



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 incluir 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**

**ESPECIFICACIONES DE UN LABORATORIO DE ALTO VOLTAJE
PARA LA EMPRESA ELÉCTRICA QUITO**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO ELÉCTRICO**

ASIPUELA HARO JUAN CARLOS

FUENTES CHUNGANDRO GILSON ALEXANDER

DIRECTOR: Ing. MIGUEL ÁNGEL LUCIO CASTRO, MSc.

CODIRECTOR: Ing. CARLOS FABIÁN GALLARDO QUINGATUÑA, PhD.

Quito, Abril 2020

AVAL

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Juan Carlos Asipuela Haro y Gilson Alexander Fuentes Chungandro, bajo nuestra supervisión.

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

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

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, Juan Carlos Asipuela Haro y Gilson Alexander Fuentes Chungandro declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

JUAN CARLOS ASIPUELA HARO

GILSON ALEXANDER FUENTES
CHUNGANDRO

DEDICATORIA

A Dios

Por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mi Madre

Rosa Haro por ser el pilar más importante y por demostrarme siempre su cariño y su apoyo incondicional durante todos aquellos momentos difíciles de mi vida.

A mi Padre

Carlos Asipuela por haberme inspirado a seguir el camino profesional y brindarme su apoyo a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida.

A mi Esposa e Hija

Paola González y mi princesa Lissoloth por ser parte fundamental de mi vida, brindarme su amor y apoyo incondicional durante todas las etapas de mi vida.

Juan Carlos

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme llegar a culminar este proyecto fruto del esfuerzo y dedicación la cual se la dedico a todos mis seres queridos.

A mis padres Rosa y Carlos, gracias por brindarme su apoyo incondicional, sacrificio y cariño, a formarme como una persona responsable y a enseñarme a no desmayar hasta lograr alcanzar la meta deseada.

A mi esposa Paola quien supo entender todo el esfuerzo y sacrificio que este trabajo conlleva y quien me brindó todo su apoyo y amor para la culminación del mismo. Gracias mi amor.

A mi hija Lissoteth, la princesa de mi vida quien siempre supo llenarme de amor y alegrías en todo momento. Gracias princesa.

A mis hermanas, tíos, abuelos y suegros, gracias por estar pendiente de mi persona y de la culminación de esta etapa de mi vida profesional. Muchas gracias

A la persona que hizo posible la elaboración de este documento; Ing. Juan Ramírez. Gracias por su ayuda y sus conocimientos.

Al grupo de ingenieros del Laboratorio de Transformadores de la EEQ; Lenin Quisaguano, Carlos Tupiza. Gracias por su tiempo, su enseñanza y sus conocimientos.

Juan Carlos

DEDICATORIA

A Dios

Por haberme dado fuerzas para culminar este proceso de aprendizaje.

A mis padres

Mi madre Patricia Chungandro y mi padre Hernán Fuentes por todo el cariño y apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida.

A mi hermano

Por los consejos y ayuda.

Alexander Fuentes

AGRADECIMIENTO

A Dios porque me dio fortaleza para poder culminar con este trabajo, y por permitirme tener vivos a mis seres queridos.

A mis padres Patricia y Hernán por el apoyo incondicional, por todo el amor que me han dado siempre, y por enseñarme que con trabajo y dedicación cualquier objetivo se puede lograr.

A mi hermano que me ha brindado su apoyo y consejos, por instalar juegos en nuestro ordenador con los cuales siempre nos divertíamos desde épocas de colegio.

A mis abuelos porque siempre me ha demostrado su amor y cariño.

A mis tías Janeth, Carmen y Amanda porque han estado presentes en los momentos más difíciles.

Al Ing. Juan Ramírez, por todo el apoyo brindado para poder llevar a cabo este trabajo de titulación.

Al laboratorio de transformadores de la EEQ, en especial al Ing. Lenin Quisaguano y al Ing. Carlos Tupiza, muchas gracias por toda la ayuda.

Alexander Fuentes

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTO	VI
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VII
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT.....	XII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS	1
1.2 ALCANCE	2
1.3 MARCO TEÓRICO	2
1.3.1 TIPOS DE LABORATORIOS DE ALTO VOLTAJE	2
1.3.2 ENSAYOS DE AISLAMIENTO	5
1.3.2.1 Pruebas Hi-pot	6
1.3.2.2 Prueba VLF	6
1.3.2.3 Prueba de alto voltaje AC	6
1.3.2.4 Prueba de voltaje de impulso.....	6
1.3.2.5 Prueba tangente delta	8
1.3.2.6 Descargas parciales	9
1.3.2.7 Resistencia de aislamiento	9
1.3.3 ENSAYOS EN TRANSFORMADORES.....	10
1.3.4 EQUIPOS E INSTRUMENTOS PRINCIPALES DE UN LABORATORIO DE ALTO VOLTAJE	11
1.3.4.1 Sistema de generación de alto voltaje alterno tipo resonante	11
1.3.4.2 Sistema de generación de alto voltaje alterno tipo transformador	14
1.3.4.3 Sistema de generación de alto voltaje continuo	17
1.3.4.4 Sistema de voltaje de impulso	19
1.3.4.5 Sistema de corriente de impulso	23
1.3.4.6 Sistema de prueba de transformadores	25
1.3.4.7 Equipos e instrumentos complementarios	27
1.3.5 PARÁMETROS REQUERIDOS PARA EL LABORATORIO DE ALTO VOLTAJE DE LA EEQ 29	
1.3.5.1 Voltaje requerido	29
1.3.5.2 Potencia Requerida a Frecuencia Industrial FI.....	32

1.3.5.3	Requerimientos de espacio físico.....	33
1.3.6	ESTUDIO ECONÓMICO.....	35
1.3.6.1	Proyecto de inversión.....	35
3.3.2.3.1	Valor actual neto VAN.	36
3.3.2.3.2	Tasa interna de retorno TIR.....	37
3.3.2.3.3	WACC.....	37
3.3.2.3.4	Costo Beneficio.....	39
2.	METODOLOGÍA.....	40
2.1.	LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN.....	40
2.2.	ADAPTACIÓN DE NORMAS.....	42
2.3.	REQUERIMIENTOS DE ESPACIO FÍSICO.....	43
2.4.	ANÁLISIS ECONÓMICO.....	43
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	44
3.1.	LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN.....	44
3.2.	EQUIPOS E INSTRUMENTOS OFERTADOS.....	59
3.2.1	OPCIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ALTO VOLTAJE ALTERNO TIPO RESONANTE.....	59
3.2.2	OPCIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ALTO VOLTAJE ALTERNO TIPO TRANSFORMADOR.....	66
3.2.3	OPCIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ALTO VOLTAJE CONTINUO.....	68
3.2.4	OPCIÓN DEL SISTEMA DE IMPULSOS DE VOLTAJE.....	69
3.2.5	OPCIÓN DEL SISTEMA DE IMPULSOS DE CORRIENTE.....	75
3.2.6	OPCIÓN DEL SISTEMA DE PRUEBA DE TRANSFORMADORES.....	76
3.3.	ADAPTACIÓN DE NORMAS.....	80
3.3.1	ENSAYO EN TRANSFORMADORES.....	80
3.3.1.1	Ensayo de voltaje inducido.....	80
3.3.1.2	Ensayo de voltaje aplicado.....	81
3.3.1.3	Ensayo de voltaje de impulso tipo maniobra.....	86
3.3.1.4	Ensayo de voltaje de impulso tipo rayo.....	86
3.3.1.5	Ensayo de relación de transformación.....	88
3.3.1.6	Ensayo de factor de potencia.....	89
3.3.2	ENSAYO DE INTERRUPTORES DE POTENCIA.....	89
3.3.2.1	Ensayo de voltaje sostenido.....	89
3.3.2.2	Ensayo de voltaje soportado por impulso tipo rayo en seco.....	90
3.3.2.3	Ensayo a frecuencia industrial e impulso tipo rayo con apertura de voltaje sostenido.....	92
3.3.2.3.1	Requisitos para realizar los ensayos.....	93
3.3.2.4	Ensayo de corriente pico y corriente simétrica de corta duración.....	94
3.3.2.5	Prueba de corriente de falla.....	95

3.3.2.6	Prueba de tiempo de apertura y cierre	95
3.3.2.7	Prueba de resistencia de contacto	96
3.3.3	ENSAYO DE APARTARRAYOS	98
3.3.3.1	Ensayo de compartición de corriente	98
3.3.3.3.1	Mediciones de corriente	99
3.3.3.3.2	Mediciones de voltaje	99
3.3.3.2	Ensayo de voltaje de descarga	100
3.3.3.3	Ensayo de descarga parcial	100
3.3.3.4	Ensayo a frecuencia industrial	100
3.3.4	ENSAYOS EN AISLADORES	101
3.3.4.1	Ensayo de baja frecuencia de flashover en seco	101
3.3.4.2	Ensayo de baja frecuencia de flashover en húmedo	101
3.3.4.3	Ensayo de impulso de flashover	102
3.3.4.4	Ensayo de resistencia a impulso de flashover	103
3.3.5	ENSAYOS EN CELDAS DE MANIOBRA	103
3.3.5.1	Ensayo dieléctrico en el circuito principal	103
3.3.5.2	Ensayo dieléctrico en circuitos auxiliares y de control	107
3.3.5.3	Medición de la resistencia del circuito principal	108
3.3.6	ENSAYOS EN FUSIBLES, SECCIONADOR PORTAFUSIBLE U OTROS DISPOSITIVOS EQUIPADOS CON UNA CUCHILLA O ESLABÓN DE MANIOBRA	108
3.3.6.1	Ensayo de voltaje aplicado a frecuencia industrial en seco	108
3.3.6.2	Ensayo de voltaje aplicado a frecuencia industrial en húmedo	109
3.3.6.3	Ensayo de voltaje aplicado a frecuencia industrial bajo rocío de agua para dispositivos de interior.	109
3.3.6.4	Ensayo de resistencia al voltaje de impulso tipo descarga atmosférica	109
3.3.6.5	Ensayo de resistencia de contacto	110
3.3.7	ENSAYOS EN TRANSFORMADORES DE MEDICIÓN	111
3.3.7.1	Ensayo de voltaje aplicado	111
3.3.7.2	Ensayo de voltaje inducido	111
3.3.7.3	Ensayo de descargas parciales	112
3.3.7.4	Prueba en Transformadores de corriente	113
3.3.7.5	Pruebas en Transformadores de potencial	114
3.3.8	ENSAYOS EN CABLES	115
3.3.8.1	Ensayo HVDC	115
3.3.8.2	Ensayo de AC de muy baja frecuencia (VLF)	118
3.3.8.2.1	Ensayo general de voltaje soportado AC VLF	118
3.3.8.2.2	Ensayo de voltaje soportado VLF AC con formas de onda coseno - impulsos rectangulares/bipolares.	120
3.3.8.2.3	Ensayo de voltaje alterna VLF con forma de onda sinusoidal	120

3.3.8.3	Ensayo de resistencia eléctrica	121
3.3.8.4	Ensayo de descargas parciales	121
3.3.8.5	Ensayo de voltaje	121
3.3.9	ENSAYOS EN RECONECTADORES	122
3.3.10	ENSAYOS EN ACEITES DIELECTRICOS	123
3.3.10.1	Pruebas eléctricas	123
3.3.10.1.1	Voltaje de ruptura	123
3.3.10.1.2	Factor de disipación	125
3.3.10.2	Pruebas Físico Químicas	125
3.3.10.2.1	Contenido de Gases	125
3.3.10.2.2	Contenido de Sulfuro Corrosivo	126
3.3.10.2.3	Acidez	126
3.3.10.2.4	Contenido de agua	126
3.3.10.2.5	Tensión Interfacial	127
3.3.10.2.6	Examen Visual	127
3.3.10.2.7	Contenido de inhibidores de oxidación	127
3.3.10.2.8	Bifelinos Policlorados	127
3.3.11	ENSAYOS EN EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL	129
3.3.11.1	Ensayo de guantes y mangas	129
3.3.11.2	Ensayo en mantas	130
3.3.11.3	Ensayo en cobertores	131
3.3.11.4	Ensayo en pértigas	131
3.3.11.5	Ensayo en protectores dieléctricos de cabeza	132
3.3.11.6	Ensayo en calzado	133
3.3.11.7	Ensayo en canastillas	134
3.4.	DISTANCIAS DE SEGURIDAD	141
3.5.	ANÁLISIS ECONÓMICO	147
3.5.1	COSTOS LIGADOS A LA OPERACIÓN, CONSTRUCCIÓN Y ADQUISICIÓN DE EQUIPO PARA EL LABORATORIO	147
3.5.2	OFERTA DE LOS ENSAYOS QUE OFRECERÁ EL LABORATORIO	155
3.5.3	DEMANDA DE LOS ENSAYOS QUE SE LLEVARÁN A CABO EN EL LABORATORIO	157
3.5.4	ESTIMACIÓN DE INGRESOS	161
3.5.5	CÁLCULO DE INDICADORES ECONÓMICOS	167
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	171
5.1.	CONCLUSIONES	171
5.2.	RECOMENDACIONES	173
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	175
	ANEXOS	179

RESUMEN

El presente documento analiza la factibilidad para la construcción de un laboratorio de alto voltaje para la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) que estaría en capacidad de realizar ensayos en elementos de la red eléctrica de hasta 138 kV, siendo éste el primer laboratorio de su tipo en el Ecuador.

En primer lugar se debe determinar los equipos y elementos con los que cuenta la EEQ con el fin de conocer las necesidades de la empresa y definir la capacidad del laboratorio. Una vez se conocen los equipos a los cuales se va a ensayar, se deben especificar las características de los equipos que llevan a cabo dichos ensayos, recordando que la ciudad de Quito cuenta con características de presión y altura diferentes de las condiciones normales, por lo que se deben aplicar diversos factores de corrección.

Para justificar la compra de los equipos de prueba de alto voltaje es necesario conocer las pruebas que se llevarán a cabo con los mismos, por ende una breve guía respecto de cómo llevar a cabo diferentes ensayos dieléctricos se verá también en este documento.

El cálculo de distancias de seguridad con el fin de garantizar un correcto funcionamiento de los equipos de alto voltaje es también considerado en este documento.

Por último se presenta una propuesta económica que justifica la ejecución de éste proyecto, en la cual se tienen en cuenta los diversos costos que implican la construcción del laboratorio, así como una estimación de ingresos que se obtendrán por el préstamo de servicios

PALABRAS CLAVE: alto voltaje, ensayos dieléctricos, laboratorio de ensayos, normativas eléctricas, especificaciones técnicas de equipos de alto voltaje.

ABSTRACT

This document analyses the feasibility of building a high voltage laboratory for Empresa Eléctrica Quito (EEQ) that would be capable of carrying out tests on elements of the electricity network up to 138 kV, this being the first laboratory of its kind in Ecuador.

First, the equipment and elements available to the EEQ must be determined in order to understand the needs of the company and define the capacity of the laboratory. Once the equipment to be tested is known, the characteristics of the equipment that carries out these tests must be specified, remembering that the city of Quito has pressure and height characteristics that are different from normal conditions, so various correction factors must be applied.

In order to justify the purchase of high voltage test equipment, it is necessary to know the tests that will be carried out with them. Therefore, a brief guide on how to carry out different dielectric tests will also be included in this document.

The calculation of safety distances in order to guarantee the correct operation of high voltage equipment is also considered in this document.

Finally, an economic proposal is presented to justify the execution of this project, in which the various costs involved in the construction of the laboratory are taken into account, as well as an estimate of the income that will be obtained from the loan of services.

KEYWORDS: high voltage, dielectric tests, testing laboratory, electrical regulations, technical specifications of high voltage equipment.

1. INTRODUCCIÓN

La Empresa Eléctrica Quito (EEQ) en la actualidad está en capacidad de realizar ensayos sobre una pequeña cantidad de elementos que compone el sistema eléctrico, dentro de ello se incluye también la carencia de ensayos, casi en su totalidad, sobre los Equipos de Protección Personal (EPP), es por tal motivo que se busca en base a un proyecto y las correspondientes contrataciones públicas construir un Laboratorio de Alto Voltaje se podría decir casi sofisticado ya que contará con todos los equipos y elementos capaces de realizar ensayos eléctricos sobre los elementos del sistema.

Por otro lado, su funcionalidad generará recursos económicos y de investigación los cuales permitirán crecer al laboratorio internamente así como proporcionar los servicios al medio externo.

En esta sección se detallan los antecedentes, razones y objetivos esenciales para la construcción del nuevo laboratorio de alto voltaje.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo general de este proyecto consiste en:

- Elaborar las especificaciones técnicas para la implementación de un Laboratorio de Alto Voltaje para la Empresa Eléctrica Quito hasta un nivel de 138 kV.
- Los objetivos específicos de este proyecto son:
- Realizar el levantamiento concerniente a las características técnicas de los elementos que se utilizan para la construcción de la red eléctrica.
- Recopilar las normativas nacionales e internacionales aplicables a la realización de ensayos dieléctricos a los diferentes elementos de la red que constituyen la red eléctrica de distribución hasta 138 kV.
- Sintetizar los ensayos, procedimientos y criterios aplicables basados en la normativa recopilada que se utilizarán en el laboratorio de alto voltaje.
- Especificar los equipamientos de alto voltaje e infraestructura necesarios para las diferentes pruebas dieléctricas de los elementos de la red eléctrica de la Empresa Eléctrica Quito hasta un nivel de 138 kV.
- Elaborar la propuesta económica para la implementación de este laboratorio.

1.2 ALCANCE

En este proyecto se realizarán visitas al laboratorio de transformadores y a todas las bodegas de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) con el fin de recopilar las características técnicas de todos los elementos de la red de distribución.

Se recopilaron las normas que rigen los ensayos de todos los elementos levantados del laboratorio y de las bodegas de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ).

Se entendió cómo se aplica cada ensayo a cada diferente elemento levantado durante la visita, con el fin de determinar cuáles ensayos se pueden realizar en el laboratorio actual de transformadores y cuáles no se pueden realizar, y para los ensayos que no se puedan realizar en el laboratorio se realiza la especificación del equipamiento necesario para realizar el ensayo, la normativa aplicable, los pasos y procedimientos para ejecutar los ensayos.

Con la recopilación de toda esta información se puede proceder a la elaboración de las especificaciones técnicas del equipamiento y de la infraestructura de un laboratorio de alto voltaje que cubra todos los ensayos de los elementos de la red eléctrica de distribución hasta un nivel de 138 [kV] aplicables en el Ecuador con su respectiva propuesta económica.

El alcance de este proyecto requirió el trabajo de campo, debido a que demandó la visita a todas las bodegas de la Empresa Eléctrica Quito, luego una amplia recopilación de equipos, normas y finalmente elaborar una propuesta económica.

1.3 MARCO TEÓRICO

1.3.1 TIPOS DE LABORATORIOS DE ALTO VOLTAJE

Los laboratorios de alto voltaje son ampliamente utilizados en diversas ramas de estudio, entre ellas: llevar a cabo pruebas en equipos eléctricos, en trabajos de investigación y desarrollo de nuevos equipos. Adicionalmente en ellos es posible determinar el factor de seguridad para los dieléctricos y los estudios de confiabilidad bajo diferentes condiciones atmosféricas tales como: lluvia, niebla, contaminación industrial, etc., a un voltaje superior al voltaje de prueba requerido. Por lo general los laboratorios de alto voltaje implican un costo muy grande, es por esta razón que tanto la planificación como el diseño deben realizarse con mucho cautela de tal manera que al seleccionar los equipos de prueba la

inversión no sea demasiado alta de tal modo que el laboratorio sea económicamente viable. [1]

Solo las mejores universidades del mundo que ofrecen la especialidad de ingeniería eléctrica poseen laboratorios de Alto Voltaje, destacándose cada laboratorio por su aplicación y capacidad de generación.

Dependiendo de su propósito los laboratorios de alto voltaje se clasifican en:

- a. Laboratorios pequeños.- estos laboratorios poseen generación D.C. y A.C. de baja potencia generalmente menores a 10 kW/10kVA con un equipo generador de impulsos de alrededor de 10 kJ o menos. Los niveles de voltajes en A.C. que se manejan están entre los 300 kV en etapas simples y 600 kV en conexión en cascada. El equipo generador de voltaje D.C. suelen llegar hasta 400 kV y el voltaje de impulso menor a 100 kV. [1]
- b. Laboratorios medianos-industriales.- la función principal de estos tipos de laboratorios es la de realizar las pruebas de rutina en la mayoría de equipos. Ocupan grandes espacios ya que son proyectados al incremento de su tamaño en el futuro, cuenta con sistemas de transporte, manejo de equipos pesados como grúas, entre otros. Los niveles de voltajes con el que trabaja se encuentran alrededor de los 200 a 600 kV en A.C. pero los niveles de potencia son mucho mayores, están entre 100 y 1000 kVA, los generadores de impulsos suelen tener rango de energías entre 20 a 100 kJ o más. [1]
- c. Laboratorios de gran tamaño.- Este tipo de laboratorios se dedican tanto a la realización de pruebas sobre equipos industriales así como al desarrollo de la investigación. Son capaces de realizar pruebas de voltaje sostenido en seco y húmedo, pruebas de impulsos, pruebas de voltaje sostenido D.C., pruebas bajo condición de contaminación, pruebas de descargas parciales PD y radio interferencia de voltaje RIV. [1]

En el campo de la investigación permite desarrollar actividades como: estudiar fenómenos en medios aislantes como gases, líquidos, sólidos o sistemas compuestos; estudios de voltajes sostenidos o disrupciones largas en equipos, estudios de interferencia debido a las descargas producidas en equipos que operan con alto voltaje, estudios de

coordinación de aislamiento en alto voltaje y fenómenos de alta corriente como arcos eléctricos y plasmas. [2]

Generalmente son muy grandes y costosos con más de una sala de pruebas de alto voltaje, cámaras de prueba bajo contaminación, áreas al aire libre con equipos de gran potencia, líneas de transmisión y torres, cuartos con condiciones atmosféricas controladas, facilidades computacionales, salas de conferencias, biblioteca, oficinas, provisiones para pruebas prolongadas y nocturnas. [2]

En el Ecuador no existe un laboratorio de alto voltaje capaz de llevar a cabo pruebas a todos los elementos de la red eléctrica, las universidades como la Escuela Politécnica Nacional y Universidad Politécnica Salesiana cuentan con laboratorios de alto voltaje que son utilizados para fines académicos. [2]

En el caso de la Escuela Politécnica Nacional, esta cuenta con un laboratorio de las siguientes características como lo indica la Figura 1.1, mismo que se encuentra en funcionamiento desde el año 1966, en la facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, en ésta instalación se puede generar y medir altos voltajes alternos, continuos y de impulso tipo descarga atmosférica, para la generación de estos voltajes el laboratorio cuenta con las siguientes características: [2]

- Para la generación de alto voltaje alterno: Un transformador de elevación con tap central, en la primera etapa cuenta con un voltaje de salida de 50 kV y una potencia de 2,5 kVA, en la segunda etapa un voltaje de 100 kV y una potencia de 5 kVA. [2]
- Para la generación de alto voltaje continuo: Haciendo uso de diodos y capacitores en el laboratorio se puede obtener un voltaje de 130 kV para la primera etapa y de 260 kV para la segunda etapa. [2]
- Para la generación de alto voltaje de impulso: Se pueden generar impulsos normalizados de tipo descarga atmosférica 1,2/50 us, así pues para la primera etapa se tiene un voltaje de 130 kV y para la segunda etapa un valor de 260 kV. [2]



Figura 1.1. Imagen frontal del laboratorio de Alto Voltaje de la EPN. Fuente: Autores del documento.

Los elementos y equipos que se prevén ser ensayados en el laboratorio de alto voltaje de la EEQ manejan un voltaje hasta los 138 kV, en tal sentido, este nuevo laboratorio contará con todos los requerimientos que el equipo solicite, tanto en instrumentación como en espacio, el cual será definido en los siguientes capítulos.

1.3.2 ENSAYOS DE AISLAMIENTO

El aislamiento eléctrico es uno de los componentes más importantes que conforma la estructura de un equipo, éste se conforma de materiales que presentan una fuerte resistencia eléctrica con el objetivo de limitar al máximo la circulación de corrientes fuera del material conductor.

La calidad del aislamiento se ve disminuida con el paso del tiempo por las exigencias a las cuales los equipos son sometidos. Es por ello que para verificar el estado del mismo los equipos son sometidos a diferentes pruebas las cuales se describen en los apartados siguientes.

1.3.2.1 Pruebas Hi-pot

La prueba de Hi-Pot DC está destinada a determinar la rigidez dieléctrica de un material aislante. La rigidez dieléctrica de un material aislante es el máximo gradiente de potencial que un material puede soportar sin que exista perforación o canales de conducción en el mismo. [3]

Los equipos para ejecutar la prueba de Hi-Pot DC deben tener la capacidad de variar el voltaje continuamente, desde cero hasta el valor requerido, midiendo la corriente que circula por el aislamiento. Si hay demasiada corriente, significa que el material no está bien aislado y falla en la prueba. [3]

1.3.2.2 Prueba VLF

La prueba de muy baja frecuencia o VLF por sus siglas en inglés consiste en la aplicación de una señal sinusoidal, cuya frecuencia va de entre 0,01 Hz hasta 0,1 Hz, con el objetivo de evaluar la calidad del aislamiento, esta prueba es especialmente útil para probar cables. Durante la prueba, los cables son sometidos a un voltaje de prueba significativamente mayor al voltaje normal de funcionamiento. La aplicación de un voltaje de prueba mayor al voltaje normal de operación permite que los puntos débiles o áreas pre-dañadas a lo largo del cable se rompan durante la prueba, en lugar de romperse durante su funcionamiento. [4]

Básicamente la prueba VLF es una prueba destructiva, es decir pasa o no pasa. [4]

1.3.2.3 Prueba de alto voltaje AC

Son pruebas a frecuencia industrial que se realizan con voltajes superiores a los de operación normal por un tiempo relativamente corto, alrededor de un minuto. El nivel de voltaje de prueba utilizado es incrementado hasta un punto específico, indicado por las normas correspondientes. Generalmente estos valores se encuentran alrededor del 125% y el 150% del voltaje nominal de operación por un período de 1 minuto. [5]

1.3.2.4 Prueba de voltaje de impulso

En los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica existen perturbaciones causadas por dos tipos de voltajes transitorios cuyas magnitudes sobrepasan en gran medida los valores pico de los voltajes nominales del sistema. [6]

El primer tipo son los sobre voltajes atmosféricos o tipo rayo los cuales se originan cuando los rayos golpean los conductores de fase de las líneas aéreas o bien los cables de

guarda de las líneas de transmisión. Estas amplitudes se encuentran en el orden de los 1000 kV o mayores con inyecciones de corriente de hasta 100 kA o más en líneas de transmisión. [6]

El segundo tipo son ocasionados por maniobras realizadas o fallas ocurridas dentro de un determinado sistema. Las amplitudes están relacionadas con el voltaje utilizado y su forma de onda cambia dependiendo de las impedancias del sistema, así como por las condiciones de maniobra. [6]

Estos dos tipos de sobre voltajes causan colapsos en equipos debido a las grandes magnitudes que pueden alcanzar, por ello un laboratorio de alto voltaje debe contar dentro de sus instalaciones con generadores de voltajes de impulso que sean capaces de generar estos dos tipos de sobre voltajes. [6]

La prueba de voltaje de impulso se encarga de probar al equipo frente a dos tipos de ondas: voltaje de impulso por descarga atmosférica que se produce debido al impacto de rayos en la red eléctrica y voltaje de impulso de maniobra, este tipo de sobre voltajes aparecen debido a la operación de elementos tales como interruptores o fallas. Este tipo de ondas se caracteriza por tener un frente de onda de corta duración en el orden de los microsegundos, que decrecen lentamente hasta llegar a cero. [7]

En la Figura 1.2 se observa la forma de onda para una señal de tipo descarga atmosférica de acuerdo a la norma IEC 60060-1.

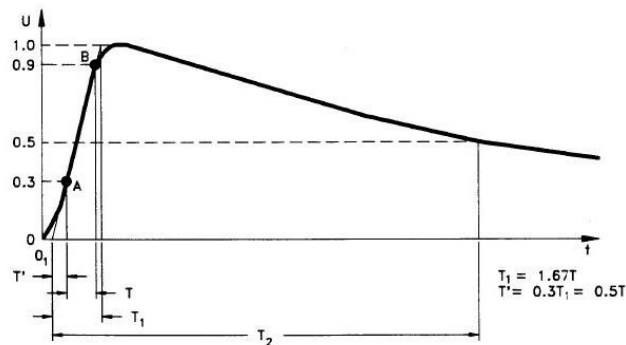


Figura 1.2. Forma de onda de voltaje de impulso de tipo descarga atmosférica de acuerdo a IEC 60060-1. $T_1 = 1,2 \mu s$, $T_2 = 50 \mu s$. [8]

En la Figura 1.3 se aprecia la forma de onda de la señal de tipo voltaje de impulso por maniobra de acuerdo a la norma IEC 60060-1.

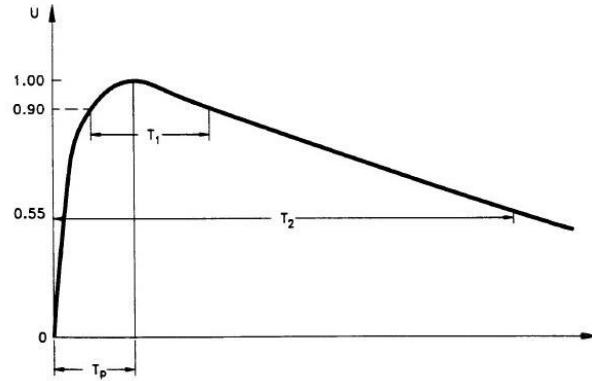


Figura 1.3. Forma de onda de voltaje de impulso de maniobra de acuerdo a IEC 60060-1. $T_p= 250 \mu s$, $T_2= 2500 \mu s$. [8]

1.3.2.5 Prueba tangente delta

La prueba de tangente delta es un parámetro importante cuando se analiza el estado del sistema de aislamiento de un equipo, ya que con él se determinan las pérdidas dieléctricas que se producen en el volumen de los materiales aislantes. [9]

El sistema de aislamiento de un elemento puede ser representado como un arreglo capacitivo-resistivo, tal y como se aprecia en la Figura 1.4.

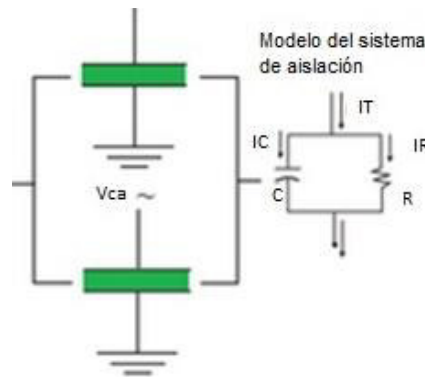


Figura 1.4. Modelado de un sistema de aislamiento. [9]

Cuando un aislante es sometido a un voltaje AC, aparece una corriente que puede ser descompuesta en dos componentes: una corriente capacitiva (I_c), y una corriente resistiva (I_r) debido a la conductancia transversal, dado que la corriente total no se encuentra en cuadratura respecto al voltaje, se genera un ángulo delta como se aprecia en la Figura 1.5. [9]

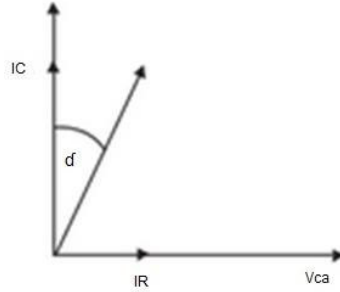


Figura 1.5. Componentes de corriente en una prueba de aislamiento en AC. [9]

Este ángulo delta se genera debido a las pérdidas de polarización y conducción en el aislamiento, la tangente delta se determina mediante la Ecuación 1.1.

$$\tan(\delta) = \frac{I_r}{I_c} \quad (1.1)$$

El motivo por el cual se usa la función tangente, se debe principalmente porque la tangente crece si el ángulo crece, lo que nos permite determinar de manera más directa la condición del aislamiento (aislamiento ideal $\delta=0 \rightarrow I_R=0$). [9]

1.3.2.6 Descargas parciales

El término descarga parcial (PD) se traduce en una ruptura dieléctrica producida en una pequeña región de un elemento sólido o líquido del aislamiento eléctrico.

Una descarga parcial puede llegar a dañar el material aislante debido a la erosión que ésta causa. [5]

Una medición de descargas parciales es una herramienta cuyo propósito es el de determinar las condiciones del aislamiento de un material que ha sido expuesto a grandes esfuerzos dieléctricos, se considera a este tipo de pruebas como destructivas. [10]

1.3.2.7 Resistencia de aislamiento

El valor de la resistencia de aislamiento será determinado por el voltaje aplicado y la corriente resultante.

El método de prueba más común para medir la resistencia de aislamiento es el de la medición directa con el instrumento de medición megohómetro. [11]

No hay una cifra exacta que nos permita determinar si una lectura de una resistencia de aislamiento es buena o mala, sin embargo una buena guía es la de considerar 1 MΩ por cada 1 kV de prueba aplicados como una cifra mínima. [11]

1.3.3 ENSAYOS EN TRANSFORMADORES

Dado que los transformadores son uno de los equipos más importantes dentro del sistema eléctrico, la Tabla 1.1 detalla las pruebas más comunes que se llevan a cabo sobre los mismos.

Tabla 1.1. Pruebas típicas realizadas sobre transformadores [12] [13]

Ensayo	Detalle de la prueba
Voltaje inducido	<p>La prueba se lleva a cabo con el doble del voltaje nominal del equipo bajo prueba, la duración de la misma se especifica en la norma IEC 60076-3 del año 2013 y en la norma IEEE Std C57.12.00-2015.</p> <p>El objetivo de la prueba es el de comprobar si el aislamiento entre espiras, capas y secciones de los devanados es óptimo para el transformador.</p>
Voltaje aplicado	<p>El objetivo de esta prueba es el de verificar que la calidad del dieléctrico de los devanados y aislamientos del transformador sea capaz de resistir los esfuerzos eléctricos a los cuales es sometido.</p> <p>La norma IEC 60076-3 del año 2013 especifica el procedimiento para llevar a cabo la prueba, mientras que en la norma IEEE Std C57.12.00-2015 especifica los niveles de voltaje de prueba.</p>
Voltaje de impulso	<p>Voltaje de impulso tipo rayo: Esta prueba se lleva a cabo con el fin de determinar el comportamiento del transformador frente a una descarga de tipo atmosférica y detectar cualquier comportamiento anormal.</p> <p>Las formas de onda, así como el proceso de la prueba se encuentran especificados en la norma IEC 60076-3 del año 2013, al igual que en la norma IEEE C57.12.90-2010.</p>
	<p>Impulso por maniobra: La prueba tiene por objetivo determinar el comportamiento del transformador frente a fallas o interrupciones eléctricas y detectar cualquier comportamiento anormal.</p> <p>Las formas de onda, así como el procedimiento de realización de la prueba se encuentran especificados en la norma IEEE C57.12.90-2010, al igual que en IEC 60076-3 del año 2013.</p>
Relación de transformación	<p>Esta prueba tiene por objetivo determinar que la relación de transformación entre el bobinado de alto voltaje y el bobinado de bajo voltaje el cual se debe encontrar dentro de la tolerancia de medición.</p> <p>El proceso para llevar a cabo la prueba así como los métodos que se pueden emplear para llevar a cabo la misma se encuentran especificados en la norma IEEE C57.12.90-2010.</p>

Resistencia de aislamiento	<p>La prueba tiene por objetivo verificar que el aislamiento del transformador cumpla con la resistencia mínima soportable bajo la operación a la cual el equipo será sometido.</p> <p>El procedimiento de la prueba se encuentra especificado en la norma IEEE C57.12.90-2010.</p>
Pérdidas sin carga	<p>Las pérdidas sin carga incluyen pérdidas en el núcleo, pérdidas dieléctricas, pérdidas en conductores de los devanados debido a corrientes de excitación, pérdidas en los conductores debido a corrientes circulantes de los bobinados en paralelo.</p> <p>El proceso para llevar a cabo la prueba así como los métodos que se pueden emplear para llevar a cabo la misma se encuentran especificados en la norma IEEE C57.12.90-2010.</p>
Pérdidas con carga	<p>Las pérdidas bajo carga incluyen las pérdidas debido a I^2R en los devanados debido a la corriente de carga y las pérdidas debido a las corrientes de Eddy que se inducen por los flujos de carga en devanados, chapas del núcleo y paredes del tanque.</p> <p>El proceso para llevar a cabo la prueba así como los métodos que se deben emplear para llevar a cabo la misma se encuentran especificados en la norma IEEE C57.12.90-2010.</p>

1.3.4 EQUIPOS E INSTRUMENTOS PRINCIPALES DE UN LABORATORIO DE ALTO VOLTAJE

En esta sección se hace referencia a los equipos que se consideran de mayor relevancia para la implementación de un laboratorio de alto voltaje, ya que éstos nos permiten generar los voltajes de prueba, corrientes e impulsos según las normas IEC y ANSI/ IEEE.

1.3.4.1 Sistema de generación de alto voltaje alterno tipo resonante

Este sistema de generación de voltajes alternos consta dentro de su construcción de circuitos resonantes en serie. Estos circuitos sintonizados surgen como una medida para superar la resonancia accidental no deseada a la que los conjuntos de pruebas están expuestas. [6]

En los transformadores de prueba cuando se prueban cables, la carga capacitiva de éstos puede llegar a causar resonancia en el orden de unas 20 veces el voltaje de prueba aplicado, pudiendo generar explosiones tanto en el cable como en el transformador de prueba. [6]

En los sistemas de generación de alto voltaje resonantes se controla la resonancia mediante la frecuencia fundamental logrando con esto desaparecer formas de resonancia no deseadas. La Figura 1.6 indica los circuitos equivalentes utilizados para la construcción

de los sistemas de generación de alto voltaje resonantes. En cada circuito, la capacitancia C_t representa la capacitancia de los objetos de prueba. El transformador de alimentación que se aprecia en las Figuras 1.6a, 1.6b, 1.6c, se encarga única y exclusivamente de compensar las pérdidas en el circuito, en la Figura 1.6a el inductor variable se conecta al lado de bajo voltaje del transformador elevador cuyo bobinado secundario se encarga de proveer el voltaje de prueba requerido, el inductor variable debe ser sintonizado con la reactancia capacitiva del objeto bajo prueba, sólo cuando la reactancia inductiva del inductor variable y la reactancia capacitiva del objeto bajo prueba son iguales se produce el efecto de resonancia, en este caso controlada ya que es el propio sistema el que se encarga de producirla, en la Figura 1.6b se observa un circuito en cascada, el principio de funcionamiento es el mismo, la ventaja de esta configuración es que por cada etapa adicional se pueden conseguir 300 kV extra de generación, además la ventaja de tener inductores en cascada resulta especialmente útil en el caso de tener un objeto bajo prueba con una inductancia capacitiva muy alta, en ese caso la segunda etapa del inductor variable compensará dicha falencia, la Figura 1.6c muestra un diagrama simplificado de un sistema en cascada, la Figura 1.6d muestra un circuito equivalente de todos los circuitos anteriores. [6]

Dado que el inductor es el corazón del sistema resonante, éste debe estar diseñado para altos factores de calidad, como se indica en la Ecuación 1. 2

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (1. 2)$$

Dónde:

Q = Factor de calidad.

ω = Frecuencia angular.

L = Inductancia del circuito equivalente.

R = Resistencia del circuito equivalente.

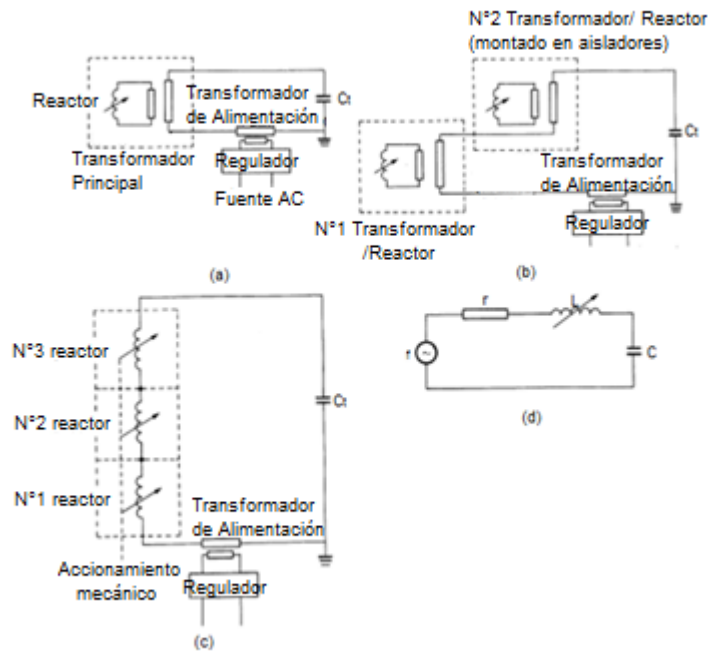


Figura 1.6. Circuito resonante en serie para transformador/reactor. [6]

(a) Transformador/reactor simple. (b) Dos o más unidades en serie. (c) Diagrama simplificado del circuito resonante en serie para unidades en serie del reactor de alto voltaje. (d) Diagrama equivalente del circuito resonante en serie. [6]

Entre las ventajas de los sistemas resonantes se mencionan las siguientes: [6]

- Debido a la eliminación de resonancias no deseadas y por la atenuación de los armónicos en la fuente de alimentación se logra mejorar la forma de onda de voltaje.
- La potencia requerida por la fuente de alimentación es inferior a la potencia del circuito de prueba principal, dependiendo del factor de calidad.
- Durante fallas en los equipos o elementos bajo prueba no se producen arcos eléctricos ya que éste se descargará inmediatamente. Esto evita que las secciones débiles de los objetos de prueba no se destruyan por completo, haciendo especial énfasis en la industria del cable donde el arco eléctrico puede producir explosiones peligrosas.

- Las operaciones tanto en serie como en paralelo de los reactores son simples y eficientes. Es posible colocar varias unidades sin que esto implique problemas de alta impedancia en grupos de transformadores de prueba en cascada.
- Los sistemas de auto sintonización pueden ser incorporados sin ningún problema para mantener la resonancia si la frecuencia de la fuente o si la capacitancia de la carga varían durante pruebas de larga duración.
- La reducción del tamaño y del peso son bastante considerables respecto a los sistemas con transformadores debido a que no requieren de reactores compensadores separados. Un sistema de transformadores puede pesar entre 10 a 20 kg/kVA mientras que un sistema resonante entre 3 a 6 kg/kVA. La Figura 1.7 muestra un sistema modular serie resonante.



Figura 1.7. Circuito resonante en serie (Laboratorio de investigación Hitachi, Suministrado por Hipotronix, Brewster, USA) [6]

1.3.4.2 Sistema de generación de alto voltaje alterno tipo transformador

Los transformadores monofásicos que operan a la misma frecuencia de la red (50 Hz o 60 Hz) son los equipos más comunes para realizar pruebas de alto voltaje AC. No existe gran diferencia entre un transformador usado para realizar pruebas y otros transformadores,

excepto que en los transformadores para ensayos deben tener una menor densidad de flujo en su núcleo para evitar altas corrientes de magnetización, esto se consigue implementando materiales de calidad en la construcción del núcleo, por ejemplo el acero de silicio. [2]

Generalmente el devanado de bajo voltaje posee valores inferiores a 1kV con devanados divididos a fin de mejorar la regulación de voltaje. Dependiendo de la aplicación pueden ser de tipo cilíndrico de caja aislante los cuales son simples de operar tanto en conexión en serie (cascada) como en conexión paralelo son también conocidos como transformadores de tipo modular, el medio de aislamiento suele ser aceite dieléctrico, y devanados aislados con papel, o de tipo tanque metálico, estos son muy compactos y el tanque metálico se encuentra conectado a tierra permitiendo que el sistema de prueba se pueda configurar cerca de la pared en un determinado campo de prueba, estos transformadores pueden funcionar en paralelo o en una conexión serie como una cascada de alto voltaje. La Figura 1.8 muestra un transformador de caja aislante tipo cascada. En la Figura 1.9 se aprecia un transformador tipo tanque metálico. [2] [14]



Figura 1.8. Transformador tipo cascada en caja aislante. [14]



Figura 1.9. Transformador tipo tanque metálico [14]

Dado que para este tipo de transformadores generar voltajes superiores a 100 kV es muy complicado se optan por conexiones en cascada con lo cual se logra voltajes de 300 a 500 kV haciéndolos fáciles de transportar ya que el peso se puede subdividir en unidades individuales. La Figura 1.10 indica la conexión en cascada de transformadores. Una desventaja de esta conexión es la gran carga que deben soportar los bobinados primarios durante las etapas más bajas, además de que requiere reactores de compensación para obtener mayor potencia a la salida de alto voltaje. [6]

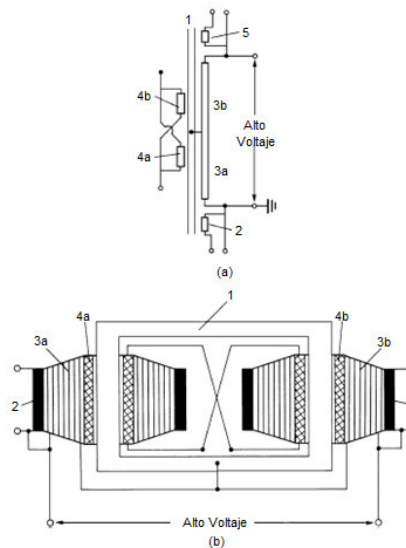


Figura 1.10. Unidad transformadora de alto voltaje que sirve para conexión en cascada: Transformador de prueba de una sola unidad con potencial de punto medio en el núcleo: Diagrama (a) y sección transversal (b). (1) Núcleo de hierro. (2) Bobinado primario. (3a y b) bobinados de alto voltaje. (4a y b) bobinados compensadores. (5) bobinado de excitación [6]

1.3.4.3 Sistema de generación de alto voltaje continuo

Los voltajes DC han sido usados principalmente para el desarrollo de la investigación científica, en ensayos de sistemas que trabajan con corriente continua y principalmente en pruebas en cables de potencia de gran longitud. [6]

Un voltaje continuo se puede obtener de dos maneras: por conversión de AC a DC y por generación electrostática. [6]

La forma más eficiente para obtener alto voltaje DC es la rectificación de corrientes alternas. [6]

El circuito básico de un rectificador de media onda se presenta en la Figura 1.11.

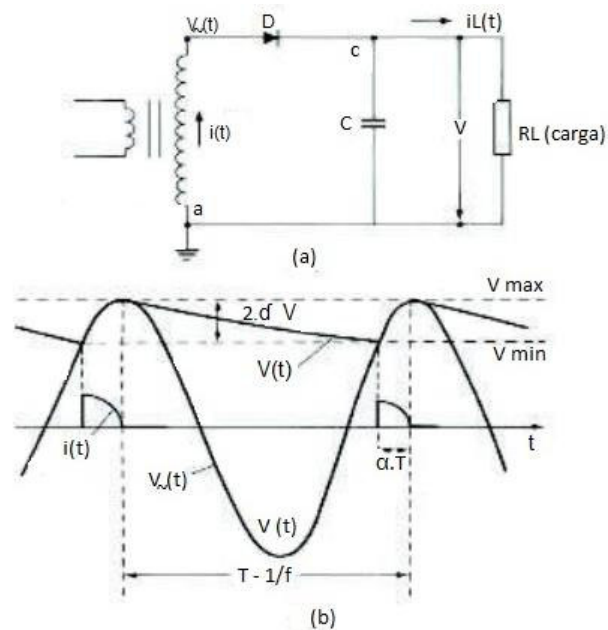


Figura 1.11. Rectificador de media onda con capacitancia de aplanamiento. (a) Circuito (b) Voltajes y corrientes en la carga RL [6]

Los rectificadores se construyen en rangos de hasta los mega-voltios lo que conlleva a una desventaja referida a que resultan sistemas de gran tamaño, muy grandes para mantener fuentes DC puras, además de las posibles saturaciones del transformador de alto voltaje. [6]

Para solucionar estos inconvenientes de saturación del transformador se utiliza un rectificador de onda completa logrando mantener la eficiencia inicial del sistema. Con la diferencia de que necesita de un transformador que tenga un devanado dividido con el

punto medio aterrizado, no obstante existen diferencias entre los voltajes de cada devanado lo que produce que no se cargue el capacitor de aplanamiento del circuito. Es por estas razones que los rectificadores de onda completa no se utilizan, siendo reemplazados por los multiplicadores de voltaje o circuitos D.C. en cascada. [6]

El principio de funcionamiento de los circuitos en cascada consiste en que en cada multiplicador los transformadores, rectificadores y capacitores soportan solo una parte del voltaje total de salida. En la Figura 1.12 se observa un ejemplo de una cascada de Cockcroft-Walton. [6]

La incorporación de cada etapa permite generar voltajes mayores facilitando la construcción debido a la adición de módulos que se conectan en función de los requerimientos. [6]

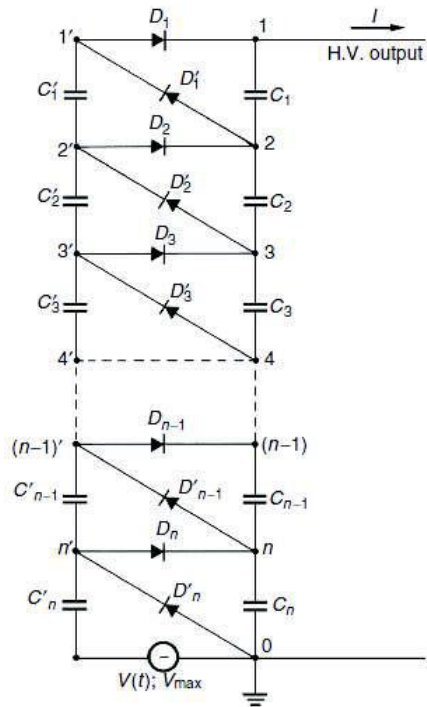


Figura 1.12. Circuito de cascada de acuerdo a Cockcroft-Walton o Greinacher. [6]

Adicionalmente existen multiplicadores de voltaje con transformadores en cascada; aquí cada etapa tiene un devanado de bajo voltaje, uno de alto voltaje y un devanado terciario de bajo voltaje que excita el devanado de voltaje del transformador. Como se observa en la Figura 1.13. [6]

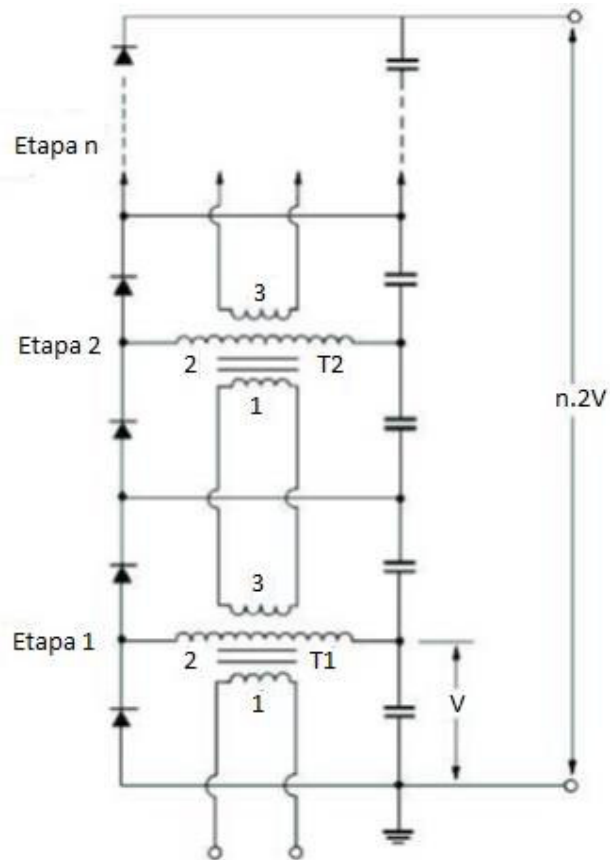


Figura 1.13. Circuito de DC con transformadores en cascada. [6]

1.3.4.4 Sistema de voltaje de impulso

La generación de voltajes de impulso se basa en la carga y descarga de circuitos los cuales almacenan energía. Su forma de onda se logra obtener por la superposición de dos funciones exponenciales. Estos generadores reflejan también una carga capacitiva la cual se constituye como energía almacenada. [6]

El circuito básico para un generador de impulso de etapa simple se presenta en la Figura 1.14.

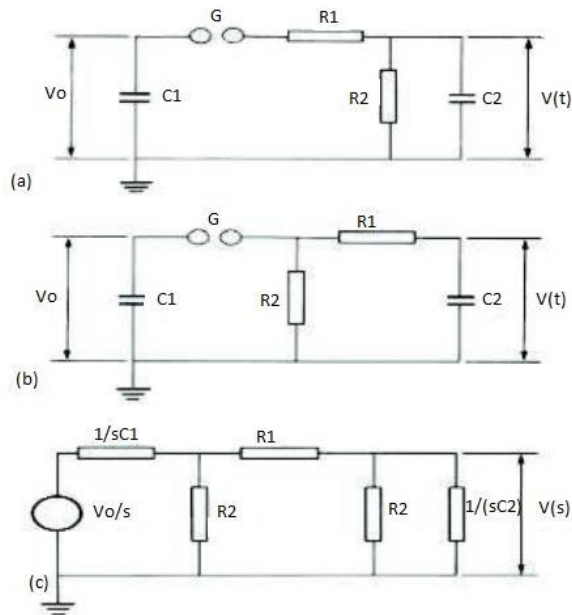


Figura 1.14. Circuitos generadores de una etapa (a) y (b). C1: capacitancia de descarga.C2: capacitancia de carga. R1: resistencia de frente o amortiguamiento. R2: Resistencia de descarga. (c) Circuito equivalente en el dominio de .s. [6]

La carga y descarga es efectuada en el capacitor C1 a través de las resistencias R1 y R2. Las esferas descargadoras G funcionan como un interruptor sensible al voltaje. Los frentes de onda y cola son variables dependiendo de los valores de R1, R2 y C2 que en conjunto forman la carga total. [6]

La energía máxima almacenada es el parámetro más significativo en generadores de impulsos y está dada por la Ecuación 1. 3

$$W = \frac{1}{2}C_1(V_{0max})^2 [J] \quad (1. 3)$$

Dónde:

W: es la energía máxima almacenada

C1: es la capacitancia del capacitor usado para la carga y descarga

V_{0max} : es el máximo voltaje o voltaje pico de la fuente del circuito [6]

Dado que los requerimientos de voltaje de impulso son cada vez mayores, los circuitos en una sola etapa no están en la capacidad de generar estos niveles de voltajes ya que existen grandes limitaciones como son: el descomunal tamaño de los elementos que

conformarían el sistema, la dificultad para suprimir el efecto corona en la estructura y conductores durante el periodo de carga.

A fin de solucionar dichos inconvenientes surge un circuito multiplicador llamado cascada de Marx usado comúnmente para obtener voltajes de impulso. Dependiendo del voltaje de carga disponible y del voltaje de salida se requiere de una serie de condensadores de impulso idénticos que se cargan en paralelo y que posteriormente se descargan en serie obteniendo así un voltaje de carga total multiplicado equivalente al número de etapas. [15]

Los circuitos multietapa tienen varias versiones, la Figura 1.15 indica un generador de Marx de 6 etapas. Los capacitores C_1 son cargados con voltajes directos en paralelo a través de las resistencias de alto valor R' así como a través de las resistencias R_2' que funcionan también como resistencias de descarga, siendo estas últimas muy pequeñas respecto a R' . Obteniendo como resultado un potencial D.C. respecto a tierra en los puntos A, B, C,..., F mientras que los puntos G, H, I,..., N se mantienen con potencial cero. La descarga del generador inicia con la esfera más baja G_1 y posteriormente se descargan G_2, G_3, \dots, G_6 . Consiguiendo así que el punto A se ponga a potencial a tierra, mientras que el capacitor C_1' ya se encuentra cargado con el potencial de la fuente $-V$, logrando que el punto H se ponga a un potencial $+V$, al producirse la descarga en las esferas G_2 el punto B toma el potencial H equivalente a $+V$, mientras el capacitor entre los puntos B-I está a un potencial $-V$ y en serie con el capacitor C_1' de la rama AH dejando al punto I con un potencial $+2V$ (2 veces V), este proceso se repite de tal manera que los capacitores se conectan en serie y los puntos que antes tenían un potencial cero van subiendo en forma de escalera, lo que quiere decir que el punto k sube a $+3V$ (3 veces V), el punto L a $+4V$ (4 veces V), el punto M a $+5V$ (5 veces V) y el punto N a $+6V$ (6 veces V) siendo este la salida de voltaje del generador. [6]

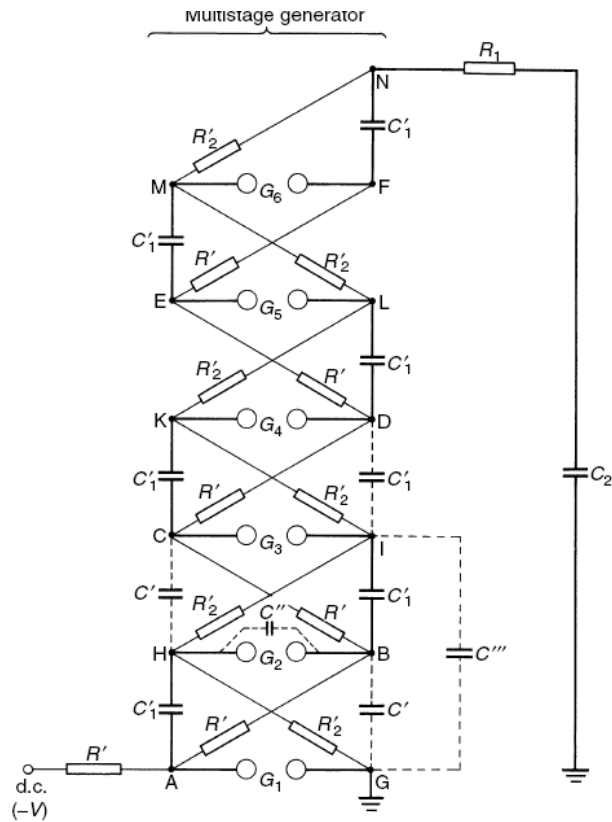


Figura 1.15. Generador de impulsos de 6 etapas, generador de Marx. [6]

La resistencia R_1 de frente de onda se ubica entre el generador y la carga, el cual debe soportar todo el voltaje del generador por un periodo de tiempo corto por lo cual esta sería dimensionada en grandes proporciones, es por esto entonces que la resistencia R_1 suele ser distribuida a través de las etapas del generador. [6]

Existen otros métodos para generar ondas de tipo impulso atmosférico que toman ventaja al utilizar transformadores de prueba logrando con esto incrementar las amplitudes de impulsos de voltaje. En la Figura 1.16 se puede apreciar un generador de impulsos básico que posteriormente es amplificado por un transformador elevador. [6]

Para incluir formas de onda tipo impulso de maniobra se lo realiza a través de inserciones de inductancias en los circuitos básicos de generación de impulsos, como se aprecia en la Figura 1.17, la resistencia R_1 ha sido remplazada por la inductancia L_1 obteniendo como resultado un circuito resonante en serie amortiguado con la ventaja de que el voltaje de salida puede llegar a ser hasta el doble de la entrada. [6]

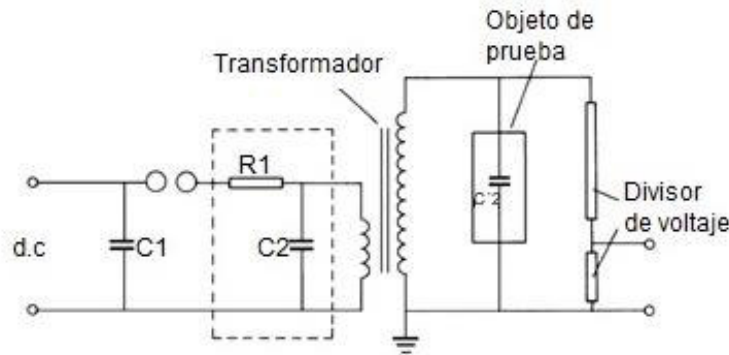


Figura 1.16. Circuito para generar impulsos de maniobra usando transformadores [6]

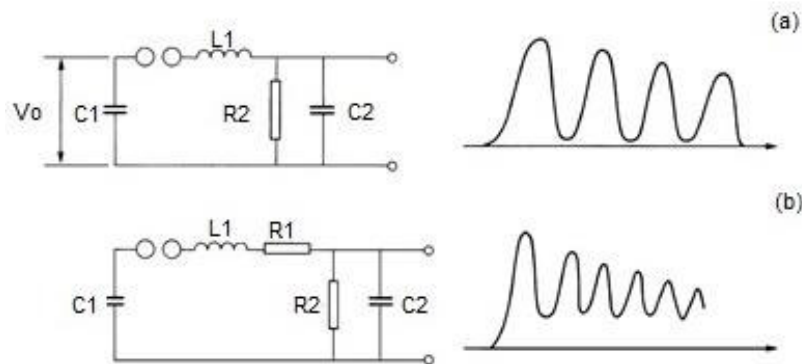


Figura 1.17. Circuitos para generación de impulsos de maniobra oscilantes [6]

1.3.4.5 Sistema de corriente de impulso

Cuando se producen perturbaciones en las líneas de transmisión ocasionados por rayos estas implican la aparición de voltajes y corrientes de impulso. Por lo cual los equipos de protección deben poder desviar los sobrevoltajes y descargar las corrientes de los rayos sin causar ningún daño, generalmente la magnitud de estas corrientes de impulso rondan los 100 kA pico. Es por esto que la generación de formas de onda de corriente de impulso encuentra un gran campo de estudio para simular dichos efectos atmosféricos. [1]

Para generar corrientes de impulso de gran magnitud se debe cargar un banco de capacitores, los capacitores del banco deben ser conectados en paralelo y cargados a un valor especificado luego el circuito debe descargarse a través del circuito serie R-L, como se muestra en la Figura 1.18 (a).

Las formas de onda usadas en pruebas de apartarrayos son del tipo $4/10 \mu s$ y $8/20 \mu s$, como se aprecia en la Figura 1.18 (b).

Los bancos de capacitores son utilizados para producir impulsos de corriente, en la Figura 1.18 (c) se aprecia el conjunto de bancos de capacitores conectados en paralelo, R es la resistencia dinámica del objeto de prueba y del circuito, L es un inductor de alta corriente generalmente es un tubo espiral. [1]

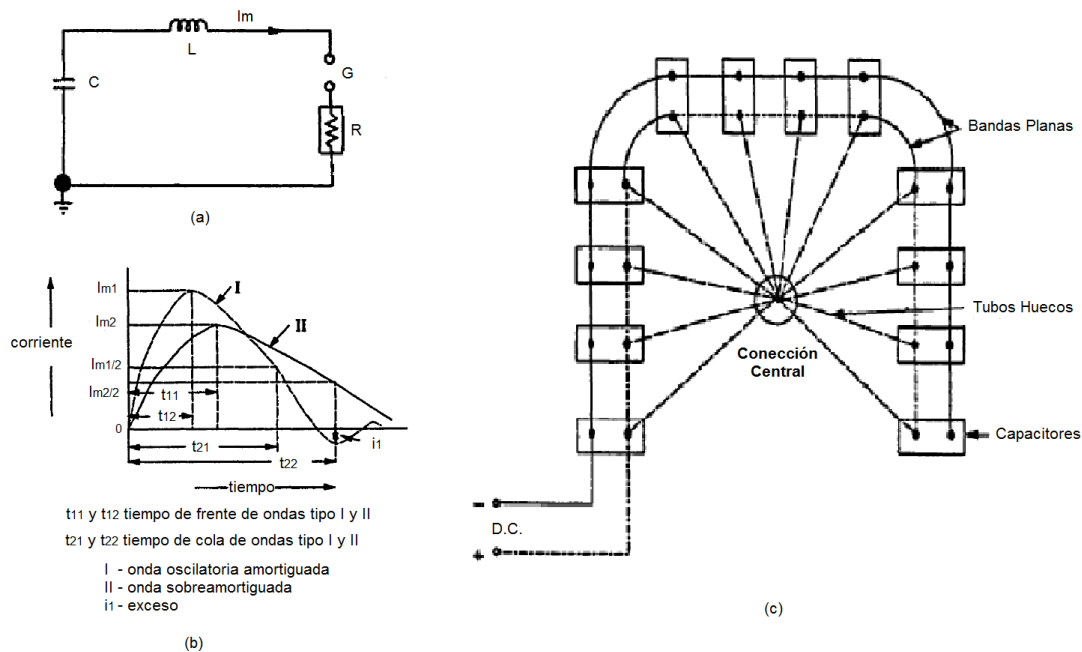


Figura 1.18. Generador de impulsos de corriente y sus formas de onda. (a) circuito básico. (b) Tipos de ondas de corriente de impulso (c) Arreglo de capacitores para la generación de corriente de impulso. [1]

Un generador de impulsos de corriente consta de lo siguiente: [1]

- Una unidad de carga de voltaje DC para cargar el banco de capacitores.
- Capacitores de alto valor ($0,5$ a $5 \mu F$) con una inductancia propia muy pequeña, capaces de proporcionar altas corrientes de corto circuito.
- Un inductor de núcleo de aire de alta corriente.
- Resistencias shunt apropiadas y sistemas de medición con registradores gráficos.

- Una unidad de disparo (trigger) y esferas de descarga para la iniciación de las ondas de corriente.

Para generar impulsos de corriente se utiliza una gran cantidad de condensadores conectados en paralelo a un punto de descarga común. El esquema de un generador de impulsos de corriente típico se presenta en la Figura 1.19. [2]

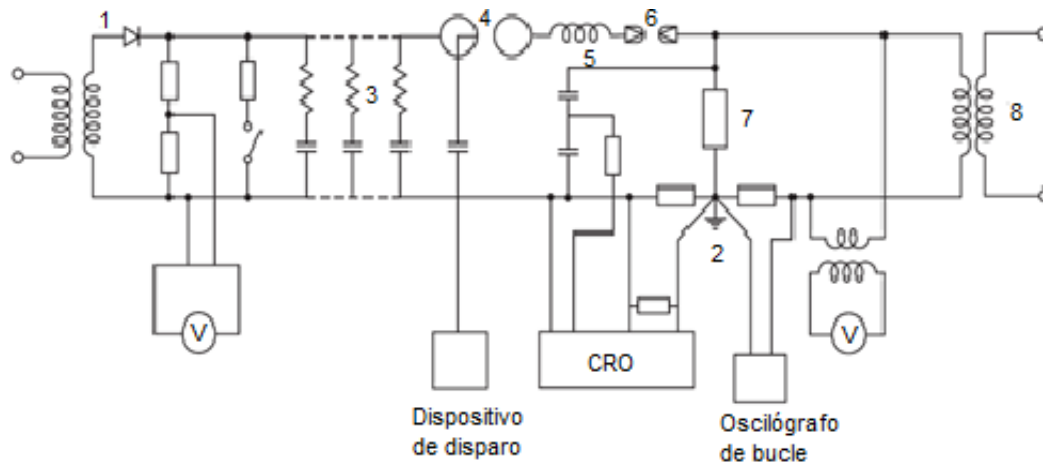


Figura 1.19. Circuito generador de corriente de impulso típico. 1. Unidad de carga 2. Dispositivo de puesta a tierra 3. Condensadores con resistencias de amortiguación 4. Distancia de la esfera de disparo. 5. Bobina del reactor 6. Espacio de la esfera protectora 7. Muestra de prueba 8. Prueba de frecuencia al transformador de potencia. [1]

1.3.4.6 Sistema de prueba de transformadores

El transformador es uno de los equipos más caros e importantes dentro de un sistema eléctrico, su mal dimensionamiento puede causar interrupciones prolongadas y costosas. Por tal motivo el diseño y construcción su aislamiento requiere de mucha cautela de modo que pueda resistir el sobre voltaje transitorio debido a la conmutación así como a los rayos. Un transformador de potencia tiene un costo en el mercado de varios millones es por tal razón que estos merecen un tratamiento especial tomando las medidas necesarias para garantizar su correcto funcionamiento. [1]

Debido a la importancia de los transformadores en los sistemas eléctricos, se realizan una serie de ensayos de alto voltaje sobre estos, por tal motivo muchos fabricantes instalan laboratorios dentro de sus plantas de producción a fin de probar sus transformadores y sus nuevos prototipos, garantizando así el cumplimiento de los requerimientos necesarios para su correcto funcionamiento. [2]

Dado que en Ecuador no se fabrican transformadores de potencia estos tienen que ser importados de otros países de América, Europa y Asia. Los transformadores que salen de las plantas de fabricación deben viajar miles de kilómetros en diversos medios de transporte hasta su lugar de destino. Es por ello la importancia de la realización de las pruebas de aceptación de los transformadores las cuales comprobarán si se produjeron daños en el equipo durante el viaje. [2]

Debido a la falta de laboratorios o una entidad certificada que realice las pruebas necesarias de transformadores de potencia en Ecuador estos tienen que ser trasladados a empresas extranjeras que realizan este tipo de pruebas, y una vez hechos los ensayos y las pruebas necesarias, el transformador viaja a su punto de instalación por lo que no se tiene garantía de lo que pueda suceder en este último viaje. [2]

Las empresas que proveen este tipo de equipos de pruebas incluyen dentro de sus productos sistemas de pruebas de transformadores en el sitio de trabajo, utilizando equipos portátiles de baja potencia y equipos de medición espectro métrica estos realizan las pruebas de aislamientos lo que aumenta la confianza en saber que el transformador instalado está en buenas condiciones, sin embargo estos tipos de sistemas en sitio tienen un costo mayor respecto a los sistemas tradicionales ya que posee instrumentos y estructuras adicionales así como un medio de transporte en el cual pueda trasladarse a los distintos sitios. [2]

En función a estas necesidades la EEQ ha optado por desarrollar un laboratorio que sea capaz de poder realizar todos los tipos de ensayos eléctricos necesarios en los distintos elementos de la red, donde, uno de sus principales elementos de prueba serán los transformadores. Con el fin de que este laboratorio se convierta en el primer laboratorio en el Ecuador que cuente con esta capacidad, este laboratorio funcionará bajo la administración de la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) y brindará sus servicios a todas las distribuidoras del país y el medio externo. [2]

Adicionalmente la EEQ tendrá la oportunidad de generar ingresos así como la capacidad de impulsar y ayudar a la industria nacional de transformadores hasta ahora muy limitada. Al tener la capacidad de realizar estos ensayos la EEQ ahorrará miles de dólares generando ingresos en la industria, y el sector eléctrico.

Para efectuar cada uno de los ensayos en los diferentes tipos de transformadores se consideran las publicaciones de la familia IEC 60076 e IEEE C.57.12.

1.3.4.7 Equipos e instrumentos complementarios

Además de los elementos principales antes mencionados, el laboratorio necesita de equipos e instrumentos de medida complementarios que permitan realizar mediciones de voltaje, corriente, resistencia, temperatura, presión, calidad del aceite dieléctrico, y otras actividades adicionales como se aprecia en la Tabla 1.2. [2]

Este equipamiento menor debe facilitar las actividades del laboratorio, por lo que se recomienda que en la medida de lo posible estos equipos sean de tamaños reducidos y portátiles.

Tabla 1.2. Instrumentos adiciones para el laboratorio de alto voltaje

<p>Probador de aceites dieléctricos</p>	<p>Este equipo se encarga de verificar que el aceite dieléctrico se encuentre en condiciones óptimas de trabajo, dado que éste tiende a deteriorarse con el tiempo y debido a los esfuerzos eléctricos a los cuales es sometido, el equipo se encarga de medir la rigidez dialéctica del aceite contenido de (agua, materiales solidos).</p> <p>Para determinar si el aceite bajo prueba se encuentra en condiciones aceptables se debe aplicar cinco voltajes de ruptura con el fin de calcular la media de éstos, los detalles de este procedimiento se encuentran en la sección 3.3.10 del presente documento, la Ecuación 1. 4 nos permite calcular la media de los voltajes ruptura. [16]</p> $X = \frac{1}{5} \sum_{n=1}^5 xn \quad (1.4)$ <p>Dónde:</p> <p>X : media de los cinco valores individuales.</p> <p>xn : enésimo valor del voltaje de ruptura</p> <p>Es necesario además calcular el rango de los voltajes de ruptura, para ello usaremos la Ecuación 1. 5.</p> $Rango = xmax - xmin \quad (1.5)$ <p>Dónde:</p> <p>xmax : Valor más alto del voltaje de ruptura de las cinco mediciones.</p> <p>xmin : Valor más bajo del voltaje de ruptura de las cinco mediciones.</p> <p>La distancia de separación entre los electrodos del equipo de prueba puede ser de 1mm o 2mm entre ellos. [16]</p>
<p>TTR</p>	<p>El TTR por sus siglas en inglés Transformer Test Ratio, está diseñado para medir la relación existente entre el número de espiras del devanado secundario y primario en transformadores de potencia, distribución e instrumentación.</p>

Equipo de pruebas de descargas parciales	Diseñado para llevar a cabo la prueba de descargas parciales PD, de este modo con los resultados que se obtienen es posible determinar si el aislamiento de un equipo ha empezado a perder sus características.
Medidor de tangente de delta	Conocido como medidor de factor de disipación, se encarga de llevar a cabo la prueba del mismo nombre que nos permitirá determinar la calidad de los materiales aislante cuyas características se ven reducidas debido al envejecimiento, contaminación del material, entre otros factores.
Megaóhmetro	El equipo se encarga de realizar las pruebas de resistencia de aislamiento, básicamente se trata de un óhmetro a gran escala capaz de generar voltajes muy altos, de este modo mide la corriente que fluye a través del material bajo prueba, siendo posible calcular su resistencia.
Micróhmetro	Equipo capaz de medir el valor de la resistencia de valores muy bajos del objeto de prueba.
Hi-Pot	El Hi-pot es un equipo de alto voltaje pudiendo ser AC o DC, este aparato se encarga de llevar a cabo la prueba que lleva su mismo nombre y al igual que otros equipos antes mencionados se encarga de verificar el aislamiento de un producto eléctrico, el equipo se encarga de monitorear la corriente de fuga a través del aislamiento. De este modo si existe alguna fuga en el aislamiento, es posible determinar: fallas en el diseño, espacios entre piezas conductoras, cables sueltos, etc.
Termómetro de infrarrojos	Conocido como termómetro sin contacto, se encarga de medir la temperatura de una superficie a partir de la emisión de radiación infrarroja.
Higrómetro	Conocido también como higrógrafo, se encarga de medir el grado de humedad del aire así como también de otros gases, de este modo se pueden determinar las condiciones del laboratorio previo a la realización de los ensayos.
VLF	Es un equipo que se utiliza para comprobador el estado de aislamiento especialmente de cables, el equipo trabaja con frecuencias muy bajas (Very Low Frequency) que llegan hasta los 0.1 Hz.
Planta de tratamiento de aceite de transformador	El sistema es un regenerador de aceites aislantes utilizado para procesar fluidos dieléctricos empleados en equipos que utilicen aceite como medio aislante y refrigerante, este procedimiento es realizado a fin de mejorar las características del aceite.
SFRA	El analizador de respuesta en frecuencia es un equipo muy sensible que determina la integridad mecánica de los núcleos de los transformadores, los devanados y los bastidores de los transformadores de potencia las cuales podrían haber sido afectados durante su transporte.

1.3.5 PARÁMETROS REQUERIDOS PARA EL LABORATORIO DE ALTO VOLTAJE DE LA EEQ

1.3.5.1 Voltaje requerido

De acuerdo a la norma IEC 60071-2, los valores de voltaje normalizados a frecuencia industrial y el voltaje de impulso soportado tipo descarga atmosférica, deben ser calculados tomando en cuenta todos los factores que pueden disminuir el aislamiento, de tal manera de que la coordinación de voltaje se cumpla para cualquier ubicación geográfica del lugar de trabajo del equipo. Para lograr esto, se deben tener en cuenta dos tipos de factores de corrección:

- Un factor de corrección asociado a las condiciones atmosféricas y
- Un factor de corrección por degradación del material aislante de los equipos generadores asociado a la altura, conocido como Derating.

Corrección debido a condiciones atmosféricas:

El factor de corrección de la altitud k_a se basa en la dependencia de la presión atmosférica de la altitud como se indica en IEC 721-2-3. De acuerdo a la norma IEC 60071-2. Insulation co-ordination, el factor de corrección de altitud k_a para pruebas de disrupciones viene dada por la Ecuación 1. 6.

$$k_a = \frac{m \cdot H}{e^{8150}} \quad (1. 6)$$

Dónde:

H: es la altitud sobre el nivel del mar en metros.

m= 1 para pruebas de impulso atmosférico y de frecuencia industrial.

m = 0.75 para pruebas de impulso de maniobra.

En el caso de Quito que se encuentra a 2850 m.s.n.m. el factor de corrección es $k_a=1,42$. Por lo que el voltaje que se requiere obtener del sistema de generación de A.C para cada sistema se presenta en la Tabla 1.3. [17]

Tabla 1.3. Valores de aislamiento estándar para Rango I ($1 \text{ kV} < U_m < 245 \text{ kV}$) fuente: Norma IEC 60071-1 (se adiciona la corrección por devaluación del aislamiento al nivel de la ciudad de Quito). [18]

Sistema Eléctrico	Valores Normalizados		Valores corregidos al nivel de Quito Constante de corrección $k_a = 1,42$	
	Voltaje más elevada para el material U_m kV (valor eficaz)	Voltaje soportado normalizado de corta duración a frecuencia industrial kV (valor eficaz)	Voltaje soportado normalizado a los impulsos tipo rayo kV (valor de cresta)	VFIq(kV)
3,6	10	20	14,1	28,1
		40		
7,2	20	40	28,1	56,3
		60		
12	28	60	39,4	84,4
		75		
		95		
17,5	38	75	53,4	105,5
		95		
24	50	95	70,3	133,6
		125		
		145		
36	70	145	98,5	203,9
		170		
52	95	250	133,6	351,6
72,5	140	325	196,9	457,1
123	185	450	260,2	632,9
		550		
		230		
145	185	450	260,2	632,9
		550		
		230		
170	275	650	386,8	914,2
		550		
		230		
170	275	650	386,8	914,2
		750		
		325		
245	275	650	386,8	914,2
		750		
		850		
		950		
		1050		

Dónde:

VFIq(kV) : es valor del voltaje normalizado de corta duración a frecuencia industrial corregido por el factor k_a

VITq(kVp) : es el voltaje soportado normalizado a los impulsos de tipo rayo corregido por el factor k_a

La Tabla 1.3 demuestra que se requiere un sistema que pueda cubrir más de 386,8 kV a frecuencia industrial y 914,2 kV pico de voltaje de impulso a la altura de Quito.

Derating:

Corresponde a la reducción de la capacidad de generación de voltaje. Se debe considerar una reducción de la capacidad de generación del 1% por cada 100 metros de altitud sobre los 1000 metros sobre el nivel del mar, que para el caso de Quito representan una reducción de capacidad de los generadores de altos voltajes del 19 %. [19]

Cálculos requeridos

Voltaje de frecuencia industrial.

Para determinar el valor del voltaje de frecuencia industrial se hace uso de la Ecuación 1.7.

$$V_{fi} = V_{nfi} * k_a * D_r \quad (1.7)$$

Dónde:

V_{fi} es el voltaje r.m.s. que debe manejar el generador de alto voltaje a frecuencia industrial

V_{nfi} es el voltaje soportado normalizado de corta duración a frecuencia industrial

k_a es el factor de corrección de altitud

D_r es el derating: fenómeno de pérdidas de potencia debido a factores característicos del entorno donde se instalará ($D_r=1.19$ para Quito). [6]

Voltaje de impulso

Para determinar el voltaje de impulso se hace uso de la Ecuación 1.8

$$V_{ir} = V_{nir} * k_a * D_r \quad (1.8)$$

Dónde:

V_{ir} es voltaje r.m.s. que debe manejar el generador de voltaje de impulso

V_{nir} es el voltaje soportado normalizado a los impulsos de tipo rayo

k_a es el factor de corrección de altitud

D_r es el derating: fenómeno de pérdidas de potencia debido a factores característicos del entorno donde se instalará.

1.3.5.2 Potencia Requerida a Frecuencia Industrial FI

Si C_t es la capacitancia del equipo a probar, V_n es el voltaje nominal r.m.s. de la fuente de alto voltaje, la potencia requerida para la prueba S_n se puede calcular en base a la Ecuación 1. 9.

$$S_n = k_s(V_n^2 \omega C_t)[VA] \quad (1. 9)$$

Siendo ω la frecuencia de la red eléctrica en términos angulares. Y $k_s=1.5$ como factor de seguridad debido a capacitancias adicionales.

Ejemplos de capacitancias adicionales son: electrodos de alto voltaje, conexiones entre la fuente y el objeto bajo prueba, dispositivos utilizados para medición como capacitores o esferas de medida. Este factor de seguridad puede tomar valores desde 2 para fuentes de muy alto voltaje, usualmente mayores a 1 MV, y puede incrementarse a valores mayores para voltajes nominales menores, también se debe considerar el sobredimensionamiento en función del factor económico. [6]

La capacitancia de los objetos de prueba puede ser muy diferente y varía ampliamente. Algunos valores típicos se aprecian en la Tabla 1.4.

Tabla 1.4. Valores típicos de capacitancia de los objetos comunes de prueba en alto voltaje [6]

Objetos típicos de prueba	Valor de Capacitancia
Aisladores de suspensión o tipo "post"	Alrededor de 10 pF
Bushings	100-1000 pF
Transformador de Potencial	200-500 pF
Transformadores de Potencia <1000 kVA	Alrededor de 1000 pF
Transformadores de Potencia >1000 kVA	1000-10000 pF

Cables con papel impregnados en aceite	250-300 pF/m
Cables aislados en gases	Alrededor de 60 pF/m
Celdas de tipo Metal aisladas en SF6	1000 a valores más allá de los 10000 pF

1.3.5.3 Requerimientos de espacio físico

En esta sección se sugerirá las dimensiones mínimas con las que debe contar el nuevo laboratorio de alto voltaje basado en las dimensiones de los equipos así como en las distancias de seguridad con las que debe cumplir entre equipos, paredes, pisos y techos con fin de evitar descargas eléctricas contra la estructura del laboratorio. Adicionalmente se sugerirá una distribución de equipos de acuerdo a las recomendaciones de los fabricantes y a la bibliografía especializada consultada, estas sugerencias serán la base de la construcción civil final, en la que se incluirán los implementos necesarios para las diferentes áreas y departamentos de trabajo.

El laboratorio debería ser un galpón construido de cemento y/o placas metálicas que forme una jaula de Faraday para dar protección al personal que realice las diferentes funciones en el laboratorio. Adicionalmente debe incluir espacios de carga y descarga de equipos de gran tamaño como transformadores, puentes grúa que tengan la capacidad de dar movilidad a estos equipos, plataformas elevadoras que permitan subir a las etapas más altas de los equipos de generación de voltaje entre otros equipos que facilitan el desarrollo del trabajo.

La norma IEC60060-1:2010 establece las distancias de seguridad de acuerdo a las recomendaciones de los fabricantes como lo indica la Figura 1.20 que deben ser respetadas entre los puntos vivos de los generadores y tierra, sea el suelo, el techo paredes o estructuras metálicas aterrizadas.

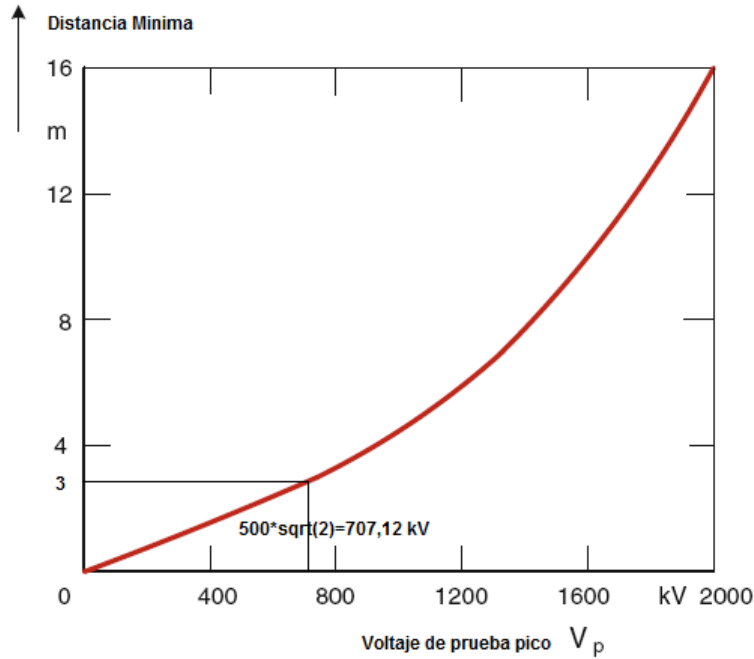


Figura 1.20. Distancias de seguridad recomendadas entre el objeto de prueba y objetos extraños energizados o aterrizados. [8]

Para determinar las distancias de seguridad del generador de impulsos de voltaje se hace uso de la Tabla 1.5.

Tabla 1.5. Correlación entre voltaje sostenido de impulso atmosférico nominal y las distancias de separación mínimas. [18]

Valores nominales de voltaje aplicado de tipo impulso kV	Autorización mínima mm	
	Barra-Estructura	Conductor-Estructura
20	60	
40	60	
60	90	
75	120	
95	160	
125	220	
145	270	
170	320	
200	380	
250	480	
325	630	

380	750	
450	900	
550	1100	
650	1300	
750	1500	
850	1700	1600
950	1900	1700
1050	2100	1900
1175	2350	2200
1300	2600	2400
1425	2850	2600
1550	3100	2900
1675	3350	3100
1800	3600	3300
1950	3900	3600
2100	4200	3900
2250	4500	4150
2400	4800	4450
2550	5100	4700
2700	5400	5000

NOTA: Los valores nominales de voltaje aplicado de tipo impulso son aplicables tanto para fase-fase como fase-tierra.

Fase-Tierra: la distancia mínima entre conductores y estructuras o barras y estructuras es aplicable

Fase-Fase: la distancia mínima entre barra y estructura es aplicable

1.3.6 ESTUDIO ECONÓMICO

El estudio económico resulta esencial al momento de plantear un proyecto, mediante la comparación de los beneficios y costos estimados se busca definir si se trata de una inversión rentable o no. [20]

1.3.6.1 Proyecto de inversión

Un proyecto puede ser definido como el conjunto de ideas, actividades y propuestas llevadas a cabo por una persona, entidad, institución con el fin de alcanzar una meta en un determinado periodo de tiempo. La importancia de los proyectos se ve reflejada en el impacto que generará en su entorno. [20]

Por otro lado se define a una inversión como el empleo del capital con el objetivo de obtener ganancias a futuro.

De este modo se puede entonces considerar a un proyecto de inversión como una propuesta de acción a la cual se le asignan recursos cuyo fin es conseguir rendimiento económico en un determinado horizonte de tiempo. Para ello es necesario el cálculo de diversos indicadores económicos de entre los cuales tenemos: VAN, TIR, WACC y el Costo Beneficio. [20]

3.3.2.3.1 Valor actual neto VAN.

El valor actual neto o también conocido como valor presente neto VPN es uno de los indicadores más utilizados para la evaluación económica de proyectos, su fin es calcular el valor presente de los flujos de fondo del proyecto mediante la tasa de descuento. [21]

El método consiste en determinar la equivalencia en el tiempo cero de los flujos de efectivo futuros que generan un proyecto o negocio y comparar esta equivalencia con el desembolso inicial de capital. [21] [20]

Para calcular el VAN se hace uso de la Ecuación 1. 10.

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{St}{(1+i)^t} \quad (1. 10)$$

Dónde:

VAN: es el Valor actual neto.

Io: es la Inversión inicial.

St: es el Flujo de efectivo neto del período t.

n: es el Número de períodos de vida del proyecto.

i: es a Tasa de descuento o tipo de interés exigido a la inversión.

Para llevar a cabo el cálculo del VAN se debe tomar en cuenta que la inversión inicial debe tener signo negativo desde el periodo cero, el signo negativo se debe a que ésta representa un desembolso de dinero que para el cálculo del VAN no es más que un egreso.

VAN > 0: El proyecto de inversión generará beneficios.

VAN =0: El proyecto de inversión no generará beneficios ni pérdidas.

$VAN < 0$: El proyecto de inversión generará pérdidas.

3.3.2.3.2 Tasa interna de retorno TIR

La tasa interna de retorno TIR es un indicador de rentabilidad que se encuentra definido como la tasa de interés que reduce a cero el valor presente, valor futuro, o el valor anual equivalente de una serie de ingresos y egresos. En pocas palabras es la tasa en la cual los flujos de entrada y salida de un proyecto llevadas a valor presente se igualan, esto significa que para tener un rendimiento la tasa de rendimiento debe ser mayor a la TIR. [22]

La TIR puede también ser definida como la tasa de descuento que iguala, en el momento inicial, la corriente futura de cobros con los pagos, generando un VAN igual a cero como lo indica la Ecuación 1. 11. [22]

$$VAN = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+TIR)^t} = 0 \quad (1. 11)$$

Dónde:

F_t : es el Flujo de caja en el período n .

t : es el Número de periodos.

I_0 : es la Inversión inicial.

3.3.2.3.3 WACC

El WACC por sus siglas en inglés Weighted Average Cost of Capital, o coste medio ponderado del capital, es un indicador que nos permite valorar en el momento actual los flujos de caja futuros esperados. [23]

El cálculo del WACC tiene en cuenta tanto el nivel de fondos propios de la empresa y su coste, como el nivel de endeudamiento y su coste financiero, así como la tasa impositiva que debe afrontar la empresa. Por tanto, tiene en cuenta todas las fuentes de recursos de la empresa, ya sean propias o ajenas. Su cálculo se lo realiza mediante la Ecuación 1. 12. [23]

$$WACC = k_e * \frac{E}{E+D} + k_d * \frac{D}{E+D} * (1 - T) \quad (1. 12)$$

Dónde:

ke: es el Coste de los fondos propios

E: son los Fondos propios

D: es el Endeudamiento

Kd: es el coste de la deuda

T: tasa impositiva

Para su cálculo todas las variables son conocidas de antemano excepto el coste de los fondos propios (Ke) que será necesario obtenerlo a parte. Para su obtención se utiliza el método CAPM (Capital Asset Pricing Model) como norma general. Este método supone que existe una relación lineal entre el sector de pertenencia de la empresa y el mercado, siendo algunos sectores más volátiles que el mercado y otros menos volátiles, y por tanto, con un comportamiento mejor (o peor) en ciclos expansivos, y viceversa en ciclos recesivos. Así pues, la fórmula para obtener el coste del capital se muestra en la Ecuación 1. 13. [23]

$$ke = Rf + (ERm - Rf) * B \quad (1. 13)$$

Dónde:

ERm: es la Rentabilidad media del mercado.

Rf: es la Rentabilidad del activo sin riesgo.

B: es el Riesgo de mercado de un activo.

Para determinar Rf se toman en cuenta los activos emitidos por los Bancos Centrales de cada país o por países de alta calificación crediticia al mayor plazo posible con el fin de evitar distorsiones debido a las decisiones de política monetaria y aspectos coyunturales. En cuanto a la ERm se hace una predicción de la rentabilidad estimada para el conjunto del mercado lo suficientemente amplia en plazos de 10 años o más con el fin de evitar posibles distorsiones a corto plazo. Por último, en cuanto a β , es el comportamiento del sector al cual pertenecen las actividades que realice la empresa respecto al mercado en función de su comportamiento. [23]

3.3.2.3.4 Costo Beneficio

El análisis de costo beneficio es una herramienta financiera cuyo fin es el de calcular el retorno de la inversión, se lo conoce también como índice neto de rentabilidad, y se obtiene al dividir el valor actual de los ingresos totales netos o beneficios netos entre el valor actual de los costos de inversión de un proyecto. [24]

Al conocer la relación costo-beneficio de un proyecto es posible conocer la rentabilidad del mismo.

La Ecuación 1. 14 describe el cálculo del costo-beneficio:

$$B/C = \frac{VAI}{VAC} \quad (1. 14)$$

En donde:

B/C: es la relación costo-beneficio

VAI: es el Valor actual de los ingresos totales netos o beneficios netos

VAC: es el Valor actual de los costos de inversión o costos totales

2. METODOLOGÍA

En éste capítulo se detalla el procedimiento utilizado para el desarrollo del presente trabajo de titulación, en el cual se destacan cuatro actividades. La primera, consiste en el levantamiento de información que comprende el uso de los datos facilitados por el Laboratorio de Transformadores de la EEQ, además de diversas visitas a las bodegas y departamentos de la empresa, la segunda comprende la búsqueda y sintetización de normas nacionales e internacionales, de entre los cuales destacan: ANSI IEEE, IEC, ASTM, con el objetivo de determinar las características técnicas de los equipos que conformarán el laboratorio de alto voltaje, además de los procedimientos que rigen las pruebas en los distintos equipos y elementos que conforman la red eléctrica hasta 138 kV, en la tercera se definirán las distancias de seguridad mínimas para el correcto y seguro funcionamiento de los equipos, dentro del área de trabajo, por último se procederá con el análisis económico de los equipos que conformarán el laboratorio de alto voltaje, con el fin de determinar la viabilidad del proyecto.

2.1. LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN

La EEQ dispone de una amplia base de datos que será utilizada para identificar los equipos y elementos que conforman la red eléctrica de la empresa hasta 138 kV.

Para llevar a cabo este punto se realizarán diversas actividades dentro de la EEQ, en primer lugar gracias a un espacio de trabajo, y un ordenador proporcionados por el laboratorio de transformadores se tiene acceso a la intranet de la EEQ, en la cual se encuentra disponible la base de datos de la empresa, de este modo se procede con la identificación de los equipos y elementos a los cuales se deberá realizar los ensayos eléctricos previstos en la guía técnica que se encuentra detallada en el punto 3.3 , este tema se desarrolló desde el 6 de Mayo al 4 de Junio del 2019; Siguiendo con el levantamiento de información se mantuvo una reunión de trabajo con personal del área de seguridad industrial el día jueves 30 de mayo del 2019, con el objetivo de conocer los detalles acerca de los equipos de protección personal manejados en la empresa. Con el fin de obtener más detalles sobre dicho equipamiento se mantuvo una reunión en las bodegas del departamento de líneas energizadas de la EEQ el día 02 de Junio, dónde se obtuvo los detalles de los EPP, tales como: guantes, mangas, cobertores, botas, protectores dieléctricos de cabeza, entre otros, además se pudo identificar físicamente el equipamiento antes descrito.

El 03 de Junio se coordinó con el departamento de líneas de transmisión con el fin de conocer detalles acerca de canastillas y pértigas, adicionalmente se obtuvo del departamento documentación referente a las normas de los EPP's.

El día viernes 07 de junio se mantuvo un encuentro con el departamento de mantenimiento de subestaciones con el fin de obtener información acerca de los transformadores de potencia de la empresa.

A partir de la información recolectada se determinó los equipos y elementos a los cuales la empresa requiere realizar los ensayos descritos en las normas: ANSI IEEE, IEC, ASTM, en la Tabla 2.1 se aprecian los resultados obtenidos.

Tabla 2.1. Equipos y elementos

Equipos	Elementos
Transformadores	Mantas
Interruptores	Pértigas
Seccionadores	Guantes
Apartarrayos	Calzado
Celdas de seccionamiento	Canastillas
Transformador de corriente	Protector dieléctrico de cabeza
Transformador de potencial	Cobertores
Autotransformadores	Mangas
Aisladores	
Cables	
Cajas de maniobra	
Re-conectores	

De acuerdo a la base de datos de la empresa se procede a determinar las características como: el nivel de voltaje, potencia, corriente, BIL, calibres, entre otros, de los equipos y elementos de la Tabla 2.1. Una vez identificada esta información se determina el equipo y elemento de mayor capacidad dentro de cada una de sus respectivas categorías.

Finalmente se separarán y ordenarán aquellos elementos que se consideren de mayores capacidades para posteriormente calcular el voltaje y la potencia de los equipos

generadores de alto voltaje y alta corriente del laboratorio de alto voltaje, que permitirán realizar los ensayos dieléctricos especificados en la guía técnica del Capítulo 3.

Una vez obtenida la lista de equipos y elementos más grandes y haciendo uso de la norma IEC 60071, se procederá a determinar el voltaje y la potencia necesarios para que los equipos generadores de alto voltaje se encuentren en la capacidad de suministrar las condiciones necesarias para el ensayo correspondiente.

2.2. ADAPTACIÓN DE NORMAS

En este punto haciendo uso de las normas internacionales de entre las cuales se destacan IEEE, IEC, ASTM, se procederá identificar las normas que especifiquen los procedimientos para realizar las pruebas. La Tabla 2.2 resume las normas utilizadas para llevar a cabo ensayos dieléctricos en los diferentes equipos y elementos. El detalle de ellas se aprecia en el Anexo Magnético debido a la extensión de las mismas.

Tabla 2.2. Normas de ensayos eléctricos para elementos que componen el sistema eléctrico

Elementos	Norma
Transformador	IEC 60076-3, IEEE Std C57.12.00 , IEEE Std C57.12.90
Transformadores de medición	IEEE Std C57.13-2016
Disyuntores/Seccionadores	IEEE Std C37.42 ,IEEE Std C37.41
Apartarrayos	IEEE Std C62.11
Cables	IEEE Std 400.1-2018 ,IEEE Std 400.2-2013 , IEC 60885-3 , IEC 60502-2
Aisladores	AIEE C29.1
Celdas de seccionamiento	IEC-62271-102, IEC-60694
Fusibles	C37.41 y C37.42
Re-conectores	AIEE 50
Aceite	ASTM D 877
Equipos de protección personal	Norma
Protector dieléctrico de cabeza	ANSI-ISEA Z89.1
Calzado	ASTM F2412- 18a
Guantes y mangas	ASTM F496 – 14a
Mantas	ASTM D1048 – 14
Cobertores	ASTM F478 – 14a
Pértigas	ASTM F711-17
Canastillas	ANSI/SIA A92.2-2009

Una vez conocidas las normas que rigen los ensayos en los diferentes equipos y elementos eléctricos, se procederá a realizar una guía que sintetice las pruebas especificadas en las normas de la Tabla 2.2.

2.3. REQUERIMIENTOS DE ESPACIO FÍSICO

En esta sección haciendo uso de las proformas y data sheets de los equipos especificados se logrará conocer las dimensiones físicas de los mismos, con esta información, con el respaldo de las normas IEC 60060-1 e IEC 60071-1 y recomendaciones dadas por los fabricantes se procederá a realizar el cálculo de las distancias de seguridad necesarias para el normal funcionamiento de los equipos, con el fin de eliminar la posibilidad de formación de arcos eléctricos que podrían producirse durante la operación de los equipos de generación de altos voltajes. Finalmente se sugerirá una distribución de los equipos dentro del laboratorio conforme a las recomendaciones propuestas por los fabricantes y la bibliografía consultada, estas sugerencias podrán ser tomadas como base para la construcción de la obra civil del laboratorio.

2.4. ANALISIS ECONÓMICO

Una vez conocidas las especificaciones técnicas de los equipos, y habiendo receptado las proformas expuestas por los fabricantes, de modo tal que los costos sean conocidos, se procederá a calcular los índices económicos tales como: Tasa interna de retorno (TIR), Valor actual neto (VAN), Weighted average cost of capital (WACC) y costo beneficio, expuestos en el punto 1.3.6 del presente trabajo.

Para el cálculo del VAN se hará uso de la ecuación 1.10 descrita en el marco teórico.

Para el cálculo del TIR se hará uso de la ecuación 1.11.

Para el cálculo del WACC se usarán las ecuaciones: 1.12 y 1.13.

Para el cálculo del costo beneficio se utilizará la ecuación 1.14.

El cálculo de éstos indicadores económicos tiene por finalidad determinar la viabilidad del proyecto, en un horizonte de tiempo de 12 años, para ello será necesario describir una breve estrategia de negocios que se ajuste a este horizonte de tiempo, la misma que será detallada en el capítulo 3.5 de este documento.


3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presenta los resultados del levantamiento realizado tanto en el sistema eléctrico de la EEQ así como de las bodegas a fin de determinar cuáles son los equipos y elementos que requieren ser ensayados para su mantenimiento o recepción, para ello se recopilaron las normas necesarias para la ejecución de cada uno de estos ensayos y posterior especificación del equipamiento del nuevo laboratorio de alto voltaje.

3.1. LEVANTAMIENTO DE INFORMACIÓN





Después de haber aplicado la metodología descrita en la sección 2.1 se realizó la Tabla 3.1 la cual contiene las características de cada uno de los elementos y equipos obtenidos durante el levantamiento en la EEQ.

Tabla 3.1. Equipos y elementos del sistema eléctrico de la EEQ

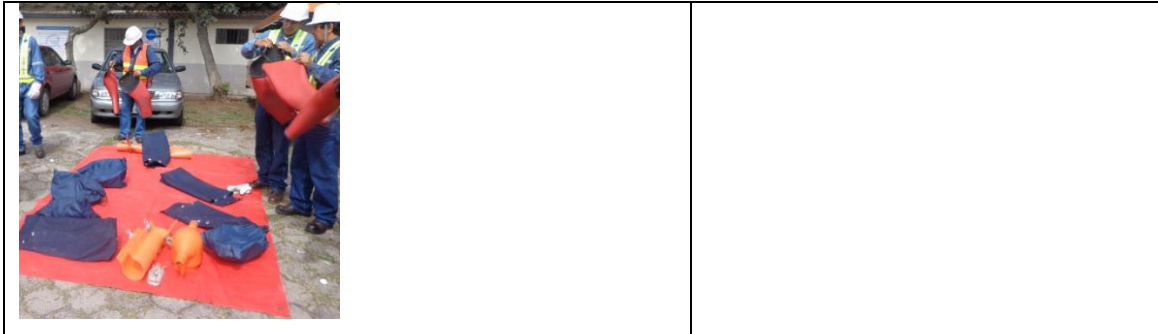
Denominación del Elemento / Equipo	Características
<p>Transformador de potencia</p> 	<p>Potencia: 27/33/40 MVA Voltaje: 138/23 kV Frecuencia: 60 Hz Fases: 3 Bobinados: 3 Datos de aislamiento Voltaje de frecuencia industrial: 275 kV BIL: 650 kV</p>
<p>Interruptor de potencia</p> 	<p>Voltaje: 138 kV Corriente: 1200 A Corriente Interruptiva (kA): 25, 31.5, 40, 50 Tanque muerto Trifásico Datos de aislamiento Voltaje de frecuencia industrial: 275 kV BIL: 650 kV</p>

<p>Disyuntor de potencia</p> 	<p>Voltaje: 138 kV Trifásico en sf6 Corriente interruptiva: 1200 A BIL: 750 kV Tanque vivo Incluye: 3 tc (1200-600-300/5 a) Datos de aislamiento Voltaje de frecuencia industrial: 275 kV BIL: 750 kV</p>
<p>Seccionador</p> 	<p>Voltaje: 138 Kv Columna central giratoria y cuchilla deslizante Tripolar Corriente interruptiva: 2000 A Datos de aislamiento Voltaje de frecuencia industrial: 275 kV BIL: 750 kV</p>
<p>Pararrayos</p> 	<p>Voltaje: 138 kV Clase estación Óxido de zinc Incluye: Desconectador y conectores Datos de aislamiento Voltaje de frecuencia industrial: 275 kV BIL: 650 kV</p>
<p>Celda modular compacta</p>	<p>Voltaje: 24 kV Aislamiento en sf6 Protección con fusible Incluye un seccionador de 600 A Corriente Soportada: 20 kA</p>

	<p>BIL: 125 kV</p> <p>Datos de aislamiento</p> <p>Voltaje de frecuencia industrial: 50 kV</p> <p>BIL: 125 kV</p>
<p>Transformador de corriente</p> 	<p>Voltaje: 138 kV</p> <p>Corriente soportada: 1200 A</p> <p>Datos de aislamiento</p> <p>Voltaje de frecuencia industrial: 275 kV</p> <p>BIL: 650 kV</p>
<p>Reconector Automático</p> 	<p>Trifásica</p> <p>Voltaje: 38 kv,</p> <p>Corriente: 100 A</p> <p>Datos de aislamiento</p> <p>Voltaje de frecuencia industrial: 95 kV</p> <p>BIL: 250 kV</p>
<p>Transformador de potencial</p> 	<p>Voltaje: 46 kV /115 v</p> <p>Potencia: 75 VA</p> <p>Clase 0.3</p> <p>Datos de aislamiento</p> <p>Voltaje de frecuencia industrial: 95 kV</p> <p>BIL: 250 kV</p>

<p>Cable de Al.</p> 	<p>Voltaje: 46 kV</p> <p>Estructura cableada TRXLPE, 1000 mcm, 37 hilos, 133% na</p> <p>Datos de aislamiento</p> <p>Voltaje de frecuencia industrial: 95 kV</p> <p>BIL: 250 kV</p>
<p>Pértiga dieléctrica</p> 	<p>Voltaje: 138 kV</p> <p>Extensible a 15 metros</p>
<p>guantes de caucho</p> 	<p>Para uso en maniobras de instalaciones a 7000 V</p>
<p>Botas</p>  <ul style="list-style-type: none"> A. Puntera B. Plantilla C. Liniero D. Cordones E. Contrafuerte F. Cuello G. Ojaletes H. Lengüeta I. Suela 	
<p>Canastilla articulada</p>	<p>Voltaje: 69 kV</p> <p>Altura a la base del barquillo 17 metros</p> <p>Carga: 160 kg.</p>

		
<p>Protector dieléctrico para cabeza</p> 		<p>Voltaje: 30 kV Tipo gorra de policarbonato</p>
<p>Cobertor aislante de poste Cobertor aislante de línea</p> 		<p>Voltaje: 69 kV de 120 cm Voltaje: 36 kV, 15 A</p>
<p>Cobertor aislante de aislador</p>		<p>Voltaje: 69 kV</p>



Una vez identificados los elementos de mayor voltaje soportado de cada categoría según se indica en la Tabla 3.1 se aplicaron las ecuaciones 1.6, 1.7, 1.8 y 1.9 descritas en la sección 1.3.5 para obtener los resultados de voltajes que debe tener el generador de alto voltaje alterno, el generador de impulsos de voltaje y la potencia requerida del generador de alto voltaje alterno en base a los cuales se determinarán las características de estos equipos y que son detallados en la Tabla 3.2.

En base a las ecuaciones mencionadas se determinó el voltaje a frecuencia industrial que debe generar el equipo de alto voltaje alterno tomando en cuenta el factor de corrección por altitud $k_a=1.42$ y un factor de degradación (Derating) $D_r=1.19$, se determinó lo siguiente:

$$V_{fi} = 458.15 \text{ kV}$$

De esta manera queda determinado el nivel de voltaje alterno nominal del sistema de generación AC para el laboratorio de alto voltaje en **500 kV** el cual existe comercialmente en la industria.

Del mismo modo se determina el voltaje de impulso máximo que el sistema generador de voltaje de impulso debe ser capaz de suministrar con los mismos factores de altitud y de degradación antes mencionados obteniendo lo siguiente:

$$V_{ir} = 1082.9 \text{ kV}$$

El sistema generador de voltaje de impulso debe tener la capacidad de proveer un voltaje de impulso de **1200 kV** valor estándar que las empresas fabricantes disponen.

Para determinar la potencia que el generador de voltaje alterno debe suministrar se tomará en cuenta el valor de la capacitancia (C_t) del equipo o elemento a ser probado, los cuales se detallan en la Tabla 1.4. Se considera la capacitancia del transformador ya que

es uno de los equipos más grandes que compone un sistema eléctrico, para ello haremos uso de la Ecuación 1.9, considerando un caso medio, con generación de $V_n = 500 \text{ kV}$, una capacitancia de prueba grande como la del transformador $C_t = 10000 \text{ pF}$, y un factor de sobredimensionamiento del 50 % recomendado por fabricantes $k_s = 1.5$. Se puede calcular una potencia requerida de:

$$S_n = 1413.72 \text{ kVA}$$

La fuente debe estar en la capacidad de poder suministrar una potencia de **1500 kVA** esto ya que se consideró un factor de seguridad debido a capacitancias adicionales como: electrodos de alto voltaje, conexiones entre la fuente y el objeto puesto a prueba, dispositivos utilizados para medición como capacitores o esferas de medida.

El uso de esta capacidad de potencia será puesta en marcha solo en casos extremos de máxima carga considerando que la mayoría de pruebas en alto voltaje son de corta duración. [2]

Tabla 3. 2. Especificaciones técnicas de equipos para el laboratorio de alto voltaje hasta un nivel de 138 kV

Denominación	Características	Detalles adicionales	Aplicación
Sistema de generación de alto voltaje Alterno (opción 1)	<ul style="list-style-type: none"> - Generador de alto voltaje alterno HVAC de tipo resonante - Voltaje de salida nominal r.m.s: 500 kV - Potencia nominal en la carga: 1500 kVA - Ciclo de trabajo - Alimentación: 220 V trifásicos/ 60 Hz - Variación de frecuencia entre 20 a 300 Hz. - Incluye circuitos de control y medición. - Debe poseer instrumentos de medida digitales que permitan registrar voltajes, capacitancias, tangente delta y descargas parciales - Incluye los certificados de calibración de todos sus instrumentos bajo ISO/IEC 17025 	Ciclo de trabajo continuo Según IEC 60840 y 62067. Sistema computarizado Normativa en la que se establecen los requisitos que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración	<ul style="list-style-type: none"> - Voltaje aplicado en transformadores - Voltaje inducido en transformadores - Pruebas de aislamiento en seccionadores - Pruebas de aislamiento en aisladores, cables - Aislamientos en celdas de seccionamiento
Sistema de generación de alto voltaje Alterno (opción 2)	<ul style="list-style-type: none"> - Generador de alto voltaje alterno HVAC basado en transformadores - Voltaje de salida nominal r.m.s: 500 kV - Potencia nominal en la carga: 1500 kVA - Ciclo de trabajo - Alimentación: 220 V trifásicos/ 60 Hz - Incluye circuitos de control y medición. - Debe poseer instrumentos de medida digitales que permitan registrar 	Sistema computarizado	<ul style="list-style-type: none"> - Voltaje aplicado en transformadores - Voltaje inducido en transformadores - Pruebas de aislamiento en seccionadores - Pruebas de aislamiento en aisladores, cables - Aislamientos en celdas de seccionamiento

	<p>medidas de voltajes, medición de capacitancia, tangente delta y descargas parciales</p> <ul style="list-style-type: none"> - Incluye los certificados de calibración de todos sus instrumentos bajo ISO/IEC 17025 	<p>Normativa en la que se establecen los requisitos que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración</p>	
Sistema de impulsos de voltaje	<ul style="list-style-type: none"> - Generador de impulsos de voltaje de ondas - Ondas recortadas - Voltaje máximo: 1200 kV - Alimentación: 220 V trifásico/ 60 Hz - Incluye circuitos de control y medición. - Debe poseer instrumentos de medida digitales que permitan registrar medidas de voltajes, gráficamente - Incluye los certificados de calibración de todos sus - instrumentos bajo ISO/IEC 17025 	<p>Según IEC 60060-1, IEC 60076-3, ANSI IEEE C57.12.90</p> <p>Sistema computarizado</p> <p>Normativa en la que se establecen los requisitos que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Se utilizan para ensayos de impulsos de voltaje en transformadores, cables, equipamientos GIS y descargadores - Pruebas de impulso con ondas completas y recortadas bajo normas a todo tipo de aislamiento - Determina el kV BIL
Sistema de impulsos de corriente	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentación: 220 V/ 60 Hz - Incluye circuitos de control y medición - Para pararrayos de clase estación debe poseer una corriente de descarga de hasta 20 kA - Incluye los certificados de calibración de 	<p>Norma de aplicación para el sistema: IEC 60099-4, IEC 62475, IEC 62305-1, IEC 61643-11</p> <p>Sistema computarizado</p> <p>Según IEEE Std C62.11</p> <p>Normativa en la que se establecen los</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Pruebas de conducción de corriente (Impulso y sostenida) en re-conectores - Pruebas de conducción de corriente (Impulso y sostenida) en disyuntores - Ensayos en pararrayos

	todos sus instrumentos bajo ISO/IEC 17025	requisitos que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración	
Sistema de prueba de transformadores de Distribución y de Potencia	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema de prueba de transformadores - Rango 5kVA hasta 40MVA - Capacidad de prueba: hasta transformadores de 40 MVA 138/46kV - Voltaje nominal de salida: por lo menos 92 kV para voltaje inducido. - Capacitores de compensación para pruebas de pérdidas y cortocircuitos - Que tenga un THD<5% - Se incluye todos los sistemas de medición y control - Incluye los certificados de calibración de todos sus instrumentos bajo ISO/IEC 17025 	<p>2 veces el nivel de voltaje</p> <p>Valor recomendado por la norma IEC 60076</p> <p>Normativa en la que se establecen los requisitos que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Pruebas de rutina en transformadores: IEC 60076-3 y ANSI C57.12.90 - Voltaje aplicado - Voltaje inducido - Resistencia de Aislamiento - Resistencia Óhmica de los devanados - Relación de Transformación y Polaridad
Probador de aceites dieléctricos	<ul style="list-style-type: none"> - Equipo que sirve para prueba dieléctrica de aceite de transformadores, disyuntores, reguladores de voltaje. - Normas de aplicación en medidas: ASTM D877, ASTM D1816, IEC 156 - Fuente de alimentación: 120V/60 Hz, que cuente con baterías - Incluye los certificados de calibración de todos sus instrumentos bajo ISO/IEC 17025 	<p>Normativa en la que se establecen los requisitos que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Rigidez dieléctrica del aceite
TTR trifásico y TTR monofásico	<ul style="list-style-type: none"> - Equipo que permite medir la relación de transformación, grupo de conexión, 		<ul style="list-style-type: none"> - Relación de transformación

	<p>corriente de excitación y ángulo de desfase.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Relación de transformación 1/1000 - El equipo debe estar diseñado para realizar pruebas en transformadores de potencia, de medida y de distribución en subestaciones. - Fuente de alimentación: 120 V/60 Hz incluir baterías de ser necesario - Por lo menos, precisión 2% - Incluye los certificados de calibración de todos sus instrumentos bajo ISO/IEC 17025 	<p>Normativa en la que se establecen los requisitos que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración</p>	
<p>Equipo de pruebas de descargas parciales</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Requisitos de alimentación: 110V o 220V a 60 Hz y además incluya una batería interna. - El equipo debe permitir realizarlas pruebas en transformadores, interruptores, aisladores, motores, interruptores y cables - Rango de medición de voltaje: hasta 200 kV. - Interfaces de comunicación USB/Ethernet. - Contiene: el divisor de voltaje 200 kv, el registrador de descargas y el calibrador. - Observación de PD en forma de elipse, ondas sinusoidales, líneas. 		

	<ul style="list-style-type: none"> - Compatible con Windows, que permita almacenar la información - Incluye los certificados de calibración de todos sus instrumentos bajo ISO/IEC 17025 	Normativa en la que se establecen los requisitos que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración	
Medidor de tangente de delta	<ul style="list-style-type: none"> - El equipo debe permitir realizar las pruebas de (Factor de disipación y factor de potencia) de aparatos de alto voltaje como: Transformadores de potencia y de distribución, transformadores de instrumentación, aislantes líquidos y sólidos, máquinas rotativas, generadores, cables, capacitores, pararrayos, aisladores y otros. - Rango de medición tan delta: 0-100 % - Rango de medición de factor de potencia: 0-1 - Tolerancia MAXIMO 2% - Permita la comunicación mediante: USB/Ethernet - Alimentación 120V/60 Hz (incluya baterías si considera necesario) - Incluye los certificados de calibración de todos sus instrumentos bajo ISO/IEC 17025 	Normativa en la que se establecen los requisitos que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración	
Analizador de barrido de respuesta de frecuencia (SFRA)	<ul style="list-style-type: none"> - IEC 60076-18 - Para transformadores hasta 40 MVA 138 kV 		

	<ul style="list-style-type: none"> - Debe poder importar datos de otros equipos de prueba FRA - Su comunicación debe ser inalámbrica - Debe operar con baterías - Incluye los certificados de calibración de todos sus instrumentos bajo ISO/IEC 17025 	Normativa en la que se establecen los requisitos que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración	
Termómetro laser	<ul style="list-style-type: none"> - Debe poder medir la temperatura sin contacto y con contacto a la vez - Rango de temperatura entre -30°C y 900°C - Retención de la última lectura (20 segundos) - Interfaz de usuario en varios idiomas - Alarma de nivel alto y bajo - Almacenamiento y revisión de datos - Interfaz USB - Incluye los certificados de calibración de todos sus instrumentos bajo ISO/IEC 17025 	Normativa en la que se establecen los requisitos que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración	
Hi-Pot	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentación 120V 60Hz - Voltaje de salida hasta 200KV de corriente directa - Tolerancia: 2% - Que sea regulable - Digital, permita registro USB, Ethernet - Incluye los certificados de calibración de todos sus instrumentos bajo ISO/IEC 	Normativa en la que se establecen los requisitos que deben cumplir los laboratorios	

	17025	de ensayo y calibración	
Megómetro	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentación 120V 60Hz - Voltaje de salida hasta 10 KV - Tolerancia: 2 % - Comunicación Usb, Ethernet y datos registro - Incluye los certificados de calibración de todos sus instrumentos bajo ISO/IEC 17025 	Normativa en la que se establecen los requisitos que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración	
Micrómetro	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentación 110V/220V que incluya baterías - Que permita medir desde nivel de microhmios hasta ohmios - Que el equipo sea portátil - Incluye los certificados de calibración de todos sus instrumentos bajo ISO/IEC 17025 	Normativa en la que se establecen los requisitos que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración	
Planta de tratamiento de aceite de transformador	<ul style="list-style-type: none"> - Debe eliminar: humedad, gases, y las partículas sólidas de los aceites dieléctricos mineral tipo I y II y vegetal. - Capacidad 100 gal/h - Contenido de gas disuelto según ASTM D-2945-71 - Contenido de agua según ASTM D-1744-64. - Rigidez dieléctrica según IEC 60156 - Incluye los certificados de calibración de todos sus instrumentos bajo ISO/IEC 	Normativa en la que se establecen los requisitos que deben cumplir los laboratorios	

	17025	de ensayo y calibración	
Higrómetro	<ul style="list-style-type: none"> - Escala de 0 a 100 % - Tolerancia al menos 1% - Debe ser digital - Incluye los certificados de calibración de todos sus instrumentos bajo ISO/IEC 17025 	Normativa en la que se establecen los requisitos que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración	
VLF cables	<ul style="list-style-type: none"> - Alimentación 110V/220V 60Hz - Frecuencia debe oscilar entre 0.01 Hz a 0.1 Hz - Precisión mayor o igual a 1×10^{-4}. - El valor RMS de la voltaje de salida debe ser mayor o igual a 3 veces el voltaje fase neutro del sistema a medir (138kV) - Ciclo de trabajo continuo - Incluye los certificados de calibración de todos sus instrumentos bajo ISO/IEC 17025 	Normativa en la que se establecen los requisitos que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración	
Equipo de Prueba para Interruptores	<ul style="list-style-type: none"> - Que permita realizar pruebas en interruptores de media y alto voltaje hasta 138kV con diseño tanque vivo y tanque muerto. (Aceite, Vacío, SF6) - Que permita realizar pruebas de sincronismo, resistencia de contactos, análisis de la corriente de bobina - Incluye los certificados de calibración de todos sus instrumentos bajo ISO/IEC 17025 	Normativa en la que se establecen los requisitos que deben cumplir los laboratorios de ensayo y calibración	

3.2. EQUIPOS E INSTRUMENTOS OFERTADOS

Una vez enviadas las especificaciones que se detallan en la Tabla 3.2 de equipos e instrumentos requeridos para el laboratorio de alto voltaje a los distintos proveedores y fabricantes comerciales dedicados a la elaboración de sistemas de alto voltaje, se obtuvo respuesta de empresas de Alemania, Suecia, India, Ecuador, cuyas características se detallan en los siguientes apartados.

3.2.1 OPCIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ALTO VOLTAJE ALTERNO TIPO RESONANTE

El sistema resonante lleva ventajas frente al sistema tipo transformador como la relación tamaño/costo, la reducción de resonancias no deseadas, menor consumo de potencia, por lo que se ha considerado como la mejor opción para la generación de alto voltaje alterno.

El sistema tipo resonante consiste principalmente de un regulador de voltaje, un transformador de excitación y un reactor variable de alto voltaje componentes que se observan en la Figura 3.1.

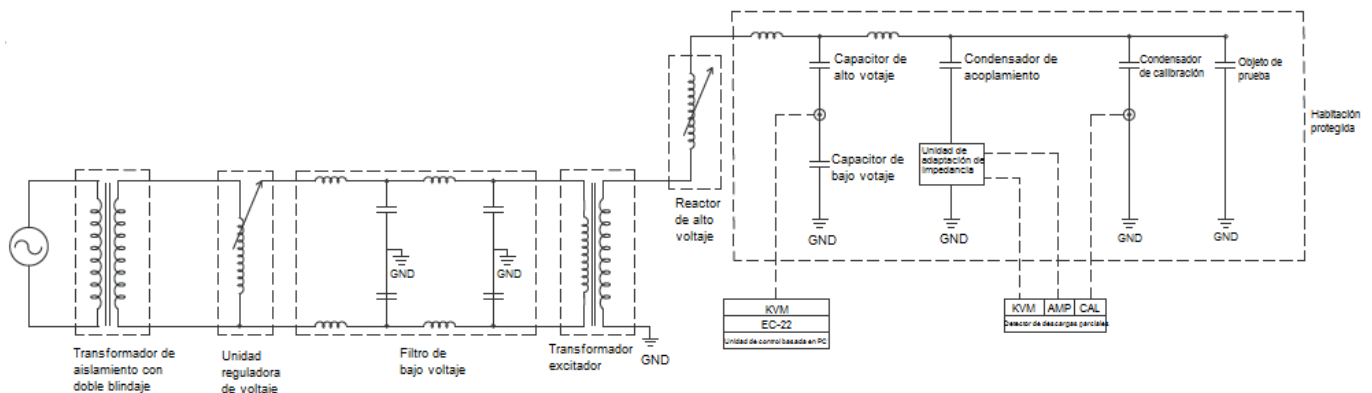


Figura 3.1. Esquema del sistema HVAC resonante de 500 kV [25]

El regulador de voltaje se conecta al sistema a través del interruptor de alimentación principal. Este componente suministra voltaje variable al transformador de excitación que permite ajustar el voltaje de salida requerido para los ensayos. El transformador de excitación proporciona la energía necesaria al circuito de alto voltaje que se conforma por el reactor variable y el objeto de prueba. El transformador de excitación también provee

aislamiento entre el primario conectado a la red y el circuito de alto voltaje en el secundario.

Este sistema resonante se compone de:

- Transformador de aislamiento con doble blindaje.
- Unidad reguladora de voltaje o convertidor estático de frecuencia (SFC).
- Filtro de bajo voltaje.
- Transformador de excitación.
- Reactor de alto voltaje.
- Filtro de alto voltaje/Divisor de voltaje.
- Unidad de control

Reactor variable de alto voltaje

El reactor variable de alto voltaje que se observa en la Figura 3.2, es la parte más importante del sistema, éste junto con el objeto de prueba constituyen en conjunto un circuito resonante serie, éste dispositivo está diseñado para ajustar su inductancia de tal manera que pueda compensar la capacitancia producida por el objeto de prueba en el circuito de alto voltaje. Su construcción se basa en láminas de acero de silicio en el núcleo, el cual permite que el reactor tenga bajos niveles de pérdidas, el nivel de silicio puede variar de 2 a 3,5%.



Figura 3. 2. Reactor variable [25]

Transformador de excitación.

El transformador de excitación que se aprecia en la Figura 3.3, el bobinado del transformador de excitación está blindado para reducir el ruido eléctrico.



Figura 3. 3. Transformador de excitación [25]

Transformador de aislamiento doblemente apantallado.

El transformador doblemente apantallado proporciona aislamiento galvánico entre la red eléctrica y el circuito de alto voltaje.

Filtro de bajo voltaje.

El filtro de bajo voltaje está diseñado para atenuar el ruido de la red en un nivel de 20 a 30 dB y está conectado entre la salida del regulador de voltaje y el transformador de excitación.

Regulador de voltaje.

El regulador de voltaje suministra un voltaje de salida variable de 0-415V al transformador de excitación.

Convertidor estático de frecuencia.

Se recomienda incluir este dispositivo para realizar pruebas de voltaje inducido puesto que en estas se necesita variar la frecuencia, en ese caso el SFC reemplazará al regulador de voltaje. Las siglas SFC provienen del inglés Static Frequency Converter.

Filtro de alto voltaje/Divisor de voltaje

El sistema resonante incluye filtros de alto voltaje cuando se realicen pruebas de descargas parciales, estos filtros se diseñan también para soportar las rigurosas pruebas de Flashover para probar aisladores, dependiendo del grado de filtrado que se requiera se realizan diferentes configuraciones de inductancias y capacitancias shunt de múltiples etapas o mono etapa, en este caso se recomienda la inclusión de estos filtros de alto voltaje. La Figura 3.4 muestra un filtro mono etapa.



Figura 3. 4. Filtro de alto voltaje [25]

Unidad de control digital.

La unidad de control de la Figura 3.5 está basada en un ordenador portátil con software de control y medición, posee las siguientes características:

Encendiendo y apagando mediante contactor de alto voltaje.

Variación manual o automática de la salida de alto voltaje con control de velocidad variable.

Si se suministra con SFC (convertidor estático de frecuencia) en lugar de un regulador de voltaje permite selección de la frecuencia de salida a un valor preestablecido.

Subida automática del voltaje de salida a un valor predefinido con una velocidad predefinida.

Protección contra sobrevoltaje y sobrecorriente con indicador de alarma.

El voltaje de prueba vs el tiempo puede ser visualizado en forma gráfica.

Visualización de todas las alarmas y advertencias.

Software de generación de informes.



Figura 3. 5. Unidad de control del sistema resonante [25]

El sistema resonante tiene los siguientes parámetros:

Voltaje de salida	500 kV
Corriente de salida	3 A.
Factor Q de diseño	20
Frecuencia	60 Hz
Rango de sintonía	0.8 - 15.9 nF a 60Hz
Ciclo de trabajo	1 Hr. ON / 1 Hr. OFF
Nivel de ruido acústico	≤ 85 dB
Voltaje de entrada	0-415V (Fase a Fase)
Cumplimiento	IEC60060-1 e IEC60060-2

La Figura 3.6 muestra las dimensiones de los módulos resonantes de alto voltaje AC.

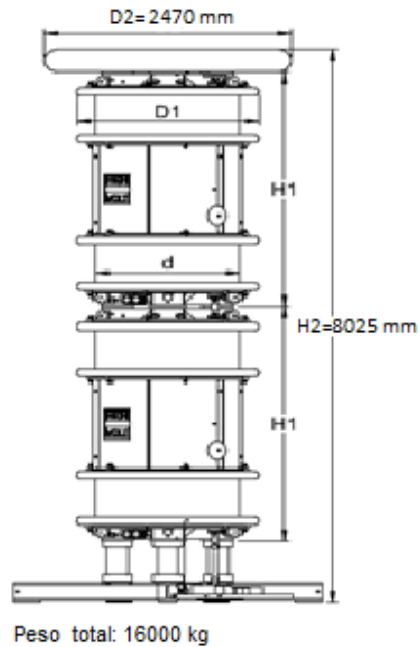


Figura 3. 6. Sistema modular resonante. [26]

Transformador de aislamiento de doble blindaje:

Clasificación	75 kVA, 1:1
Entrada	380 V, 2 fases, 60 Hz
Salida	415 V, 2 fases, 60 Hz

Regulador de voltaje:

Clasificación	75 kVA
Entrada	415 V
Salida	0 - 415 V

Transformador de Excitación:

Las características del transformador excitador del sistema se aprecian en la Figura 3.7.

Salida	0 - 25 kV, 3 A
Entrada	0 - 415V, 60 Hz
Refrigeración	ONAN

Protección	Pararrayo de 25 kV conectado a la salida
Peso total	1200 kg
Peso del aceite	370 kg

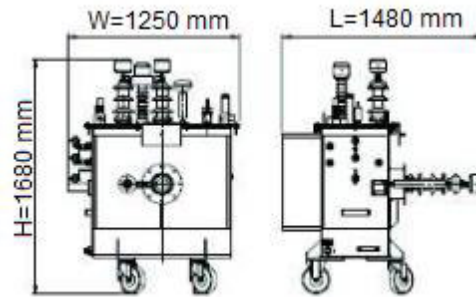


Figura 3. 7. Transformador de excitación [26]

Reactor variable de alto voltaje:

Salida	250 kV, 3 Amperios, 750 kVA (x 2 Módulos en serie)
Entrada	0 -25 kV
Construcción	Modular
Refrigeración	ONAN

Divisor de alto voltaje:

Las dimensiones del divisor de alto voltaje se aprecian en la Figura 3.8.

Clasificación	500kV, 600 pF
Construcción	Carcasa de FRP sellada herméticamente
Marco de la base debidamente equipado con ruedas con mecanismo de bloqueo	
Dimensiones:	
Diámetro (D)	1600 mm
Altura (H)	5900 mm

Base (A x A) 2180 x 2180 mm

Peso total 295 kg

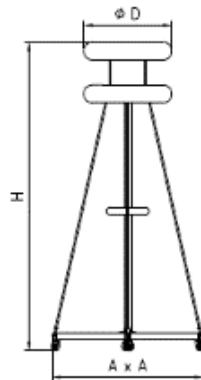


Figura 3.8. Divisor de alto voltaje. [26]

Especificaciones más detalladas de cada componente se encuentran en el Anexo 2, mientras que las dimensiones con las que cuenta el equipo ofertado por fabricantes se presentan en el Anexo 1.

3.2.2 OPCIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ALTO VOLTAJE ALTERNO TIPO TRANSFORMADOR

Otra opción del sistema generador de alto voltaje corresponde al sistema convencional que se ha venido utilizando durante varios años por las empresas fabricantes de insumos de alto voltaje, el sistema de prueba tipo transformador. La opción ofertada para la generación de alto voltaje alterno se indica en la Figura 3.9.



Figura 3. 9. Transformador tipo tanque. 750 kV/2100 kVA. [14]

Conforme a lo mencionado en la sección 3.1 la capacidad requerida del sistema generador de alto voltaje AC corresponde a un sistema de 500 kV/1500 kVA.

El equipo de prueba ofertado incluye los siguientes componentes.

- Filtros armónicos de línea
- Reactores de compensación
- Transformador de prueba
- Capacitor de acoplamiento
- Sistemas de control y medición
- Sistemas de aterrizaje y sistemas de conexión de elementos

Las ofertas proporcionadas por los proveedores detallan las dimensiones de un transformador de 750 kV/ 2100 kVA el cual posee características similares al sistema solicitado para el laboratorio de alto voltaje y se aprecia en la Figura 3.10.

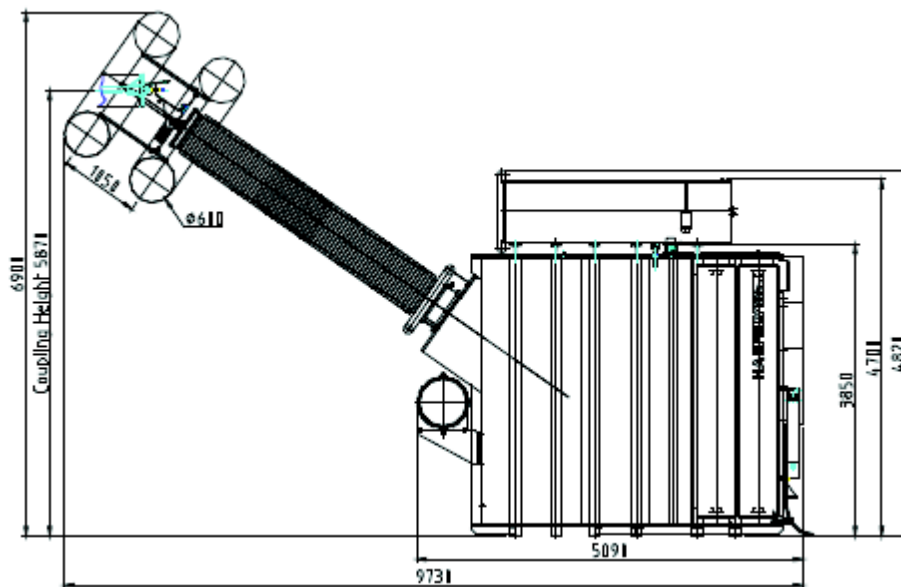


Figura 3. 10. Transformador tipo Tanque de 750 kV/2100 kVA. [14]

Note que este tipo de sistemas además de ser muy fácil de manipular posee desventajas que tienen que ver con el control de resonancias no deseadas las cuales producen distorsiones de ondas.

3.2.3 OPCIÓN DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ALTO VOLTAJE CONTINUO

Este tipo de sistemas son utilizados para estudios de aislamiento eléctrico de cables de gran longitud ya que al realizar ensayos con DC se omite el efecto capacitivo. [27]

De acuerdo a lo especificado en las normas ASTM para pruebas dieléctricas en equipos de protección personal, los EPP's pueden ser probados con voltaje DC. En función a este detalle se decidió adquirir un HIPOT DC para uso exclusivo de ensayos sobre elementos como: guantes, mangas, mantas, cobertores, calzado, protector dieléctrico para cabeza, entre otros, dejando reservado la utilización del sistema resonante solo para elementos que usen corriente AC.

Considerando que con el HIPOT se llevará a cabo ensayos sobre elementos que superan los 100 kV, cómo es el caso de las pértigas, se recurrió a catálogos de algunas casas comerciales para establecer los valores estándar existentes, tamaños y posibles costos; de cuyo análisis se tomó la decisión de optar por un sistema que pueda generar 240 kV D.C. de salida.

En la Figura 3.11 se aprecia un equipo HIPOT.



Figura 3.11. Sistema HIPOT. [27]

Las especificaciones técnicas del equipo HIPOT se presentan continuación. En la Figura 3.12 se aprecian las dimensiones de los módulos del sistema:

Voltaje y frecuencia de entrada 120V/60Hz

Número de módulos	4
Voltaje de salida (kV DC)	240
Corriente de salida (mA)	4.1
Ciclo de trabajo	1 Hr On 1 Hr Off
Medición	± 2% de precisión a escala completa
Peso neto por módulo	26 kg

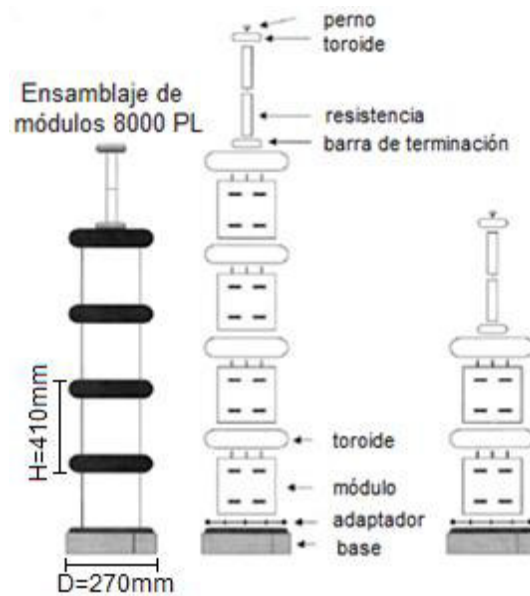


Figura 3. 12. Disposición modular [27]

3.2.4 OPCIÓN DEL SISTEMA DE IMPULSOS DE VOLTAJE

Conforme a lo determinado en la Sección 3.1 en base a la norma IEC 60071-1, la Tabla 1.3 muestra que para un voltaje de 138 kV el nivel de voltaje de prueba de impulso tipo rayo requerido es 650 kV que con los factores de corrección atmosférica y el derating se determinó que el voltaje de impulso mínimo requerido es de 1200 kV pico.

A continuación se detalla el sistema de generación de voltajes de impulso con capacidad de generar los voltajes de impulso completo (lightning impulse ó LI) y de onda recortada (lightning impulse chopped ó LIC) además de voltajes de impulso de maniobra (switching impulse ó SI) conforme la norma IEC 60060-1. La Figura 3.13 indica el sistema junto con los componentes básicos de la Figura 3.14, cabe mencionar que el sistema de Impulso

ofertado es adecuado para obtener ondas de LI, SI y de Corriente de Impulso por lo que no se requiere un equipo adicional de pruebas de corriente de impulso separado.



Figura 3. 13. Disposición del sistema de impulsos [28]

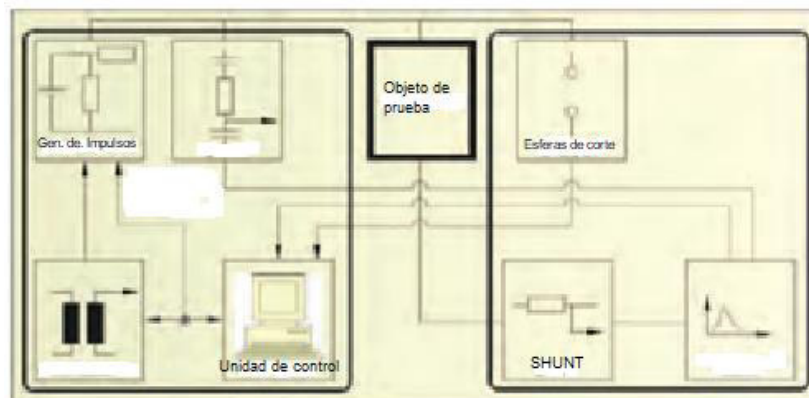


Figura 3. 14. Diagrama de sistema generador de impulsos con sus componentes básicos [28]

El sistema está conformado por los siguientes componentes: [28]

Generador de Impulsos

Los generadores de voltaje de impulso se componen por condensadores de impulso, conectados a esferas de encendido y resistencias que se encargan de dar la forma al frente y cola de la señal de impulso. El número de etapas de condensadores dependerá

del voltaje de salida que se desee, cada etapa de condensadores puede generar hasta 200 kV.

Divisor de voltaje de impulso

Se encarga de medir los voltajes de impulso. Estos divisores de voltaje también se utilizan para cargar el generador de voltaje de impulso. Los divisores están compuestos por una estructura capacitiva modular no inductiva de alta tasa de aumento de impulsos, cuyo esquema se presenta en la Figura 3.15.



Figura 3. 15. Divisor de voltaje de impulso [28]

Esferas de corte

Estas esferas se encargan de recortar las ondas de voltaje de impulso, de este modo se pueden generar las ondas chopped waves, que forman parte del proceso de ensayo con ondas de voltaje de impulso. Además sirven simultáneamente como condensadores de carga para el generador de impulsos y no distorsionan la forma de onda hasta el instante del corte, su apariencia física se aprecia en la Figura 3.16.



Figura 3. 16. Esfera de corte múltiple [28]

Shunt de corriente de impulso.

Este dispositivo se utiliza para medir la corriente de impulso que fluye a través del objeto durante el ensayo, su apariencia física se observa en la Figura 3.17.



Figura 3. 17. Shunt de corriente de impulso [28]

El circuito de Glaninger:

Para probar cargas de baja inductancia en devanados de bajo voltaje de los transformadores se puede añadir un circuito Glaninger adicional a la salida del generador de impulsos, su esquema se aprecia en la Figura 3.18.

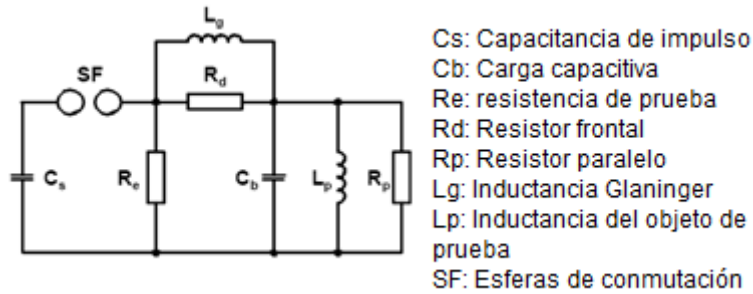


Figura 3.18. Diagrama del circuito Glaninger. [29]

Dispositivo de compensación:

Un dispositivo de compensación de sobreimpulso permite probar cargas capacitivas más altas mientras se mantiene el sobreimpulso en los límites de acuerdo con las formas de impulsos estándar.

Sistema de Análisis de Impulsos:

El software de análisis de resultados proporcionado por cada fabricante permitirá determinar detalladamente la información sobre el objeto de prueba de forma más rápida y precisa, la Figura 3.19 esquematiza un sistema de análisis de impulsos.



Figura 3. 19. Sistema de Análisis de Impulsos [28]

Sistema de Control de Impulsos

La unidad de control que se aprecia en la Figura 3.20 se comunica con el operador a través de un ordenador de fácil uso, funciona de forma totalmente automática, semiautomática o de modo manual.



Figura 3. 20. Sistema de Control de Impulsos [28]

Sistema generador de voltaje de impulso.

El sistema generador de voltajes de impulso posee las siguientes características las mismas que pueden ser encontradas con más detalles en el Anexo 2.

6 Condensadores de etapa con capacidad para 200 kV, 1 μ F, 20 kJ

3 Resistencias delanteras y 3 resistencias traseras por cada etapa; para generar formas de onda de impulso de relámpago de 1,2 μ S + 30%, 50 μ S + 20% según IEC 60060, 60076-3, IEC60099-4

2 Resistencias delanteras y 2 resistencias traseras por cada etapa; para generar formas de onda de impulso tipo maniobra de 250 μ S + 30%, 2500 μ S + 20% según IEC60060

6 Inductores para generar una onda de corriente de impulso de 8/20 μ S según IEC60099

5 Resistencias de carga

Carcasa cerrada con soplador de aire caliente para los huecos de la esfera para minimizar el efecto ambiental

Amplificador disparador de impulsos

Mecanismo motorizado para el movimiento de la esfera controlado remotamente desde la unidad de control.

La Figura 3.21 muestra las dimensiones de un generador de impulsos de voltaje.

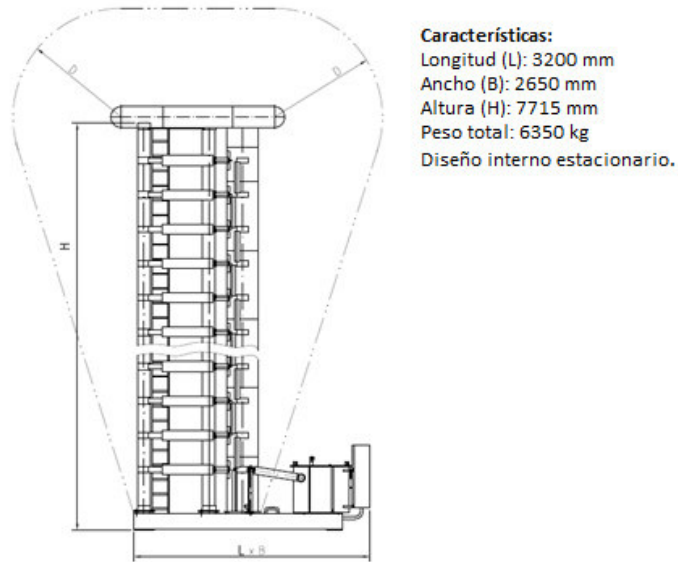


Figura 3. 21. Generador de impulsos de voltaje [30]

Adicionalmente el generador requiere de una unidad de carga para los capacitores, mediante un voltaje continuo rectificado. Con las características mostradas en la Figura 3.22.

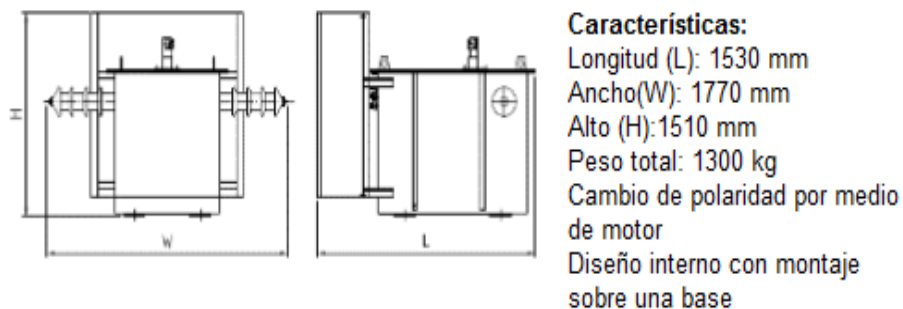


Figura 3. 22. Unidad de carga de capacitores del generador de impulsos de voltaje [30]

Más detalles del sistema se pueden apreciar en el Anexo 1.

3.2.5 OPCIÓN DEL SISTEMA DE IMPULSOS DE CORRIENTE

Dentro de los ensayos que el laboratorio debe tener la capacidad de realizar se encuentran las pruebas en apartarrayos los cuales requieren de un generador de impulsos de corriente. La norma IEEE C 62.11 “Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1 kV)”. Detalla los procedimientos para realizar las pruebas en apartarrayos.

Como se mencionó en la Sección 3.2.4 los sistemas de generación de impulso de voltaje hoy por hoy son capaces de generar también impulsos de corriente, lo cual evita adquirir un sistema generador de impulsos de corriente adicional que también repercute en los costos de inversión inicial.

3.2.6 OPCIÓN DEL SISTEMA DE PRUEBA DE TRANSFORMADORES

De acuerdo con el levantamiento realizado en la sección 3.1 en todo el sistema de la EEQ existen transformadores cuyas capacidades varían desde los 5 kVA hasta los 40 MVA, por ende el sistema de prueba debe estar en capacidad de realizar ensayos incluso en los transformadores de mayor capacidad de la EEQ.

El sistema de pruebas de transformadores junto con las fuentes generación de alto voltaje alterno debe poder variar la frecuencia a fin de poder realizar todos los ensayos de rutina mencionan en la sección 3.3.1, para conseguir variar la frecuencia cuando se requieran ensayos de voltaje inducido, se requiere de un convertidor estático de frecuencia SFC, cuya función es precisamente la de permitir que el sistema varíe la frecuencia en caso de ser necesario.

La Figura 3.23 esquematiza el sistema de prueba de transformadores, mientras que en la Figura 3.24 se muestra el circuito equivalente de un sistema de pruebas de transformador típico.

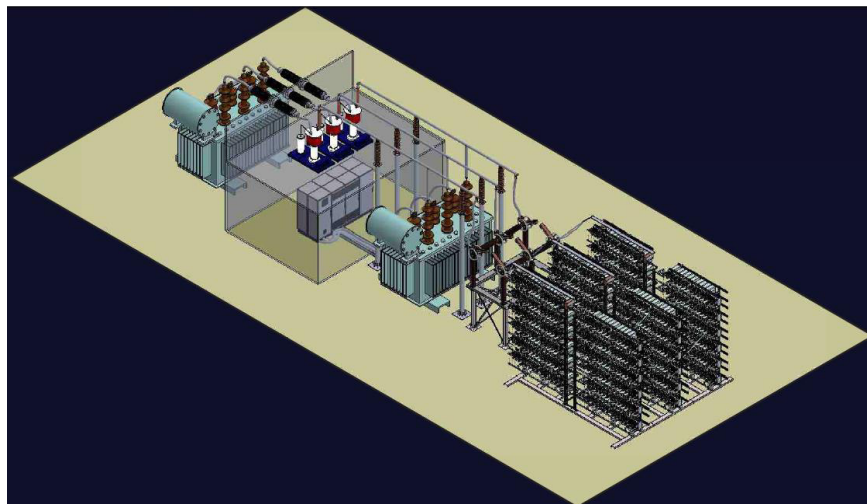


Figura 3. 23. Sistema de prueba de transformadores. [31]

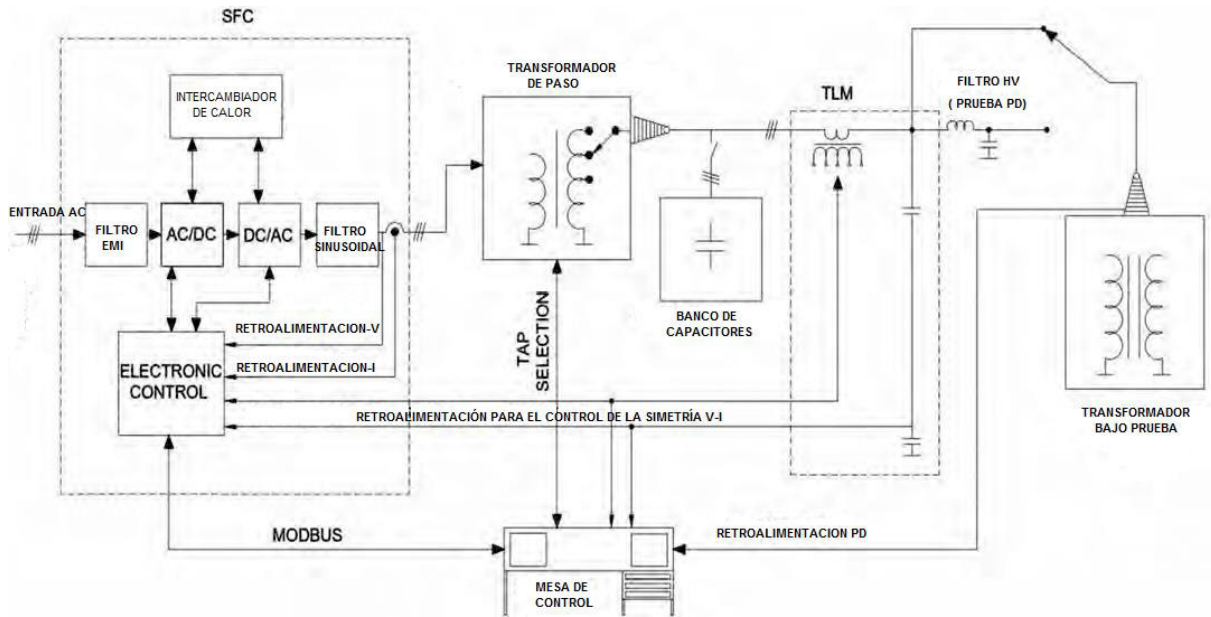


Figura 3. 24. Disposición modular de los componentes esenciales del sistema de pruebas de transformadores [31]

El sistema de prueba de transformadores cuenta con el siguiente equipamiento: [31]

Convertidor estático de frecuencia (SFC).

Transformador elevador trifásico.

Banco de condensadores con interruptor trifásico con opción de selección automática o manual.

Sistema de medición de pérdidas.

Detector de descargas parciales multicanal.

Convertidor estático de frecuencia SFC.

Se recomienda incluir este dispositivo ya que es útil para realizar pruebas donde se necesite variar la frecuencia, en el caso específico de transformadores es especialmente útil para llevar a cabo las pruebas de voltaje inducido, la Figura 3.25 muestra el SFC del sistema de prueba para transformadores.



Figura 3. 25. Convertidor estático de frecuencia. [31]

Transformador trifásico elevador

Este transformador trifásico está especialmente diseñado para trabajar en un rango de frecuencias que va desde los 40 Hz hasta los 400 Hz, en la Figura 3.26 se aprecia el transformador elevador del sistema de prueba para transformadores.



Figura 3. 26. Transformador de prueba de paso trifásico [31]

Banco de capacitores

El banco de condensadores de compensación de energía reactiva que se aprecia en la Figura 3.27 está diseñado para ser usado en el lado de alto voltaje del elevador en conexiones delta y estrella y pueden ser conectados o desconectados mediante la

maniobra de aisladores trifásicos. La selección de los valores reactivos (MVar) pueden ser seleccionados de forma manual o automática.



Figura 3. 27. Banco de condensadores de compensación de energía [31]

Sistema de medición de pérdidas.

El sistema de medición de pérdidas es indispensable en procesos de verificación de calidad, esto debido a los altos índices que pérdidas que se generan durante la realización de los ensayos. El sistema está diseñado para realizar mediciones de alta precisión en transformadores de distribución y potencia.

Características técnicas del sistema de prueba de transformadores.

Ciclo de trabajo	Ciclo de trabajo continuo
Voltaje de alimentación	Trifásico, 220 V
Rango de potencia	20 kVA – 40 MVA
Frecuencia de salida	40 Hz - 400 Hz
Sistema de refrigeración	ONAN
THD	<3%
Temperatura de trabajo	5-40 °C ambiente

Para más detalles acerca del sistema de prueba de transformadores dirigirse al Anexo 1 y 2.

3.3. ADAPTACIÓN DE NORMAS

En esta sección haciendo uso de la Tabla 3.1 que corresponde al levantamiento de información, se ha sintetizado los ensayos aplicables a dichos elementos de acuerdo a las normas nacionales e internacionales.

El objetivo de esta sección es dar a conocer al lector el procedimiento, criterio de aceptación, entre otros detalles, que se deben tener en cuenta para la ejecución de los ensayos de rutina que el laboratorio de alto voltaje estará en la capacidad de llevar a cabo.

Es importante mencionar que las tablas que se presentan en este capítulo no se encuentran corregidas por los factores de altitud o condiciones atmosféricas.

3.3.1 ENSAYO EN TRANSFORMADORES

3.3.1.1 Ensayo de voltaje inducido

El ensayo de voltaje inducido es un ensayo de rutina, en otras palabras, éste debe aplicarse a cada uno de los transformadores que se fabriquen o se reparen. El objetivo de esta prueba es verificar las condiciones del estado del aislamiento interno del transformador, entre espiras y capas de un mismo devanado. [12]

El voltaje de prueba corresponde al doble del voltaje nominal del transformador, la prueba debe iniciarse con una tercera parte del valor de prueba, posteriormente este valor se incrementará gradualmente hasta el valor final del voltaje de prueba, al final de la prueba el voltaje se reducirá rápidamente hasta llegar a un tercio del valor o menos, antes de apagarse. La Tabla 3.3 indica los tiempos de duración establecidos para el ensayo a una frecuencia seleccionada. [12] [32]

Tabla 3.3. Duración de la prueba de voltaje inducido

Frecuencia [Hz]	Duración [s]
120	60
180	40

240	30
360	20
400	18

Criterio de aceptación

La prueba se considera exitosa si no ocurren fallas en aislamiento durante la prueba. [7]

3.3.1.2 Ensayo de voltaje aplicado

El objetivo de esta prueba es verificar que el material aislante del transformador tenga la capacidad de soportar esfuerzos eléctricos a los cuales se verá sometido durante su operación. [12]

La prueba debe ser llevada a cabo con la aplicación de una señal sinusoidal de acuerdo a la norma IEEE Std 4, el voltaje de prueba deberá ser aplicado por 60 segundos entre todos los terminales accesibles de los devanados bajo prueba conectados entre sí y todos los terminales accesibles de los devanados restantes, núcleo, tanque o carcasa del transformador, conectado a tierra.

La prueba empezará con un voltaje no superior a un tercio del valor del voltaje de prueba especificado, el voltaje se incrementará entonces hasta llegar al valor de prueba tan rápido como sea consistente con la medición. Al final de la prueba, el voltaje se disminuirá rápidamente a un valor menor a un tercio del valor de prueba, antes de apagarse. Las Tablas 3.4 y 3.5 exponen los valores de voltajes de prueba para los ensayos de voltaje aplicado para las clases I y II respectivamente.

Criterio de aceptación

La prueba se considera exitosa si no ocurren fallas en el aislamiento durante la prueba

Tabla 3. 4. Niveles de aislamiento dieléctrico para transformadores de distribución y potencia clase I, voltajes en kV [32]

Voltaje máximo del sistema (kV rms)	Voltaje nominal del sistema ^{a,g} (kV rms)	Prueba de voltaje aplicado ^l (kV rms)			Prueba de voltaje inducido ^{b,f} (fase a tierra) (kV rms)	Bobinado line-fin BIL ^{c,r} (kV cresta)			Neutro BIL ^{q,r,n} (kV cresta)	
		Delta o Y completamente aislado	Y aterrizado	Impedancia en estrella aterrizada o estrella aterrizada para el BIL mas alto		Mínimo	Alternativas	Estrella aterrizada	Impedancia en estrella aterrizada o estrella aterrizada para el BIL mas alto	
Col 1	Col2	Col3	Col4	Col5	Col6	Col7	Col8	Col9	Col10	Col11
Transformadores de Distribución										
1,5	1,2 ^e	10	-	10	1,4	30			30	30
3,5	2,5 ^e	15	-	15	2,9	45			45	45
6,9	5 ^e	19	-	19	5,8	60			60	60
11	8,7 ^e	26	-	26	10	75			75	75
17	15	34	-	34	17	95	110		75	75
26	25	40	-	40	29	125	150		75	95
36	34,5	50	-	50	40	125	150	200	75	125
48	46	95	-	70	53	200	250		95	150
73	69	140	-	95	80	250	350		95	200
Clase I Transformadores de potencia										
1,5	1,2	10	10	10	1,4	30	45		45	45
3,5	2,5	15	15	15	2,9	45	60		60	60
6,9	5	19	19	19	5,8	60	75		75	75
11	8,7	26	26	26	10	75	95		95	95

17	15	34	26	34	17	95	110		95	110
26	25	50	26	40	29	150			95	125
36	34,5	70	26	50	40	200			95	150
48	46	95	34	70	53	200	250		110	200
73	69	140	34	95	80	250	350		110	250

^a Para un voltaje nominal del sistema mayor que el voltaje máximo del sistema, utilice la siguiente clase de voltaje más alta para los niveles de prueba del voltaje aplicada.

^b Las pruebas de voltaje inducido se realizarán a $2,0 \times$ voltaje nominal del sistema durante 7200 ciclos.

^c Los BIL en negrita son los niveles estándar más utilizados.

^d Los transformadores conectados en Y-Y que utilizan un neutro común sólidamente conectado a tierra pueden utilizar el neutro BIL seleccionado de acuerdo con el devanado de bajo voltaje de clasificación.

^e Los transformadores de distribución y potencia monofásicos y los transformadores de regulación para voltajes nominales entre los terminales de 8,7 kV e inferiores son diseñadas tanto para la conexión en Y como para la Δ , y están aisladas para los voltajes de prueba correspondientes a la conexión en Y, de modo que una sola línea de los transformadores sirven para las aplicaciones Y y Δ . Por lo tanto, los voltajes de prueba de estos transformadores, cuando están conectados y en funcionamiento, son superiores a necesario para su voltaje nominal.

^f Para devanados en serie en transformadores, tales como transformadores de regulación, los valores de prueba a tierra serán determinados por el BIL de la serie bobinas en lugar de por el voltaje nominal entre los terminales.

^g Los valores indicados como voltaje nominal del sistema en algunos casos (especialmente los voltajes de 34,5 kV e inferiores) son aplicables a otros voltajes menores de aproximadamente el mismo valor. Por ejemplo, 15 kV abarca voltajes nominales del sistema de 14 440 V, 13 800 V, 13 200 V, 13 090 V, 12 600 V, 12 470 V, 12 000 V, 11 950 V.

^h La NBI neutral nunca excederá la NBI de bobina.

Tabla 3. 5. Niveles de aislamiento eléctrico para todos los devanados de los transformadores de potencia de clase II, voltajes en kV [32]

Voltaje máximo del sistema (kV rms)	Voltaje nominal del sistema ^a (kV rms)	Prueba de voltaje aplicado ^g (kV rms)			Prueba de voltaje inducido ^{b,c} (fase a tierra) (kV rms)		Bobinado línea-fin BIL ^d (kV cresta)			Neutral BIL (kV crest) ^{e,g}		
		Delta y Y completamente aislado	Y aterrizada	Impedancia en estrella aterrizada o estrella aterrizada para el BIL mas alto	Ciclo 7200 mejorado	Una hora	Mínimo	Alternativas		Y aterrizada	Impedancia en estrella aterrizada o estrella aterrizada para el BIL mas alto	
Col1	Col2	Col3	Col4	Col5	Col6	Col7	Col8	Col9	Col10	Col11	Col12	Col13
17	15	34	34	34	16	14	110				110	110
26	25	50	34	40	26	23	150				110	125
36	34,5	70	34	50	36	32	200				110	150
48	46	95	34	70	48	42	200	250			110	200
73	69	140	34	95	72	63	250	350			110	250
121	115	173	34	95	120	105	350	450	550		110	250
145	138	207	34	95	145	125	450	550	650		110	250
169	161	242	34	140	170	145	550	650	750	825	110	350
242	230	345	34	140	240	210	650	750	825	900	110	350
362	345	518	34	140	360	315	900	1050	1175		110	350

550	500	N/A	34	140	550	475	1425	1550	1675		110	350
765	735	N/A	34	140	880	750	1950	2050			110	350
800	765	N/A	34	140	885	795	1950	2050			110	350

^a Para un voltaje nominal del sistema mayor que el voltaje máximo del sistema, utilice la siguiente clase de voltaje más alto para los niveles de prueba aplicados.

^b Las pruebas de voltaje inducido se realizarán a $1,58 \times$ voltaje nominal del sistema durante una hora y a $1,80 \times$ voltaje nominal del sistema para la prueba de 7200 ciclos mejorados.

^c La columna 6 y la columna 7 proporcionan niveles de prueba de fase a tierra que normalmente serían aplicables a los devanados en estrella. Cuando el nivel de voltaje de prueba se va a medir de fase a fase (como es normalmente el caso de los devanados en triángulo), los niveles en la columna 6 y la columna 7 deben multiplicarse por 1.732 para obtener el nivel de prueba de voltaje inducido de fase a fase requerido.

^d Los BIL en negrita son los niveles estándar más utilizados.

^e Los transformadores conectados en Y-Y que utilizan un neutro común sólidamente conectado a tierra pueden utilizar un BIL de neutro seleccionado de acuerdo con la capacidad del devanado de bajo voltaje.

^f Para voltajes de sistema nominales de 500 kV a 765 kV, los niveles de prueba de voltaje inducida no siguen las reglas de la nota b, y la NBI de 1950 kV no es un nivel estándar del IEEE.

^g Si el usuario especifica un BIL diferente para el neutro que el indicado anteriormente, también se especificará el voltaje de prueba aplicada.

3.3.1.3 Ensayo de voltaje de impulso tipo maniobra

La prueba consistirá en un transitorio de voltaje entre el 50% y 70% del valor de prueba especificado seguida de dos transitorios completos al valor de prueba especificado. [12]

La onda de voltaje de impulso debe tener un valor cresta de acuerdo con el nivel de aislamiento asignado, sujeta a una tolerancia de $\pm 3\%$, y debe exceder el 90% del valor de cresta por al menos $200\mu\text{S}$. El tiempo de cresta debe ser superior a los $100\mu\text{S}$, y el tiempo hasta el primer voltaje cero en la cola de la onda debe ser al menos $1000\mu\text{S}$. [12]

3.3.1.4 Ensayo de voltaje de impulso tipo rayo

La prueba de impulso tipo rayo, debe consistir y ser aplicada en el siguiente orden: una onda de voltaje reducida, dos ondas recortadas, y una onda completa. El intervalo de tiempo entre la aplicación entre la señal recortada y la señal de onda completa debe ser minimizado sin ningún retraso intencional, no menos de 15 segundos y no más de 5 minutos, esto se realiza con el fin de evitar una recuperación de la rigidez dieléctrica del material. [12]

Onda completa de prueba

La forma de onda aplicada debe crecer hasta su valor de cresta en $1,2\mu\text{S} \pm 30\%$, para luego decaer hasta la mitad de su valor en $50\mu\text{S} \pm 20\%$. [12]

La tolerancia en el valor de cresta de la onda de voltaje de prueba debe estar entre $\pm 3\%$

Onda recortada

Una onda recortada es básicamente una onda de completa de tipo rayo, con la diferencia de que la onda de voltaje se recortara en el tiempo requerido para el flashover (tiempo para el recorte) sin tardar más allá de los $6\mu\text{S}$ después del origen. [12]

Onda de voltaje reducida

Una onda de voltaje reducida es idéntica a una onda completa de prueba, con la excepción de que su valor está entre el 50% y el 70% del valor de la onda completa. [12]

Polaridad de las ondas

Para los transformadores sumergidos en aceite mineral, las ondas de prueba son normalmente de polaridad negativa para reducir el riesgo en el circuito de prueba. La

Tabla 3.6 presenta los valores de voltaje cresta de prueba para cada tipo de onda en función del voltaje más alto del equipo. [12]

Tabla 3. 6. Voltajes de prueba para pruebas de impulso de voltaje. [13]

Voltaje más alto de operación del equipo (Um) kV	Onda completa de impulso tipo rayo (LI) kV	Onda recortada de impulso (LIC) kV	Impulso de tipo maniobra (SI) kV
<1,1	-		-
3,6	20	22	-
	40	44	-
7,2	60	66	-
	75 ^a	83 ^a	-
12	75	83	-
	95	105	-
	110 ^a	121 ^a	-
17,5	95	105	-
	125 ^a	138 ^a	-
24	125	138	-
	145	160	-
	150 ^a	165 ^a	-
36	170	187	-
	200 ^a	220 ^a	-
52	250	275	-
72,5	325	358	-
	350 ^a	385 ^a	-
100	450	495	375 ^a
123	550	605	460 ^a
145	550	605	460 ^a
	650	715	540 ^a
170	650	715	540 ^a
	750	825	620 ^a
245	850	935	700 ^a
	950	1045	750 ^a
	1050	1155	850 ^a

300	950	1045	750
	1050	1155	850
362	1050	1155	850
	1175	1290	950
420	1175	1290	950
	1300	1430	1050
	1425	1570	1175
550	1300	1430	1050
	1425	1570	1175
	1550	1705	1300 ^a
	1675 ^a	1845 ^a	1390 ^a
800	1800	1980	1425
	1950	2145	1550
	2050 ^a	2255 ^a	1700 ^a
	2100	2310	1675 ^a
1100	1950	2145	1425
	2250	2475	1800
1200	2250	2475	1800

^a Estos valores no se indican en la norma IEC 60071-1:2011 para el valor particular de (Um), pero se incluyen porque representan una práctica común en algunas partes del mundo o para algunos niveles de impulso tipo maniobra, porque representan un valor coordinado para un valor particular de nivel de impulso de rayo.

3.3.1.5 Ensayo de relación de transformación

La relación de espiras de un transformador es la relación entre el número de espiras en el devanado de alto voltaje y el número de espiras en el devanado de bajo voltaje.

Cuando el transformador tenga tomas, la relación de vueltas se determinará para todas las tomas y para el devanado completo.

El ensayo de relación se realizará a un voltaje nominal o inferior y a una frecuencia nominal o superior.

En el caso de los transformadores trifásicos, cuando cada fase es independiente y accesible, se puede usar potencia monofásica, aunque, cuando sea conveniente, se puede utilizar energía trifásica.

Los métodos para realizar este procedimiento son detallados en la norma IEEE Std C57.90.

Método del TTR

Se hace uso generalmente de equipos capaces de medir la relación de transformación TTRs, los cuales se encuentran específicamente diseñados para llevar a cabo este tipo de pruebas; el equipo de prueba de relación de transformación hace la medición independientemente de la configuración, y por lo general emplea soluciones de conmutación internas para realizar el proceso de medición. [33]

3.3.1.6 Ensayo de factor de potencia

El factor de potencia de aislamiento es la relación entre la potencia disipada en el aislamiento en vatios y el producto del voltaje y la corriente efectiva en voltamperios cuando se prueban bajo un voltaje sinusoidal y bajo condiciones prescritas.

Los métodos descritos en la norma IEEE Std C57.12.90 son aplicables a los transformadores de distribución y potencia que están inmersos en un líquido aislante.

El factor de potencia de aislamiento puede medirse mediante circuitos de puente especiales o mediante el método voltampere-watt.

La precisión de la medición debe estar dentro de $\pm 0.25\%$ del factor de potencia de aislamiento y la medición debe hacerse a una frecuencia de 60 Hz o cerca de ella.

El valor de voltaje que se aplicará para medir el factor de potencia, no deberá exceder la mitad del voltaje de prueba de baja frecuencia dado en las Tablas 3.4 y 3.5 o 10 000 V, elegir el valor de voltaje que sea menor. [12]

3.3.2 ENSAYO DE INTERRUPTORES DE POTENCIA

El interruptor de potencia es un dispositivo electromecánico cuya función principal es la de conectar y desconectar circuitos eléctricos bajo condiciones normales o de falla, además pueden realizar o efectuar re-cierres, cuando sea una función que se requiera en el sistema. [34]

3.3.2.1 Ensayo de voltaje sostenido

Son realizados para verificar la capacidad que tiene el interruptor de soportar el voltaje sostenido con magnitudes y formas de onda aplicadas bajo condiciones de pruebas especificadas, los valores de prueba se encuentran expuestos en la Tabla 3.7. [34]

Ensayo de voltaje sostenido a frecuencia industrial en seco

El voltaje de ensayo será el voltaje soportada en seco a la frecuencia nominal de la red y se aplicará al objeto durante 1 minuto sin que se produzcan descargas eléctricas ni daños en el material aislante. [34]

Ensayo de voltaje sostenido a frecuencia industrial en húmedo

El voltaje de ensayo será el voltaje soportado a frecuencia nominal de la red y se aplicará al objeto durante 10 s sin que exista flameo o daño al material aislante. [34]

Ensayo de voltaje sostenido a frecuencia industrial bajo rocío de agua

El voltaje de ensayo será el voltaje sostenido a frecuencia industrial nominal y se aplicará al objeto durante 10 s sin que exista flameo o daño al material aislante. [34]

- Forma de aplicación del voltaje de prueba en frecuencia industrial para húmedo y seco.

El 75% del valor del voltaje de prueba a frecuencia industrial en seco y húmedo debe ser aplicado en un solo paso y se elevará gradualmente al valor requerido en no menos de 5 s ni más de 30 s. [34]

- Forma de aplicación del voltaje a frecuencia industrial para el caso de rocío de agua

El voltaje deberá elevarse rápidamente hasta alcanzar el voltaje de prueba nominal en un plazo de no más de 20 s. [34]

3.3.2.2 Ensayo de voltaje soportado por impulso tipo rayo en seco

Prueba de voltaje de onda completa

El voltaje de prueba nominal debe ser 1.2/50 μ s de onda completa de impulso tipo rayo en seco. Los valores nominales preferidos para todos los interruptores se indican en la columna 2 de la Tabla 3.7 y en la Tabla 3.8 para los interruptores de uso exterior o en la Tabla 3.9 para los interruptores de uso interior. [34]

Tabla 3.7. Valores de voltaje aplicado a interruptores para uso exterior ruptura en aire tipo subestación. [34]

Voltaje máximo nominal	Voltaje sostenido nominal		Voltaje corona y RIV	
	Impulso tipo rayo	Frecuencia Industrial (kv rms)	Voltaje de prueba	Límite de RIV

(kv rms)	(kv pico)	Seco 1 min	Húmedo 10 s	(kv rms)	(μ V @ 1mhz)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
8.3	95	38	30	--	--
15.5	110	50	45	--	--
27	150	70	60	--	--
38	200	95	80	--	--
48.3	250	120	100	--	--
72.5	250	120	100	--	--
	350*	175	145	--	--
123	350	175	145	78	500
	450	235	190	78	500
	550*	280	230	78	500
145	350	175	145	92	500
	450	235	190	92	500
	550	280	230	92	500
	650*	335	275	92	500
170	450	235	190	108	500
	550	280	230	108	500
	650	335	275	108	500
	750*	385	315	108	500
245	550	280	230	156	500
	650	335	275	156	500
	750	385	315	156	500
	900*	465	385	156	500
	1050	545	455	156	500
362	1050	545	455	230	500
	1300*	610	525	230	500
550	1550	710	620	349	500
	1800*	810	710	349	500
800	2050	940	830	508	750

Tabla 3. 8. Valores de voltaje típico para interruptores de ruptura en aire, exteriores de clase de distribución. [34]

Voltaje máximo nominal	Voltaje sostenido nominal	
	Impulso tipo rayo	Frecuencia Industrial (kv rms)

(kv rms)	(kv pico)	Seco 1 min	Húmedo 10 s
(1)	(2)	(3)	(4)
8.3	75	28	24
15.5	95	38	30
27	125	60	50
38	150	70	60

Tabla 3.9. Valores de típicos de voltaje para los interruptores de ruptura en aire, tipo interior. [34]

Voltaje máximo nominal (kv rms)	Voltaje sostenido nominal		
	Impulso tipo rayo (kv pico)	Frecuencia Industrial (kv rms)	
		Rocío 10 s	Seco 1 min
(1)	(2)	(3)	(4)
4.8	60	15	19
8.3	75	24	28
15.5	95	26	38
15.5	110	30	50
27	125	40	60
38	150	--	80

Criterio de aceptación

El voltaje de impulso se aplicará tres veces consecutivas; y si no se produce ninguna descarga disruptiva, se considerará que el interruptor ha superado la prueba. Si dos o tres de las ondas de impulso aplicadas causan descargas, se considerará que el disyuntor no ha superado el ensayo. Si sólo uno de los tres impulsos aplicados causa una descarga, se aplicarán nueve impulsos consecutivos adicionales. Si no se produce una descarga disruptiva en ninguno de estos nueve impulsos adicionales, se considerará que el conmutador ha superado la prueba. [34]

3.3.2.3 Ensayo a frecuencia industrial e impulso tipo rayo con apertura de voltaje sostenido

El propósito de la prueba es verificar que un interruptor abierto es capaz de soportar los voltajes dieléctricos nominales entre las partes vivas que forman la(s) separación(es) abierta(s).

La finalización exitosa de la prueba no necesariamente garantiza que un interruptor abierto siempre descargará el voltaje de prueba hacia tierra en lugar de atravesar el interruptor.

La finalización exitosa de esta prueba no garantiza que el dispositivo pase otras pruebas. [34]

3.3.2.3.1 *Requisitos para realizar los ensayos*

Interruptores con capacidad nominal superior a 48,3 kV

La base del interruptor debe estar conectada a tierra o montada sobre una estructura de soporte metálica conectada a tierra. Si el interruptor está diseñado para utilizar aisladores tipo pin y pasador, se añadirán una o más unidades aislantes, idénticas a las que soportan las partes portadoras de corriente a cada uno de los soportes o columnas del aislador. [34]

Con el interruptor en posición totalmente abierta, se aplicarán las siguientes series de ensayos:

a) Se aplicará un voltaje de prueba del 10% superior al voltaje soportado nominal de frecuencia industrial durante 1 minuto a cada uno de los terminales de un solo polo con el otro terminal y la base del polo a tierra. [34]

b) Se debe aplicar un voltaje de prueba de un valor 10% más alto que el voltaje sostenido en seco de impulso tipo rayo nominal de 1.2/50 μ s. Se aplicará un total de seis impulsos a cada terminal del polo del interruptor, tres de polaridad positiva y tres de polaridad negativa con el otro terminal y la base del polo conectado a tierra. [34]

Interruptores con capacidad nominal de 48,3 kV e inferior

El interruptor se montará sobre una estructura metálica conectada a tierra, con el interruptor totalmente abierto, se aplicarán las siguientes pruebas. [34]

a) Se aplicará un voltaje de prueba 10% superior al voltaje soportado nominal de frecuencia industrial durante 1 minuto a cada terminal de un solo polo, con el otro terminal conectado a tierra y la base de la conexión a tierra sin conexión a tierra. [34]

b) Se aplicará un voltaje de prueba 10% superior al voltaje nominal tipo rayo en seco de 1,2/50 μ s. Se aplicará un total de seis impulsos a cada terminal del polo del interruptor,

tres de polaridad positiva y tres de polaridad negativa con el otro terminal conectado a tierra y la base del polo sin conexión a tierra. [34]

Criterios de aceptación

Se considerará que el interruptor ha superado la prueba si:

a) Durante la aplicación del voltaje sostenido a la frecuencia industrial, no se produce ninguna descarga eléctrica a través de la separación abierta o a tierra y no hay daños en el polo del interruptor. [34]

b) Durante las tres aplicaciones de cada polaridad del voltaje soportado nominal de los impulsos tipo rayo, no se producen descargas eléctricas a través del interruptor abierto. Si sólo se produce una descarga eléctrica a través del interruptor abierto durante los tres impulsos, se aplicarán nueve impulsos consecutivos adicionales. Si una descarga perturbadora no se produce en ninguno de estos nueve impulsos adicionales, se considerará que el interruptor ha pasado la prueba. Una descarga a tierra durante la serie de ensayos se considerará como un acontecimiento inoportuno, y se aplicará otro impulso. No se permitirá más de una descarga a tierra durante cada serie de ensayos. [34]

3.3.2.4 Ensayo de corriente pico y corriente simétrica de corta duración

Se realizan pruebas de corriente pico y de corta duración para confirmar la capacidad del interruptor para soportar las fuerzas magnéticas (corriente pico) y la carga térmica (duración de la corriente) impuestas por un cortocircuito. [34]

El interruptor deberá ser colocado en una estructura de soporte rígida en cualquier posición de montaje conveniente. [34]

Prueba de corriente pico nominal

La duración mínima de la prueba para verificar la capacidad de corriente de pico será de 10 ciclos.

La corriente instantánea nominal de un interruptor es la corriente total rms que un interruptor deberá llevar por lo menos durante un ciclo a la frecuencia nominal. La corriente será el valor eficaz, incluida la componente de DC, durante el máximo ciclo determinado a partir de la cresta de la onda de corriente, y el período de prueba será de al menos diez ciclos. [34]

Prueba de corriente de corta duración (simétrica)

La duración mínima de la prueba para verificar la clasificación de la corriente de corta duración (simétrica) será de 3 s. [34]

Criterio de aceptación

Se considerará que se cumplen los valores nominales de corriente pico admisible y de corta duración (simétrica) si no hay daños visibles en el interruptor después del ensayo. El interruptor debe resistir operaciones mecánicas repetidas (al menos 15 ciclos de apertura y cierre) sin sufrir daños acumulativos. Sin embargo, las pruebas pueden dar como resultado alguna evidencia visual de que por el interruptor ha pasado la corriente, como marcas leves en los contactos. Cuando esto ocurra, se demostrará que el interruptor puede transportar su corriente continua nominal sin exceder el aumento de temperatura permitido. [34]

3.3.2.5 Prueba de corriente de falla

Las pruebas de corriente que producen fallas se realizan para confirmar la capacidad del interruptor para cerrar y soportar una corriente de corta duración impulsada por un voltaje hasta su voltaje nominal máximo. [34]

La capacidad de corriente causante de averías de un interruptor se expresará en términos de

- a) Voltaje aplicado
- b) Corriente RMS simétrica
- c) Velocidad de funcionamiento

3.3.2.6 Prueba de tiempo de apertura y cierre

Se hacen pruebas de tiempo para determinar el tiempo necesario para que los disyuntores o sus componentes operen: abrir, cerrar, apertura y cierre y re-cierre. [35]

Las pruebas de tiempo pueden medirse por cualquiera de los siguientes métodos: [35]

- a) Oscilógrafo.
- b) Contador de ciclos o temporizador de intervalos para determinar el intervalo de tiempo en el que el disyuntor opera después de dada la orden activación o cierre.

Los oscilógrafos pueden producir registros a partir de los cuales se puede determinar la velocidad de operación.

Estas pruebas, cuando se utilizan como pruebas de producción, son un medio para comprobar el funcionamiento de un nuevo interruptor dentro del rango de velocidad seleccionado durante el desarrollo de este. Después de que un interruptor de circuito ha entrado en servicio, estas pruebas pueden utilizarse para determinar si sigue funcionando correctamente. [35]

Se deben registrar los tiempos de apertura de todos los interruptores. [35]

La interrupción deberá producirse hasta llegar a los tres ciclos o menos. [35]

3.3.2.7 Prueba de resistencia de contacto

Debido a circulación de corriente en equipos como interruptores, seccionadores y cambiadores de derivaciones en transformadores se genera un efecto natural de calentamiento que en el caso de equipos con contacto a presión o contactos deslizantes, el efecto de calentamiento se puede volver crítico debido a puntos de alta resistencia (falsos contactos), por esta razón la resistencia de estos contactos debe ser muy bajas (en el orden de $\mu\Omega$) logrando con esto evitar el calentamiento excesivo en los puntos de unión. [36]

Procedimiento

El equipo de prueba la resistencia de contactos consta de una fuente de alimentación que hace circular una corriente a través de los contactos bajo prueba y calcula la resistencia mediante la Ley de Ohm como se aprecia en la Figura 3. 28.

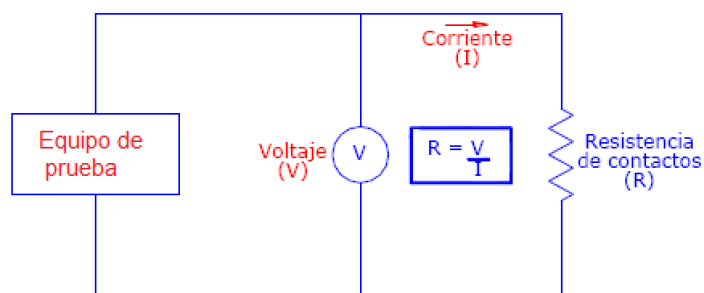


Figura 3. 28. Esquema de conexión del equipo probador de resistencia de contacto. [36]

Para el ensayo se debe considerar la resistencia óhmica de los cables de conexión debido a que los valores de las resistencias de los contactos son muy bajos. Para eliminar el

efecto de la resistencia de los cables se utiliza un circuito de 4 hilos como se aprecia en la Figura 3. 29, donde el circuito de corriente se cierra a través de los terminales C1 y C2 y el voltaje es medido a través del circuito independiente a través de los terminales P1 y P2. Logrado evitar la circulación de corriente por este circuito lo que elimina la influencia de la resistencia de los cables.

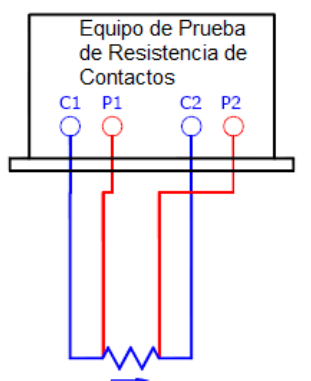


Figura 3. 29. Esquema de conexión al equipo de prueba para eliminación de resistencia de los cables de conexión. [36]

Criterio de aceptación

La Tabla 3. 10 detalla los valores de aceptación para las pruebas de resistencia de contacto en los diferentes equipos de potencia.

Tabla 3. 10. Valores de resistencia para ensayos de resistencia de contactos

Equipos	Resistencia de contacto (Valor máximo en $\mu\Omega$)
Interruptores de gran volumen de aceite	300
Interruptores de bajo volumen de aceite o SF6	100
Interruptores en vacío	100
Cuchillas de desconexión o seccionadores	100

3.3.3 ENSAYO DE APARTARRAYOS

3.3.3.1 Ensayo de compartición de corriente

En el caso de los apartarrayos formados por dos o más columnas paralelas de varistores, las mediciones son realizadas para confirmar que las columnas comparten la corriente de "descarga crítica" dentro de las tolerancias especificadas por el fabricante. [37]

En ausencia de una corriente especificada por el usuario, la corriente crítica de descarga será una de las siguientes: [37]

- a) La corriente de clasificación de sobrevoltaje de maniobra que se identifica en la Tabla 3. 11, para descargadores de estación y de clase intermedia con voltajes nominales de servicio de 54 kV o superiores.
- b) La corriente de clasificación de los impulsos de rayo que la Tabla 3.12 muestra a detalle, para todos los demás descargadores.

Las mediciones se realizarán en cada una de las secciones conectadas del apartarrayo. Una sección conectada es cualquier sección del apartarrayo en la que existen conexiones eléctricas comunes en la parte superior e inferior de las columnas en paralelo, sin conexión eléctrica común en un punto intermedio. Si las columnas de una sección conectada contienen cada una más de un varistor (es decir, las columnas paralelas consisten en un número de "capas" de varistores), se pueden realizar mediciones en cada una de las capas, que juntas forman la sección conectada.

Tabla 3. 11. Corriente de clasificación de impulsos de maniobra. [37]

Voltaje máximo del sistema (kV)	Cresta de clase estación (A)	Clase Intermedia (A)
3-150	500	500
151-325	1000	--
326-900	2000	--

Tabla 3.12. Corriente de clasificación de tipo impulso atmosférico. [37]

Calcificación de Pararrayos	Valor cresta del impulso (kA)
Estación (800 kV) ^a	20
Estación (550 kV) ^a	15

Estación (inferior a 550 kV) ^a	10
Intermedio	5
Distribución de gran resistencia	10
Distribución de funcionamiento normal	5
Distribución de servicio liviano	5
<i>a</i> = Máximo voltaje del sistema	

3.3.3.3.1 Mediciones de corriente

Las secciones o capas del varistor conectadas se someterán a una corriente de descarga de cualquier forma de onda conveniente que tenga una magnitud de 0,5 a 2 veces la corriente de descarga crítica. La diferencia de corrientes entre las columnas cualesquiera no superará el límite especificado por el fabricante. (Para las secciones con más de dos columnas, el ensayo podrá realizarse en parejas u otras subdivisiones de la sección número total de columnas, con los niveles actuales debidamente ajustados, a condición de que la división actual en todas ellas se pueda determinar los posibles pares de columnas). [37]

3.3.3.3.2 Mediciones de voltaje

Los voltajes de descarga se determinarán para cada columna de la sección conectada mediante la medición del voltaje de descarga en cada columna o en varistores individuales dentro de la columna. Los voltajes deben ser medidos para una corriente de descarga de cualquier forma de onda conveniente que tenga una magnitud de 0,5/N a 2/N veces el valor crítico de la corriente de descarga, donde N es el número de columnas de la sección conectada. Los voltajes de descarga más altas y más bajas de la columna, V_{max} y V_{min}, teniendo en cuenta la precisión de la medición, serán tales que: [37]

$$\frac{V_{max}}{V_{min}} \leq S^{\frac{1}{\alpha}} \quad (3.1)$$

Dónde:

S: es la relación máxima de corrientes especificada por el fabricante entre dos columnas cualquiera.

α : es el máximo exponente no lineal de los varistores en el rango de corriente especificado.

3.3.3.2 Ensayo de voltaje de descarga

El ensayo de voltaje de descarga se aplicará a elementos individuales, secciones o apartarrayos completos. El voltaje de descarga, no deberá superar el valor máximo ni ser inferior a los valores mínimos especificados por el fabricante. La forma de onda será de 4/10 a 8/20. Cuando no se utilice la forma de corriente o de onda determinada, el fabricante facilitará la información sobre el método de derivación utilizado para calcular los niveles de voltaje. [37]

3.3.3.3 Ensayo de descarga parcial

La prueba de descarga parcial se aplica a todos los apartarrayos excepto a los sumergidos en líquido. El ensayo se llevará a cabo sobre apartarrayos completos o unidades descargadoras. El voltaje de la frecuencia de la red deberá elevarse hasta el valor nominal del voltaje de ciclo de trabajo del apartarrayo o la unidad, que se mantendrá durante no menos de 2 s, y luego se reducirá a 1,05 veces el valor MCOV (voltaje máximo de funcionamiento continuo) del descargador o unidad. [37]

La descarga parcial se medirá con equipos y métodos generales que se ajusten a la norma IEEE C37.301. La PD medida no excederá de 10 pC.

3.3.3.4 Ensayo a frecuencia industrial

Se realizará en pararrayos o descargadores completamente montados. Para los descargadores de distribución, el voltaje a frecuencia industrial deberá ser de al menos 1,25 veces el valor MCOV. Para los descargadores intermedios y de estación, el voltaje de prueba deberá ser de al menos 1,20 veces el valor MCOV. Los valores medidos de corriente resistiva o de pérdida de potencia no superarán los límites especificados por el fabricante. EL voltaje debe aplicarse durante un mínimo de 1 s, pero no es necesario que exceda de 30 s. [37]

3.3.4 ENSAYOS EN AISLADORES

3.3.4.1 Ensayo de baja frecuencia de flashover en seco

Voltaje de flashover en seco.

El valor del voltaje de flashover en seco debe ser la media aritmética expresado en voltios rms, de no menos de 5 flashovers realizados consecuentemente. El período entre flashovers consecutivos no deberá ser menor de 15 segundos ni mayor de 5 minutos. [38]

Aplicación del voltaje

El voltaje de aplicación inicial debe ser rápidamente incrementado a aproximadamente el 75% del valor promedio de flashover esperado. La tasa de aumento del voltaje debe ser de tal modo que el tiempo para el flashover no sea menos de 5 segundos ni más de 30 segundos luego de que el valor del 75% es alcanzado. [38]

3.3.4.2 Ensayo de baja frecuencia de flashover en húmedo

El aislador bajo prueba deberá ser ubicado en un área provista de precipitaciones artificiales razonablemente distribuida producidas por un número adecuado de sprays, la Figura 3. 30, muestra los sprays para la generación de precipitaciones artificiales.

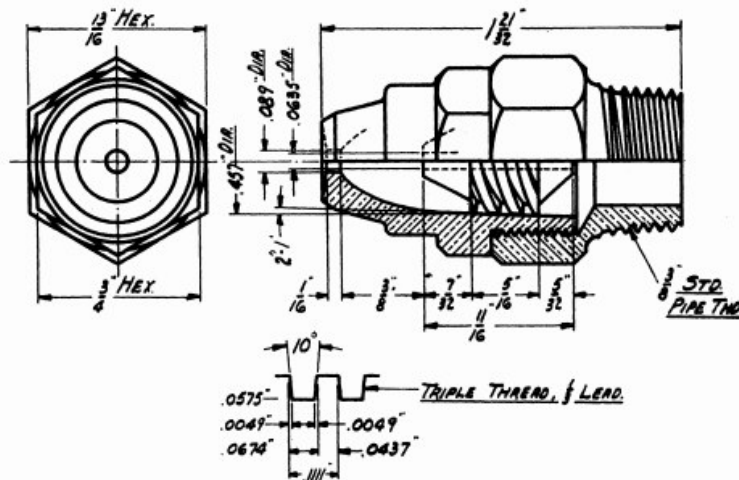


Figura 3. 30. Sprays para la generación de precipitaciones artificiales. [38]

Dirección del spray

El spray debe ser direccionado como para golpear aislador hacia abajo en un ángulo de 45° desde la vertical y paralelo al plano vertical a través de su eje dentro de las limitaciones prácticas. En el caso de aisladores de más de 6 pies de largo, el spray debe

estar a 45° desde la vertical en el centro y lo más cerca posible a este ángulo en los extremos. [38]

Temperatura del agua

La temperatura del agua que se rocíe en el aislador no debe ser mayor de los 15°C [38]

Voltaje de flashover en húmedo

El valor del voltaje de flashover mojado debe ser la media aritmética expresado en voltios r.m.s, de no menos de 5 flashovers realizados consecuentemente. El periodo entre flashovers consecutivos no deberá ser menor de 15 segundos ni mayor de 5 minutos. [38]

Aplicación del voltaje

El voltaje de aplicación inicial debe ser rápidamente incrementado a aproximadamente el 75% del valor promedio de flashover esperado. La tasa de aumento del voltaje debe ser de tal modo que el tiempo para el flashover no sea menos de 5 segundos ni más de 30 segundos luego de que el valor del 75% es alcanzado. [38]

3.3.4.3 Ensayo de impulso de flashover

Esta prueba debe ser llevada a cabo bajo condiciones secas.

Todas las pruebas deben ser hechas con la onda 1,2 x 50 μ s. [38]

Determinación del voltaje de impulso de flashover crítico

El voltaje de flashover crítico será determinado por cualquiera de los siguientes métodos: [38]

Método 1: El voltaje de impulso crítico de flashover será determinado mediante la aplicación de varios impulsos de diversa magnitud a la muestra y midiendo el voltaje de cresta del impulso que cause flashover en aproximadamente el 50% de las aplicaciones. Los impulsos serán aplicados en pasos crecientes o decrecientes, de modo tal que en el caso de impulsos crecientes el flashover ocurra en los pasos más altos y en el paso más bajo no se produzcan flashovers. Al menos 3 impulsos serán aplicados en cada paso de voltaje y la diferencia de voltaje entre un paso y otro no deberá exceder el 5% del voltaje de impulso crítico de flashover esperado.

En el caso en el cual en voltaje se aplique del paso más alto al más bajo

Método 2: El voltaje de impulso crítico de flashover será obtenido mediante la aplicación de no más de 8 impulsos de magnitud variable a la muestra para que el flashover ocurra

en no menos del 30% y no más del 70% de los impulsos totales aplicados. El voltaje crítico de flashover será el valor cresta del impulso más bajo que causó el flashover. Al menos 1 onda completa deberá ser mayor del 85% del voltaje crítico de flashover.

3.3.4.4 Ensayo de resistencia a impulso de flashover

Esta prueba se realiza con el objetivo de determinar si el dieléctrico será capaz de soportar un voltaje de impulso sin descarga disruptiva. [38]

La prueba de voltaje de resistencia será realizada con un impulso de polaridad que produzca el más bajo voltaje de resistencia crítico en la muestra. Tres impulsos consecutivos deberán ser aplicados. El voltaje de cresta de cada uno no deberá ser menor que el voltaje de resistencia especificado propiamente corregido [38]

Si no toma lugar ninguna descarga disruptiva durante los tres impulsos consecutivos, se considera entonces que la muestra pasó la prueba. Si 2 o 3 de las ondas de voltaje que se aplica causan descarga disruptiva se considera que la muestra no pasó la prueba. Si solo 1 de las 3 señales aplicadas, 3 señales de impulso adicionales deben ser aplicadas si no hay descarga disruptiva en estas ondas adicionales se considera que el objeto pasó la prueba. [38]

3.3.5 ENSAYOS EN CELDAS DE MANIOBRA

3.3.5.1 Ensayo dieléctrico en el circuito principal

Se aplicará un ensayo de voltaje a frecuencia industrial de corta duración en seco.

El voltaje de ensayo se especifica en la columna 2 de la Tabla 3.13, Tabla 3.14, Tabla 3.15 y Tabla 3. 16, de acuerdo con las normas pertinentes de la IEC. [39] [40] [41]

Tabla 3.13. Niveles nominales de aislamiento para voltajes de la gama I serie I [39]

Voltaje nominal U_r kV (valor rms)	Voltaje nominal sostenido de corta duración a frecuencia Industrial U_d kV (valor rms)		Voltaje nominal sostenido a los impulsos tipo rayo U_p kV (valor pico)	
	Valor común	A través de la distancia de aislamiento	Valor común	A través de la distancia de aislamiento
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)

3.6	10	12	20	23
			40	46
7.2	20	23	40	46
			60	70
12	28	32	60	70
			75	85
17.5	38	45	75	85
			95	110
24	50	60	95	110
			125	145
36	70	80	145	165
			170	195
52	95	110	250	290
72.5	140	160	325	375
100	150	175	380	440
	185	210	450	520
123	185	210	450	520
	230	265	550	630
145	230	265	550	630
	275	315	650	750
170	275	315	650	750
	325	375	750	860
245	260	415	850	950
	395	460	950	1050
	460	530	1050	1200

Tabla 3.14. Niveles nominales de aislamiento para voltajes de la gama I serie II (usado en Norteamérica) [39]

Voltaje nominal Ur kV (valor rms)	Voltaje nominal sostenido de corta duración a frecuencia Industrial Ud kV (valor rms)				Voltaje nominal sostenido a los impulsos tipo rayo Up kV (valor piko)	
	Valor común		A través de la distancia de aislamiento		Valor común	A través de la distancia de aislamiento
	seco	húmedo	seco	húmedo		
(1)	(2)	(2a)	(3)	(3a)	(4)	(5)
4.76	19	--	21	--	60	70
8.25	26	24	29	27	75	80
	35	30	39	33	95	105
15	35	30	39	33	95	105
	50	45	55	50	110	125
25.8	50	45	55	50	125	140

	70	60	77	66	150	165
38	70	60	77	66	150	165
	95	80	105	88	200	220
48.3	120	100	132	110	250	275
72.5	160	140	176	154	350	385

*Los valores de la Tabla 3.13 son aplicables para voltajes nominales superiores a 72,5 kV e inferiores o iguales a 245 kV.
**Los valores de humedad son una resistencia de 10s para los equipos utilizados en exteriores, véase 9.2 de la norma IEC 60060-1.

Tabla 3.15. Niveles nominales de aislamiento para voltajes gama II [39]

Voltaje nominal Ur kV (valor rms)	Voltaje nominal sostenido de corta duración a frecuencia Industrial Ud kV (valor rms)		Voltaje soportado por impulso de maniobra nominal Us kV (valor pico)			Voltaje nominal sostenido a los impulsos tipo rayo Up kV (valor pico)	
	Fase - Tierra y entre fases (nota 3)	A través de un dispositivo de conmutación abierto y/o distancia de aislamiento (nota 3)	Fase-tierra y entre el dispositivo de conmutación abierto	Entre fases (notas 3 y 4)	Entre distancias de aislamiento o (notas 1,2 y 3)	Fase - tierra y entre fases	Entre dispositivo de conmutación abierto y/o la distancia de aislamiento (notas 2 y 3)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
300	380	435	750	1125	700 (+245)	950	950 (+170)
			850	1275		1050	1050 (+170)
362	450	520	850	1275	800 (+295)	1050	1050 (+205)
			950	1425		1175	1175 (+205)
420	520	610	950	1425	900 (+345)	1300	1300 (+240)
			1050	1575		1425	1425 (+240)
550	620	800	1050	1680	900 (+450)	1425	1425 (+315)
			1175	1760		1550	1550 (+315)
880	830	1150	1300	2210	1100(+650)	1800	1800 (+455)
			1425	2420		2100	2100 (+455)

Nota 1: La columna (6) también es aplicable a algunos interruptores automáticos, véase la norma IEC 60056.

Nota 2: En la columna (6), los valores entre paréntesis son los valores máximos del voltaje a frecuencia industrial $U_r\sqrt{2}\sqrt{3}$ aplicado al terminal opuesto (voltaje combinado).

En la columna (8), los valores entre paréntesis son los valores máximos del voltaje a frecuencia industrial $0,7 U_r\sqrt{2}\sqrt{3}$ aplicada al terminal opuesto (voltaje combinado).

Nota 3: Los valores de la columna (2) son aplicables:

a) Para ensayos tipo, fase a tierra

b) Para la prueba de rutina, fase a tierra, fase a fase y a través del dispositivo de conmutación abierto.

Los valores de las columnas (3), (5), (6) y (8) sólo son aplicables para ensayos tipo.

Nota 4: Estos valores se obtienen utilizando los factores multiplicadores indicados en la tabla 3 de la norma IEC 60071-1.

Tabla 3. 16. Niveles nominales de aislamiento adicionales en Norteamérica gama II [39]

Voltaje nominal U_r kV (valor rms)	Voltaje nominal sostenido de corta duración a frecuencia Industrial U_d kV (valor rms)		Voltaje soportado por impulso de conmutación nominal U_s kV (valor pico)			Voltaje nominal sostenido a los impulsos tipo rayo U_p kV (valor pico)	
	Fase - Tierra y entre fases (nota 3)	A través de un dispositivo de conmutación abierto y/o distancia de aislamiento (nota 3)	Fase-tierra y entre el dispositivo de conmutación abierto	Entre fases (notas 3 y 4)	Entre distancias de aislamiento (notas 1,2 y 3)	Fase - tierra y entre fases	Entre dispositivo de conmutación abierto y/o la distancia de aislamiento (notas 2 y 3)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
362	520	610	950	1425	800 (+295)	1300	1300 (+205)
550	710	890	1175	2210	900 (+450)	1800	1800 (+315)

Las mismas notas de la Tabla 3.15 son aplicables

Cuando el aislamiento de las celdas de maniobra y control está compuesto sólo por aisladores de núcleo sólido y aire a la presión ambiente, el ensayo de voltaje sostenido a frecuencia industrial puede ser omitido.

Si no se cumplen las condiciones del apartado anterior, se aplicará lo siguiente:

Cuando se prueben los seccionadores, las condiciones de ensayo serán las indicadas en la Tabla 3. 17 y en la Figura 3. 31. Diagrama de conexión del conmutador tripolar se puede apreciar la forma de conexión para un conmutador tripolar.

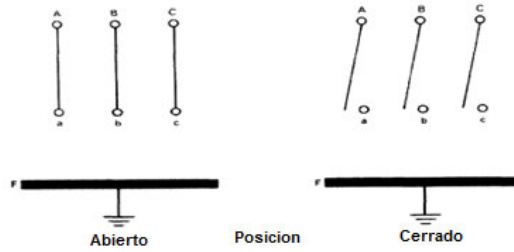


Figura 3. 31. Diagrama de conexión del conmutador tripolar [39]

Tabla 3. 17. Ensayos de voltaje a frecuencia industrial [39]

Condición de ensayo N°	Posición de Desconexión	Voltaje aplicado a	Tierra conectada a
1 ^a	Cerrado	AaCc	BbF
2 ^a	Cerrado	Bb	AaCcF
3 ^a	Abierto	ABC	abcF
4 ^a	Abierto	Abc	ABCF
5 ^a	Abierto	ABC	Earthing switch

Si el aislamiento entre polos es de aire a presión atmosférica, las condiciones de ensayo Nros. 1 y 2 pueden combinarse con el voltaje de ensayo que se aplica entre todas las partes del circuito principal conectadas entre sí y la base.

El seccionador de puesta a tierra en la posición que permite obtener la distancia más corta entre la punta de la cuchilla de puesta a tierra y las partes activas de ABC.

Cuando se prueben seccionadores de puesta a tierra, el voltaje de prueba se aplicará con el seccionador de puesta a tierra en posición abierta:

- Entre los terminales aislados adjuntos con las bases puestas a tierra (por ejemplo, de A a B con F puestas a tierra)
- Entre todos los terminales aislados conectados entre sí y las bases puestas a tierra (por ejemplo. abc a f puestas a tierra)

3.3.5.2 Ensayo dieléctrico en circuitos auxiliares y de control

Los circuitos auxiliares y de control de los interruptores y dispositivos de control se someterán a pruebas de resistencia al voltaje de impulso, así como a pruebas de resistencia al voltaje de frecuencia industrial de corta duración. [39] [42] [40] [41]

Cada ensayo se llevará a cabo

a) entre los circuitos auxiliares y de control conectados entre sí y el bastidor del dispositivo de conmutación

b) si es posible, entre cada parte y las otras partes conectadas entre sí y con el bastidor

El ensayo de voltaje sostenido tipo impulso se realizará de acuerdo con la norma IEC 60255-5.

El valor de pico del voltaje de impulso será de 5 kV. Los circuitos auxiliares y de control deberán resistir las pruebas sin sufrir daños permanentes.

Los ensayos de frecuencia industrial se realizarán de acuerdo con la norma IEC 61180-1. El voltaje de prueba será de 2 kV con una duración de 1 min. [39]

Criterio de aceptación

Se considerará que los circuitos auxiliares y de control de las celdas de maniobra y control han superado las pruebas si no se produce ninguna descarga perturbadora durante cada prueba [39]

3.3.5.3 Medición de la resistencia del circuito principal

Para el ensayo de rutina, la caída de voltaje en corriente continua o la resistencia del circuito principal se medirán en condiciones lo más parecidas posibles a la temperatura del aire y a los puntos de medición a aquellas en las que se realizó el ensayo correspondiente. La corriente durante el ensayo deberá tener un valor conveniente entre 50 A y la corriente normal nominal. [42] [40]

La resistencia medida no será superior a 1,2 R_u , siendo R_u igual la resistencia medida antes del ensayo de aumento de temperatura.

3.3.6 ENSAYOS EN FUSIBLES, SECCIONADOR PORTAFUSIBLE U OTROS DISPOSITIVOS EQUIPADOS CON UNA CUCHILLA O ESLABÓN DE MANIOBRA

3.3.6.1 Ensayo de voltaje aplicado a frecuencia industrial en seco

El voltaje de prueba a aplicarse debe ser corregido apropiadamente por las condiciones atmosféricas correspondientes, y se debe aplicar por 60 segundos. El setenta y cinco por ciento del voltaje de prueba debe ser aplicado en un solo paso y luego incrementado con una tasa de aumento del 2% por segundo. La Tabla 3.18 muestra los valores de voltaje de prueba. [43]

Criterio de aceptación

La prueba se considera exitosa si no existe flameo o daño alguno en el material aislante. [43]

3.3.6.2 Ensayo de voltaje aplicado a frecuencia industrial en húmedo

El voltaje de prueba a aplicar debe ser corregido apropiadamente por las condiciones atmosféricas correspondientes, y se debe aplicar por 60 segundos. Setenta y cinco por ciento del voltaje de prueba debe ser aplicado en un solo paso y luego incrementado con una tasa de aumento del 2% por segundo. La Tabla 3. 18 muestra los valores de voltaje de prueba. [43]

Criterio de aceptación

La prueba se considera exitosa si no existe flameo o daño alguno en el material aislante. [43]

3.3.6.3 Ensayo de voltaje aplicado a frecuencia industrial bajo rocío de agua para dispositivos de interior.

El voltaje de prueba a aplicarse debe ser corregido apropiadamente por las condiciones atmosféricas correspondientes, y se debe aplicar por 10 segundos. Setenta y cinco por ciento del voltaje de prueba debe ser aplicado en un solo paso y luego incrementado con una tasa de aumento del 2% por segundo. La Tabla 3. 18 presenta los valores de voltaje de prueba. [43]

Criterio de aceptación

La prueba se considera exitosa si no existe flameo o daño alguno en el material aislante. [43]

3.3.6.4 Ensayo de resistencia al voltaje de impulso tipo descarga atmosférica

La forma de onda voltaje deberá ser la 1.2/50 μ s de acuerdo a lo descrito en IEEE Std 4.

El dispositivo que se está probando deberá ser capaz de pasar esta prueba con voltajes de polaridad positiva y negativa.

Se deben aplicar tres impulsos de voltaje consecutivos, con las correcciones atmosféricas apropiadas. La Tabla 3. 18 muestra los valores de voltaje de prueba. [43]

Criterio de aplicación

Si no se produce una descarga disruptiva durante cualquiera de los tres impulsos consecutivos, entonces el dispositivo ha pasado la prueba. Si se produce más de una descarga, entonces el dispositivo ha fallado la prueba. Si se produce una descarga, entonces se deberán aplicar nueve impulsos adicionales del voltaje de prueba especificado, en caso de no producirse descargas durante los nueve impulsos, entonces el dispositivo ha pasado la prueba. [43]

Tabla 3. 18. Valores de voltaje de prueba para fusibles, seccionadores porta fusible, y otros dispositivos con cuchillas de seccionamiento. [34]

Máximo voltaje nominal ^a				Voltajes sostenidos				
Voltaje nominal		Voltaje nominal		Terminal a tierra			Terminal a terminal	
				Prueba de voltaje a frecuencia industrial en seco 1 min (kV, rms)	Prueba de voltaje a frecuencia industrial bajo rocío de agua 10 s (kV, rms)	Impulso tipo descarga atmosférica 1,2x50 µs (kV, pico)	Prueba de voltaje a frecuencia industrial en seco 1 min (kV, rms)	Impulso tipo descarga atmosférica 1,2x50 µs (kV, pico)
Col 1	Col 1a	Col 2	Col 2a	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7
5.5	5.2	-	-	21	20	60	21	60
8.3	7.8	-	-	27	24	75	27	75
15.5	15.0	8.3/15.5	7.8/15.0	35	30	95	35	95
23.0	18.0 ^b	-	-	42	36	125	42	125
27.0	27.0	15.5/27.0	15.0/27.0	42	36	125	42	125
38.0	38.0	27.0/38.0	27.0/38.0	70	60	150	70	150

a. Las clasificaciones más comunes están en las columnas 1 y 2. Las columnas 1a y 2a eran las calificaciones comunes antes de la revisión de esta norma en 1996.

b. Aplicable sólo a los open-link cutouts.

3.3.6.5 Ensayo de resistencia de contacto

Tanto los seccionadores como las cuchillas de puesta a tierra deben ser puestos a prueba para verificar el ajuste entre sus contactos y así detectar posibles problemas durante la etapa de montaje o a la necesidad de un reajuste debido a la excesiva cantidad de maniobras a las que se encuentran sometidos estos dispositivos.

El procedimiento así como los criterios de aceptación se encuentran descritos en la sección 3.3.2.7, las cuales permitirán su correcta ejecución.

3.3.7 ENSAYOS EN TRANSFORMADORES DE MEDICIÓN

3.3.7.1 Ensayo de voltaje aplicado

Los extremos de los terminales y los Taps sacados de la caja del devanado sometido a prueba deberán estar unidos entre sí y conectado al terminal de línea del transformador de prueba. Todos los demás terminales y piezas (incluido el núcleo) deben conectarse a tierra y al otro terminal del transformador de prueba. La conexión a tierra entre el aparato que se está probando y el transformador de prueba deberá ser sustancialmente circuito metálico. [44]

El voltaje de prueba aplicado se especifica en las Tablas 3.4 y 3.5 debe iniciarse a un tercio o menos del valor total y aumentarse gradualmente hasta alcanzar el valor máximo en no más de 15 segundos. Después de mantenerlo durante 1 minuto, se debe reducir gradualmente en no más de 15 segundos a un tercio del valor máximo o menos y con el circuito abierto. [44]

3.3.7.2 Ensayo de voltaje inducido

Estas pruebas se realizan aplicando voltaje a un devanado con todos los demás devanados abiertos. Un extremo de cada bobinado se conectará a tierra durante este ensayo. Normalmente el voltaje se aplica al devanado de bajo voltaje. Cuando el voltaje en cualquier bobinado exceda los 50 kV durante esta prueba, se deben proporcionar algunos medios para verificar el voltaje. [44]

El voltaje para la prueba debe ser tal que impida la saturación del núcleo. Por lo general, este requisito requiere el uso de una frecuencia de 120 Hz o más cuando se excitan unidades de 60 Hz. [44]

Cuando se utilizan frecuencias superiores a 120 Hz, la severidad de la prueba aumenta de forma anormal, y para ello, la duración del ensayo deberá reducirse de acuerdo con la Tabla 3.3. [44]

El voltaje debe iniciarse a un tercio o menos del valor total y debe incrementarse gradualmente hasta alcanzar el valor total en no más de 15 s. Después de haber mantenido durante el tiempo especificado en la Tabla 3.3, deberá reducirse gradualmente en no más de 15 s a un tercio del valor máximo, o menos, y el circuito se abre. [44]

Los transformadores de voltaje en equipos de medición polifásicos se pueden probar con voltaje monofásica. Por lo general el voltaje de prueba especificada se aplica a uno de los

devanados de cada núcleo con los extremos neutros de la bobina abierta devanados conectados a tierra. [44]

3.3.7.3 Ensayo de descargas parciales

A discreción del fabricante, las pruebas de voltaje inducido o aplicado y de descarga parcial pueden ser realizadas juntas. [44]

Si es necesario, se pueden utilizar electrodos externos para el terminal primario y la tierra del transformador. [44]

Cuando se utilice un voltaje de pre-esfuerzo de 60 Hz, ésta se mantendrá durante un mínimo de 60 s; cuando se utilice un voltaje de pre-esfuerzo superior a 60 Hz, la duración puede reducirse según la Tabla 3.3. Posteriormente, el voltaje de ensayo será reducido al nivel del voltaje de extinción prescrita, que luego se mantendrá por un mínimo de 30 segundos. Durante este tiempo se medirá la intensidad de la descarga parcial. Se recomienda que la reducción del voltaje previa al voltaje de prueba se realice durante aproximadamente 10 segundos. [44]

La Tabla 3. 19, muestra los valores de voltaje de prueba.

Se considerará que el transformador ha cumplido los requisitos si la intensidad de la descarga parcial medido en el nivel de voltaje de extinción prescrito es igual o inferior a 10 pC para llenado de aceite o de gas transformadores, y 50 pC para sistemas de aislamiento de tipo seco. [44]

El método de prueba debe ser conforme a la norma IEC 60270. Para los circuitos de prueba típicos, véase la norma IEC 60270.

Tabla 3. 19. Voltajes de prueba de descarga parcial. [44]

Voltaje nominal del sistema (kV, rms)	Máximo voltaje del sistema (kV, rms)	Voltaje de Pre-esfuerzo (kV, rms)		Voltaje de extinción prescrito (kV, rms)	
		Prueba de rutina	Prueba Tipo	Prueba de rutina	Prueba Tipo
115	123	185		107	
138	145	220		126	
161	170	260		147	
230	245	315		212	
		370			
		Prueba de rutina	Prueba Tipo	Prueba de rutina	Prueba Tipo

345	362	410	510	300	362
		460	575		
500	550	545	680	435	550
		665	830		
765	800	780	975	665	800

Medición de descargas parciales en transformadores de voltaje nominal de 72 kV e inferiores.

Para los transformadores de voltaje los requisitos son los siguientes:

a) El voltaje de pre-esfuerzo se expresa en la siguiente fórmula.

Voltaje de pre-esfuerzo = (Voltaje nominal primaria) × 1,8

b) El voltaje de extinción prescrita se expresa en la fórmula siguiente.

Voltaje de extinción prescrita = (Voltaje nominal primaria) × 1,2

Para los transformadores del Grupo 1 con valores de sobrevoltaje extendidos, el multiplicador 1.2 indicado anteriormente puede ser cambiado por acuerdo entre el cliente y el fabricante.

Medición de las descargas parciales de los transformadores de corriente para un voltaje nominal de 72 kV e inferiores

Para los transformadores de corriente los requisitos son los siguientes:

a) El voltaje de preesfuerzo se expresa en la siguiente fórmula

Voltaje de pretensado = (Voltaje nominal del sistema) × 1,8

b) El voltaje de extinción prescrita se expresa en la siguiente fórmula

Voltaje de extinción prescrita = (Voltaje nominal del sistema / $\sqrt{3}$) × 1,2

3.3.7.4 Prueba en Transformadores de corriente

Prueba de polaridad

Para determinar la polaridad de un transformador de corriente se puede hacer uso de diferentes métodos, este en específico realiza la comparación con un transformador de polaridad conocida, para ello se procederá de la siguiente manera: [44]

- a) Conectar el transformador como se muestra en la Figura 3.32.
- b) Energizar el circuito a partir de una fuente de corriente controlada de tal modo que el flujo de corriente en los bobinados H1-H2 sean como se muestra en la Figura 3.32.
- c) Si el amperímetro lee la suma de las corrientes en los devanados de alta, la polaridad del transformador desconocido es inversa. Si el amperímetro lee la diferencia de corrientes, la polaridad del transformador desconocido es la marcada.

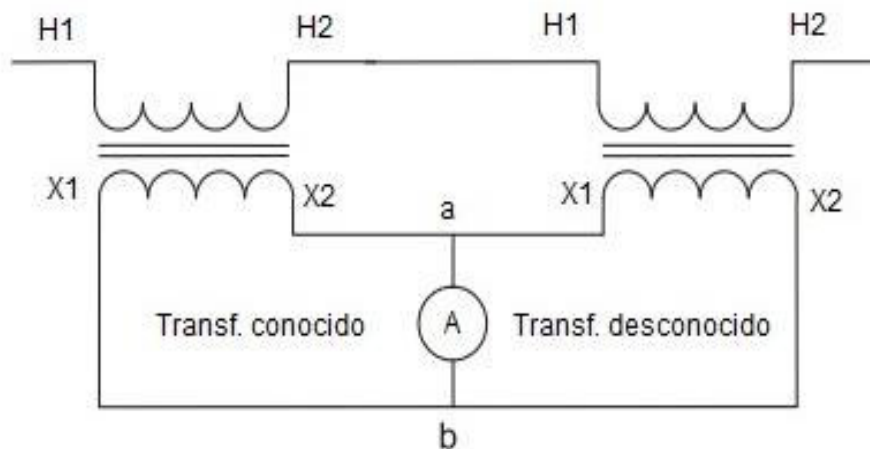


Figura 3.32. Prueba de polaridad por comparación con el transformador de corriente de polaridad conocida. [44]

3.3.7.5 Pruebas en Transformadores de potencial

Para determinar la polaridad de los transformadores de voltaje utilizando este método, haga lo siguiente: [44]

- a) Conecte los bobinados de alto de los dos transformadores en paralelo, como se muestra en la Figura 3.33, conectando H1 del transformador conocido a H1 del transformador desconocido y H2 del conocido a H2 del transformador desconocido.
- b) Conectar los devanados de bajo a través de un voltímetro, como se muestra en la Figura 3.33, conectando X1 del transformador conocido a X1 del transformador desconocido y X2 del transformador conocido a un terminal de un voltímetro y X2 del transformador desconocido al otro terminal del voltímetro.

c) Energice el circuito en los terminales H1-H2 desde una fuente de voltaje controlada de 60 Hz.

d) Si el voltímetro lee cero, la polaridad del transformador desconocido es la marcada. Si el voltímetro lee la suma de los voltajes de los devanados, la polaridad del transformador desconocido es al revés.

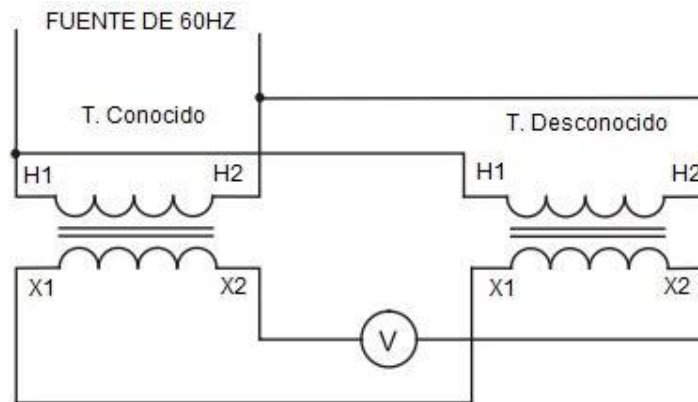


Figura 3. 33. Prueba de polaridad por comparación con un transformador de voltaje de la misma relación y polaridad conocida. [44]

3.3.8 ENSAYOS EN CABLES

3.3.8.1 Ensayo HVDC

La fuente de voltaje debe tener las siguientes características:

Proporcionar el voltaje máximo de prueba requerido con algún margen adicional.

Proporcionar la posibilidad de aumentar el voltaje continuamente o en pasos pequeños.

Tener la capacidad de corriente necesaria para cargar al objeto de prueba en un tiempo razonable. [45]

Mantener un factor de rizado menor al 3%, tal y como se explica en el Std4 de IEEE.

Proporcionar una fuente capaz de mantener las caídas de voltaje durante los pulsos de corriente transitoria en un valor no mayor al 10%. Tener cuidado para evitar descargas fuertes de corona de las conexiones de alto voltaje que causan pulsos de corriente transitorios. [45]

Proporcionar instrumentación de voltaje y corriente de acuerdo a lo especificado en IEEE Std4. Los amperímetros utilizados para medir la corriente de fuga debe tener un rango bajo que pueda apreciar corrientes de 10 μ A a 100 μ A. [45]

Desconectar todo el equipo del cable a probar que no se incluirá en la prueba.

Verificar el funcionamiento del equipo de prueba de acuerdo a las recomendaciones del fabricante antes de conectar el cable de prueba. Si se tiene un sistema portátil de medición de DC, éste debe cumplir con el IEEE Std4 el voltímetro del equipo de prueba será verificado por comparación antes de conectar la carga de prueba. [45]

El voltaje debe ser incrementado continuamente o en pasos hasta llegar al valor máximo de prueba. Aplicar el voltaje lentamente lo suficiente como para prevenir sobrepasar el nivel de prueba. Si se aumenta el voltaje continuamente, la tasa de aumento deberá ser aproximadamente uniforme y debe dar como resultado el voltaje de prueba máximo que debe alcanzarse en un periodo de tiempo de no menos de 10 y no más de 60 segundos. Una tasa de aumento de voltaje de $<1\text{kV/s}$ es recomendada. En los casos en que se van a probar muestras extremadamente largas, la tasa de aumento de voltaje puede ser más lento debido a las consideraciones prácticas del equipo de prueba. Si se emplea el método de incremento de voltaje por pasos, es deseable por lo menos cinco pasos. La duración en cada paso debe ser lo suficiente como para que la corriente alcance un estado estable (1 minuto sugerencia). El voltaje de prueba máximo debe mantenerse por 15 minutos. Después de alcanzar el voltaje máximo, la magnitud de la corriente de fuga debe ser registrada al menos 2 veces: la primera aproximadamente a los 2 minutos y nuevamente al final del periodo de prueba (15 minutos).

Los voltajes de prueba recomendados para cables de 5kV y superiores se encuentran expuestos en la Tabla 3.20 dependiendo de la opinión del usuario/ propietario, si se requieren voltajes de prueba más estrictos, el nivel más alto debe ser determinado en consulta con los proveedores del cable y sus accesorios. [45]

Tabla 3.20. Voltajes de prueba para pruebas DC en cables. [45]

Voltaje del sistema, kV rms, fase fase	BIL del sistema, kV cresta	Prueba de aceptación, kV dc, fase fase	Prueba de mantenimiento, kV dc, fase fase
5	75	28	23
8	95	36	29
15	110	56	46
25	150	75	61

28	170	85	68
35	200	100	75
46	250	125	95
69	350	175	130
115	450	225	170
115	550	275	205
138	650	325	245
161	750	375	280
230	1050	525	395
345	1175	585	440
345	1300	650	488
500	1425	710	535
500	1550	775	580
500	1675	838	629

NOTA 1 Se pueden considerar voltajes más altos que los indicados, hasta el 80% del sistema BIL, pero la antigüedad y el funcionamiento del sistema no deben ser mayores que los indicados. El medio ambiente del sistema debe tenerse en cuenta. Se insta al usuario a consultar a los proveedores del cable y de todos los accesorios antes de aplicar el alto voltaje.

NOTA 2-Cuando los cables más antiguos u otros tipos/clases de cables u otros equipos, tales como transformadores, interruptores, motores, etc., están conectados al cable a ensayar, voltajes inferiores a las indicadas en esta tabla pueden ser necesarios para cumplir con las limitaciones impuestas por dichos cables y equipos interconectados. Ver IEEE Std 95™ y Tabla 1 de IEEE Std C37.20.2™-1999

NOTA 3-Si el voltaje de prueba excede el 50% del BIL del sistema, se debe proporcionar protección contra sobrevoltajes excesivas inducidas por descargas eléctricas en la terminación.

NOTA 4 - Se recomienda encarecidamente que el usuario consulte con el fabricante de todos los componentes que serán sometidos a tales pruebas antes de realizar cualquier prueba en cables y accesorios de cable con capacidad nominal de 115 kV y superior.

NOTA 5 - Debe tenerse en cuenta que esta tabla y los procedimientos de prueba sugeridos en esta guía no necesariamente concuerdan con los siguientes puntos las recomendaciones de otras organizaciones, como las de la Asociación de Empresas de Iluminación Edison. Cuando exista preocupación, el usuario debe consultar al proveedor del cable y los accesorios para determinar que los componentes soportarán la prueba.

Al final del periodo de prueba, el voltaje debe reducirse devolviéndolo a cero. El voltaje en el cable se descargara a través de la resistencia interna del equipo. Normalmente esta resistencia tiene un valor óhmico muy alto y el tiempo de descarga será largo, especialmente para cables de más de 100 metros. Para descargar cables de mayor longitud, se puede utilizar sistemas de conexión a tierra automáticos separados con una resistencia de descarga de alto voltaje. [45]

3.3.8.2 Ensayo de AC de muy baja frecuencia (VLF)

Los métodos de prueba VLF AC utilizan señales AC en el rango de frecuencia de 0.01 Hz a 1 Hz. El objeto bajo prueba debe soportar un voltaje especificado aplicado a través del aislamiento durante un tiempo determinado sin que se rompa el aislamiento. [46]

Los métodos de prueba de diagnóstico VLF de los sistemas de cables son diversos de entre los cuales destacan los siguientes: [46]

3.3.8.2.1 Ensayo general de voltaje soportado AC VLF

El propósito de una prueba sostenida es verificar la integridad del cable bajo prueba. Si el cable de prueba tiene un defecto lo suficientemente severo en el voltaje de prueba sostenido, un fenómeno de pre-falla se iniciará y crecerá en el aislamiento. [46]

Para que un árbol eléctrico en condiciones de laboratorio no penetre completamente en el aislamiento durante el ensayo, se han establecido niveles de prueba de voltaje alterno VLF y duraciones de tiempo de prueba para las dos fuentes de voltaje de ensayo de utilización común, las formas de onda coseno rectangulares y sinusoidales. [46]

Las consideraciones para la prueba son las siguientes:

- Los detalles sobre el cable, incluyendo la capacitancia del cable debe estar disponible de manera que el personal estará familiarizado con los cables implicados, la ubicación de los puntos abiertos, donde los cables o las juntas pueden ser accesibles. [46]
- El equipo de prueba utilizado debe ser lo suficientemente potente como para alimentar y disipar o recuperar el sistema de carga de energía del cable durante el ciclo de prueba y monitoreo. [46]
- Si el aislamiento del accesorio o cable se encuentra en una condición avanzada de degradación, la prueba puede causar una avería antes de terminar cuando se utilizan voltajes de prueba superiores al voltaje de funcionamiento. [46]
- Los equipos deben estar preparados para instalar un nuevo empalme, cable o terminación en caso de que una falla inesperada ocurra durante la prueba. [46]
- Al finalizar o al interrumpirse una prueba de voltaje alterno VLF, el objeto de prueba debe ser descargado y luego puesto a tierra. [46]

En cuanto a los tiempos de prueba:

- El tiempo mínimo de prueba recomendado para una prueba de resistencia simple en circuitos de cables viejos es de 30 minutos a 0,1 Hz. Si un circuito se considera importante, por ejemplo cables para circuitos de alimentación primarios, entonces se debe considerar la posibilidad de extender el tiempo de prueba a 60 minutos a 0,1 Hz. [46]
- El tiempo mínimo de prueba recomendado para una instalación y/o prueba de resistencia de aceptación en cables nuevos es de 60 minutos a 0.1 Hz. [46]
- Se puede considerar un tiempo de prueba dentro del rango de 15 a 30 minutos si la característica monitoreada permanece estable durante al menos 15 minutos y no se produce ninguna falla. Debe tenerse en cuenta el tiempo para una prueba de resistencia recomendado es de 30 minutos. [46]

Tabla 3. 21. Voltajes de ensayo de VLF para formas de onda sinusoidales y coseno rectangulares. [46]

Forma de onda	Cable system rating (phase to phase) kV	Instalación (fase a tierra)		Aceptación (fase a tierra)		Mantenimiento (fase a tierra)	
		kV rms	kV pico	kV rms	kV pico	kV rms	kV pico
Sinusoidal	5	9	13	10	14	7	10
	8	11	16	13	18	10	14
	15	19	27	21	30	16	22
	20	24 (nota 3)	34 (nota3)	26	37	20	28
	25	29 (nota 3)	41 (nota 3)	32	45	24 (nota 3)	34 (nota 3)
	28	32	45	36 (nota 3)	51 (nota 3)	27	38
	30	34	48	38	54	29 (nota 3)	41 (nota 3)
	35	39	55	44	62	33	47
	46	51	72	57	81	43	61
	69	75	106	84	119	63	89
Cosenoidal-Rectangular	5	13	13	14	14	10	10
	8	16	16	18	18	14	14
	15	27	27	30	30	22	22
	20	34	34	37	37	28	28

	25	41	41	45	45	34	34
	28	45	45	51	51	38	38
	30	48	48	54	54	41	41
	35	55	55	62	62	47	47
	46	72	72	81	81	61	61
	69	106	106	119	119	89	89

NOTA 1-Si el voltaje de funcionamiento es una clase de voltaje inferior al voltaje nominal del cable, se recomienda que los voltajes de prueba de mantenimiento sean las correspondientes a la clase de voltaje de funcionamiento.

NOTA 2-El voltaje de mantenimiento es aproximadamente el 75% de la magnitud del voltaje de prueba de aceptación.

NOTA 3-Algunos equipos de prueba existentes tienen un voltaje máximo de hasta un 5% por debajo de los valores listados en la tabla. Estos equipos de prueba son aceptables para su uso. Sin embargo, existe el riesgo de que el cable pueda ser "sub probado" debido a una combinación de un voltaje de prueba más bajo y la incertidumbre permitida del circuito de medición.

3.3.8.2.2 *Ensayo de voltaje soportado VLF AC con formas de onda coseno - impulsos rectangulares/bipolares.*

El cable o sistema de cables a ensayar se conecta a la unidad de prueba de voltaje alterno VLF y a la unidad de prueba rectangular coseno, el voltaje de prueba se debe aumentar hasta un valor igual al especificado en la Tabla 3. 21. Durante el ciclo de ensayo, la corriente de fuga podrá ser supervisada y registrada si se dispone del equipo necesario. Cuando el cable o el sistema de cable pasa el VLF el voltaje de prueba, dicho voltaje se regula a cero y el cable y el equipo de prueba se descargan y se conectan a tierra. El sistema o el cable pueden volver a ponerse en servicio. Si un cable o sistema de cables no supera la prueba, el voltaje de prueba se derrumbará. El equipo de prueba de voltaje AC VLF se apaga para descargar el cable y el equipo de prueba; entonces el cable se pone a tierra. La falla del cable puede ser localizada con un equipo estándar de localización de fallas del cable. Después de que la falla haya sido localizada y reparado el circuito, se debe volver a probar. [46]

3.3.8.2.3 *Ensayo de voltaje alterna VLF con forma de onda sinusoidal*

El equipo de prueba de voltaje alterno VLF se conecta al sistema de cables que se va a probar y el voltaje de prueba aumenta o disminuye a un valor hasta el especificado en la Tabla 3. 21. Cuando por el cable o el sistema de cable se pasa el voltaje VLF el voltaje

de prueba se regula a cero, se descargan el cable o el sistema de cable y el equipo de prueba, y el cable o el sistema de cable está conectado a tierra. [46]

Si se produce un fallo durante la prueba, el voltaje de prueba se desploma. El equipo de prueba de voltaje alterno VLF se apaga, para descargar el sistema de cables y el equipo de prueba. Se registran el voltaje de ruptura y el tiempo de prueba transcurrido. Durante el ciclo de ensayo, podrá controlarse y registrarse la corriente de fuga. El cable se conecta a tierra. [46]

Cuando un defecto ha causado una avería, ésta puede localizarse con un equipo estándar de localización de averías. [46]

Los sistemas de cables pueden ser probados después de su instalación, para su aceptación o en programas de mantenimiento preventivo después de los apagones. Los fallos identificados pueden repararse o sustituirse las secciones de cable con fallos. Una vez que un sistema de cable pasa la prueba VLF, puede volver a ponerse en servicio. [46]

3.3.8.3 Ensayo de resistencia eléctrica

El cable en su completa longitud, o una muestra de él, debe ser colocado en el cuarto de prueba, el cual deberá ser mantenido a una temperatura razonablemente constante, por lo menos durante 12 horas previas a la prueba. [47]

Los valores medidos de resistencia deben ser corregidos a una temperatura de 20 C y 1 km de longitud de acuerdo con los factores dados en IEC 60228. [47]

3.3.8.4 Ensayo de descargas parciales

En el caso de cables tripolares, el ensayo se realizará en todos los núcleos aislados, aplicándose el voltaje entre cada conductor. [47]

El voltaje de prueba debe ser incrementado gradualmente hasta un valor de $2 U_0$ por 10 s y luego ser reducido a $1,73 U_0$, siendo U_0 el valor del voltaje nominal del cable. [47]

No debe haber descargas detectables que excedan la sensibilidad del objeto de prueba definida en IEC 60885-3. [47]

3.3.8.5 Ensayo de voltaje

La prueba debe ser realizada a temperatura ambiente, usando voltaje alterno a (frecuencia industrial).

Para cables mono polares, el voltaje debe ser aplicado por 5 minutos entre el conductor y la placa metálica. [47]

En el caso de cables tripolares con núcleos apantallados individualmente, el voltaje de ensayo se aplicará durante 5 minutos entre cada conductor y la capa metálica.

En el caso de cables tripolares sin núcleos apantallados individualmente, el voltaje de ensayo se aplicará durante 5 minutos sucesivos entre cada conductor aislado y todos los demás conductores y capas metálicas colectivas. [47]

Los cables tripolares pueden ensayarse en una sola operación utilizando un transformador trifásico.

El voltaje de prueba debe ser $3,5 U_0$, que se encuentra especificado en la Tabla 3. 22.

Tabla 3. 22. Voltajes de prueba

Voltaje nominal U_0 kV	3,6	6	8,7	12	18
Voltaje nominal kV	12,5	21	30,5	42	63

Si se usa un transformador trifásico para probar cables tripolares, el voltaje de prueba entre fases debe ser 1,73 veces los valores dados en la tabla anterior.

En todos los casos los valores de voltaje deben ser incrementados gradualmente hasta el valor especificado. [47]

3.3.9 ENSAYOS EN RECONECTADORES

Su función es la de comprobar la integridad de los reconectores o de las partes que lo componen durante el proceso de fabricación. [48]

Los ensayos deben incluir lo siguiente:

1. El valor del voltaje de prueba de baja frecuencia en seco de 1 minuto de duración se muestra en la Tabla 3. 23. [48]
2. La determinación de la corriente de disparo mínima

La Tabla 3. 23, indica los voltajes de prueba estándar para los reconectores automáticos.

Tabla 3. 23. Pruebas de aislamiento estándar para reconectores de circuitos automáticos. [48]

Clase de aislamiento		Voltaje soportado (kV)		
Voltaje nominal (kV)		Impulso de baja frecuencia		
Distribución	Potencia	seco	húmedo	1.5x40
2.4-4.8	2.4	21	20	60
7.2	4.8	27	24	75
14.4	7.2	35	30	95
---	14.4	50	45	110
23	23	60	50	150

Duración

En la prueba de baja frecuencia el voltaje debe ser aplicado continuamente durante un periodo de 1 minuto en pruebas en seco y diez segundos durante ensayos en húmedo. [48]

Puntos de aplicación de prueba de voltaje

Prueba 1.- Con reconector automático cerrado y el tanque o montajes metálicos conectados a tierra, el voltaje de prueba debe ser aplicado simultáneamente a todos los terminales a un lado del reconector automático. [48]

Prueba 2.- Con el reconector automático abierto, el voltaje de prueba debe ser aplicado simultáneamente a los terminales cercanos con los terminales restantes y tanques o montajes metálicos aterrizados. [48]

Prueba 3.- Con el reconector automático cerrado y el tanque o montajes metálicos conectados a tierra, el voltaje de prueba debe ser aplicado a una fase con terminales de otras fases y el tanque y montajes metálicos a tierra. [48]

3.3.10 ENSAYOS EN ACEITES DIELECTRICOS

3.3.10.1 Pruebas eléctricas

3.3.10.1.1 Voltaje de ruptura

Este método de prueba abarca la determinación del voltaje de ruptura dieléctrica de líquidos aislantes (aceites de origen petrolífero, fluidos de silicona, aceites minerales, fluidos de éster sintético y natural). Esta prueba es aplicable para líquidos aislantes

usados en cables, transformadores, disyuntores y elementos similares que usen el líquido aislante como medio de refrigeración y aislamiento. [16]

El voltaje de prueba debe ser alterno dentro de un rango de frecuencias entre 45 a 65 Hz, normalmente la frecuencia será la misma que la frecuencia industrial. [16]

Dejar que la muestra y el recipiente se equilibren con la temperatura ambiente. La temperatura del laboratorio no deberá sobrepasar los 30 °C ni ser menor a 20 °C. [16]

Se debe asegurar que la muestra de prueba sea homogénea, para ello se debe girar suavemente la muestra varias veces, la agitación no debe ser muy rápida, con el fin de evitar que se introduzcan burbujas de aire en la muestra. El recipiente para la prueba debe estar completamente lleno, es decir que al cerrar la tapa del recipiente no debe existir aire en contacto con el líquido aislante. [16]

Una vez el recipiente de prueba se encuentre lleno se debe esperar al menos 3 minutos pero no más de 5 minutos para aplicar el voltaje de prueba. En el caso de aceites aislantes eléctricos de alto punto de inflamación, dígase el casco de ésteres naturales y sintéticos el tiempo de espera deberá ser de por lo menos 30 minutos previo a la aplicación del voltaje de prueba. [16]

Aplicar el voltaje aumentándolo desde cero con una tasa de crecimiento de 0,5 kV/s hasta que se produzca la ruptura, se debe registrar el valor más alto de voltaje rms que se haya producido justo antes de la ruptura, repetir este procedimiento cuatro veces más, se debe esperar al menos 60 s pero no más de 90 s antes de aplicar el voltaje nuevamente. [49]

Se debe calcular la media de los cinco voltajes de ruptura medidos anteriormente, utilizando la Ecuación 1.4.

Utilizando los valores de los voltajes de ruptura se debe determinar el rango con la Ecuación 1.5, dependiendo de la separación de los electrodos de prueba el rango no deberá exceder los siguientes valores:

1 mm de separación: El rango debe ser menor al 120% de la media de los cinco (5) voltajes de ruptura. [16]

2 mm de separación El rango debe ser menor al 92% de la media de los cinco (5) voltajes de ruptura. [16]

Los valores recomendados se encuentran expuestos en la Tabla 3. 24 y la Tabla 3. 25 [49], la Figura 3. 34 , muestra la disposición de los electrodos para la prueba.



Figura 3. 34. Disposición de los electrodos para la prueba de voltaje de ruptura.

3.3.10.1.2 Factor de disipación

El factor de disipación es una medida de la potencia perdida cuando un líquido aislante eléctrico se somete a un campo AC. La energía se disipa en forma de calor dentro del líquido. Un factor de disipación de bajo valor significa que en el líquido hará se pierda parte de la potencia aplicada. La prueba se utiliza como una comprobación del deterioro y la contaminación del aceite aislante. [49]

Los valores recomendados se encuentran expuestos en la Tabla 3. 24 y la Tabla 3. 25.

3.3.10.2 Pruebas Físico Químicas

3.3.10.2.1 Contenido de Gases

El contenido de gas de un líquido aislante puede definirse como el volumen porcentual de gas disuelto o en ppm (partes por millón) a presión y temperatura estándar. Algunos tipos de equipo requieren el uso de líquidos aislantes eléctricos de bajo contenido gaseoso. Al llenar los aparatos eléctricos, el bajo contenido de gas reduce el oxígeno disponible, aumentando así la vida útil del líquido aislante. [49]

El contenido de gas no está destinado a ser utilizado en las especificaciones de compra porque el aceite para transformadores es habitualmente desgasificado inmediatamente antes de su uso. [49]

La cantidad y los tipos de gases disueltos en el aceite mineral pueden ser utilizados como una herramienta para ayudar a detectar y diagnosticar fallos y condiciones anormales de funcionamiento en el equipo. [49]

Los valores recomendados se encuentran expuestos en la Tabla 3. 24 y la Tabla 3. 25.

3.3.10.2.2 Contenido de Sulfuro Corrosivo

Esta prueba se utiliza para determinar la presencia de azufre corrosivo en el aceite mineral. El aceite mineral se calienta en un recipiente de cobre pulido. [49]

Se inspecciona el recipiente de cobre para comprobar el aspecto característico del azufre corrosivo. [49]

Una de las fuentes de azufre que puede conducir al azufre corrosivo presente en el aceite mineral puede provenir del petróleo crudo del que se refinó esto en caso de no haber sido severamente hidro-tratado. El azufre también puede provenir de otras fuentes, como las mangueras de goma utilizadas para el procesamiento de petróleo. [49]

Los valores recomendados se encuentran expuestos en la Tabla 3. 24 y la Tabla 3. 25.

3.3.10.2.3 Acidez

El número de neutralización de un líquido aislante eléctrico es una medida de los componentes ácidos (acidez) de ese material. En el petróleo nuevo, cualquier ácido presente es probablemente un residuo del proceso de refinado del petróleo. En un líquido de servicio, el número de neutralización es una medida de los subproductos ácidos de la oxidación del petróleo. El número de neutralización puede utilizarse como guía general para determinar cuándo el aceite debe ser reprocesado o reemplazado. [49]

Los valores recomendados se encuentran expuestos en la Tabla 3. 24 y la Tabla 3. 25.

3.3.10.2.4 Contenido de agua

El agua en el líquido aislante puede estar presente en varias formas: agua disuelta, agua en suspensión, agua libre en forma de gotas de agua o agua acumulada en el fondo, y agua ligado a los compuestos polares, existentes debido al envejecimiento y deterioro del líquido aislante. De acuerdo con ASTM D1533, el contenido de agua del líquido aislante se mide en ppm en peso o mg/kg. [49]

Los valores recomendados se encuentran expuestos en la Tabla 3. 24 y la Tabla 3. 25.

3.3.10.2.5 *Tensión Interfacial*

Este método abarca la medición, en condiciones de no equilibrio, de la tensión superficial que un líquido aislante mantiene respecto al agua. La tensión interfacial es una medida de las fuerzas de atracción entre las moléculas de los dos líquidos. Se expresa en mili Newton por metro (mN/m). La prueba es un excelente medio para detectar los contaminantes polares solubles en aceite y los productos de la oxidación en los aceites minerales. [49]

Los valores recomendados se encuentran expuestos en la Tabla 3. 24 y la Tabla 3. 25.

3.3.10.2.6 *Examen Visual*

Esta prueba indica el color y el grado de turbiedad del aceite mineral, lo que puede indicar la presencia de agua libre o partículas sólidas contaminantes. Los contaminantes pueden determinarse filtrando las partículas y examinándolas. Esta prueba puede ser se utiliza para sugerir la necesidad de realizar pruebas de laboratorio adicionales, ya que puede permitir la determinación de si la muestra debe ser enviada a un laboratorio central para una evaluación completa. [49]

Los valores recomendados se encuentran expuestos en la Tabla 3. 24 y la Tabla 3. 25.

3.3.10.2.7 *Contenido de inhibidores de oxidación*

Dos inhibidores de oxidación sintéticos se utilizan comúnmente en los líquidos dieléctricos. Son el diterbutilfenol (DBP) número 2-6 y diterbutilparacresol (DBPC) número 2-6. Su uso proporciona una resistencia añadida a la oxidación en sistemas que están parcial o totalmente expuestos al aire. La eficacia del inhibidor de oxidación depende mucho del tipo de petróleo crudo del que proviene el aceite mineral aislante. [49]

Ciertos aceites minerales nuevos pueden contener sustancias antioxidantes naturales que pueden dar un falso positivo en esta prueba. [49]

3.3.10.2.8 *Bifelinos Policlorados*

En todo el mundo, las regulaciones requieren que los aparatos eléctricos y los líquidos aislantes eléctricos que contienen bifenilos policlorados (PCB) sean manipulados y eliminados mediante el uso de diferentes procedimientos. El procedimiento que se utilizará para un aparato o una cantidad determinada de líquido aislante es determinado

por el contenido de PCB del líquido. Los resultados de esta técnica analítica pueden ser útiles con el fin de seleccionar los procedimientos de manipulación y eliminación adecuados. La manipulación y eliminación de aparatos eléctricos y los líquidos aislantes eléctricos que contienen bifelinos policlorados está regulado en la mayoría de los países por la regulación nacional, estatal o local. [49]

Los valores recomendados se encuentran expuestos en la Tabla 3. 24 y la Tabla 3. 25.

Tabla 3. 24. Valores límite de prueba para aceite mineral nuevo, antes de ser energizado. [49]

Prueba	Valores por clase de voltaje		
	≤ 69 kV	>69 <230 kV	≥ 230 kV
Voltaje de ruptura dieléctrica ASTM D1816 kV mínimos 1 mm gap 2 mm gap	25 45	30 55	35 60
Factor de disipación ASTM 924 25 °C, % máximo 100 °C, máximo	0,05 0,40	0,05 0,40	0,05 0,30
Tensión interfacial ASTM D971 mN/m mínimo	38	38	38
Examen visual ASTM D1524	Claro	Claro	Claro
Acidez ASTM D974 Mg KOH/g máximo	0,03	0,03	0,03
Contenido de agua ASTM D1533 Mg/kg máximo (ppm) ^a	20	10	10
Contenido de inhibidores de oxidación ASTM D2668 Aceite mineral de tipo II Aceite mineral de tipo II	0,08 0,3	0,08 0,3	0,08 0,3
Gas disuelto total ASTM D3612	N/A	N/A	0,5% o de acuerdo a especificaciones del fabricante ^{b,c}
Azufre corrosivo ASTM D1275	No corrosivo	No corrosivo	No corrosivo

^a La medida equivalente de mg/kg son las partes por millón (ppm)

^b Este valor debe obtenerse de una muestra recogida entre 24 y 48 horas después de

que se llene el transformador

^c El medio por ciento (0,5%) se utiliza para el total de gases disueltos, que es la suma de las (ppms) de los gases individuales que incluyen cualquier gas atmosférico. 0,5% = 5000 ppm

Tabla 3. 25. Valores límites de prueba recomendado para aceite mineral de equipos en servicio. [49]

Prueba	Valores por clase de voltaje		
	≤ 69 kV	>69 <230 kV	≥ 230 kV
Voltaje de ruptura dieléctrica ASTM D1816 kV mínimos 1 mm gap 2 mm gap	23 40	28 47	30 50
Voltaje de ruptura dieléctrica ASTM D877 (Para equipos que no sean transformadores) kV mínimos 2.54 mm gap	25	25	25
Factor de disipación ASTM 924 25 °C, % máximo 100 °C, máximo	0,5 5,0	0,5 5,0	0,5 5,0
Tensión interfacial ASTM D971 mN/m mínimo	25	30	32
Acidez ASTM D974 Mg KOH/g máximo	0.20	0.15	0.10
Contenido de agua ASTM D1533 Mg/kg máximo (ppm) ^a	35	25	20
Contenido de inhibidores de oxidación ASTM D2668 Aceite mineral de tipo II	0,08% mínimo		

^a La medida equivalente de mg/kg son las partes por millón (ppm) en función del peso

3.3.11 ENSAYOS EN EQUIPOS DE PROTECCIÓN PERSONAL

3.3.11.1 Ensayo de guantes y mangas

Cada guante o manga deberá soportar una frecuencia de 50 Hz o 60 Hz voltaje de prueba AC (valor rms) o voltaje de prueba de DC (valor promedio) especificado en la Tabla 3. 26.

El voltaje de prueba debe ser aplicado continuamente por no menos de 1 min y no más de 3 min. [50]

Criterio de aceptación

La prueba se considera satisfactoria si no existe daño o perforación en la estructura del material. [50]

Tabla 3. 26. Niveles de voltajes de prueba en mangas y guantes. [50]

Clase	Máximo voltaje AC de uso rms, V	Voltaje máximo de prueba AC rms, V	Máximo voltaje DC de uso , promedio ,V	Voltaje máximo de prueba DC, promedio, V
00	500	2500	750	10000
0	1000	5000	1500	20000
1	7500	10000	11250	40000
2	17000	20000	25500	50000
3	26500	30000	39750	60000
4	36000	40000	54000	70000

3.3.11.2 Ensayo en mantas

Cada manta se someterá a un examen de prueba y resistencia de voltaje de prueba de 60 Hz AC (valor rms) o la DC voltaje de prueba de prueba (valor promedio) especificado en la Tabla 3. 27. La prueba se realizará de forma continua durante al menos 3 min. [51]

Criterio de aceptación

La prueba se considera satisfactoria si no existe daño o perforación en la estructura del material. [51]

Tabla 3. 27. Niveles de voltaje de prueba en mantas. [51]

Clase	Máximo voltaje nominal de uso fase-fase, ac, rms, max	Voltaje de prueba AC, rms V	Voltaje de prueba DC, V
0	1000	1500	20000
1	7500	10000	40000
2	17000	20000	50000
3	26500	30000	60000
4	36000	40000	70000

3.3.11.3 Ensayo en cobertores

Cada cobertor deberá soportar una frecuencia de 50 – Hz o 60 – Hz voltaje de prueba AC (valor rms) o voltaje de prueba de DC (valor promedio) especificado en la Tabla 3. 28. El voltaje de prueba debe ser aplicado continuamente por no menos de 1 min y no más de 3 min. [52]

Criterio de aceptación

La prueba se considera satisfactoria si no existe daño o perforación en la estructura del material. [52]

Tabla 3. 28. Niveles de voltaje de prueba en cobertores. [52]

Clase	Máximo voltaje AC de uso rms, V	Máximo voltaje DC de uso , promedio ,V	Voltaje máximo de prueba AC rms, V	Voltaje máximo de prueba DC, promedio, V
0	1000	1500	5000	20000
1	7500	11250	10000	40000
2	17000	25500	20000	50000
3	26500	39750	30000	60000
4	36000	54000	40000	70000

3.3.11.4 Ensayo en pértigas

La configuración típica de la prueba se muestra en la

Figura 3. 35. Montar verticalmente la muestra de prueba en al menos a 0,9 m (3 pies) sobre el suelo en un soporte aislante.

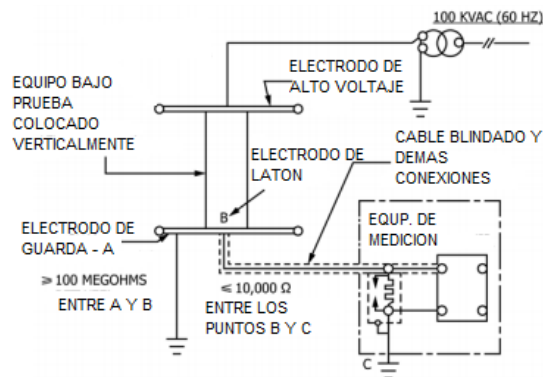


Figura 3. 35. Montaje para ensayo de pértigas. [53]

Procedimiento

Durante la prueba de aceptación de la resistencia eléctrica, los tubos o varillas se someterán a un voltaje alterno de 100 kV rms a frecuencia nominal, con un aumento máximo de voltaje de 3000 V/s. El voltaje de prueba se aplicará entre los electrodos durante 5 min. [53]

Criterio de aceptación

Durante el transcurso de la prueba, no habrá ningún signo de saltos, perforaciones, rastreo o erosión en la superficie de cualquier muestra. No deberá haber un aumento perceptible de la temperatura de cualquier muestra. [53]

3.3.11.5 Ensayo en protectores dieléctricos de cabeza

Solo los protectores de clase G y E se encuentran diseñados para brindar protección eléctrica.

El aparato de ensayo estará compuesto por lo siguiente componentes: [54]

- Un recipiente que contenga agua dulce del grifo, de suficiente tamaño para sumergir el protector a la línea de agua.
- Un marco para suspender la muestra de prueba en el agua.
- Una fuente de corriente alterna de 60-Hertz variable de 0 a 30.000 voltios (rms) con un mínimo de 20 miliamperios de capacidad y 20.000 voltios.
- Cableado y terminales para la aplicación de voltaje a través de la corona de la muestra de prueba.
- Un voltímetro de suficiente capacidad y precisión para medir los voltajes especificados.

f. Un miliamperímetro de capacidad suficiente y precisión para medir las corrientes especificadas.

La Figura 3. 36 muestra el equipo de prueba para protectores dieléctricos de cabeza.

Protectores dieléctricos de cabeza clase G

Aplique el voltaje, aumentándolo de 0 a 22000 voltios, a razón de 1000 V/seg y espere por un minuto. Registre la corriente de fuga. [54]

Protectores dieléctricos de cabeza clase E

Aplique voltaje, e incremente su valor de 0 a 20000 V y mantenerlo por no menos de 3 minutos. Registre los valores de la corriente de fuga. [54]

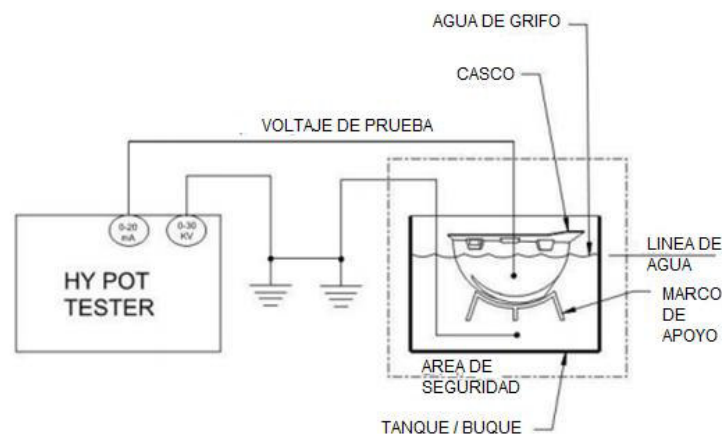


Figura 3. 36. Equipo de prueba de aislamiento eléctrico para protectores dieléctricos de cabeza. [54]

3.3.11.6 Ensayo en calzado

Procedimiento

Llenar el calzado con esferas metálicas que simulen el pie.

El calzado se debe colocar en un electrodo externo tipo malla metálica; un segundo electrodo interno se coloca sobre las esferas metálicas colocadas en el calzado. [55]

El aparato que realiza los ensayos se muestra en la Figura 3. 37.



Figura 3. 37. Pruebas en calzado. [55]

Mantenga el electrodo interno al potencial de tierra.

Aplique el voltaje de prueba al electrodo exterior.

Aumentar el voltaje de prueba a una velocidad de 1 kV/s hasta 18 kV (valor rms) a 60 Hz y mantener este voltaje durante 1 minuto. [55]

Criterio de aceptación

Si se produce una falla al subir el voltaje antes de alcanzar 18 kV, repetir la prueba para verificar la validez de la falla, en caso de producirse nuevamente una falla se considera que el calzado esta defectuoso. [55]

3.3.11.7 Ensayo en canastillas.

Estos dispositivos se encontrarán divididos en 3 categorías: A, B, C. [56]

Categoría A

Dispositivos aéreos que están diseñados y fabricado para trabajos en los que la grúa es considerada como aislamiento primario (trabajo a mano alzada) tendrá todos los componentes conductores en el extremo de la plataforma unido para lograr equipotencial de todos estos componentes de la Figura 3. 38. [56]

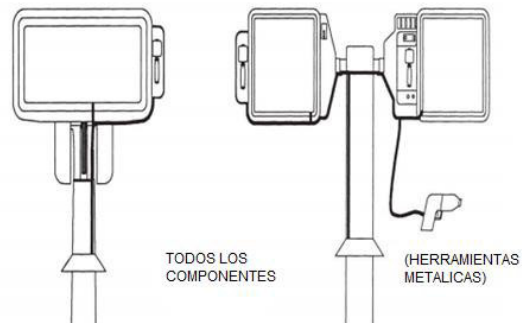


Figura 3. 38. Disposiciones típicas de las canastillas para los dispositivos aéreos de categoría A y categoría B. [56]

Los dispositivos aéreos que están equipados con un sistema de electrodos de prueba inferiores que están diseñados y fabricados para trabajos en los que el boom no se considera un aislamiento primario, sino secundario, (uso de guantes dieléctricos). Los dispositivos aéreos de categoría B pueden ser con una capacidad superior a 46 kV. [56]

Categoría C

Dispositivos aéreos que no son equipados con un sistema de electrodos de prueba inferiores y están diseñados y fabricados para trabajos en los que la canastilla no se considera un aislamiento primario, sino secundario, como el que se utilizan aislantes guantes dieléctricos. Estos dispositivos aéreos están diseñados para de 46 kV e inferiores. [56]

Procedimiento

Pruebas para elementos de categoría A y B.

La grúa debe ser posicionada como se muestra en la Figura 3. 39.

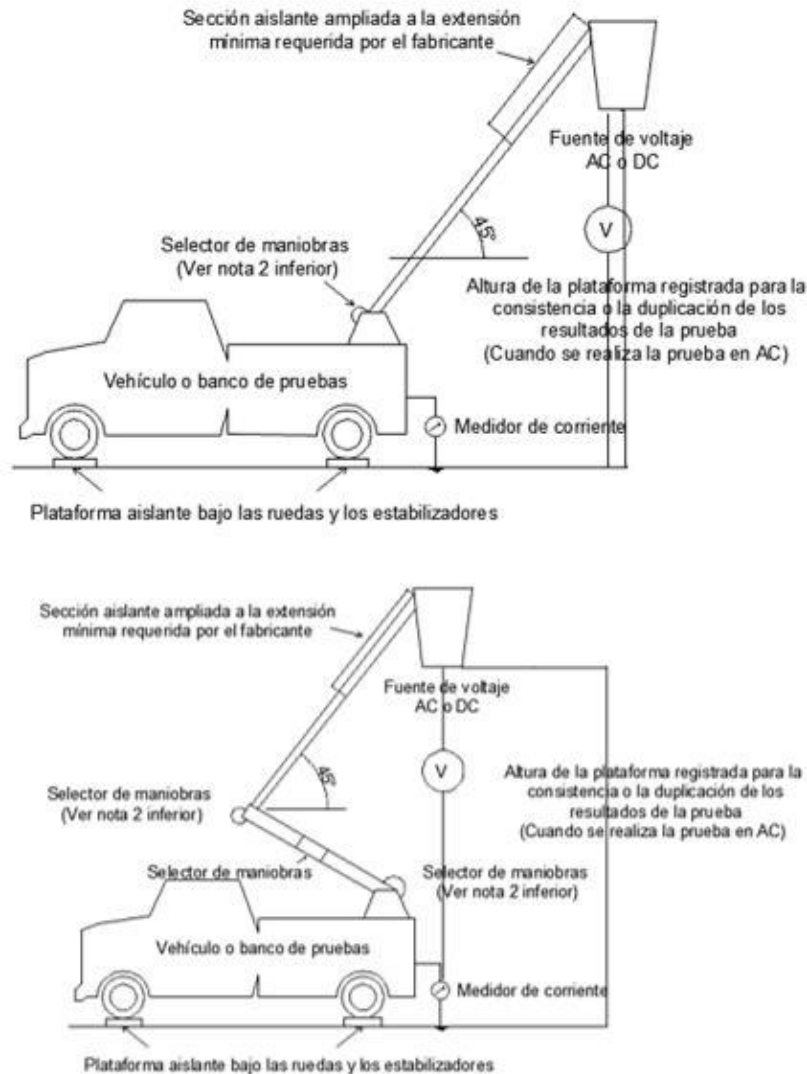


Figura 3. 39. Posiciones de la grúa para la prueba dieléctrica de los dispositivos aéreos aislantes extensibles. [56]

Nota 1: Estas posiciones de la grúa son para pruebas en el exterior. Otras posiciones de la barrera son aceptables, por ejemplo, para pruebas en interiores. Las posiciones utilizadas para las pruebas con corriente alterna deben documentarse y acompañar los documentos de prueba para la repetibilidad de la prueba.

Nota 2: La continuidad eléctrica sobre este punto es necesaria y puede ser verificada por un ohmímetro o medidor de continuidad. Si no hay continuidad a través de este punto, se requiere una derivación [56]

Procedimiento

Se realizará una de las siguientes pruebas:

- a) Una prueba de corriente alterna, aplicable de acuerdo con los criterios de la Tabla 3. 29; [56]
- b) Una prueba de corriente continua, aplicable de conformidad con los criterios de la 3.26;
- c) En el campo y con el vehículo conectado a tierra, la grúa podrá elevarse hasta una línea de alto voltaje cuyo voltaje sea tan alto o más alto que el voltaje de trabajo, pero sin exceder el voltaje de calificación del dispositivo aéreo. Las fugas de corriente no deben exceder los valores indicados en la Tabla 3. 30. Esta prueba se realizará con frecuencia para cumplir con el requisito de la Prueba Periódica. [56]
- (d) Una prueba de contacto de línea de AC energizada de acuerdo con los criterios de la Tabla 3. 30, donde el vehículo sea conectado a tierra.

Pruebas para elementos de categoría C

Se deben realizar una de las siguientes pruebas:

- (a) Una prueba de corriente alterna o corriente continua para la unidad aplicable de acuerdo con los criterios de la Tabla 3. 29Tabla 3. 29. Valores de prueba eléctrica periódica para dispositivos de categorías A, B, C y otros . [56]

La unidad móvil estará aislada de todos los caminos hacia el suelo como se muestra en la Figura 3. 40 con la unidad móvil conectada a través de un cable coaxial apantallado a un medidor de corriente y luego conectado a tierra. La grúa debe ser posicionada como se muestra en la Figura 3. 40; [56]

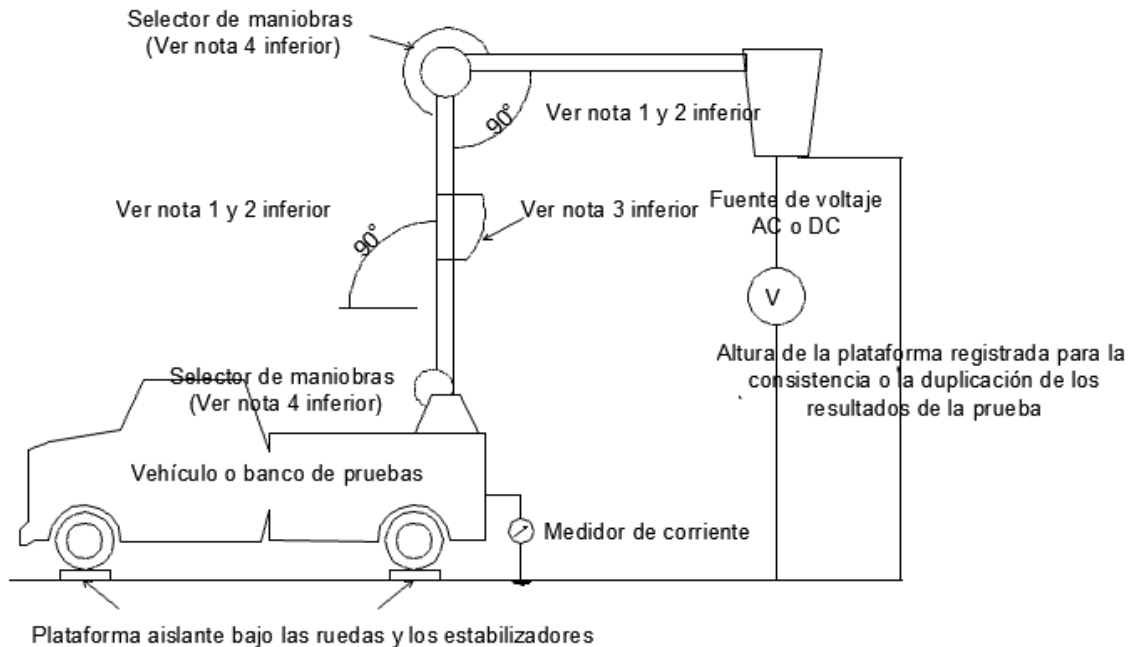


Figura 3. 40. Configuración de la prueba dieléctrica para dispositivos aéreos de categoría C. [56]

Nota 1: Debido a las altas corrientes capacitivas, estos ángulos del brazo son más críticos que en los casos de los dispositivos de categoría A y B.

Nota 2: Estas posiciones de los brazos son para pruebas al aire libre. Otras posiciones son aceptables, cuando las pruebas se realicen en interiores.

Nota 3: Sistema de aislamiento para el chasis.

Nota 4: La continuidad eléctrica sobre esta unión es necesaria y puede ser verificada por un ohmímetro. Si no hay continuidad a través de la articulación, se requiere una derivación.

b) Prueba alternativa de DC para la grúa, aplicable de acuerdo con los criterios de la Tabla 3. 29. La unidad móvil estará conectada a tierra, y los ensayos DC deberán ser realizados por el método alternativo que se aprecian en la Figura 3. 41 con un medidor de corriente conectado entre la fuente de voltaje y la unidad.;

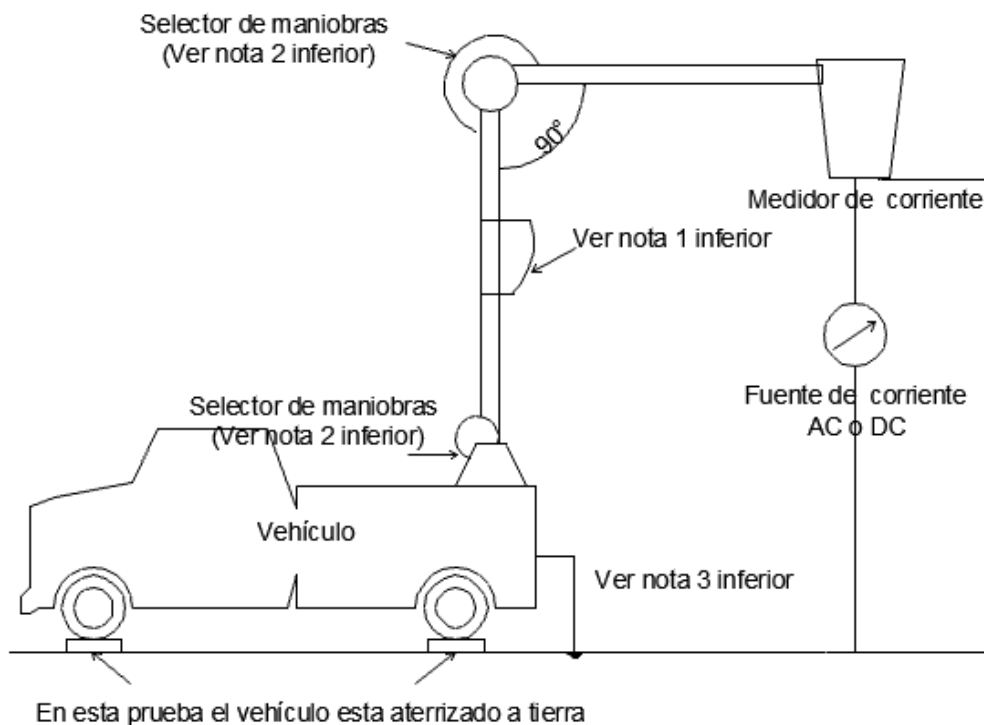


Figura 3. 41. Configuración de prueba dieléctrica opcional para dispositivos aéreos de categoría C. [56]

Nota 1: Sistema de aislamiento para el chasis.

Nota 2: La continuidad eléctrica sobre esta unión es necesaria y puede ser verificada por un ohmímetro. Si no hay continuidad a través de la articulación, se requiere una derivación.

Nota 3: El vehículo debe estar conectado a tierra.

(c) Una prueba de contacto de línea de AC energizada de acuerdo con los criterios de la Tabla 3. 30, donde el vehículo está conectado a tierra y se coloca un amperímetro protegido y con fusibles entre una línea de alto voltaje y el accesorio metálico adherido en la plataforma. Se utilizará un dispositivo de derivación mientras se conecta o desconecta la línea eléctrica. El voltaje mínimo de la línea de prueba debe ser el voltaje máximo de cualquier circuito en el que se vaya a utilizar el dispositivo aéreo. El voltaje máximo de la línea de prueba no debe exceder el voltaje de prueba de calificación del dispositivo aéreo. Esta prueba puede utilizarse como prueba periódica. [56]

Tabla 3. 29. Valores de prueba eléctrica periódica para dispositivos de categorías A, B, C y otros [56]

Unidad nominal	Prueba a 60 Hertz (rms)			Prueba de corriente directa		
	Voltaje nominal de línea (rms kV)	Voltaje (rms kV)	Corriente máxima admisible (μ A rms)	Tiempo	Voltaje (kV)	Corriente máxima admisible (μ A rms)
Dispositivos aéreos aislantes con un sistema de electrodos de prueba inferior (Categoría A y Categoría B).						
46 & inferior	40	40	1 min	56	28	3 min
79	60	60	1 min	84	42	3 min
138	120	120	1 min	168	84	3 min
230	200	200	1 min	280	140	3 min
345	300	300	1 min	420	210	3 min
500	433	433	1 min	606	303	3 min
765	663	663	1 min	928	464	3 min
Dispositivos aéreos aislantes sin un sistema de electrodos de prueba inferior (Categoría C)						
46 & inferior	40	400	1 min	56	56	3 min
Escaleras Aislantes y Torres Aislantes Verticales						
46 & inferior	40	400	1 min	56	56	3 min
20 & inferior	20	200	1 min	28	28	3 min

Nota: A continuación se presenta un método de cálculo de los voltajes de prueba para las unidades que no son indicados en esta tabla:

- a. Los valores de prueba de 60 Hz son iguales a la línea a tierra en el valor nominal de la unidad multiplicado por 1.5
- b. Multiplique los valores de prueba de 60 Hz por 1.4 para obtener los valores de corriente continua.

Tabla 3. 30. Valores de voltajes y tiempo de prueba para dispositivos aéreos aislantes de clase A, B y C. [56]

Categoría del dispositivo	Voltaje	Corriente máxima admisible	Tiempo de prueba
A o B	Línea a tierra	1 μ A/kV ac	3 minutos
A o B	Línea a tierra	0,5 μ A/ kV dc	3 minutos

Categoría del dispositivo	Voltaje	Corriente máxima admisible	Tiempo de prueba
B o C	Línea a tierra	30 μ A/kV ac	3 minutos

3.4. DISTANCIAS DE SEGURIDAD

En función a la información proporcionada sobre dimensiones de los equipos más representativos del laboratorio de alto voltaje como son: el generador de alto voltaje resonante, el conjunto generador de voltajes y corrientes de impulsos, el equipo de pruebas de transformadores y el hi-pot se determinó las distancias mínimas de seguridad con las que cada equipo debe contar así como también una representación gráfica de dichas distancias en la obra civil del laboratorio de alto voltaje.

Conforme a lo establecido por la norma IEC60060-1:2010 se determinó los parámetros requeridos para cada equipo que conforma el laboratorio de Alto Voltaje.

Para el sistema generador de AC de 500 kV, su voltaje pico es 707,12 kV que al trasladar este valor a la Figura 1.20 se tiene 3 metros como distancia de seguridad. Aplicando el factor de corrección atmosférica $k_a=1,42$ dado por la Ecuación 1.6 la distancia mínima entre punto energizados y tierra es de 4.26 metros. Se puede apreciar estas dimensiones en la Figura 3. 42.

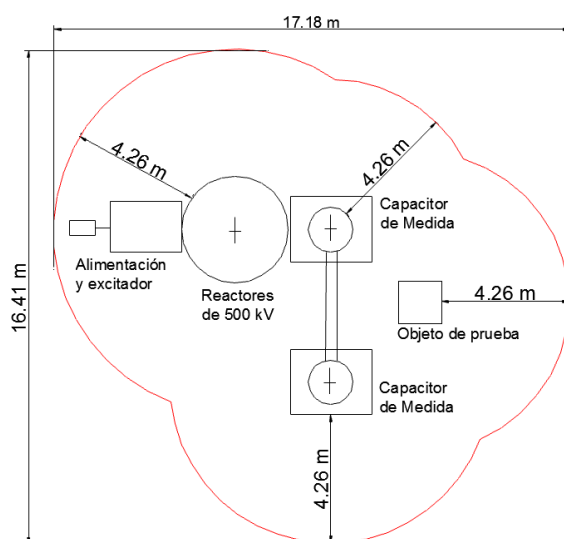


Figura 3. 42. Distancias mínimas en aire para el generador resonante de 500 kV. Fuente: Autores.

Mientras que para el generador de impulsos cuyo valor pico es de 1697,1 kV se determina la distancia de seguridad en base a la Tabla 1.5, cuyo resultado es de 3.2m, que al realizar la corrección por factor k_a , la distancia mínima a tierra es de 4.54m. Sin embargo los fabricantes recomiendan una distancia de seguridad mínima a las paredes, el techo y otras partes conectadas a tierra de 6m la cual es evidenciada en la Figura 3. 43. (Ver ANEXO 1 impulso de voltaje)

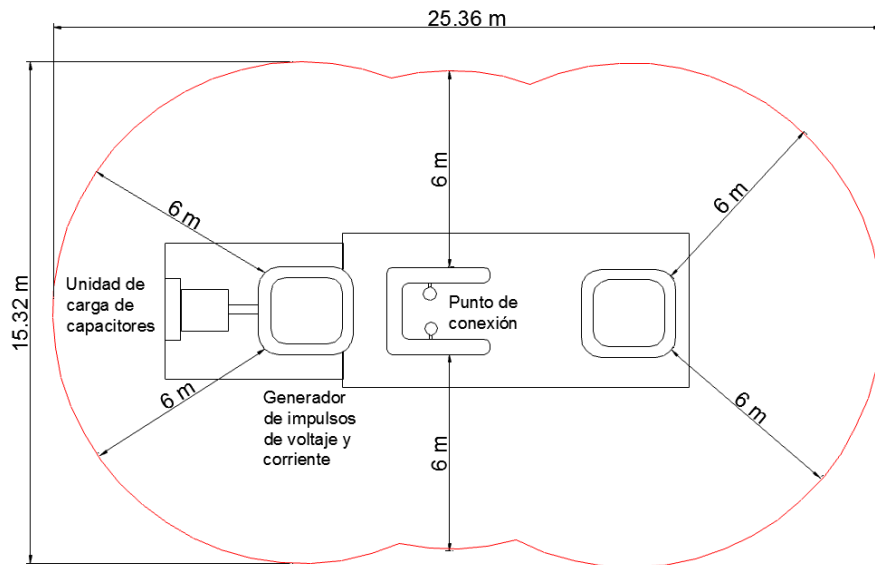


Figura 3. 43. Distancias mínimas en aire para el conjunto generador de impulsos de voltaje y corriente de 1200 kV y 100 kA. Fuente: Autores.

Para el sistema de pruebas de EPP's y dado que el Hi-Pot es un sistema móvil, éste tendrá ciertas distancias para cuando se realicen pruebas en el laboratorio. En base a la referencia [1] se recomienda una distancia de 1m por cada 275 kV. De este modo, siendo el sistema de 200 kV nos da una distancia de 0.72 metros, con el factor de corrección por altitud se necesita de una distancia mínima de 1.03 metros entre puntos vivos y tierra como se indicada en la Figura 3. 44.

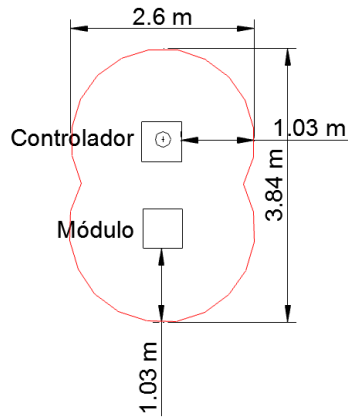


Figura 3. 44. Distancias mínimas en aire para el equipo Hi-Pot de 200 kV DC. Fuente: Autores.

Tomando en cuenta los accesos del personal que cumplirá sus labores además de que al laboratorio ingresarán equipos de gran tamaño para ser ensayados, se propone que la obra civil cuente con una distribución como se muestra la Figura 3. 45.

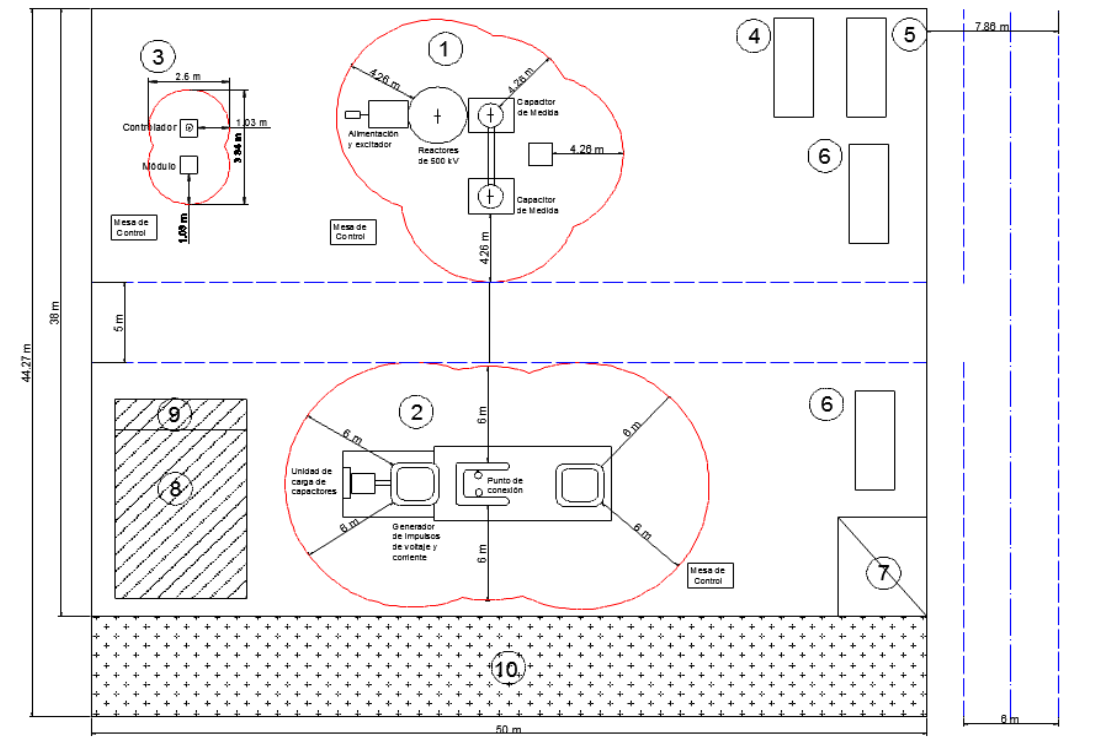


Figura 3. 45. Disposición recomendada de los equipos del Laboratorio de Alto Voltaje de la EEQ. Fuente: Autores.

La ubicación de los equipos de la Figura 3. 45 es detallada a continuación:

1. Generador de Alto Voltaje resonante de 500 kV.
2. Generador de impulsos de voltaje y corriente. 1200 kV /120 kJ.
3. HIPOT de 200 kV DC.
4. Convertidor de frecuencia estática (SFC) para el sistema de pruebas de transformadores de potencia.
5. Transformador elevador trifásico con salida multipunto para el sistema de pruebas de transformadores de potencia.
6. Cámara de control para el sistema de pruebas de transformadores de potencia y banco de condensadores con interruptor aislante trifásico con opción de selección automática o manual.
7. Cámara de transformación
8. Área libre para zona de trabajo, oficinas, taller, etc.
9. Tablero de distribución de energía para el sistema resonante HVAC el sistema de HVDC.
10. Área para construcción de oficinas, sala de conferencia, recepción, taller, bodegas, etc.

Además de la superficie donde se ubicará el laboratorio, las distancias de seguridad proporcionan la altura que debe tener la construcción tal y como se observa en la Figura 3. 46 y Figura 3. 47, se toma en cuenta la altura del sistema resonante y del sistema de generación de impulsos dado que estos son los equipos con mayor altura.

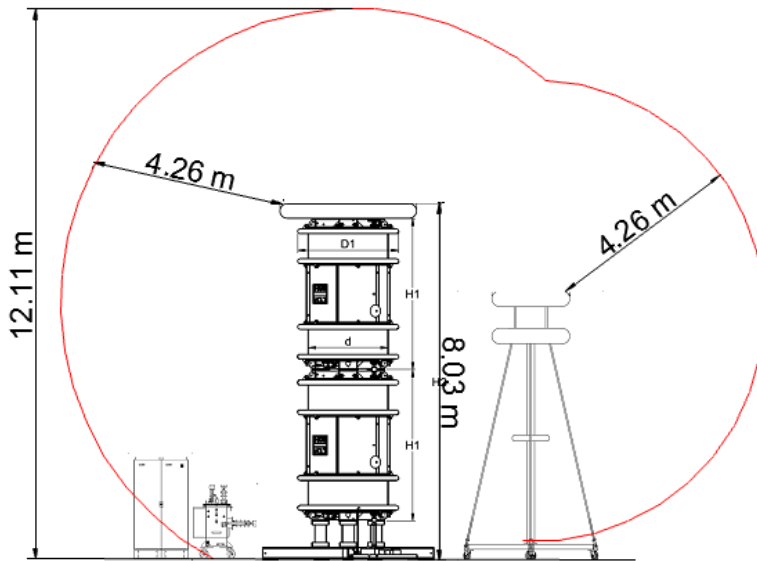


Figura 3. 46. Altura mínima para el generador resonante de HVAC. Fuente: Autores.

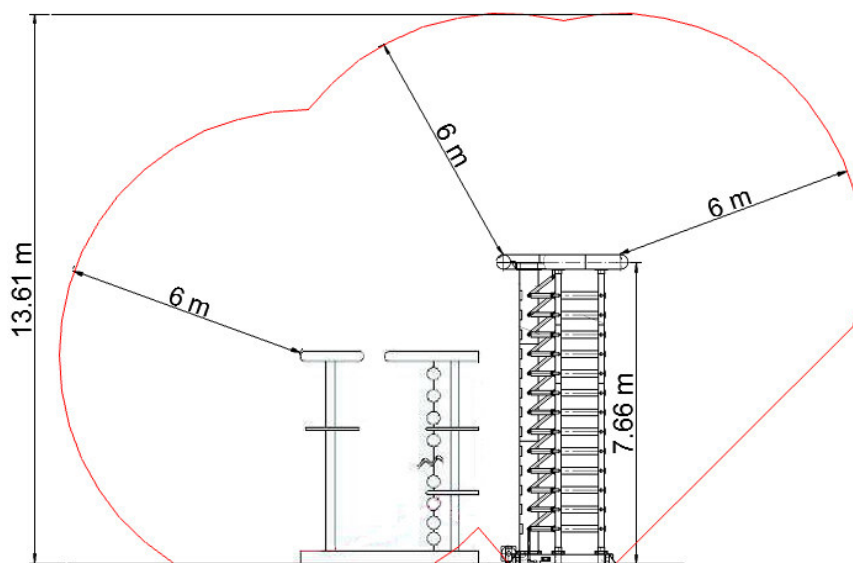


Figura 3. 47. Altura mínima para el sistema de generación de impulsos de 1200 kV. Fuente: Autores.

Como lo sugiere la Figura 3. 48 la altura de la construcción civil del laboratorio será de 13.6 metros a la cual le será incrementada 3 metros por motivos de instalación de luminarias y el puente grúa quedando como la altura mínima requerida los 16.6 metros. En la Figura 3. 48 y la Figura 3. 49 se aprecian las perspectivas de los equipos respecto a la construcción del galpón requerido.

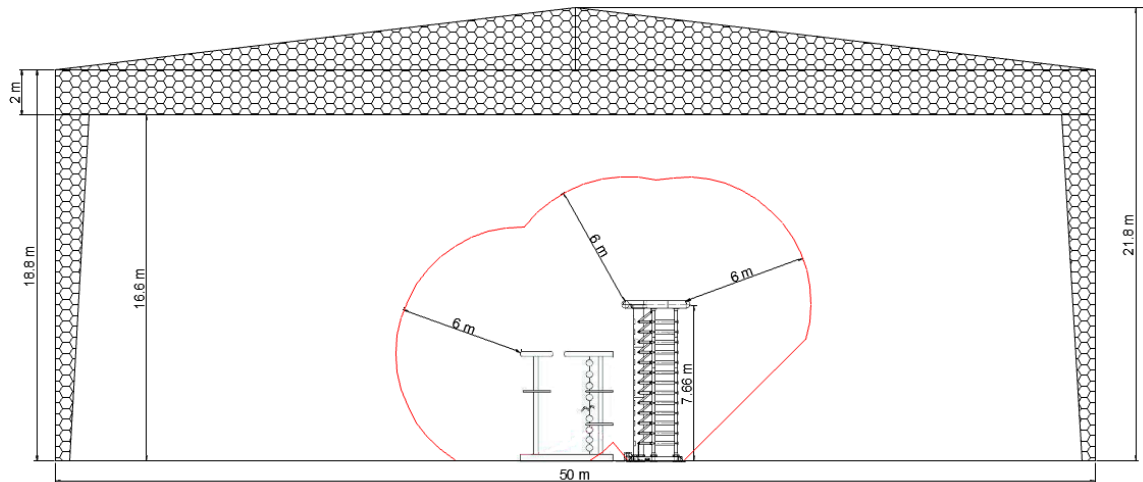


Figura 3. 48. Altura mínima del Laboratorio de Alto voltaje de la EEQ (Lado 1). Fuente: Autores.

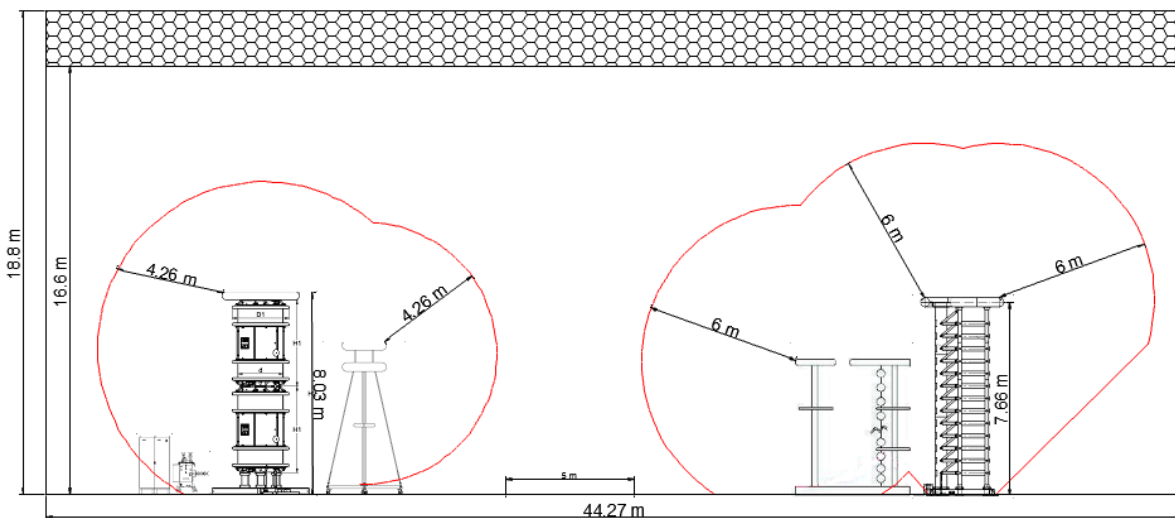


Figura 3. 49. Altura mínima del Laboratorio de Alto voltaje de la EEQ (Lado 2). Fuente: Autores.

En lo que se refiere a la construcción del galpón, éste se verá aumentado en 3 metros ya que los techos suelen ser construidos en forma inclinada, no obstante la superficie del techo puede ser utilizado como bases de instalación de paneles fotovoltaicos a fin de generar energías alternativas que en el futuro puedan alimentar cargas pequeñas localizadas en el laboratorio.

La Figura 3. 45 muestra una disposición aproximada de donde pueden ser construidas las oficinas, bodegas, sala de conferencias, taller y área de recepción sin que esto signifique

que no se pueda realizar la construcción de otros tipos de edificaciones sin olvidar tomar en cuenta las distancias de seguridades establecidas.

Nótese que los diagramas mostrados anteriormente son bosquejos aproximados de la construcción del galpón y que para su correcta implementación esto debe ser analizado y realizado en conjunto con un ingeniero civil y un ingeniero mecánico los cuales determinarán las dimensiones y características finales del galpón.

El galpón tendrá la capacidad de ingreso de tráileres suponiendo el caso más crítico de ingreso de un transformador de 40 MVA por lo cual deberá contar con un corredor de 5 metros de ancho el cual facilite el ingreso de estos así como del ingreso de los equipos componentes del laboratorio. Finalmente se determinó que la las dimensiones mínimas requeridas del galpón son: 50 metros de largo por 44.27 metros de ancho y 16.6 metros de altura más la altura del techo inclinado de 3 metros.

3.5. ANALISIS ECONÓMICO

Previo a la ejecución de un proyecto de inversión siempre es necesario demostrar no solo la viabilidad técnica sino también su viabilidad económica, de este modo se garantiza que el mismo genere recursos suficientes para retornar la inversión.

En este capítulo se expondrá el análisis económico correspondiente al nuevo laboratorio de alto voltaje.

3.5.1 COSTOS LIGADOS A LA OPERACIÓN, CONSTRUCCIÓN Y ADQUISICIÓN DE EQUIPO PARA EL LABORATORIO

Cálculo del transformador de alimentación del laboratorio

Dentro de la instalación del nuevo laboratorio se pueden identificar diversas zonas en las cuales se llevarán a cabo las diversas labores, que pueden ser apreciadas en la Figura 3.45.

Iluminación

Debido a la altura de la edificio, se requiere el uso de luminarias de alta luminosidad, por ello se ha considerado el uso de luminarias tipo highbay, cuyas principales aplicaciones se pueden ver reflejadas en la iluminación de bodegas, galpones, hangares e industrias con instalaciones de techo alto.

Al analizar los valores de niveles de iluminación recomendados para interiores, el nivel recomendado es de 300 lux, considerando un plano de trabajo de 0,85 m.

Es importante mencionar que para llevar a cabo el cálculo actual se ha considerado un color blanco puro para las paredes, un techo de metal y para el suelo así mismo un color blanco.

Elección de las luminarias

Gracias al uso del software Dialux Evo 8.2, se determinó que la luminaria a escoger debe contar con un rendimiento lumínico de al menos 158 lm/W y la altura de montaje deberá ser de 16,6 m, para este caso en particular se ha seleccionado la luminaria High Power LED High bay Light AOK-460Wofu, que se aprecia en la Figura 3. 50.

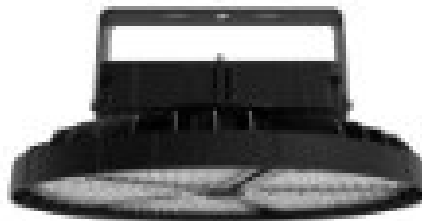


Figura 3. 50. Muestra de luminaria recomendada. Fuente: Dialux Evo 8.2

En la Figura 3. 51 se aprecia la disposición recomendada por el software Dialux Evo 8.2, mientras que la Tabla 3. 31 muestra las coordenadas exactas en las cuales se debe colocar las luminarias.



Figura 3. 51. Disposición geométrica de las luminarias en el laboratorio. Fuente: Dialux Evo 3.2.

Tabla 3. 31. Coordenadas para la ubicación de las luminarias. Fuente: Dialux.

AOK AOK-460WofU High Power LED High bay Light

N°	X [m]	Y [m]	Altura de montaje [m]	Factor de degradación
1	6.250	7.378	16.600	0.80
2	18.750	7.378	16.600	0.80
3	31.250	7.378	16.600	0.80
4	43.750	7.378	16.600	0.80
5	6.250	22.135	16.600	0.80
6	18.750	22.135	16.600	0.80
7	31.250	22.135	16.600	0.80
8	43.750	22.135	16.600	0.80
9	6.250	36.892	16.600	0.80
10	18.750	36.892	16.600	0.80
11	31.250	36.892	16.600	0.80
12	43.750	36.892	16.600	0.80

De acuerdo a los datos expuestos por la Tabla 3. 32, se puede determinar que la carga de iluminación resultante es de 5,52 kW

Tabla 3. 32. Detalle del consumo de energía de las luminarias. Fuente: Dialux.

Número de luminaria	Φ (Luminaria) [lm]	Potencia [W]	Rendimiento lumínico [lm/W]
12 AOK-AOK-460WofU High Power LED High bay Light	72.990	460	158,7
Suma total de luminarias	875.880	5.520	158,7

Potencia de conexión: 2,49 W/m² (Superficie de planta de la estancia 2213,5 m²)

Consumo: 12400 kWh/a de un máximo de 77500 kWh/a

Carga de los equipos de Alto voltaje

La mayor parte de la demanda de energía del laboratorio se verá reflejada precisamente en la operación de estos equipos, en la Tabla 3. 33 y la Tabla 3. 34 es posible apreciar la demanda eléctrica de los equipos de alto voltaje.

Tabla 3. 33. Potencia de los equipos de alto voltaje

Sistema	Potencia nominal [kVA]	Potencia activa [kW]
Sistema resonante de generación de alto voltaje AC	75	71,25
Sistema de generación de voltaje y corriente de impulso	200	190
Sistema de prueba de transformadores	375	356,25
Hi-Pot DC	10	9,5
Sistema de prueba de disyuntores	15	14,25
Equipos menores	12	11,4
Total		652,65

Tabla 3. 34. Demanda máxima unitaria de los equipos de alto voltaje

Elemento	Carga [kW]	Factor de utilización Fu	Carga instalada representativa [kW]	Factor de simultaneidad Fc	Demanda máxima unitaria [kW]
Sistema resonante de generación de alto voltaje AC	71,25	0,7	49,875	1	49,875
Sistema de generación de voltaje y corriente de impulso	190	0,5	95	1	95
Sistema de prueba de transformadores	356,25	0,9	320,4	1	320,4
Hi-Pot DC	9,5	0,6	5,7	1	5,7
Sistema de prueba de disyuntores	14,25	0,5	7,125	1	7,125
Equipos menores	11,4	0,6	6,84	1	6,84
Total					484,94

A partir de la Tabla 3. 34 se observa que la demanda esperada para los sistemas de alto voltaje es de 484,94 kW.

Cargas adicionales

En este punto haremos referencia a los tomacorrientes de 120 V que el laboratorio necesitará para cubrir sus necesidades de energía cuya salida de corriente se considera sea de 2 A, para los tomacorrientes de 220 V se considera una salida de 50 A además se tiene en cuenta también la potencia del puente grúa que también se propone sea adquirido, toda esta información se aprecia en la Tabla 3. 35.

Tabla 3. 35. Demanda de energía de las cargas adicionales

Elemento	Carga [kW]	Factor de utilización Fu	Carga instalada representativa [kW]	Factor de simultaneidad Fc	Demanda máxima unitaria [kW]
40 Tomacorrientes de 120 V/2A	9,12	0,7	6,384	0,2	1,276
12 Tomacorrientes de 220/50A	132	0,7	92,4	0,2	18,48
Puente grúa	8	0,9	7,2	1	7,2
Total					26,956

Transformador de alimentación

Es evidente que el transformador de alimentación para el nuevo laboratorio deberá ser capaz de soportar la demanda en conjunto de los sistemas de iluminación, equipos de alto voltaje y las cargas adicionales, para el dimensionamiento del transformador de alimentación se considera también un posible crecimiento en la demanda de energía del laboratorio, para este caso en particular se considerará un 20%.

Demanda en iluminación	D ilu= 5,52 kW
Demanda de equipos de alto voltaje	D hv= 484,94 kW
Demanda de cargas adicionales	D a = 26,959 kW
Demanda total	D t = 517,419 kW

Aplicando el factor de crecimiento se tiene una demanda final igual a:

Demanda final $D_f = 620,303 \text{ kW}$

Una vez obtenida la demanda final y al considerar un factor de potencia $fp=0,9$ se tiene que la demanda de diseño para el transformador es igual a:

Demanda de diseño $D_d = 689,22 \text{ kVA}$

Al analizar los valores comerciales más cercanos se tiene que el transformador de alimentación tendrá una capacidad de 750 kVA.

Costos de Inversión

Para el cálculo de los costos de inversión se considera esencial la adquisición de normas para el funcionamiento del mismo, en la Tabla 3. 36 describe los costos de las normas requeridas.

Luego de haber establecido contacto con diversos fabricantes internacionales y entablado conversaciones con distribuidores de equipamiento eléctrico en el Ecuador se receptaron diversas proformas, de las cuales se seleccionaron los equipos que presentaron mejor relación calidad precio, mismos que se pueden apreciar en la Tabla 3. 37, por este motivo los equipos detallados a continuación no pertenecen a un solo fabricante en concreto.

Tabla 3. 36. Costos de las normas internacionales requeridas para el nuevo laboratorio de la EEQ.

Elementos	Norma	Costo (USD)
Transformador	IEC 60076-3	400,00
	IEEE Std C57.12.00	99,00
	IEEE Std C57.12.90	99,00
Transformadores de medición	IEEE Std C57.13-2016	420,00
Disyuntores/Seccionadores	IEEE Std C37.42	84,00
	IEEE Std C37.41	84,00
Apartarrayos	IEEE Std C62.11	269,00

Cables	IEEE Std 400.1-2018	55,00
	IEEE Std 400.2-2013	137,00
	IEC 60885-3	189,00
	IEC 60502-2	403,00
Aisladores	AIEE C29.1	49,00
Celdas de seccionamiento	IEC 62271-102	303,00
	IEC-60694	145,00
Fusibles	C37.41	84,00
Re-conectores	AIEE 50	51,00
Aceite	ASTM D 877	50,00
Equipos de protección personal	Norma	Costo (USD)
Protector dieléctrico de cabeza	ANSI-ISEA Z89.1	35,00
Calzado	ASTM F2412- 18a	50,00
Guantes y mangas	ASTM F496 – 14a	50,00
Mantas	ASTM D1048 – 14	50,00
Cobertores	ASTM F478 – 14a	40,00
Pértigas	ASTM F711-17	50,00
Canastillas	ANSI/SIA A92.2-2009	282,00

Tabla 3. 37. Costo de inversión del nuevo laboratorio

Equipo	Inversión (USD)
Sistema Resonante	210.000,00
Sistema de Impulso	180.000,00
Sistema de prueba de transformadores	470.000,00
Sistema de prueba de descargas parciales	90.000,00
Sistema de prueba de aceites	25.980,00
TTR	20.570,00
Tangente delta	62.400,00
SFRA	39.000,00
Termómetro	6.000,00
Hi-Pot 200kV DC	18.700,00

Meghómetro	30.300,00
Micrómetro	21.560,00
Planta de tratamiento de aceite	120.000,00
Higrómetro	450,00
VLf cables	43.320,00
Sistema de pruebas de disyuntores	1 250.000,00
Transformador de alimentación para el laboratorio	20.000,00
Adquisición de normas	3.419,00
Costo de ingeniería del proyecto	20.000,00
Costo del puente grúa	20.000,00
Costo de la edificación	150.000,00
Costo del terreno	175.000,00
Total	2 976.699,80

Costos de operación y mantenimiento

Con el fin de calcular los egresos del laboratorio en la Tabla 3. 38 se especifican los egresos correspondientes a la construcción, operación y mantenimiento del mismo.

Los costos de mantenimiento se han estimado en 1% de la inversión en el equipamiento. Los salarios del personal se han tomado directamente de los datos proporcionados por la EEQ, mientras que para el cálculo del número de trabajadores se ha tomado como referencia el actual laboratorio de transformadores, teniendo en cuenta que para realizar la mayoría de los ensayos ofrecidos por el laboratorio propuesto requiere de al menos de dos personas, se considera la jornada laboral como ocho horas diarias y cinco días a la semana.

Si bien la EEQ tiene en su haber terrenos que podrían ser utilizados para la construcción del proyecto, en este caso se considera que todo proyecto debe ser autosuficiente, por ende el costo del terreno también se incluye para el cálculo del costo total de inversión.

Se considera que el terreno donde se ubique el laboratorio debe ser de por lo menos unos 3000 m², mientras que para la construcción del inmueble en sí, se debe tener en cuenta que la obra civil debe ser una jaula de Faraday, es por esto que casi la totalidad de la edificación deberá ser de acero.

Es importante tener en cuenta que por el número de ensayos que se prevé sean llevados a cabo y con el fin de agilizar los mismos, se ve necesario añadir un puente grúa capaz de mover las cargas más pesadas dentro del laboratorio, la capacidad del mismo deberá ser de por lo menos 5 toneladas.

Por último se considera que un laboratorio que lleve a cabo pruebas eléctricas debe contar con las normas correspondientes a dichos ensayos, las normas que se proponen sean adquiridas se encuentran descritas en el punto 2.2 de este documento, y el precio de las mismas ha sido cuantificado en un solo grupo.

Tabla 3. 38. Costo de operación y mantenimiento del laboratorio

Razón	Costo unitario	Cantidad	Costo final por año (USD)
Mantenimiento del laboratorio	29.866,8 USD	1 vez/año	29.866,8
Pago Jefe de laboratorio	13,5 USD/ hora	1	25.920
Pago ingeniero eléctrico	8,125 UDSD/hora	4	62.400
Pago tecnólogos	6,25 USD/hora	5	60.000
Consumo de energía	0,081 USD/kWh	482961,6 kW h/año	39.120
Seguridad y aseo	2,5 USD/hora	3	14.400
Costo Total			231.706,8

3.5.2 OFERTA DE LOS ENSAYOS QUE OFRECERÁ EL LABORATORIO

Dado que los equipos que se proponen sean adquiridos deben cumplir con diversas normas internacionales, la gama de ensayos que pueden ser llevados a cabo por los mismos es bastante amplia, y se detalla a continuación.

Oferta de servicios:

- Pruebas dieléctricas en transformadores de acuerdo a IEEE Std C57.12.90, IEEE Std C57.12.00, IEC 60076-3

- Pruebas dieléctricas en transformadores de instrumentación de acuerdo a IEEE Std C57.13-2016
- Pruebas dieléctricas de aceite de acuerdo a ASTM D 877
- Pruebas dieléctricas en aisladores de acuerdo a AIEE C29.1-1994
- Pruebas dieléctricas en celdas de seccionamiento de acuerdo a IEC 60694 e IEC62271-102
- Pruebas dieléctricas en cables de acuerdo a IEEE Std 400.1-2018, IEEE Std 400.2-2013, IEC 60885-3, IEC 60502-2
- Pruebas dieléctricas en pararrayos de acuerdo a IEEE Std C62.11-2012
- Pruebas dieléctricas en re-conectores de acuerdo a AIEE 50
- Pruebas dieléctricas en interruptores de acuerdo a IEEE Std C37.34.
- Pruebas dieléctricas en seccionadores, fusibles, seccionador porta fusible de acuerdo a IEEE Std C37.41 e IEEE Std C37.42.
- Pruebas dieléctricas en calzado de acuerdo a ASTM F2412- 18a
- Pruebas dieléctricas en guantes de acuerdo a ASTM D120-14a y F496-14a
- Pruebas dieléctricas en cobertores de acuerdo a ASTM 478-14a
- Pruebas dieléctricas en mantas de acuerdo a ASTM D1048-14
- Pruebas dieléctricas en pértigas de acuerdo a ASTM F711- 17
- Pruebas dieléctricas en canastillas de acuerdo a ANSI/SIA A92.2-2009
- Pruebas dieléctricas en protectores dieléctrico de cabeza de acuerdo a ANSI-ISEA Z89.1

Las pruebas descritas previamente son las más comunes, aunque no se descarta la posibilidad de llevar a cabo ensayos sobre otros elementos, tal es el caso de ensayos en EPP's, como se explica en el literal 3.3.11 del presente documento estos pueden ser ensayados con voltaje AC o DC, y para ello se ha considerado la compra de un Hi-Pot DC que podrá ser utilizados para llevar a cabo dichos ensayos.

Además de los ensayos dieléctricos, el laboratorio puede tomar en consideración la posibilidad de dictar cursos de capacitación que incluyan el manejo de los equipos adquiridos, ensayos dieléctricos de acuerdo las normas listadas anteriormente.

3.5.3 DEMANDA DE LOS ENSAYOS QUE SE LLEVARÁN A CABO EN EL LABORATORIO

Dado que en el Ecuador no existe un laboratorio de estas características, se pueden identificar tres potenciales clientes para el mismo.

Demanda interna.

La EEQ cuenta con una amplia cantidad de elementos además de las adquisiciones que se realizan anualmente, por ende el laboratorio que se propone, se encuentra diseñado para llevar a cabo ensayos a todo el equipamiento eléctrico de la empresa, de este modo se puede identificar un gran mercado interno, así pues los ingresos en este punto se verán reflejados en forma de ahorros.

La Figura 3. 52, Figura 3. 53, Figura 3. 54 y Figura 3. 55, muestran a continuación el número de pruebas que el laboratorio de transformadores ha llevado a cabo desde el año 2014 al 2018. [57]

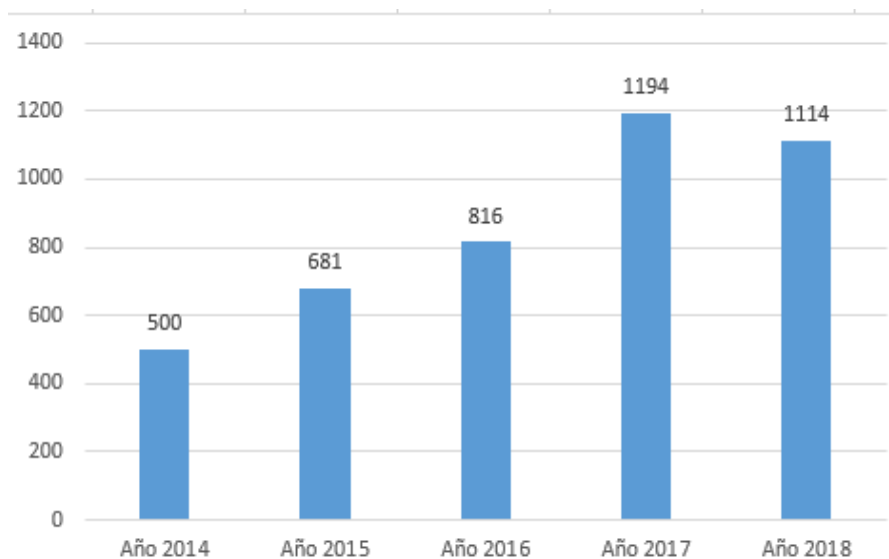


Figura 3. 52. Número de transformadores atendidos por el laboratorio de transformadores de la EEQ. [57]

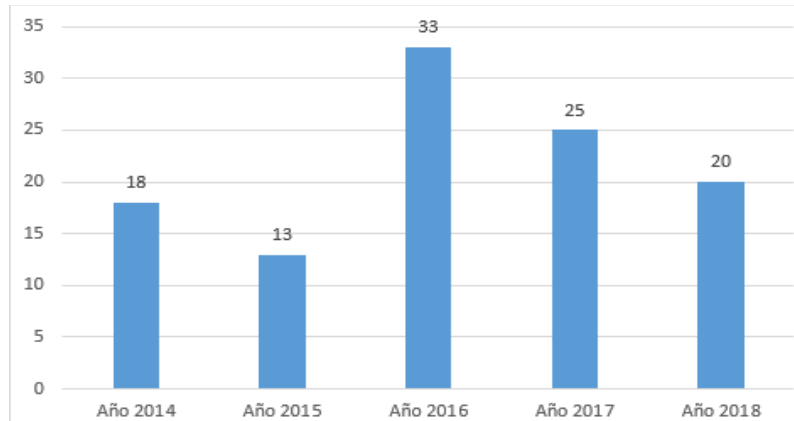


Figura 3. 53. Número de interruptores atendidos por el laboratorio de transformadores de la EEQ. [57]

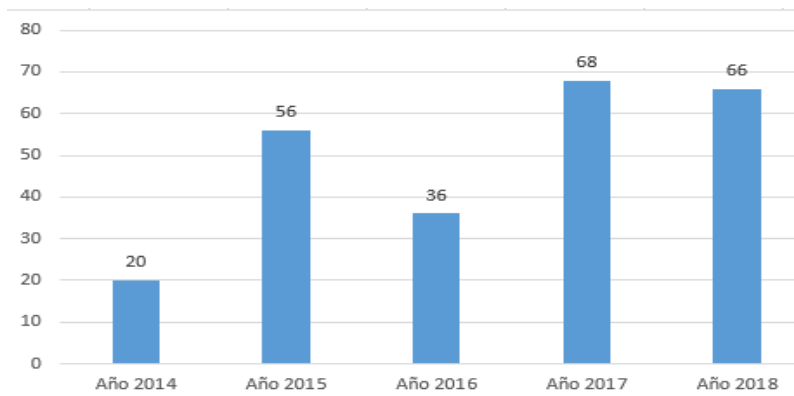


Figura 3. 54. Número de carros canasta atendidos por el laboratorio de transformadores de la EEQ. [57]

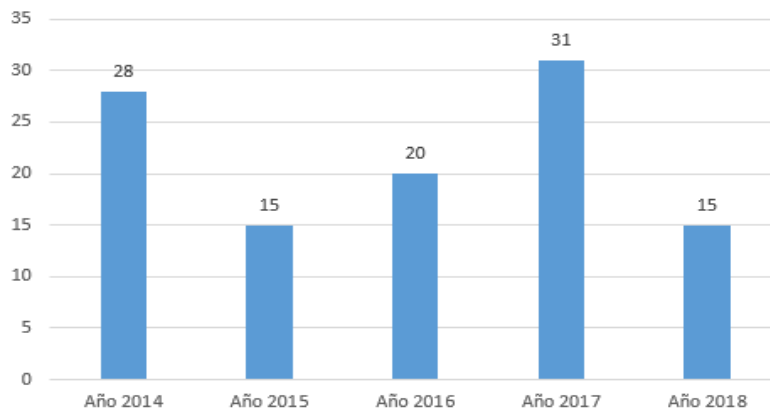


Figura 3. 55. Número de re-conectores atendidos por el laboratorio de transformadores de la EEQ. [57]

Cientes externos

En este punto se pueden destacar dos tipos de clientes externos, los primeros vendrían a ser las demás empresas de distribución de energía eléctrica del país, y los segundos son cualquier cliente particular que requiera realizar ensayos dieléctricos en algún tipo de equipamiento en específico. De este modo de acuerdo a las Estadísticas del sector eléctrico ecuatoriano 2018, las empresas distribuidoras cuentan con las características que se describen en la Tabla 3. 39 y la Tabla 3. 40, es posible apreciar el amplio mercado que ofrecen las empresas distribuidoras del país, que bien podría ser aprovechado por el nuevo laboratorio.

Es importante recalcar también que cada una de estas empresas debe proporcionar equipos de protección personal para sus trabajadores, que también deben ser ensayados, de acuerdo a la norma NFPA 70E, es obligatorio ensayar todo equipo y herramienta de protección antes de ser entregado al trabajador, y en el caso específico de guantes de protección estos deben ser ensayados dos veces por año.

En el caso de que empresas fabricantes de transformadores deseen mejorar sus diseños y realizar pruebas especiales como son las pruebas de voltaje de impulso de acuerdo a IEC 60076-3 e IEEE Std C57.90, el laboratorio propuesto también se encontraría en la capacidad de llevarlas a cabo.

A todo esto es necesario agregar también los proveedores de material eléctrico que tienen las empresas eléctricas, industria petrolera, comunicaciones, constructoras, etc, mismos que requieren ensayar sus productos para demostrar la calidad de los mismos previo a su comercialización.

Así pues una vez analizado el abanico de potenciales clientes para el laboratorio, se puede observar a breves rasgos que la demanda del mismo será bastante grande.

Tabla 3. 39. Número y capacidad de transformadores de distribución. [58]

Empresa	Monofásico (u)	Trifásico (u)	Total (u)	Monofásico (MVA)	Trifásico (MVA)	Total (MVA)
CNEL- Guayaquil	33.995	2.055	36.050	1.792,28	630,77	2.423,55
CNEL- Guayas Los Rios	28.683	1.080	29.763	896,74	227,63	1.124,37
CNEL- Manabi	25.298	871	26.169	593,04	131,12	724,15

CNEL-EI Oro	14.374	1.372	15.746	392,06	269,39	661,45
CNEL-Sto Domingo	21.765	1.028	22.793	339,15	106,86	446,01
CNEL-Sta.Elena	8.519	496	9.015	260,85	112,54	373,79
CNEL-Esmeraldas	8.985	887	9.872	191,29	122,15	313,44
CNEL-Milagro	11.085	359	11.444	245,32	75,67	320,99
CNEL-Los Rios	9.645	394	10.039	265,17	51,04	316,21
CNEL-Sucumbios	8.420	1.072	9.492	143,36	108,17	251,53
CNEL-Bolivar	5.072	207	5.279	58,76	14,60	73,35
Total CNEL EP	175.841	9.821	185.662	5.178,51	1.849,93	7.028,44
E.E. Quito	24.902	15.851	40.753	672,70	2.113,99	2.786,70
E.E. Centro sur	19.249	4.382	23.631	328,21	430,89	759,10
E.E. Norte	14.046	2.467	16.513	267,96	196,18	464,14
E.E. Ambato	12.429	2.484	14.913	179,74	220,69	400,43
E.E Sur	16.905	951	17.856	240,95	103,40	344,35
E.E. Riobamba	12.385	837	13.222	189,64	77,85	267,49
E.E. Cotopaxi	7.755	1.424	9.179	121,72	132,74	254,46
E.E. Azogues	1.769	278	2.047	30,83	23,70	54,53
E.E. Galápagos	805	139	944	21,11	11,09	32,20
Total Empresas Eléctricas	110.245	28.813	139.058	2.052,86	3.310,53	5.363,39
Total General	286.086	38.634	324.720	7.231,36	5.160,46	12.391,83

Tabla 3. 40. Redes eléctricas de las distribuidoras del Ecuador. [58]

Empresa	Monofásico (km)	Bifásico (km)	Trifásico (km)	Total (km)
CNEL-Sto Domingo	5.556,26	29,58	17,33	5.603,17
CNEL-Manabí	5.505,86	4,66	30,24	5.540,76
CNEL-Guayas	5.067,51	18,28	33,09	5.118,88

Los Ríos				
CNEL-Sucumbíos	4.305,94	6,79	110,41	4.423,14
CNEL-Guayaquil	4.475,17	170,28	20,20	4.665,66
CNEL-EI Oro	3.207,39	0,70	8,15	3.216,23
CNEL-Bolívar	2.969,61	15,40	53,96	3.039,27
CNEL-Esmeraldas	2.627,71	23,30	52,37	2.703,39
CNEL-Los Ríos	2.012,96	1,83	16,33	2.031,13
CNEL-Milagro	1.946,60	5,39	0,63	1.952,62
CNEL-Sta. Elena	1.634,72	3,85	3,72	1.642,29
Total CNEL EP	39.310,03	280,06	346,44	39.936,54
E.E. Centro sur	10.698,20	335,08	954,15	11.987,43
E.E. Quito	1.438,31	6.509,25	2.229,66	10.177,23
E.E. Ambato	6.465,19	144,53	611,63	7.221,35
E.E. Norte	5.683,89	338,18	258,20	6.280,28
E.E. Cotopaxi	4.992,95	119,91	239,08	5.596,61
E.E. Riobamba	5.010,98	38,19	38,47	5.069,61
E.E Sur	1.301,46	79,19	123,49	5.213,66
E.E. Azogues	204,62	39,95	71,55	1.412,95
E.E. Galápagos	41.033,22	2,64	18,82	226,08
Total Empresas Eléctricas	80.343,25	7.606,92	4.545,06	53.185,19
Total General	80.343,25	7.886,98	4.891,50	93.121,73

3.5.4 ESTIMACIÓN DE INGRESOS

Una vez conocida la cantidad de ensayos que lleva a cabo el actual laboratorio de transformadores de la EEQ, además del amplio mercado al cual el presente proyecto tendría acceso, es pertinente proceder a calcular la cantidad de ingresos a los cuales el nuevo laboratorio tendría acceso por el préstamo de sus servicios, dicha estimación se muestra en la Tabla 3. 41 y la Tabla 3. 42.

Tabla 3. 41. Estimación de ingresos para el nuevo laboratorio por concepto de pruebas en transformadores

PRUEBA	COSTO (USD)	Nº DE PRUEBAS POR AÑO	INGRESO NETO (USD)
Transformadores de 30 kVA hasta 125 kVA			
Voltaje inducido y aplicado	120,00	520	62.400,00
Voltaje de impulso	280,00	4	1.120,00
Pruebas de rutina(megado, TTR, FP)	140,00	520	72.800,00
Descargas parciales	250,00	6	1.500,00
Transformadores de 150 kVA hasta 250 kVA			
Voltaje inducido y aplicado	160,00	450	72.000,00
Voltaje de impulso tipo maniobra	320,00	4	1.280,00
Pruebas de rutina	160,00	450	72.000,00
Descargas parciales	280,00	6	1.680,00
Transformadores de 300kVA hasta 500kVA			
Voltaje inducido y aplicado	200,00	300	60.000,00
Voltaje de impulso	360,00	3	1.080,00
Pruebas de rutina	220,00	300	66.000,00
Descargas parciales	320,00	2	640,00
Transformadores de 630kVA hasta 2,5MVA			
Voltaje inducido y aplicado	260,00	25	6.500,00
Voltaje de impulso	400,00	1	400,00
Pruebas de rutina	280,00	25	7.000,00
Descargas parciales	360,00	1	360,00
Transformadores de 5MVA hasta 10MVA			
Voltaje inducido y aplicado	500,00	5	2.500,00
Voltaje de impulso	600,00	1	600,00
Pruebas de rutina	350,00	5	1.750,00
Descargas parciales	420,00	1	420,00
Transformadores de potencia de 10MVA hasta 40MVA			
Voltaje inducido y aplicado	2.000,00	1	2.000,00
Voltaje de impulso	3.500,00	1	3.500,00
Pruebas de rutina	2.000,00	1	2.000,00
Descargas parciales	1.500,00	1	1.500,00
Total			441.030,00

Tabla 3. 42. Estimación de ingresos para el nuevo laboratorio por concepto de pruebas de diferentes elementos eléctricos

PRUEBA	COSTO (USD)	Nº DE PRUEBAS POR AÑO	INGRESO (USD)
Pruebas en Transformadores de corriente de medio voltaje			
Voltaje aplicado e inducido	180,00	6	1.080,00
Descargas parciales	180,00	6	1.080,00

Prueba de polaridad	150,00	6	900,00
Prueba de relación de transformación	150,00	6	900,00
Pruebas en Transformador de potencial de medio voltaje			
Voltaje aplicado e inducido	180,00	6	1.080,00
Descargas parciales	180,00	6	1.080,00
Prueba de polaridad	150,00	6	900,00
Prueba de relación de transformación	150,00	6	900,00
Pruebas en aisladores			
Prueba de baja frecuencia de flashover en seco	160,00	20	3.200,00
Prueba de baja frecuencia de flashovers mojado.	160,00	20	3.200,00
Prueba de impulso de flashover	300,00	20	6.000,00
Prueba de resistencia a impulsos de voltaje	300,00	20	6.000,00
Pruebas en Disyuntores/ Interruptores			
Ensayo de voltaje sostenido	250,00	22	5.500,00
Prueba de voltaje soportado por impulso tipo rayo	500,00	22	11.000,00
Prueba de corriente de corta duración	180,00	22	3.960,00
Prueba de corriente de falla	200,00	22	4.400,00

Pruebas de disyuntores de potencia			
Ensayo de voltaje sostenido	1.500,00	1	1.500,00
Prueba de voltaje soportado por impulso tipo rayo	2.500,00	1	2.500,00
Prueba de corriente de corta duración	2.500,00	1	2.500,00
Prueba de corriente de falla	3.000,00	1	3.000,00
Pruebas en seccionadores, fusibles, seccionador porta fusible			
Ensayo de voltaje aplicado a frecuencia industrial en seco	80,00	20	1.600,00
Ensayo de voltaje aplicado a frecuencia industrial en húmedo, y bajo rocío de agua.	80,00	20	1.600,00
Ensayo de medición de resistencia de contactos.	80,00	20	1.600,00
Ensayo de resistencia al voltaje de impulso tipo descarga atmosférica	150,00	20	3.000,00
Prueba en Reconectores			
Pruebas de 1 min en seco con baja frecuencia	250,00	20	5.000,00
Determinación de la corriente de disparo	250,00	20	5.000,00
Pruebas en Celdas de maniobra			
Prueba dieléctrica en el circuito principal	300,00	5	1.500,00

Prueba dieléctrica en circuitos auxiliares y de control	300,00	5	1.500,00
medición de la resistencia del circuito principal	250,00	5	1.250,00
Pruebas en cables			
DC	120,00	10	1.200,00
VLF	320,00	24	7.680,00
Descargas Parciales	280,00	24	6.720,00
Equipos de protección personal			
Guantes de clase 00 a clase 2	20,00	200	4.000,00
Guantes de clase 3 a clase 4	50,00	186	9.300,00
Mangas de clase 00 a clase 2	20,00	60	1.200,00
Mangas de clase 3 a clase 4	50,00	80	4.000,00
Mantas de clase 0 a clase 2	20,00	40	800,00
Mantas de clase 3 a clase 4	50,00	40	2.000,00
Cobertores de clase 0 a clase 2	20,00	50	1.000,00
Cobertores clase 3 a clase 4	50,00	43	2.150,00
Protector dieléctrico de cabeza Muestra	320,00	10	3.200,00
Zapatos muestra	350,00	10	3.500,00
Pértigas	50,00	52	2.600,00
Canastillas			
Carros canasta	350,00	52	18.200,00
Aceite dieléctrico			
Prueba de calidad de	30,00	1.400	42.000,00

aceite			
Regeneración de aceite dieléctrico			
Regeneración de aceite	300,00	20	6.000,00
Valor Final			198.280,00

Los valores que se estiman en la Tabla 3. 41 y la Tabla 3. 42 con respecto al número de pruebas, se basan en el informe de gestión del año 2018 del Departamento de construcción de redes de la EEQ, en el cual se especifican las actividades del Laboratorio de transformadores, así mismo el cálculo de precios sigue la metodología del cálculo de precios unitarios que utiliza el departamento de construcción de redes.

Cabe señalar que las Tabla 3. 41 y la Tabla 3. 42 muestran el número de equipos que se estima procese el nuevo laboratorio en el primer año de operación, sin embargo se espera que exista un crecimiento en el número de pruebas que se lleven a cabo de entre un 3 y 4% anual.

Otro punto importante a destacar es el hecho de que en una economía saludable la inflación aumenta anualmente en un porcentaje no mayor al 4%, en otras palabras el costo de bienes y servicios crece dependiendo de la inflación del país, esto quiere decir que para este caso de estudio, los costos de los ensayos incrementarán respecto al año anterior. Si bien en los últimos dos años 2018, 2019 la inflación del Ecuador no ha crecido más allá del 0,40% es posible apreciar que desde el año 2003 al 2016 el país contaba con tasas de inflación superiores al 2% [59], es por ello que para llevar a cabo el cálculo de los indicadores económicos en el punto 3.5.5 se considera una inflación del 2% anual.

Por último se debe tener en cuenta que una vez los equipos y la edificación sean pagados, éstos pasan a ser un activo para la empresa que si bien verán su valor inicial reducido debido a la depreciación aún continuarán teniendo valor en el mercado, para el cálculo de dichos valores se considera una depreciación lineal, mientras que en el caso del terreno como bien se sabe, los terrenos son unos de los pocos bienes que tienden a ganar valor en el tiempo a pesar de que dicho valor dependerá de diversos factores, para el presente estudio se considera un incremento en su valor de un 2% anual. Todos los valores correspondientes a los parámetros antes mencionados se aprecian en la Tabla 3. 43.

Tabla 3. 43. Valor final de equipos y elementos luego de la depreciación

Elemento	Valor inicial (USD)	Valor final (USD)
Edificio	150.000	30.000
Inversión en equipos	2 651.699,8	530.339,96
Terreno	175.000	230.908,78
Ingresos por capacitaciones dictadas		20.000
Total		811.248,74

3.5.5 CÁLCULO DE INDICADORES ECONÓMICOS

Haciendo uso de los conceptos y ecuaciones descritos en el punto 1.3.6 de este documento, se procede al cálculo de los diversos indicadores económicos.

A partir de los valores expuestos en el puntos 3.5.1, es posible llevar a cabo el análisis económico pertinente, del cual se obtiene un flujo de caja que se aprecia en la Tabla 3.44.

Tabla 3. 44. Flujo de caja del nuevo laboratorio expresado en dólares americanos.

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7
(+) Ingresos		639.280	677.636,8	718.295,01	761.392,71	807.076,27	855.500,85	906.830,89
(-) Operación y mantenimiento		231.706,8	240.975,07	250.614,07	260.638,64	271.064,18	281.906,75	293.183,02
(-) Depreciación		140.085	140.085	140.085	140.085	140.085	140.085	140.085
INGRESO BRUTO		267.488,2	296.576,72	327.595,93	360.669,071	395.927,08	433.509,09	473.562,87
INGRESO NETO		267.488,2	296.576,72	327.595,93	360.669,071	395.927,08	433.509,09	473.562,87
Inv. Inicial	2 976.699,8							
Flujo de caja	-2 976.699,8	267.488,2	296.576,72	327.595,93	360.669,071	395.927,08	433.509,09	473.562,87

Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12	Año 13	Año 14	Año 15
961.240,75	1 018.915,2	1 080.050,11	1 144.853,12	1 213.544,3	1 286.356,96	1 363.538,38	1 445.350,68
304.910,34	317.106,75	329.791,02	342.982,66	356.701,97	370.970,052	385.808,85	401.241,21
140.085	140.085	140.085	140.085	140.085	140.085	140.085	140.085
516.245,41	561.723,44	610.174,08	661.785,44	716.757,32	775.301,91	837.644,52	904.024,47
516.245,41	561.723,44	610.174,08	661.785,44	716.757,32	775.301,91	837.644,52	904.024,47
516.245,41	561.723,44	610.174,083	661.785,44	716.757,32	775.301,91	837.644,52	904.024,47

WACC = 10,21%

VAN = 1 639.310,69 USD

TIR = 21%

COSTO BENEFICIO = 1,3168

Análisis de viabilidad

Al analizar los resultados que los indicadores económicos nos proponen, se observa que el proyecto es económicamente viable ya que se tiene un VAN y TIR positivas. Al analizar el VAN se observa que si el proyecto se lleva a cabo se tendrán unas ganancias en valor actual de USD 1 639.310,69.

En el caso del TIR con un valor de 21%, nos indica que mientras que los intereses que se paguen por el crédito utilizado para realizar este proyecto no sean superiores al 21%, el proyecto es económicamente viable.

El indicador del costo beneficio muestra la relación entre los ingresos y egresos en el laboratorio a lo largo de su vida útil, en este caso en concreto su valor es de 1,3168.

Cabe mencionar que el riesgo país utilizado en el presente documento corresponde a fechas previas a la crisis desatada por el COVID-19.

Si bien los indicadores económicos nos dan resultados positivos que en otras palabras significa que la inversión será recuperada y además es posible obtener ganancias, existen quizás otros factores que determinan la viabilidad del proyecto.

Debido a la carencia de este tipo de instalaciones en el Ecuador, mucho del material y equipamiento eléctrico que las distribuidoras de energía del Ecuador adquieren incluyendo la propia EEQ, no están en capacidad de probarlos al momento de su compra, esto es importante debido a que se desconoce si dichos equipamientos han sufrido daños durante su traslado ya sea vía terrestre, marítima o aérea, la única forma de comprobar el estado de estos elementos es precisamente llevando a cabo ensayos sobre los mismos, si bien es necesario destacar la labor que el Laboratorio de transformadores de la EEQ lleva a cabo, es posible observar que de acuerdo a las normas internacionales como son IEC e IEEE aún no se llevan a cabo todos los ensayos que éstas normas sugieren sean pruebas de rutina, esto se debe a la carencia del equipamiento necesario, recordando

también que el actual laboratorio maneja únicamente niveles de voltaje de distribución. Otro punto importante es el tema de los EPP's, que como bien se menciona de acuerdo a las normas NFPA es indispensable que todo equipo de protección personal sea probado previo a su entrega al trabajador ya que detrás de estos se encuentran seres humanos cuyas vidas sin lugar a dudas son invaluableles.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- Al realizar el levantamiento de información y cumpliendo con el primer objetivo específico, se concluye que si bien el actual laboratorio de transformadores de la EEQ lleva a cabo varios ensayos en transformadores, canastillas, reconectores, entre otros equipos, aún existe mucho equipamiento que no puede ser probado, además si bien se llevan a cabo varios ensayos en dichos elementos, aún no es posible ejecutar todas las pruebas que normas como IEEE, IEC, ASTM consideran como pruebas de rutina, debido principalmente a la falta de los equipos de prueba necesarios.
- El sistema generador de alto voltaje resonante posee beneficios que lo hacen una mejor opción frente a los típicos sistemas de generación de alto voltaje basado en transformadores como son los bajos requerimientos de energía a la entrada del sistema, la eliminación de capacitancias no deseadas producidas por un sistema tipo transformador, que tienen la posibilidad de generar un fenómeno resonante no deseado cuando se realizan ensayos en cables, problemas que el sistema resonante no tiene, tal y como se ve evidenciado incluso con las recomendaciones de los fabricantes que se aprecian en el Anexo 1.
- En el Ecuador no existe un laboratorio de alto voltaje capaz de llevar a cabo ensayos en equipo y material eléctrico de acuerdo a normativas internacionales como IEC, IEEE, ASTM, debido a esto muchos de los equipos que la EEQ y de las demás distribuidoras de energía eléctrica del país no pueden ser probados al momento de su recepción, si bien se pueden incluir pruebas en fábrica de los equipos adquiridos, no existe certeza absoluta de lo que pueda ocurrir durante el proceso de transporte del equipamiento, por ello se llevó a cabo la sintetización de dichas normas tal y como observa en el punto 3.3 del presente documento, con el fin de llevar a cabo los ensayos necesarios, cumpliendo así con los objetivos específicos dos y tres.
- En el cálculo de los niveles de voltaje correspondientes, además de aplicar las correcciones por condiciones atmosféricas pertinentes, se debe tener en cuenta el factor denominado Derating, cuya función es sobre dimensionar el aislamiento de los equipos dado que a partir de los 1000 m sobre el nivel del mar éste empieza a

degenerarse a razón de 1% por cada 100m, teniendo en cuenta estos factores de corrección se realizó las especificaciones de los equipos necesarios para el nuevo laboratorio de alto voltaje, los cuales se presentan en el literal 1.3.5.1 de este trabajo, cumpliendo de este modo con el objetivo principal de este trabajo de titulación además de cumplir con el objetivo específico número cuatro.

- Se concluye que en el país el Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN aún no cuenta con normativas aprobadas para llevar a cabo ensayos dieléctricos, por lo que muchas de las normas utilizadas son de origen internacional cuyo costo es elevado, además de encontrarse redactadas en inglés, dificultando aún más la correcta interpretación de las mismas.
- Debido a las dimensiones de los equipos de generación de alto voltaje el espacio físico requerido debe ser bastante grande ya que se deben tener en cuenta las distancias de seguridad recomendadas con el fin de evitar una descarga eléctrica entre el equipo y la instalación o entre equipos, siendo en el presente documento el caso más crítico el sistema de generación de voltajes de impulso. Siguiendo estos criterios se determinó que las dimensiones de la nave industrial para el nuevo laboratorio cubran un área de 44,27m x 50m y cuente con una altura de 16,6m, tal y como se observa en el literal 3.4 y cumpliendo así con el objetivo específico cuatro.
- Se concluye que para la construcción de la nave industrial del laboratorio de alto voltaje se deben implementar paredes metálicas o bien paredes de concreto cubiertas por láminas metálicas, el piso de la instalación deberá ser cubierto con una malla de puesta a tierra la cual estará conectada a la estructura metálica con el fin de formar un apantallamiento eléctrico o Jaula de Faraday.
- Al llevar a cabo la evaluación económica del proyecto es evidente la viabilidad del mismo ya que los indicadores económicos planteado como son VAN, TIR, Costo beneficio, muestran resultados positivos, así pues al analizar el VAN es posible determinar que para un horizonte de tiempo de 15 años el proyecto recuperará la inversión inicial, además de generar ganancias de alrededor de USD 1'639.310,69, cifra nada despreciable que a su vez podría financiar otros proyectos que la empresa tuviera en mente, este proceso se aprecia en el literal 3.5.5 de este documento, cumpliendo así con el objetivo específico cinco.

- La viabilidad tanto técnica como económica se justifican plenamente, la viabilidad económica debido a los indicadores económicos expuestos, mientras que la viabilidad técnica debido a las necesidades de realizar ensayos sobre cada elemento que interviene en el sistema eléctrico como son: ensayos en EPP's llevados a cabo para mantener el control de la calidad de estos equipos, en elementos como: transformadores, aisladores, cables, interruptores, seccionadores, celdas de maniobra, TC's, TP's, entre otros, con el fin de verificar su integridad al momento de su recepción o a su vez en ensayos en sitio como mantenimiento preventivo y correctivo.
- El desconocimiento del estado de los EPPs puede provocar en cualquier momento accidentes bastante graves, ya que detrás de ellos se encuentra en riesgo la integridad de los trabajadores de la empresa, cuya vida y como la de cualquier otro ser humano es sin lugar a dudas invaluable, mediante la adquisición de los equipos para el nuevo laboratorio se eliminarán las dudas debido al estado de los equipos dando mayor seguridad al personal que hace uso continuo de los mismos.

5.2. RECOMENDACIONES

- Implementar un reglamento el cual imponga a las distintas empresas dentro del área de concesión de la EEQ a respetar los códigos de seguridad donde se proponga que todos los EPP's sean puestos bajo ensayo de aceptación y mantenimiento periódicos (por lo menos una vez al año).
- Se recomienda la adquisición y uso del sistema generador de alto voltaje tipo resonante principalmente por el bajo requerimiento de energía de la red, además de presentar ventajas al momento de probar elementos como cables en los cuales se evitan resonancias no deseadas.
- Se recomienda que el Laboratorio de alto voltaje propuesto en el presente trabajo sea acreditado con el SAE (Servicio de acreditación ecuatoriano), esto con el fin de poder brindar sus servicios al público en general, para ello y una vez revisadas las opciones que esta institución ofrece para la acreditación de laboratorios se considera que se debe optar por dos acreditaciones, la primera como un Laboratorio de investigación y la segunda como un Laboratorio de ensayos y calibración, sin embargo la figura por la cual la EEQ opte queda a discreción del departamento legal de la empresa.

- Se recomienda la adquisición de las normas internacionales correspondientes a los ensayos dieléctricos, debido a que las normativas del INEN se encuentran aún en proceso de aprobación.
- Se recomienda adquirir equipos cuyos fabricantes brinden la posibilidad de proporcionar una garantía extendida especialmente para los equipos más costosos, con el fin de precautelar la inversión del laboratorio.
- Se recomienda ampliar el cálculo de los costos de inversión, tomando en cuenta propuestas de un mayor número de oferentes, los costos de inversión expuestos en el presente documento son referenciales, calculados con información provista por un número limitado de fabricantes, con cotizaciones del año 2019 y principios del 2020, las cuales sirvieron para demostrar la viabilidad del proyecto, si la EEQ S.A desea comprar estos equipos deberá realizar un estudio de mercado más profundo que se ajuste a la Ley de Contratación Pública.
- Se recomienda no adquirir compromisos con ninguno de los fabricantes mencionados en el presente documento, ya que éstos no son los únicos proveedores de este tipo de equipamiento, si bien se hace mención de ciertas marcas de equipos, se debe únicamente al hecho de que fueron las únicas firmas que tuvieron la gentileza de contestar a los requerimientos de información, la misma que se incluye con el fin de evidenciar el trabajo de investigación que hicieron los autores del presente trabajo; es decir, si la EEQ S.A. toma este estudio como base para una adquisición concreta de equipos, deberá eliminar la información correspondiente a marcas y productores ciñéndose estrictamente a lo que estipula la Ley de Contratación Pública.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. S. Naidu. a. V. Kamaraju, High voltage engineering, Tata McGraw-Hill Education, 2009.
- [2] J. Ramirez, Especificación de un Laboratorio de Extra Alto Voltaje para la Escuela Politécnica Nacional, Quito: Tesis de Ingeniería, Escuela Politécnica Nacional, 2015.
- [3] H. Electric, Pruebas Hi Pot, <http://es.electric-test.com/info/what-is-hipot-testing-18894043.html>, 2020.
- [4] H. technologies, The basics of VLF testing, <https://hvtechnologies.com/blog/basics-vlf-testing>, 2020.
- [5] NOVA. MIRON, «Mantenimiento de Transformadores,» 01 10 2019, <http://www.novamiron.com.ar/>.
- [6] E. Kuffel. a. W. S. Zaengl. J. Kuffel, High Voltage Engineering fundamentals, Newnes, 2000.
- [7] *Power transformers Part3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air*, IEC Std. 60076-3, 2013.
- [8] Power transformers Part1: General definitions and test requirements, IEC Std. 60060-1, 1989.
- [9] Revista. Electro. Industria, Experiencias prácticas usando la prueba de tangente delta, <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=3183>, 2019.
- [10] G. A. Gómez, Measurement of partial discharge in power transformers under international standards IEC and IEEE., 2017.
- [11] S. y. s. electromecánicos, Prueba de resistencia de aislamiento, https://www.syse.com.mx/pruebas_resistencias_aislamiento.html#t, 2019.
- [12] I. S. Association, Test code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, IEEE Std C57.12.90, 2010, p. 88.
- [13] Power transformers Part 3: Insulation levels, dielectric tests and external clearances in air, IEC 60076-3, 2013.
- [14] HIGHVOLT, «HVAC Test system based on transformers,» 2020. [En línea], <https://www.highvolt.de/portaldata/1/Resources/HV/Downloads/1-10-4.pdf>.
- [15] C. Wadhwa, High Voltage Engineering, New Delhi: New Age Internacional (P) Limited, 2007.

- [16] Standard Test method for dielectric breakdown voltaje of insulating liquids using VDE electrodes, ASTM D1816-12, 2019.
- [17] Insulation Co-ordination Part2: Application guide, IEC Std. 60071-2, 1996.
- [18] Insulation co-ordination Part1: Difinitions, principles and rules, IEC Std. 60071-1, 1993.
- [19] J. Nelson, High-Altitude Considerations for Electrical Power Systems and Components, 1984.
- [20] R. C. Bu, Análisis y evaluación de poryectos de inversión, Ciudad de México: Limusa, 1995.
- [21] Economipedia, Valor actual neto (VAN), <https://economipedia.com/definiciones/valor-actual-neto.html>, 2019.
- [22] Economipedia, Tasa interna de retorno (TIR), <https://economipedia.com/definiciones/tasa-interna-de-retorno-tir.html>, 2019.
- [23] Financlick, Qué es el WACC y cómo interpretarlo, <https://www.financlick.es/que-es-el-wacc-y-como-interpretarlo-n-81-es>, 2019.
- [24] CreceNegocios, Qué es el análisis costo beneficio, <https://www.crecenegocios.com/analisis-costo-beneficio/>, 2019.
- [25] HV AC Modular Series Resonant Model RS500-1500M, Especificaciones Tecnicas proporcionadas por KVTEK, 2020.
- [26] AC resonant test system WRM 2000/800-400, Especificaciones Técnicas proporcionadas por HIGH VOLT, 2015.
- [27] H. Haefely, «Series DC Hipot Testers,» 2020. [En línea], https://hubbellcdn.com/specsheet/HIPO_8000PL_SPEC.pdf.
- [28] Impulse Voltage Test System Model V1200-120 IG, Especificaciones Tecnicas proporcionadas por TVTEK, 2020.
- [29] HIHGVOLT, Glaninger Circuit, <https://www.highvolt.de/portaldata/1/Resources/HV/Downloads/3-32-3.pdf>, 2020.
- [30] Impulse voltage test system IP 200/2000 G, Especificaciones Tecnicas proporcionadas por HIGH VOLT, 2015.
- [31] Integrated Power Transformer Test System Model IPTS 40, Especificaciones Tecnicas proporcionadas por KVTEK, 2020.
- [32] I. S. Association, Standard for General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, IEEE Std C57.12.00, 2015, p. 70.

- [33] SMC, Prueba de relación de transformación, <https://smcint.com/es/prueba-de-relacion-de-transformacion/>, 2020.
- [34] Standar Requirements for AC High-Voltage Air Switches Rated Above 1000 V, IEEE Std. C37.30.1, 2011.
- [35] IEEE Standard Test Procedures for AC High-Voltage Circuit Breakers with Rated Maximum Voltage Above 1000 V, IEEE Std C37.09-2018, 2018.
- [36] INTEC, «Pruebas de resistencia de contactos,» 2004, http://www.tecsaqro.com/tecsa/Pruebas_subestaciones/Ducter.pdf.
- [37] Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1 kV), IEEE Std. C62.11, 2012.
- [38] American standard Insulator Tests, AIEE C29.1, 1994.
- [39] Common specifications for high-voltage switchgear and controlgear standards, IEEE Std. 60694, 2002.
- [40] IEEE Standard of Common Requirements for High Voltage PowerSwitchgear Rated Above 1000 V, IEEE Std C37.100, 2007.
- [41] IEEE Standard for High Voltage Gas-Insulated Substations Rated Above 52 kV, IEEE Std C37.12-2010, 2010.
- [42] High-voltage switchgear and controlgear Part102: High-voltage alternating current disconnectors and earthing switches, IEC Std. 62271-102, 2001.
- [43] Standard for high voltage (> 1000 V) expulsion type Distribution class fuses, fuse and disconnecting cutouts, fuse disconnecting switches, and fuse links, and accessories used with these devices, IEEE Std C37.42, 2009.
- [44] Standard Requirements for Instrument Transformers, IEEE Std C57.13, 2016.
- [45] IEEE Guide for Field Testing of Laminated Dielectric, Shielded AC Power Cable Systems Rated 5 kV to 500 kV Using High Voltage Direct Current (HVDC), IEEE Std 400.1, 2018.
- [46] IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF) (less than 1 Hz), IEEE Std 400.2, 2013.
- [47] Power cables with extruded insulation and their accessories, IEC 60502-2, 2005.
- [48] Standard for Automatic circuit reclosers for A-C Distribution systems, AIEE 50, 2017.
- [49] Guide for Acceptance and Maintenance of Insulating Mineral Oil in Electrical Equipment, IEEE Std C57.106-2015, 2015.

- [50] Standard Specification for In-Service Care of Insulating Gloves and Sleeves, ASTM F496 – 14a, 2019.
- [51] Standard Specification for Rubber Insulating Blankets, ASTM D1048 – 14, 2019.
- [52] Standard Specification for In-Service Care of Insulating Line Hose and Covers, ASTM F478 – 14a, 2019.
- [53] Standard Specification for Fiberglass-Reinforced Plastic (FRP) Rod and Tube Used in Live Line Tools, ASTM F711 – 17, 2019.
- [54] American National Standard for Industrial Head Protection, ANSI/ISEA Z89.1 , 2019.
- [55] Standard Test Methods for Foot Protection, ASTM F2412-18a, 2019.
- [56] Vehicle mounted elevating and rotating aerial devices, ANSI/SIA A92.2, 2009.
- [57] «Informe de gestión Departamento de construcción de redes,» Empresa Eléctrica Quito, Quito, 2018.
- [58] «Estadísticas del sector eléctrico ecuatoriano,» ARCONEL , Quito, 2018.
- [59] «INEC,» 07 02 2020, <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/search/inflacion/>.
- [60] Standard Test Code for High-Voltage Switches, IEEE Std C37.34, 1994.
- [61] Electrical test methods for electric cables Part3:Test methods for partial discharge measurements on lengths of extruded power cables, IEC 60885-3, 2015.
- [62] Standard for high voltage (> 1000 V) expulsion type Distribution class fuses, fuse and disconnecting cutouts, fuse disconnecting switches, and fuse links, and accessories used with these devices, IEEE Std C37.41, 2016.
- [63] H. H. V. Test, AC TEST SYSTEM. Tank Type Transformers, http://www.haefely.com/pdf/LL_PSK.pdf, 2015.

ANEXOS

ANEXO 1. Data Sheets de los equipos de alto voltaje.

ANEXO 2. Proformas de los equipos de alto voltaje.

ANEXO 3. Informe de gestión año 2018 Departamento de construcción de redes.