

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

GUÍA TÉCNICA PARA LA REALIZACIÓN DE ENSAYOS EN EL AISLAMIENTO DE CABLES DE MEDIO VOLTAJE MEDIANTE SEÑALES DE CORRIENTE ALTERNA EN MUY BAJA FRECUENCIA “VERY LOW FREQUENCY” (VLF) PARA LA EMPRESA ELÉCTRICA QUITO

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

JONATHAN EDUARDO FARINANGO SARABIA

DIRECTOR: Ing. Miguel Ángel Lucio Castro, MSc.

CODIRECTOR: Ing. Carlos Fabián Gallardo Quingatuña, PhD.

Quito, marzo 2022

AVAL

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por Jonathan Eduardo Farinango Sarabia, 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

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

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

JONATHAN EDUARDO FARINANGO SARABIA

DEDICATORIA

A Dios y a mi familia.

AGRADECIMIENTO

A mi madre Martha Isabel por todo el amor, esfuerzo y dedicación hacia mí; a Fausto por el apoyo incondicional; a mi hermana Kristellé por su afecto y paciencia.

Al MSc. Miguel Ángel Lucio Castro, Dr. Carlos Fabián Gallardo, Ing. Juan Ramírez y al personal del área de redes subterráneas de la EEQ quienes colaboraron generosamente durante el desarrollo y culminación de este trabajo.

A los profesores de la Escuela Politécnica Nacional por la formación académica.

A mis amigos, ingenieros Gastón Guamán y Guido Chicaiza por la valiosa amistad y buenos consejos.

¡Gracias!

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.2. ALCANCE	2
1.3. JUSTIFICACIÓN	3
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. CABLE DE ENERGÍA DE MEDIO VOLTAJE	4
2.2. SISTEMA DE CABLE.....	4
2.3. ELEMENTOS QUE CONFORMAN EL CABLE DE POTENCIA.....	4
2.3.1. Conductor central	4
2.3.2. Capa semiconductor interna, primera capa semiconductor o blindaje del conductor.....	4
2.3.3. Aislamiento.....	5
2.3.3.1. Capacitancia.....	5
2.3.3.2. Constante de aislamiento	6
2.3.4. Capa semiconductor externa, segunda capa semiconductor o blindaje del aislamiento	7
2.3.5. Apantallamiento.....	7
2.3.5.1. Pantalla de Hilos de Cobre / Neutro Concéntrico.....	7
2.3.5.2. Pantalla en cinta de Cobre	7
2.3.6. Chaqueta.....	8
2.3.7. Bloqueo contra la humedad	8
2.4. TIPOS DE AISLAMIENTO EN CABLES DE DISTRIBUCIÓN.....	9
2.4.1. Dieléctricos extruidos.....	9
2.4.1.1. Polietileno (PE).....	9

2.4.1.2.	Polietileno reticulado (XLPE)	9
2.4.1.3.	Polietileno reticulado retardante de árboles (TRXLPE)	9
2.4.1.4.	Caucho de etileno propileno (EPR).....	9
2.4.2.	Dieléctricos laminados.....	10
2.4.2.1.	Papel aislado recubierto de plomo (PILC).....	10
2.4.2.2.	Impregnado en masa sin drenaje (MIND)	10
2.5.	DEFECTOS RELACIONADOS CON LA DEGRADACIÓN Y LAS FALLAS DEL AISLAMIENTO	10
2.6.	PROCESOS DE DEGRADACIÓN DEL AISLAMIENTO	12
2.7.	CIRCUITOS ELÉCTRICOS EQUIVALENTES	13
2.7.1.	Cable de potencia.....	13
2.7.2.	Defecto del tipo vacío en el aislamiento.....	15
2.7.3.	Falla en el cable	15
2.7.3.1.	Falla de aislamiento (Falla en paralelo o derivación)	15
2.7.3.2.	Falla de conductor y/o blindaje metálico (Falla serie).....	16
2.8.	NORMATIVA	17
2.9.	PRUEBAS EN CAMPO	20
2.9.1.	Prueba de instalación	20
2.9.2.	Prueba de aceptación.....	20
2.9.3.	Prueba de mantenimiento.....	20
2.10.	PRUEBAS EN MUY BAJA FRECUENCIA (VLF)	20
2.10.1.	Prueba de resistencia simple	21
2.10.2.	Pruebas de diagnóstico	22
2.10.2.1.	Tangente delta o factor de disipación (TD)	22
2.10.2.2.	Diferencial Tangente Delta (DTD).....	25
2.10.2.3.	Estabilidad Temporal Tangente Delta (TDTS)	25
2.10.2.4.	Espectroscopía dieléctrica	26
2.10.2.5.	Prueba de Descarga Parcial	26
2.10.2.5.1.	Definiciones generales.....	26
2.10.2.5.2.	Parámetros de la descarga parcial.....	27
2.10.2.5.3.	Parámetros del sistema de medición	28
2.10.2.5.4.	Parámetros influyentes en las descargas parciales.....	29
2.10.2.5.5.	Fuentes de descarga parcial	29
2.10.2.5.6.	Circuito de prueba.....	30
2.10.2.5.7.	Detección y estimación de la ubicación de la descarga parcial	31
2.10.2.5.8.	Precisión de la medición	32

2.10.2.6. Resistencia monitoreada (MW).....	33
2.11. TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE NEUTRO CONCÉNTRICO CORROÍDO	33
2.11.1. Reflectometría en el dominio del tiempo (TRD)	33
2.11.2. Medición de la resistencia neutra concéntrica.....	33
2.11.3. Medición del voltaje superficial	34
2.12. FUENTES DE VOLTAJE VLF	34
2.12.1. Fuente sinusoidal	34
2.12.2. Fuente Coseno Rectangular	35
2.13. EQUIPOS PARA LOCALIZAR FALLAS EN SISTEMAS DE CABLE ...	36
2.13.1. Reflectómetro en el dominio del tiempo (TDR)	36
2.13.2. Descarga capacitiva (Thumper)	36
3. METODOLOGÍA	39
3.1. COMPILACIÓN DE LA INFORMACIÓN TÉCNICA DE LOS SISTEMAS DE CABLE Y DE LA NORMATIVA	39
3.2. ESTRUCTURACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS DE ACUERDO CON LOS ESTÁNDARES INTERNACIONALES.....	40
3.3. ENSAYOS EN CABLES AISLADOS CON EL EQUIPO DE PRUEBA DISPONIBLE EN LA EMPRESA ELÉCTRICA QUITO	41
3.4. ELABORACIÓN DE LA GUÍA TÉCNICA Y RECOMENDACIÓN DE LA NORMATIVA.....	42
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	44
4.1. LEVANTAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE LOS OBJETOS DE PRUEBA, EQUIPOS DE ENSAYO Y NORMATIVA.....	44
4.1.1. Cables y accesorios de medio voltaje.....	44
4.1.2. Especificación técnica de los instrumentos de prueba.....	46
4.2. ESPECIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA EN LOS ENSAYOS.....	48
4.2.1. Metodología de pruebas	48
4.2.1.1. Pruebas en la Subestación Eléctrica Tumbaco.....	48
4.2.1.1.1. Descripción del Ensayo	48
4.2.1.1.2. Datos Técnicos del Cable	49
4.2.1.1.3. Equipo de Ensayos.....	50
4.2.1.1.4. Preparación del cable para las conexiones.....	50
4.2.1.1.5. Procedimiento de Prueba	51
4.2.1.1.6. Consideraciones previas al ensayo.....	52
4.2.1.1.7. Prueba de chaqueta	52

4.2.1.1.8. Prueba de resistencia simple VLF.....	53
4.2.1.1.9. Localización de Fallas.....	56
4.2.1.1.10. Prueba Tangente Delta.....	57
4.2.1.1.11. Observaciones de la metodología aplicada.....	59
4.2.1.2. Pruebas en la Subestación Eléctrica El Inga	63
4.2.1.2.1. Descripción del ensayo.....	63
4.2.1.2.2. Datos técnicos del cable	65
4.2.1.2.3. Procedimiento.....	65
4.2.1.2.4. Consideraciones previas.....	66
4.2.1.2.5. Prueba de resistencia simple	66
4.2.1.2.6. Medición de la resistencia de aislamiento (Prueba de MEGADO).....	67
4.2.1.2.7. Observaciones de la metodología aplicada.....	70
4.2.1.3. Pruebas realizadas en Subestación Eléctrica El Obraje	72
4.2.1.3.1. Descripción del ensayo.....	72
4.2.1.3.2. Resultados e Informe.....	72
4.2.1.3.3. Observaciones.....	73
4.2.2. Pruebas aplicables y no aplicables	74
4.3. ESTRUCTURA DE LA GUÍA TÉCNICA.....	75
4.4. RECOMENDACIÓN DE ESTÁNDARES.....	78
4.5. RECOMENDACIÓN DE EQUIPOS.....	80
4.5.1. Sistema de localización de descargas parciales	80
4.5.2. Reflectómetro en el dominio del tiempo (TDR)	81
4.5.3. Sistema de localización de fallas (THUMPER)	82
4.5.4. Instrumentación para detectar y localizar corrosión en el blindaje metálico	82
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	84
5.1. CONCLUSIONES.....	84
5.2. RECOMENDACIONES	86
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
7. ANEXOS.....	92

RESUMEN

En la red de distribución de medio voltaje, los sistemas de cable están relacionados con gran parte del tiempo de interrupción del servicio eléctrico al cliente. La Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR) provee índices tales como la Frecuencia Media de Interrupción (FMIK) y el Tiempo Total de Interrupción (TTIK) para evaluar la calidad del servicio técnico de los alimentadores primarios. La Empresa Eléctrica Quito (EEQ) en cumplimiento con las regulaciones del país se ha visto en la necesidad de implementar métodos sofisticados, como las pruebas de muy baja frecuencia (VLF), que permitan evaluar con certeza la condición del aislamiento de cables de potencia. El estudio realizado en este trabajo tiene por objetivo principal estructurar un manual técnico, basado en los estándares internacionales, que facilite los requerimientos para ensayar en campo sobre los cables y sistemas de cable con energización VLF. La información proporcionada en la guía técnica está acorde a alinear los procedimientos que se practican actualmente en las redes subterráneas de la EEQ con las fuentes, instrumentos y equipos de prueba manejados, así como también, aquellos que no se encuentran disponibles, pero que son necesarios para cumplir con el programa sugerido por las normas.

Además, las pautas empleadas en el manual técnico son recomendadas a el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) para facilitar el desarrollo de una norma local que regularice los ensayos de campo y recomiende la prueba de voltaje AC VLF.

PALABRAS CLAVE: aislamiento de cables de potencia, prueba de cables, prueba de campo, prueba de muy baja frecuencia, prueba de voltaje AC VLF, sistema de cable de alimentación, VLF.

ABSTRACT

In the medium voltage distribution network, cable systems are associated with the customer's outage time of electrical service. The Agencia de Regulacion y Control de Energia y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR) provides indices such as the Average Interruption Frequency (ASIFI) and the Total Interruption Time (ASIDI) to evaluate the technical service quality of the primary feeders. Empresa Eléctrica Quito (EEQ), in compliance with the regulations of the country, has seen the need to implement sophisticated methods, such as very low frequency (VLF) testing, which allow the assessment of certainty in the condition of power cable insulation. The main objective of this study is to elaborate a technical manual based on international standards which facilitates the requirements for field testing of cables and cable systems with VLF energization. The information provided in the technical guide is consistent with aligning the procedures that are currently implemented in underground networks from the EEQ with the sources, instruments, and test equipment available, as well as those that are not available, but are necessary to comply with the program suggested by the standards.

In addition, the guidelines employed in the technical manual are recommended to the Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) to facilitate the development of a local standard that regularizes field tests and recommends the VLF AC voltage testing.

KEYWORDS: cable testing, field testing, power cable insulation, power cable system, very low frequency testing, VLF AC voltage testing, VLF.

1. INTRODUCCIÓN

El soterramiento de las redes aéreas de distribución y la interconexión de los transformadores, interruptores y demás elementos de medio voltaje en las subestaciones eléctricas implican la presencia de cables aislados de potencia. Esto a la vez conlleva a ensayos de aislamiento sobre dichos componentes con el fin de detectar posibles defectos originados en fábrica o en el proceso de almacenamiento, transporte, manipulación, instalación o aceptación. Además, como toda máquina o elemento de la red eléctrica deben estar sometidos a mantenimientos periódicos durante la vida operativa.

En la actualidad, varias empresas distribuidoras evalúan el estado del aislamiento de cables de potencia blindados mediante métodos no normalizados o técnicas deficientes no recomendadas para ciertos tipos de dieléctricos y sistemas de cable. Este problema proviene de varios factores tales como el desconocimiento de los estándares aplicables, las limitaciones de los equipos de prueba, la poca importancia que se da a estos componentes, entre otros.

Varias organizaciones internacionales y empresas privadas han desarrollado estudios de tecnologías modernas, como las pruebas de corriente alterna en muy baja frecuencia (VLF), para que sean aplicadas en campo como sustitución del método tradicional de alto voltaje de corriente directa (HVDC) el cual tiene un efecto adverso en los cables con aislamientos del tipo polietileno reticulado (XLPE) y no es efectivo en detectar ciertos desperfectos. Además, la prueba VLF tiene la ventaja de desarrollar algunos defectos más rápido que las pruebas a frecuencia operativa de 60 Hz y no presenta caídas de voltaje tal como sucede en los ensayos de corriente alterna amortiguada (DAC) [1], [2].

Por años, la Empresa Eléctrica Quito (EEQ) solo ha realizado mediciones de resistencia de aislamiento sin ningún respaldo normativo como método para conocer si el cable de potencia está en condiciones óptimas de operación. Actualmente, el área de redes subterráneas ya dispone de un equipo de pruebas VLF, no obstante, el personal técnico no toma en cuenta todos los requerimientos de la normativa para llevar a cabo este tipo de ensayos ni cuenta con una metodología estandarizada para efectuar las pruebas de campo, por ello, en el presente trabajo escrito se proporciona una guía técnica estructurada con las normas internacionales para aplicar las pruebas de instalación, aceptación o mantenimiento sobre cables y sistemas de cable a través de la energización en muy baja frecuencia.

1.1. OBJETIVOS

El objetivo general de este Proyecto Técnico es:

Elaborar una guía técnica para realizar pruebas de aislamiento en cables de distribución utilizando señales de voltaje de corriente alterna en muy baja frecuencia “Very Low Frequency” (VLF) con el respaldo de las normas internacionales para la Empresa Eléctrica Quito.

Los objetivos específicos del Proyecto Técnico son:

- Recopilar información de los tipos y características técnicas de los cables aislados de medio voltaje que se emplean en las redes de distribución de la Empresa Eléctrica Quito y de los estándares internacionales aplicables en las pruebas de aislamiento de sistemas de cables de alimentación blindados usando energización VLF.
- Sintetizar los procedimientos de las normativas para llevar a cabo las pruebas de aislamiento en cables y sistemas de cable de potencia blindados.
- Observar la metodología de ensayos que la Empresa Eléctrica Quito aplica actualmente sobre los cables de alimentación blindados.
- Elaborar un manual técnico con los lineamientos y procedimientos sintetizados de las normativas para guiar las pruebas VLF aplicadas a cables blindados de distribución en base a los requerimientos de la EEQ.
- Recomendar al Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN) la aplicación de las normativas investigadas.

1.2. ALCANCE

En este trabajo se presenta una guía técnica, estructurada con los estándares internacionales, para probar cables aislados de medio voltaje utilizando señales en VLF. Como parte inicial para el desarrollo de este proyecto fue necesario conocer los tipos y algunas de las características técnicas de los cables aislados disponibles en las redes de distribución, para ello, se consultó la norma para diseños de redes subterráneas de la EEQ y se navegó en el sitio web ArcGIS de la empresa distribuidora.

Luego se investigó y se llevó a cabo una lectura comprensiva de los estándares internacionales y varios trabajos (papers) relacionados a las pruebas VLF aplicadas a cables de alimentación blindados con el propósito de conocer los requerimientos y procedimientos para efectuar dichos ensayos.

Posteriormente se visitó la EEQ con el fin de observar y documentar la metodología, los criterios de aceptación, la interpretación de resultados y la normativa actual aplicada en

las pruebas de cables aislados. Esto amplió el problema a detalle y la importancia del presente estudio.

Para finalizar el trabajo se elaboró la guía metodológica con los procedimientos, las referencias, la interpretación de las mediciones o de las pruebas, los criterios de aceptación/rechazo y cualquier otra información que sea importante conocer al evaluar los cables y sistemas de cable de potencia con energización VLF. Además, se recomendó los estándares usados en la estructuración del manual para que el INEN regularice e incluya este tipo de pruebas en el futuro.

1.3. JUSTIFICACIÓN

En la recepción, instalación y en el mantenimiento de máquinas y elementos eléctricos que forman parte de la red de distribución se deben efectuar pruebas eléctricas para garantizar el buen estado del objeto y que en conjunto se cumpla con los índices de calidad propuestos por la entidad regulatoria del sector eléctrico nacional (ARCERNNR).

Los cables aislados de distribución no son la excepción, al estar expuestos a daños durante el almacenamiento, transporte, instalación y funcionamiento es necesario realizar ensayos de aislamiento en todas las etapas para asegurar períodos ininterrumpidos de trabajo. Por estos motivos y considerando lo expuesto al inicio de este capítulo, en este escrito se implementa un manual técnico que provea los requerimientos estandarizados para llevar a cabo las pruebas de campo con voltaje VLF en los cables de alimentación blindados.

Este trabajo tiene el propósito de ser una fuente guía para que el personal técnico de la EEQ realice las pruebas con el equipo VLF disponible. El manual técnico describe los requerimientos que se necesita conocer durante las pruebas para que la evaluación sea lo más acertado posible al estado real del elemento. También se sugiere al INEN la regularización de las normas internacionales investigadas para que sean incluidas dentro de la normativa nacional.

La información documentada en las pruebas presenciadas en la EEQ fue de utilidad para tener una idea de que tan eficientes son los métodos manejados en la actualidad y ayudó a reflejar la importancia de la guía técnica. Todos los resultados y experiencias obtenidas en dichos ensayos están detallados más adelante.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. CABLE DE ENERGÍA DE MEDIO VOLTAJE

El cable de energía es un componente eléctrico empleado en la red como medio para transportar la carga eléctrica de un lugar a otro a un voltaje determinado. Se diseñan con clasificaciones de 5, 8, 15, 25 y 35 kV para el uso en sistemas de medio voltaje (medio voltaje: desde 0.6 kV hasta 40 kV) [3], [4], [5].

2.2. SISTEMA DE CABLE

El sistema de cable puede verse como un objeto individual, que consta de subcomponentes como cables, empalmes y terminaciones (ver Figura 2.1). Factores como los cambios topológicos, las reparaciones, las diferentes construcciones y materiales aislantes dan lugar a una gran diversidad de edades y tipos de subcomponentes en un sistema [6].

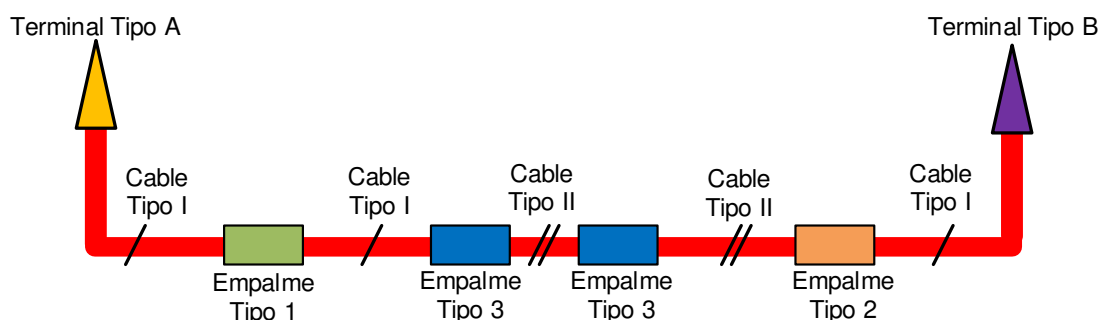


Figura 2.1. Representación del sistema de cable [6].

2.3. ELEMENTOS QUE CONFORMAN EL CABLE DE POTENCIA

El cable de potencia está estructurado comúnmente por el conductor o un conjunto de conductores centrales, la capa semiconductor interna, el aislamiento, la capa semiconductor externa, el blindaje metálico y la chaqueta (ver Figura 2.4 o Figura 2.3).

2.3.1. CONDUCTOR CENTRAL

El conductor central del cable tiene la función de transportar energía eléctrica. A nivel de medio voltaje se constituyen por hilos de cobre o de aluminio cuya galga es función de la corriente de carga (ver Figura 2.3 o Figura 2.4) [3].

2.3.2. CAPA SEMICONDUCTORA INTERNA, PRIMERA CAPA SEMICONDUCTORA O BLINDAJE DEL CONDUCTOR

Este elemento tiene la función de homogeneizar el campo eléctrico por encima de la superficie de la capa evitando concentraciones puntuales de cargas eléctricas en los

intersticios de los hilos. Sin esta capa, la capacidad del aislamiento disminuiría debido al efecto del elevado campo eléctrico. La fabricación se realiza con materiales termoestables generalmente polietileno con característica semiconductor (ver Figura 2.4 o Figura 2.3) [3].

2.3.3. AISLAMIENTO

El aislamiento brinda rigidez contra fugas de corriente, fallas entre fases o fase neutro del cable y confina el campo eléctrico producido al interior del conductor. Se caracteriza por propiedades como la rigidez dieléctrica, la permitividad relativa (constante dieléctrica), el factor de pérdidas (tangente delta), la capacitancia, la constante de aislamiento, etc. (ver Figura 2.3 o Figura 2.4) [3].

El desempeño, la funcionalidad y la vida útil del cable depende en gran parte del estado del aislamiento [7].

2.3.3.1. Capacitancia

La capacitancia por unidad de longitud de un cable blindado con cinta se obtiene por medio de la ecuación (2.1) [8].

$$C = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_0 \times \epsilon_r}{\ln \frac{R_b}{RDc}} \left[\text{uF} / \text{unidad de longitud} \right] \quad (2.1)$$

La capacitancia por unidad de longitud de un cable con neutro concéntrico se calcula a través de la ecuación (2.2) [8].

$$C = \frac{2 \times \pi \times \epsilon_0 \times \epsilon_r}{\ln \frac{R_b}{RDc} - \left(\frac{1}{k} \right) \ln \left(k \times \frac{RDS}{R_b} \right)} \left[\text{uF} / \text{unidad de longitud} \right] \quad (2.2)$$

Donde:

C = Capacitancia del cable.

R_b = El radio que pasa por los centros de los hilos neutros (ver Figura 2.2).

RDc = El radio del conductor central (ver Figura 2.2).

RDS = El radio de la hebra neutral (ver Figura 2.2).

k = Número de hebras neutrales concéntricas.

ϵ_0 = Permitividad del espacio libre (0.01420 $\mu\text{F}/\text{milla}$).

ϵ_r = Permitividad relativa del medio. La Tabla 2.1 provee el rango de valores de la permitividad relativa para los materiales aislantes más comunes.

Tabla 2.1. Valores típicos de permitividad relativa [8].

Material	Rango
Cloruro de polivinilo (PVC)	3.4 – 8.0
Caucho de etileno propileno (EPR)	2.5 – 3.5
Polietileno (PE)	2.5 – 2.6
Polietileno reticulado (XLPE)	2.3 – 6.0

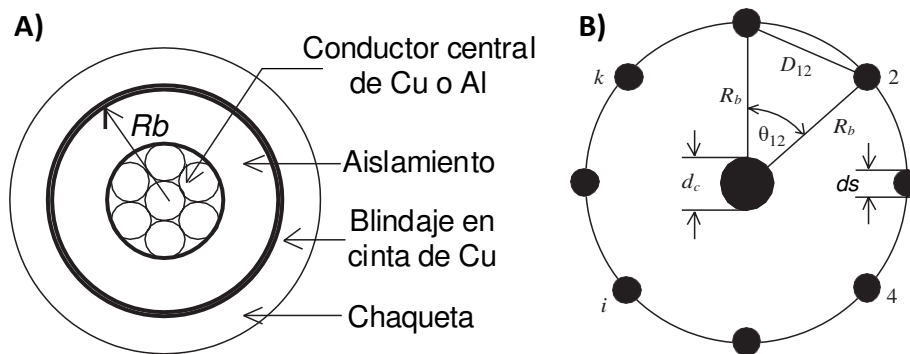


Figura 2.2. A) Blindaje cinta de cobre, B) Blindaje hebras neutrales [8].

Donde:

d_c = Diámetro del conductor central.

d_s = Diámetro de la hebra neutral.

2.3.3.2. Constante de aislamiento

La constante de aislamiento indica la capacidad de oposición del material a la corriente de fuga. Entre mayor sea, menor será la fuga de corriente entre el conductor y el blindaje metálico. La unidad de medida es el megaohmio por kilómetro ($M\Omega/km$) y es función tanto de la temperatura como de la humedad del entorno circundante en el momento de la prueba [3].

La corrección por temperatura del valor medido se realiza por medio de la ecuación (2.3) [9], [10].

$$R_{corregida} = R_{medida} \times K \quad (2.3)$$

Donde:

$R_{corregida}$ = Resistencia corregida a $20^\circ C$ o $40^\circ C$.

R_{medida} = Resistencia medida a la temperatura de prueba.

K = Factor de conversión de resistencia de aislamiento (ver Anexo B).

2.3.4. CAPA SEMICONDUCTORA EXTERNA, SEGUNDA CAPA SEMICONDUCTORA O BLINDAJE DEL AISLAMIENTO

Este elemento tiene la función de recubrir al dieléctrico del cable para confinar homogéneamente las líneas del campo eléctrico al interior del aislamiento complementando la función de la capa semiconductora interna. Al igual que la primera capa semiconductora, el blindaje del aislamiento es fabricado con materiales termoestables, generalmente polietileno con característica semiconductora (ver Figura 2.3 o Figura 2.4) [3].

2.3.5. APANTALLAMIENTO

El apantallamiento es un elemento metálico no magnético de cobre colocado sobre la segunda capa semiconductora. Ayuda a complementar las funciones del blindaje del aislamiento y permite llevar a cabo el proceso de puesta a tierra. Comúnmente es utilizado como conductor neutro del cable (ver Figura 2.3 o Figura 2.4) [3].

2.3.5.1. Pantalla de Hilos de Cobre / Neutro Concéntrico

Esta pantalla está formada por una cantidad de hilos de cobre distribuidos uniformemente sobre la capa semiconductora externa. Cumple con la función de blindaje del cable y puede actuar como conductor neutro siempre que los hilos sean de un calibre adecuado (ver Figura 2.3) [3].

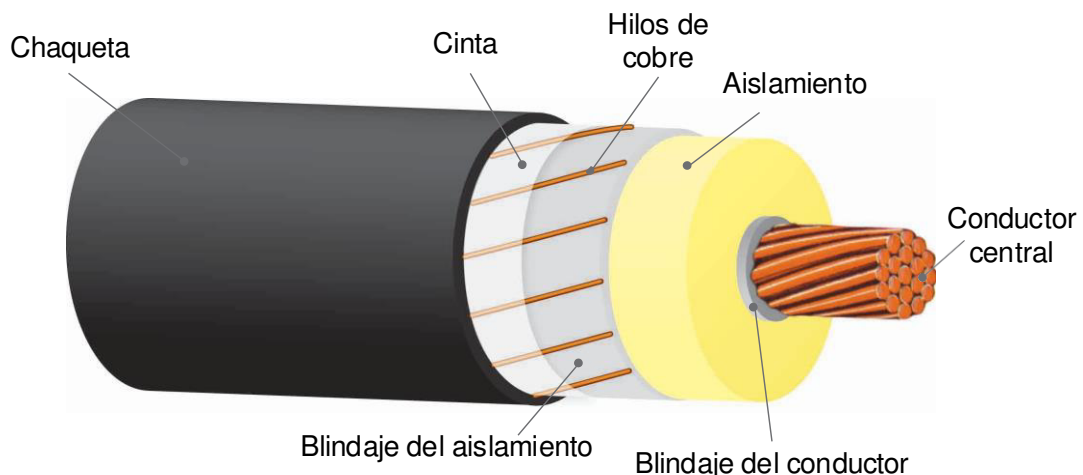


Figura 2.3. Cable de medio voltaje con apantallamiento en neutro concéntrico [3].

2.3.5.2. Pantalla en cinta de Cobre

Este apantallamiento se aplica de forma helicoidal sobre el blindaje del aislamiento recubriéndolo totalmente (traslapado) o en forma parcial (abierto). Presenta mayor problema de corrosión en presencia de humedad respecto al cable con pantalla de hilos de cobre (ver Figura 2.4) [3].

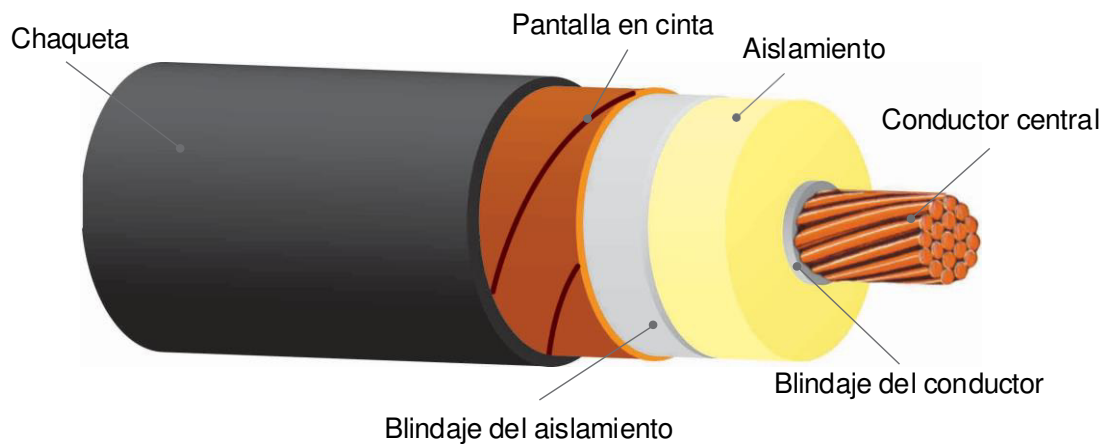


Figura 2.4. Cable de medio voltaje con apantallamiento en cinta de cobre traslapado [3].

2.3.6. CHAQUETA

La chaqueta es el elemento más externo que recubre el cable. Tiene por función evitar la exposición al medio que lo rodea por lo cual es diseñada para soportar efectos de humedad, llama, rayos UV, hidrocarburos, impacto y abrasión. Se fabrican con materiales como el policloruro de vinilo (PVC) o el polietileno (PE) (ver Figura 2.3 o Figura 2.4) [3].

2.3.7. BLOQUEO CONTRA LA HUMEDAD

Algunos cables tienen bloqueos antihumedad para evitar la penetración del agua al interior del componente. Estos cables son utilizados en sitios donde se espera que el dispositivo trabaje la mayor parte del tiempo sumergido (ver Figura 2.5) [3].

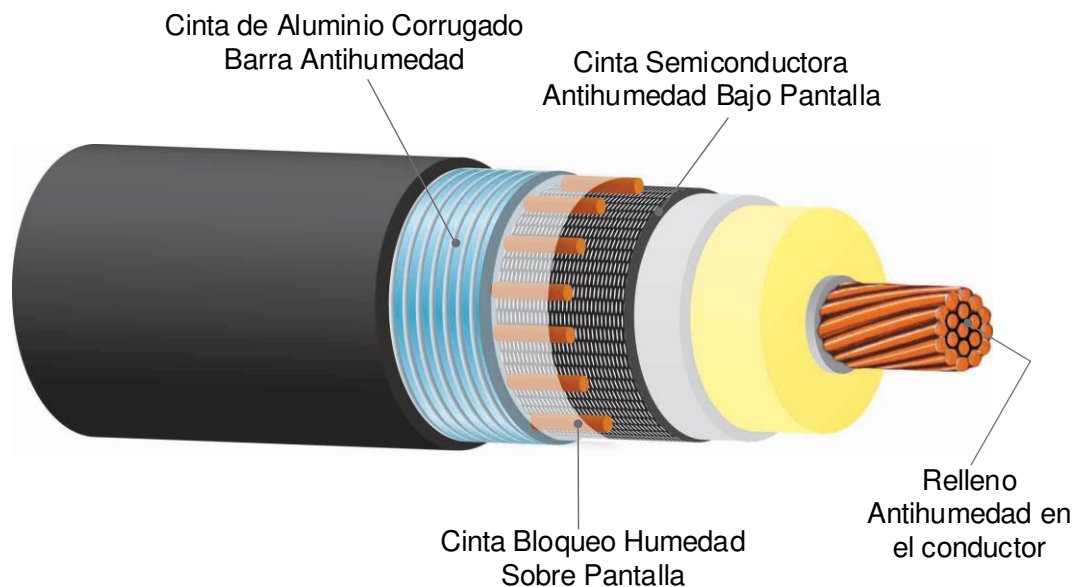


Figura 2.5. Cable de medio voltaje con elementos antihumedad [3].

2.4. TIPOS DE AISLAMIENTO EN CABLES DE DISTRIBUCIÓN

El aislamiento de los cables utilizados en las redes de medio voltaje se fabrican con materiales extruidos o laminados.

2.4.1. DIELECTRICOS EXTRUIDOS

Los dieléctricos extruidos son polímeros obtenidos mediante un proceso de extrusión y empleados como aislamiento eléctrico en cables. Aislamientos como el polietileno, polietileno reticulado, polietileno reticulado retardante de árboles de agua (árbol de agua: patrón en forma de árbol electro-oxidado que puede ocurrir en el lugar donde hay contaminantes iónicos, protuberancias o huecos en materiales poliméricos que están sometidos a voltaje y humedad), caucho de etileno propileno, etc., son fabricados mediante este proceso [2].

2.4.1.1. Polietileno (PE)

El polietileno es un polímero termoplástico [2]. Este material es típicamente empleado en la fabricación de la chaqueta de los cables [7].

2.4.1.2. Polietileno reticulado (XLPE)

Este polímero es termoestable [2]. La mayoría de las empresas distribuidoras emplean cables con aislamiento de polietileno reticulado debido al factor de pérdidas bajo que presentan. Una desventaja frente a los aislamientos de caucho de etileno propileno es la alta rigidez mecánica que exhiben, lo que los hace duros y dificulta el grado de curvatura en las instalaciones [7].

2.4.1.3. Polietileno reticulado retardante de árboles (TRXLPE)

Se basa en el polímero XLPE, por tanto, es termoestable. Contiene un aditivo, una modificación de polímero o un relleno que retarda el desarrollo y el crecimiento de los árboles de agua [2].

2.4.1.4. Caucho de etileno propileno (EPR)

Este dieléctrico es un polímero termoestable relleno utilizado como aislamiento eléctrico en cables y accesorios [2]. Son flexibles debido a que están hechos de goma o de caucho, pero presentan mayor factor de pérdidas respecto a los dieléctricos XLPE. Es común encontrarlos en la industria minera y en empresas distribuidoras como sustituciones temporales [7].

En la industria del cable también se incluye al EPDM (Caucho monómero de etileno propileno dieno) con la "M" que se refiere a la clasificación en monómeros "ASTM D-1418" [2].

2.4.2. DIELECTRICOS LAMINADOS

Los cables con dieléctricos laminados utilizan como aislamiento el papel impregnado. Estos aislantes están constituidos por capas de cintas de papel de celulosa o polipropileno o una combinación de ambos [2]. En la actualidad, los cables con dieléctricos laminados son empleados en sistemas de transmisión, sin embargo, pueden encontrarse instalados en las redes de medio voltaje debido al uso antes de la aparición de los cables extruidos. Los dieléctricos laminados tienen mayor vida útil frente a los aislamientos extruidos [7].

2.4.2.1. Papel aislado recubierto de plomo (PILC)

Las cintas de papel se aplican sin impregnación, posteriormente el aislamiento completo se seca y se impregna con un compuesto en conjunto [2].

2.4.2.2. Impregnado en masa sin drenaje (MIND)

El compuesto de impregnación tiene una viscosidad suficientemente alta a la temperatura máxima de funcionamiento para impedir la migración o el drenaje del compuesto [2].

2.5. DEFECTOS RELACIONADOS CON LA DEGRADACIÓN Y LAS FALLAS DEL AISLAMIENTO

Las causas de los defectos típicos de los sistemas de cable de medio voltaje descritas en la Tabla 2.2 y Tabla 2.3 son los resultados de inspecciones visuales y de investigaciones forenses realizadas en los componentes alterados de un conjunto. Algunas de las descripciones son solo hipótesis obtenidas de la información práctica [6].

Tabla 2.2 Defectos típicos de aislamiento en cables extruidos [2], [6].

Defectos	Causas
Problemas de interfaz (empalmes, terminaciones)	Mano de obra, operación, entrada de humedad
Protuberancias en conectores (bordes afilados)	Mano de obra, fabricación
Penetración de humedad	Operación ambiental, fabricación, perforaciones de la chaqueta
Árboles de agua	Fabricación, medio ambiente

Defectos	Causas
Contaminantes	Mano de obra, fabricación, medio ambiente
Cavidades (delaminación en interfaces o aislamiento interior)	Mano de obra, fabricación
Montaje incorrecto de accesorios	Mano de obra, fabricación
Problemas con el conductor	Operación, mano de obra, medio ambiente.
Corrosión del blindaje metálico	Fabricación, medio ambiente
Materiales defectuosos	Fabricación, mano de obra

Tabla 2.3. Defectos típicos de aislamiento en cables llenos de fluido [2], [6].

Defectos	Causas
Disminución del nivel de aceite en accesorios	Operación, fugas
Secado del aislamiento (papel seco, quebradizo y agrietado)	Operación, fugas, grietas en la chaqueta.
Entrada de humedad	Operación, grietas en la chaqueta, medio ambiente
Huecos o fisuras	Operación y mano de obra
Contaminaciones	Mano de obra, operación
Resina mal endurecida	Obra
Posicionamiento asimétrico del conductor	Mano de obra, operación, medio ambiente
Problemas con el conductor	Mano de obra, entorno de operación
Materiales defectuosos	Fabricación

La Tabla 2.4 muestra los defectos típicos de aislamiento según el tipo de subcomponente del sistema.

Tabla 2.4. Defectos típicos de aislamiento en los subcomponentes del sistema [6].

Tipo de defecto	Cables laminados		Cables extruidos	
	Accesorios	Aislamiento	Accesorios	Aislamiento
Posicionamiento asimétrico de conductores	X			
Resina mal endurecida	X			

Tipo de defecto	Cables laminados		Cables extruidos	
	Accesorios	Aislamiento	Accesorios	Aislamiento
Cavidades / Fisuras	X	X	X	X
Problemas del conductor	X		X	
Contaminaciones	X		X	
Disminución del nivel de aceite	X			
Secado de masa		X		
La fragilidad				X
Movimiento de nivelación de campo			X	
Problemas de interfaz			X	
Penetración de humedad	X	X	X	X
Protuberancia en conectores	X		X	
Capa semiconductora restante			X	
Arborescencias acuosas				X

2.6. PROCESOS DE DEGRADACIÓN DEL AISLAMIENTO

En la Tabla 2.5 se describe brevemente los procesos de degradación de los diferentes defectos que ocurren en los sistemas de cable.

Tabla 2.5. Procesos de degradación de los sistemas de cable [6].

Defecto	Proceso de degradación
Nivel de aceite bajo	Límites → descargas superficiales → tracking (caminos conductores en la superficie de un aislante eléctrico)
Penetración de humedad	Aumento local de pérdidas eléctricas → sobrecalentamiento → descargas parciales
Protuberancias en conectores	Concentraciones de campo local → descargas parciales → árbol eléctrico (microcanales carbonizados o no sólidos)
	Concentraciones de campo local → descargas parciales → formación de gas → disminución de la rigidez dieléctrica
Cavidades / fisuras	Descargas parciales → árbol eléctrico
Secado de masa	Aumento de viscosidad → cavidades → descargas parciales →

Defecto	Proceso de degradación
(encerado del fluido)	arborización eléctrica
Pantalla exterior dañada	Concentración de campo local en la pantalla exterior → descargas parciales → árbol eléctrico
	Penetración de agua → aumento local de pérdidas eléctricas → fragilización de las capas de papel
Partes semiconductoras	Concentración de campo local → descargas parciales → árbol eléctrico / tracking
Movimiento de nivelación de campo	Concentración de campo local → descargas superficiales → árbol eléctrico / tracking
Problemas del conductor	Sobrecalentamiento local → grietas → cavidades → descargas parciales → arborización eléctrica
Resina mal endurecida	Cavidades → descargas parciales → árbol eléctrico
	Penetración de humedad → aumento de pérdidas → agrietamiento → descargas parciales → formación de árboles eléctricos
Árboles de agua	<p>Características de aislamiento inferiores (cambios químicos en el aislamiento) → arborización eléctrica</p> <p>Los árboles de agua pueden conducir a árboles eléctricos cuando se someten a altos esfuerzos eléctricos como resultado de un impulso de rayo, una conmutación o sobrevoltaje DC, un alto voltaje AC o cuando la punta del árbol de agua se acerca a un conductor o al escudo del aislamiento. Los árboles de agua afectan principalmente a los cables extruidos de polietileno de alto peso molecular (HMWPE) y a los XLPE más antiguos. La arborización de agua no es un problema importante para los aislamientos EPR o TRXLPE [11].</p>

2.7. CIRCUITOS ELÉCTRICOS EQUIVALENTES

2.7.1. CABLE DE POTENCIA

El cable aislado de potencia se representa eléctricamente por una impedancia en serie, conformada por la resistencia y la reactancia inductiva propia del conductor central, más

la admitancia en derivación, compuesta por la conductancia y la susceptancia capacitiva del dieléctrico (ver Figura 2.6) [8].

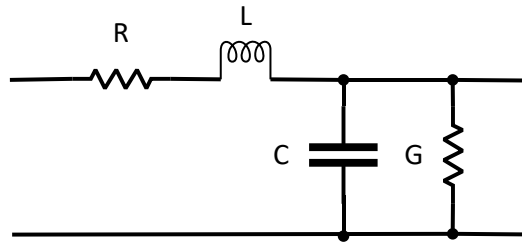


Figura 2.6. Circuito equivalente del cable aislado por unidad de longitud [8], [12].

Donde:

R = Resistencia del conductor central.

L = Inductancia propia del conductor.

C = Capacitancia del aislamiento.

G = Conductancia del aislamiento.

La ecuación (2.4) representa la impedancia característica obtenida de los parámetros eléctricos del cable [12].

$$Z = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.4)$$

Donde:

Z = Impedancia característica del cable.

$\omega = 2 \times \pi \times f$, siendo f la frecuencia en Hz.

j = Unidad imaginaria.

En ensayos de aislamiento, la impedancia en serie (R y L) es insignificante respecto a la impedancia en paralelo (G y C). Por tanto, el esquema eléctrico del cable aislado de la Figura 2.6 queda simplificado al de la Figura 2.7 [1].

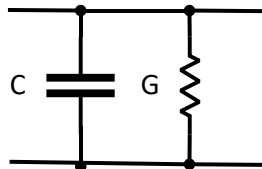


Figura 2.7. Circuito simplificado del cable aislado de alimentación [1], [2].

2.7.2. DEFECTO DEL TIPO VACÍO EN EL AISLAMIENTO

El circuito equivalente de un defecto hueco en el aislamiento del cable es representado por la capacitancia del vacío (C_c) y por el espacio de chispa (S_g) como se muestra en la Figura 2.8 [13].

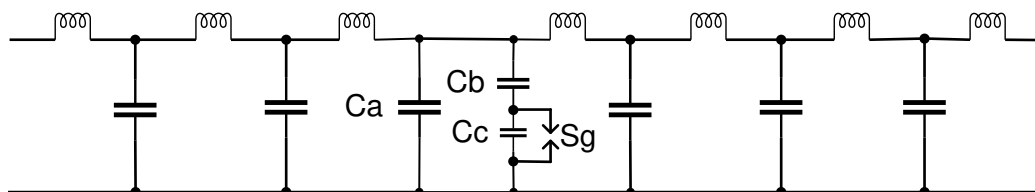


Figura 2.8. Circuito equivalente de un defecto (cavidad) en el aislamiento del cable [13].

Donde C_a representa la capacitancia de una porción de aislamiento sin defecto y C_b es la capacitancia remanente del cable en alineación radial con el defecto [13].

2.7.3. FALLA EN EL CABLE

La falla en el cable es representada por una resistencia no lineal paralela a una descarga de chispas. Las fallas pueden estar presentes en el aislamiento, en el conductor o en el blindaje metálico del cable (ver Figura 2.9, Figura 2.10 y Figura 2.11 respectivamente) [14].

2.7.3.1. Falla de aislamiento (Falla en paralelo o derivación)

Las fallas de aislamiento se clasifican en intermitentes, no lineales dependientes del voltaje o de cortocircuito tal como se describen en la Tabla 2.6 [14].

Tabla 2.6. Tipos de falla de aislamiento [14].

Tipo	Característica
Intermitente	Fallas poco frecuentes y no constantes.
No lineal (dependiente del voltaje)	<ul style="list-style-type: none"> Si se aplica un Voltaje DC < 500 V entre el conductor y el blindaje metálico, el cable no presenta fallas. Si se aplica un Voltaje DC > 500 V entre el conductor y el blindaje metálico, la falla parpadea o presenta la característica de una resistencia no lineal dependiente del voltaje.
Cortocircuito	Fallas de baja resistencia.

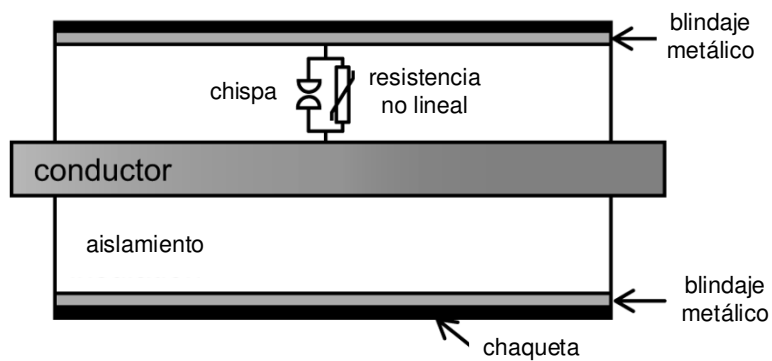


Figura 2.9. Falla en el aislamiento del cable [14].

2.7.3.2. Falla de conductor y/o blindaje metálico (Falla serie)

La Tabla 2.7 muestra las causas de las fallas serie en el cable aislado.

Tabla 2.7. Tipos de falla serie [14].

Tipo	Causa
Circuito abierto	Daños mecánicos: Empalme separado, conductor o blindaje metálico cortados.
	Daños eléctricos: Cable, empalmes o terminaciones rotas.
No lineal (dependiente de la corriente)	La falla presenta la característica de una resistencia no lineal dependiente de la corriente. Corrosión del escudo metálico. Empalme o terminación deteriorado. Conductor quemado.

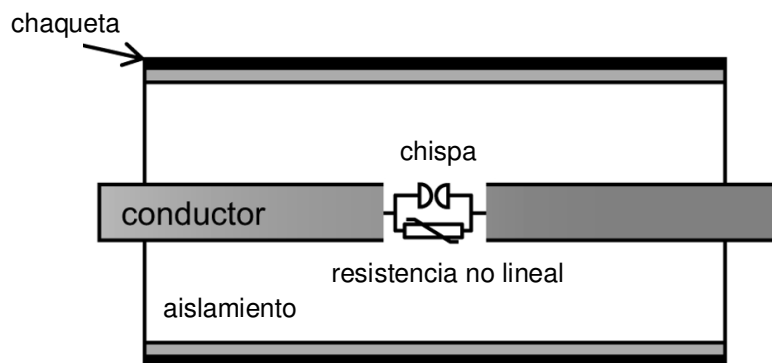


Figura 2.10. Falla de conductor [14].

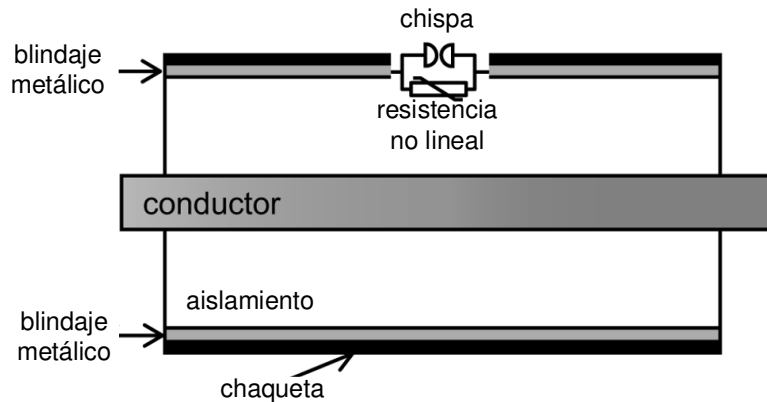


Figura 2.11. Falla de blindaje metálico [14].

2.8. NORMATIVA

Las siguientes normas constituyen las referencias bibliográficas investigadas para la estructuración de la guía técnica aplicada a las pruebas en campo sobre los cables aislados de medio voltaje con señales en muy baja frecuencia.

IEEE Std 400.2-2013

IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF) (less than 1Hz). En esta norma se describe la prueba de rigidez dieléctrica y los ensayos de diagnóstico tales como el factor de pérdida tangente delta y la descarga parcial que se llevan a cabo con energización VLF sobre los sistemas de cable de potencia blindados [2]. En este estándar el análisis teórico y técnico de los ensayos es ampliamente detallado en comparación a versiones anteriores y a otras normas internacionales.

IEEE Std 400™-2012

IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems. En esta guía se enumeran los métodos de prueba existentes para aplicaciones en campo sobre los sistemas de cable de alimentación apantallados de 5 kV en adelante. La norma proporciona las ventajas y desventajas, así como la descripción de cada método de prueba en las que se incluyen a los ensayos en muy baja frecuencia. Además, provee el listado de estándares aplicables para cada técnica [1].

IEEE Std 510-1983

IEEE Recommended Practices for Safety in High-Voltage and High-Power Testing. En esta práctica recomendada se especifica los lineamientos de seguridad para quienes están involucrados en las pruebas de objetos de alto voltaje y alta potencia de varios tipos, incluyendo a los cables de energía. Los requerimientos de la norma están

orientados a la seguridad en campo y se aplican tanto al personal como al sistema bajo prueba [15].

ANSI/NETA ATS-2009

Standard for Acceptance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems. Estas especificaciones cubren las inspecciones y las pruebas de campo disponibles para evaluar la idoneidad en la energización inicial de equipos y sistemas de energía eléctrica. Los lineamientos dados garantizan que los equipos y los sistemas eléctricos probados estén operativos, cumplan con los estándares aplicables, las tolerancias del fabricante y estén instalados de acuerdo con las especificaciones de diseño [10]. La norma provee las pruebas eléctricas y no eléctricas a considerar en la aceptación de los cables de medio voltaje.

ANSI/NETA MTS-2011

Standard for Maintenance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems. Estas especificaciones cubren las inspecciones y las pruebas de campo disponibles para evaluar la idoneidad del servicio continuo y la confiabilidad de los equipos y sistemas de distribución de energía eléctrica. Los lineamientos aseguran que los equipos y sistemas eléctricos probados estén operativos, cumplan con los estándares aplicables, las tolerancias del fabricante y sean adecuados para un servicio sin interrupciones [9]. La norma enlista las pruebas eléctricas y no eléctricas a considerar en el mantenimiento de los cables de medio voltaje.

IEEE NESC C2-2007

National Electrical Safety Code. Este código muestra las reglas básicas necesarias de seguridad que el personal y el público requiere considerar durante la instalación, operación o mantenimiento del suministro eléctrico [16]. La norma provee las distancias de seguridad mínimas que el equipo personal de trabajo debe precautelar ante la exposición a conductores eléctricos energizados con voltaje alterno.

NFPA 70E-2012

Standard for Electrical Safety in the Workplace. Esta norma proporciona los requerimientos de trabajo prácticos y seguros que los empleados deben conocer con relación a los peligros que surgen del uso de electricidad [17]. El código incluye las distancias mínimas de seguridad que los trabajadores deben preservar cuando el circuito está energizado con voltaje continuo.

IEC 60270:2000

High Voltage Test Techniques: Partial Discharge Measurements. Esta norma es aplicable a la medición de descargas parciales que ocurren en aparatos, componentes o sistemas

eléctricos cuando se prueban con voltajes alternos con frecuencias de hasta 400 Hz o con voltaje continuo [18]. La guía proporciona las características de los circuitos de medición de descarga parcial, así como los procedimientos para calibrar los instrumentos de medida dentro o fuera del sistema de prueba. Este estándar está orientado para la aplicación de pruebas en fábrica, sin embargo, es la base teórica y práctica para comprender los ensayos en campo.

IEEE Std 400.3™-2006

IEEE Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment. Esta guía cubre las pruebas de diagnóstico aplicadas a los sistemas de cable de alimentación blindados instalados, nuevos o envejecidos a través de la detección, medición y ubicación de descargas parciales [11]. En la norma se incluye las especificaciones de los ensayos fuera de línea cuando se utiliza fuentes de voltaje externas de muy baja frecuencia.

IEEE Std 1617™-2007

IEEE Guide for Detection, Mitigation, and Control of Concentric Neutral Corrosion in Medium Voltage Underground Cables. Esta norma internacional establece los métodos disponibles para detectar corrosión en el cable subterráneo de distribución con cualquier tipo de blindaje (correas o hilos), cubierta (con o sin chaqueta) e instalación (instalado directamente “enterrado” o a través de un conducto) [19]. Además, ayuda a comprender los procesos y las causas de la corrosión, y proporciona varias recomendaciones para la mitigación y el control del problema. Es fundamental la revisión de este estándar puesto que un blindaje metálico corroído puede alterar las mediciones de pérdida dieléctrica o de descarga parcial.

IEEE Std 1234™-2019

IEEE Guide for Fault-Locating Techniques on Shielded Power Cable Systems. En este estándar se describe las pruebas y mediciones para identificar la ubicación de una falla sobre los cables de alimentación blindados [14]. La guía muestra varias técnicas de localización de fallas seguras para que sean aplicadas con el fin de reducir el tiempo de interrupción del servicio al cliente. Los métodos involucran a equipos de bajo y alto potencial en las que se incluyen a los dispositivos de descarga capacitiva (Thumper).

IEC 60229:2007

Electric cables - Tests on extruded oversheaths with a special protective function. Esta norma internacional contiene una serie de pruebas aplicables en los cables eléctricos construidos con cubiertas extruidas [20]. El estándar proporciona los requerimientos para evaluar la chaqueta del cable en campo.

2.9. PRUEBAS EN CAMPO

La prueba de aislamiento en campo controla la condición del sistema de cable con la posibilidad de identificar posibles fallas y puntos débiles causados por el envío, la manipulación, la instalación inadecuada y los defectos de fábrica no detectados en los sistemas nuevos o para conocer el deterioro del aislamiento, distinguir la inoportuna reparación o reemplazo en aquellos componentes envejecidos. Los ensayos se emplean como estrategias para mejorar la confiabilidad y proteger la importante inversión del sistema eléctrico [1], [2].

2.9.1. PRUEBA DE INSTALACIÓN

La prueba de instalación se realiza solo en secciones de cable nuevos instalados antes de conectarse al sistema, es decir, antes de empalmar, terminar o energizar. El propósito de la prueba es detectar daños durante el envío, almacenamiento o instalación del cable [1], [2].

2.9.2. PRUEBA DE ACEPTACIÓN

La prueba de aceptación se realiza antes de la energización una vez concluida la instalación del sistema de cable incluido las terminaciones y juntas [2]. El ensayo se lleva a cabo con el propósito de evaluar la mano de obra de la instalación de los subcomponentes del sistema [1].

2.9.3. PRUEBA DE MANTENIMIENTO

Este ensayo se realiza durante la vida operativa del sistema de cable generalmente en períodos no críticos y bajo condiciones planificadas [2]. La prueba tiene por fin evaluar la condición y monitorear el envejecimiento de los sistemas de cable en servicio. Las mediciones del ensayo sirven como referencia para evaluaciones futuras, criterios de decisión sobre sistemas similares en diseño y condiciones operativas y para mejorar el diagnóstico a través de la formación de tendencias. En la prueba de mantenimiento, los niveles y las duraciones del voltaje aplicados son menores a los utilizados en los ensayos de fábrica, instalación o aceptación dado que es probable encontrarse con aislamientos envejecidos en varios grados por el período prolongado de tiempo que han estado en servicio [1].

2.10. PRUEBAS EN MUY BAJA FRECUENCIA (VLF)

Las pruebas en VLF son recomendadas y mayormente aplicadas en campo debido a las múltiples ventajas que presentan frente a ensayos realizados a otras frecuencias o con corriente continua. Los ensayos en muy baja frecuencia proporcionan información más

completa sobre la condición del sistema de cable, por ejemplo, los cambios del envejecimiento del aislamiento se experimentan mejor en VLF que a la frecuencia de potencia, además, no dejan secuelas (cargas espaciales) en los cables extruidos por los cambios continuos de polaridad a menos que se reduzca la frecuencia por debajo de los 0.01 Hz y el estrés eléctrico sea mayor a 10 kV/mm [1], [2].

Las pruebas VLF emplean señales en el rango de frecuencia de 0.01 a 1 Hz. Todos los métodos son aplicables a sistemas de cable con o sin cubierta con cualquier tipo de blindaje [2].

2.10.1. PRUEBA DE RESISTENCIA SIMPLE

La prueba de resistencia simple consiste en aplicar un voltaje específico durante un período de tiempo prescrito entre el conductor y el blindaje del cable. El ensayo tiene por fin romper los puntos débiles del aislamiento con una corriente de falla mínima [1]. Si el sistema de cable sobrevive durante la prueba, se considera que está en buenas condiciones, es decir, pasa la prueba [1], [2].

Los voltajes recomendados a escala mundial son menos de 2 a 3 veces el voltaje de funcionamiento [2]. La Tabla 2.8 muestra los voltajes y tiempos establecidos en las normas internacionales.

Tabla 2.8. Voltajes y duración de las pruebas de resistencia según las normas internacionales [2], [21], [22].

Norma	Voltaje de Prueba	Duración
IEEE Std 400.2™-2013	Menos de 2U ₀ a 3U ₀ para pruebas de instalación y aceptación.	60 minutos
	75% $V_{aceptación}$ para ensayos de mantenimiento. Se puede reducir otro 20% si se aplica durante más tiempo.	30 minutos en cables antiguos. 60 minutos en circuitos importantes.
	El tiempo mínimo recomendado es de 30 minutos.	
IEC 60502-2014	3 U ₀	15 minutos
DIN-VDE 0276-620-2010	3 U ₀	60 minutos
U ₀ es el voltaje nominal Fase-Tierra		

2.10.2. PRUEBAS DE DIAGNÓSTICO

Las pruebas de diagnóstico son no destructivas. Se llevan a cabo durante la vida operativa del sistema como parte de programas de mantenimiento preventivo con el propósito de localizar regiones degradadas que puedan causar fallas en los cables y accesorios. Mediante la comparación con las cifras de mérito (valores referenciales establecidos en la normativa para la discriminación de las mediciones) o los datos acumulados históricos del sistema de cable, es posible determinar la cantidad relativa de degradación y discriminar si la sección continuará funcionando correctamente en servicio [2]. La condición (edad, contaminación y entrada de humedad) de los diversos componentes del sistema de cable (accesorios, aislamiento de cable y pantalla/neutro) influyen en los resultados de prueba. Los valores medidos permiten diferenciar entre sistemas de cables nuevos, defectuosos y altamente degradados, además, sirven como criterios para la toma de decisiones al momento de reemplazar o rejuvenecer los cables y accesorios [1], [2].

Las técnicas de diagnóstico disponibles en muy bajas frecuencias son:

- Factor de disipación o tangente delta.
- Diferencial tangente delta.
- Estabilidad temporal tangente delta.
- Espectroscopia dieléctrica.
- Medición de descargas parciales.
- Resistencia monitoreada.

En la actualidad, los métodos tangente delta, diferencial tangente delta y estabilidad temporal tangente delta son los más utilizados, en tanto que, el método de la espectroscopia dieléctrica es de uso limitado [2].

2.10.2.1. Tangente delta o factor de disipación (TD)

El factor de disipación a muy bajas frecuencias incrementa durante el proceso de envejecimiento y contaminación del cable. Las arborescencias acuosas en aislamientos extruidos, la entrada de humedad en dieléctricos laminados, los escudos corroídos, los accesorios degradados, los sistemas con diferentes materiales de aislamiento y los subproductos de reticulación son las causas que envejecen y contaminan el sistema. El incremento del factor tangente delta en VLF indica que el voltaje de ruptura a frecuencia de potencia ha disminuido particularmente en los cables con aislamientos extruidos [2].

La tangente delta se obtiene midiendo el factor de potencia (Θ) cuando el sistema de cable es excitado con voltaje sinusoidal alterno. Mediante este ángulo, la corriente total es descompuesta en las componentes de carga y pérdida (ver Figura 2.12) [2].

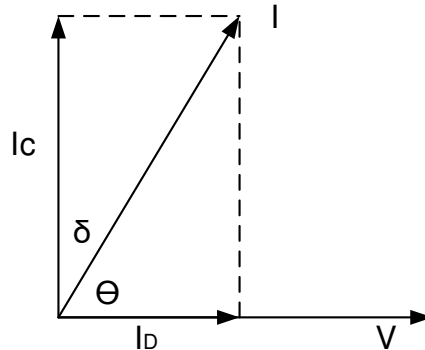


Figura 2.12. Diagrama fasorial del factor Tangente Delta [23].

La ecuación (2.5) representa el factor de disipación del sistema de cable en función de las corrientes circulantes [1], [2].

$$DF = TD = \frac{I_D}{I_C} = \frac{\sqrt{I^2 - I_C^2}}{I_C} = \frac{1}{R\omega C} \quad (2.5)$$

Donde:

DF = Factor de disipación o tangente delta

I_D = Corriente resistiva o de pérdida

I_C = Corriente capacitiva o de carga

I = Corriente total

R = Resistencia de aislamiento

C = Capacidad de aislamiento

ω = Frecuencia angular del voltaje aplicado

Si la prueba se lleva a cabo con una fuente coseno rectangular, la tangente delta se obtiene mediante la aproximación de Hamon (método aproximado para deducir el factor de pérdida dieléctrica a partir de las medidas de corriente de polarización) descrita en la ecuación (2.6) [24].

$$\tan\delta = \frac{i_{pol}\left(\frac{0.1}{t_m}\right)}{2\pi \times f_{VLF} \times C \times V} \quad (2.6)$$

Donde:

$\tan\delta$ = Tangente delta.

i_{pol} = Corriente de polarización.

t_m = Tiempo de medición segundos después de aplicar el voltaje (ver Figura 2.13) [25].

f_{VLF} = Frecuencia VLF.

V = magnitud del voltaje aplicado.

C = Capacitancia del cable.

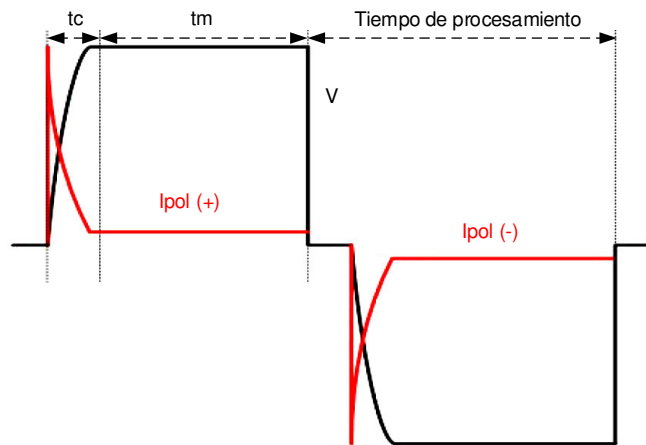


Figura 2.13. Voltaje coseno rectangular VLF y corriente de polarización [25].

Donde:

t_c = Tiempo en alcanzar el voltaje establecido.

t_m = Tiempo de medición.

La condición del sistema se determina a través de la comparación con valores de referencia conocidos para el tipo de aislamiento medido [26]. Los valores de referencia pueden provenir de:

- Valores medidos en cables del mismo diseño y misma edad dentro de la misma ubicación.
- Valores cuando son nuevos.
- Estándares de la industria.
- Una biblioteca de experiencias.
- Valores medidos en fases adyacentes (solo si las fases tienen la misma topología).

La variabilidad con el tiempo, el incremento a dos voltajes designados y las mediciones a diferentes frecuencias son los métodos derivados de la técnica tangente delta para evaluar la condición global del aislamiento [1].

2.10.2.2. Diferencial Tangente Delta (DTD)

El diferencial tangente delta es la variación que experimenta la TD con el voltaje. Matemáticamente se define como la diferencia del tangente delta promedio medido a dos voltajes diferentes, revise la ecuación (2.7), ecuación (2.8) y ecuación (2.9) [2].

$$DTD = TD(U_0) - TD(0.5 U_0) \quad (2.7)$$

$$DTD = TD(1.5 U_0) - 0.5 TD(U_0) \quad (2.8)$$

$$DTD = TD(2.0 U_0) - TD(U_0) \quad (2.9)$$

Donde:

U_0 = Voltaje nominal fase-tierra.

TD = Tangente delta.

La DTD es un indicativo para detectar el envejecimiento del cable [1].

2.10.2.3. Estabilidad Temporal Tangente Delta (TDTS)

La estabilidad temporal tangente delta es la variación de la tangente delta con el tiempo a voltaje constante. Este valor aumenta conforme el aislamiento envejece, también puede presentar variaciones si se interrumpe el voltaje aplicado [2].

Matemáticamente se representa por la desviación estándar o por el rango intercuartil.

Desviación estándar (STDEV)

Normalmente se expresa como una desviación estándar de las mediciones secuenciales de la tangente delta tomadas a un voltaje particular (generalmente U_0), revise la ecuación (2.10) [2], [26].

$$STDEV = \sqrt{\frac{\sum(TD - \overline{TD})^2}{n - 1}} \quad (2.10)$$

Donde:

TD = Tangente delta

\overline{TD} = Tangente delta medio o promedio

Rango intercuartil (RIQ)

Se puede usar el rango intercuartil a través del intervalo del 50% medio de los datos [2], [26]. La ecuación (2.11) muestra el artificio matemático para representar la estabilidad temporal tangente delta bajo este concepto estadístico.

$$RIQ = Q_3 - Q_1 \quad (2.11)$$

Donde:

Q_1 = Primer cuartil

Q_3 = Tercer cuartil

2.10.2.4. Espectroscopía dieléctrica

La espectroscopía dieléctrica es un método de diagnóstico empleado para medir el factor de pérdidas en un rango de voltajes y frecuencias (0.001 Hz a 100 Hz). La tangente delta es inversamente proporcional a la frecuencia, por tanto, es mayor a frecuencias bajas. Esto hace que las mediciones tengan mayor sensibilidad y el efecto del ruido sobre la señal disminuya como consecuencia del aumento de las corrientes resultantes [1], [2].

La espectroscopía dieléctrica se puede realizar en el dominio del tiempo (TDS) o de la frecuencia (FDS). Si la prueba se lleva a cabo con excitación VLF coseno rectangular (TDS), las pérdidas dieléctricas se calculan a partir de los valores de corriente de polarización con la aproximación de Hamon descrita en la ecuación (2.6). Si el ensayo se realiza con fuente VLF sinusoidal (FDS), los valores tangente delta se obtienen de los componentes reales e imaginarios (pérdida y desplazamiento) de la corriente [1], [2].

2.10.2.5. Prueba de Descarga Parcial

La prueba de descarga parcial es un indicador de diagnóstico empleado para determinar la degradación del aislamiento mediante la detección, medición y ubicación de las fuentes de descarga [11].

2.10.2.5.1. Definiciones generales

Descarga parcial

La descarga parcial se define como aquella descarga eléctrica localizada que une parcialmente el aislamiento entre dos conductores. Las descargas parciales son eventos de corta duración y siempre van acompañadas de emisiones de luz, calor, sonido, pulsos electromagnéticos e incluso pueden dar lugar a reacciones químicas [11]. Aparecen en áreas localizadas del aislamiento del cable, juntas o terminaciones en presencia de sobrevoltajes, voltajes de servicio o voltajes externos [1].

Pulso de descarga parcial

Pulso de voltaje o de corriente que resulta de una descarga parcial. En un cable, el pulso se propaga en ambas direcciones [11].

Ruido de fondo

Señales detectadas durante las pruebas de descarga parcial que no se originan en el objeto de prueba [18].

Fuentes de ruido: el sistema de medición (ruido blanco), transmisión de radio u otras señales continuas o impulsivas [18].

2.10.2.5.2. Parámetros de la descarga parcial

Voltaje de inicio de la descarga parcial (PDIV)

Voltaje aplicado que aumenta gradualmente desde un valor inferior en el que no se observan descargas parciales hasta un voltaje en el que se observan por primera vez descargas parciales repetidas en el objeto de prueba. En la práctica, el PDIV es el voltaje aplicado más bajo a la cual la magnitud de una cantidad de pulsos de descargas parcial es igual o superior a un valor específico [18].

Voltaje de extinción de la descarga parcial (PDEV)

Voltaje aplicado que disminuye gradualmente desde un valor más alto en el que se observan cantidades de pulsos de descarga parcial hasta un voltaje en el cual se extinguen las descargas parciales repetitivas en el objeto de prueba. En la práctica, el PDEV es el voltaje aplicado más bajo a la cual la magnitud de una cantidad de pulsos de descargas parcial es igual o menor a un valor especificado [18].

Magnitud de la descarga parcial o carga aparente (q)

Carga que se inyecta en un período de tiempo muy corto a los terminales del objeto de prueba. La carga medida generalmente se expresa en picoCoulomb (pC) [18].

Secuencia de pulso

Pulsos de descarga parcial en función del tiempo. Este parámetro se emplea para determinar correlaciones estadísticas como la amplitud de un pulso y el tiempo para el siguiente pulso [11].

a) Frecuencia de repetición de pulsos (N)

Número descargas parciales por segundo, en el caso de pulsos equidistantes [18].

b) Tasa de repetición de la descarga parcial (n)

Relación entre el número total de pulsos de PD registrados en un intervalo de tiempo seleccionado y la duración de dicho intervalo. Los pulsos registrados están por encima de una magnitud especificada o dentro de un rango especificado de magnitudes [18].

Densidad de la descarga parcial

El término densidad de descarga parcial es aplicable solo para cables con aislamiento laminado. La densidad corresponde a las descargas parciales por unidad de tiempo y de longitud $\left[\frac{pC}{(m)(s)} \right]$ [11].

Ángulo de fase del pulso de la descarga parcial (Φ)

La ecuación (2.12) representa el ángulo de fase del pulso de descarga parcial [11].

$$\Phi_i = \frac{t_i}{T} \times 360^\circ \quad (2.12)$$

Donde:

Φ_i = Ángulo de fase del pulso.

t_i = Tiempo medido desde la transición positiva anterior del voltaje de prueba (desde cero) hasta el pulso de la descarga parcial.

T = Período de la onda sinusoidal.

2.10.2.5.3. Parámetros del sistema de medición

Frecuencias de límite inferior (f1) y superior (f2)

Frecuencias a las que la impedancia de entrada $Z(f)$ ha disminuido 6 dB desde el valor pico de banda de paso [18].

Ancho de Banda (Δf)

El ancho de banda está definido por las frecuencias de límite inferior y superior como se indica en la ecuación (2.13). Un instrumento de detección y localización de PD con banda ancha tiene buena resolución en los cables instalados en campo [18].

$$\Delta f = f2 - f1 \quad (2.13)$$

Tiempo de resolución de pulso (Tr)

El tiempo de resolución indica la capacidad del sistema de medición de detectar dos pulsos de entrada sucesivos de muy corta duración, de la misma forma, polaridad y magnitud de carga en la cual el valor pico de la respuesta resultante cambiará en no más del 10% del de un solo pulso. Este parámetro es inversamente proporcional al ancho de banda del sistema de medición [18].

Factor de escala (k)

Factor por el cual se multiplicará el valor de la lectura del instrumento para obtener el valor de la cantidad de entrada [18].

2.10.2.5.4. Parámetros influyentes en las descargas parciales

Las cantidades relacionadas a las descargas parciales están influenciadas por los siguientes parámetros [11].

- El tipo y la ubicación de las fuentes de PD en el sistema de aislamiento.
- El material aislante.
- El voltaje de prueba y el tiempo aplicado.
- El ruido ambiental.

2.10.2.5.5. Fuentes de descarga parcial

Los puntos débiles del sistema de cable tales como huecos, puntos o bordes afilados, partes flotantes, cavidades interfaciales (cable y accesorio), alta resistencia del blindaje de aislamiento, regiones rotas del neutro, arborescencia eléctrica o tracking de interfaz son fuentes de descarga parcial [1]. La Tabla 2.9 muestra las fuentes de descarga parcial clasificados por tipo de aislamiento y componente.

Tabla 2.9. Fuentes de descarga parcial en sistemas de cable [11].

Componente	Fuentes de descarga parcial
Cable extruido	Vacíos o cavidades dentro del aislamiento o en las interfaces entre el aislamiento y las pantallas semiconductoras. Incluye cortes de cuchillos, ranuras o grietas en el escudo de aislamiento.
	Cavidades entre las interfaces de cable y accesorios.
	Escudo aislante de alta resistencia o neutro roto. (Típico en cables sin chaqueta o con chaqueta deteriorada)
	Árboles eléctricos iniciados a partir de protuberancias, huecos o árboles de agua.
Cable de Papel	Impregnación deficiente; papel seco, quebradizo y agrietado; encerado del fluido; sitios con huellas carbonizadas; agua en el aislamiento; fuga de fluido.
Accesorios	Huecos en productos no moldeados, interfaces sueltas de la junta del aislamiento, juntas ensambladas incorrectamente, contaminación por humedad u óxido de metal, terminaciones mal instaladas, cortes de cuchillo o magulladuras en el empalme, mal contacto entre el conector y el semiconductor o mala conexión entre el neutro y el semiconductor exterior del cuerpo del empalme, hardware del conector del terminal y superficies contaminadas.

2.10.2.5.6. Circuito de prueba

El sistema de medición está compuesto por un dispositivo de acoplamiento, un sistema de transmisión y un instrumento de medida. El circuito de la Figura 2.14 se emplea para medir descargas parciales en objetos de prueba que están conectados directamente entre la fuente de voltaje y tierra. El filtro (Z) sirve para atenuar las perturbaciones de la fuente de alto voltaje y para aumentar la sensibilidad en las mediciones a través del bloqueo de los pulsos de corriente de PD desde el interior del sistema de cable hacia la impedancia de la fuente [18].

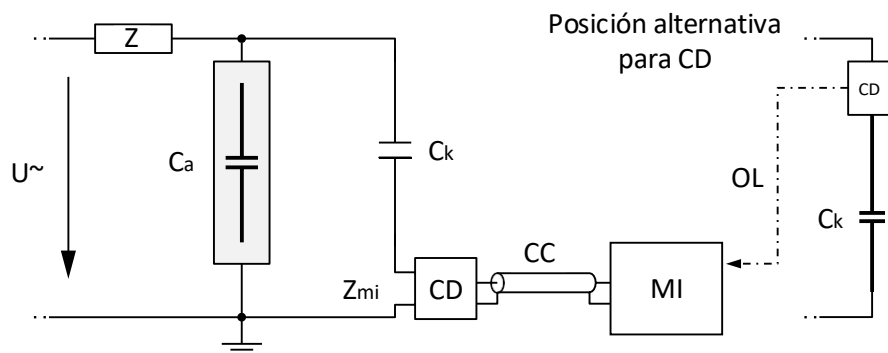


Figura 2.14. Circuito de prueba para la medición de descargas parciales en cables de energía [18].

En la Tabla 2.10 se enlista cada elemento del circuito de la Figura 2.14.

Tabla 2.10. Elementos del circuito de prueba de medición de descargas parciales [18].

Componente	Definición
U_{AC}	Fuente de alto voltaje
Z_{mi}	Impedancia de entrada del sistema de medición
CC	Cable de conexión (sistema de transmisión de señales)
OL	Enlace óptico
Ca	Objeto de prueba
Ck	Capacitor de acoplamiento
CD	Dispositivo de acoplamiento (convierte las corrientes de entrada en señales de voltaje de salida).
MI	Instrumento de medición de descargas parciales (sistema de procesamiento de las PD detectadas).
Z	Filtro

Los enlaces ópticos se pueden utilizar alternativamente para la interconexión del dispositivo de acoplamiento con el instrumento de medida [18].

2.10.2.5.7. Detección y estimación de la ubicación de la descarga parcial

La ubicación de las fuentes de descarga parcial se logra en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia [11].

Dominio del tiempo

La ubicación es estimada a través del principio de la reflectometría usando la diferencia del tiempo (t) y la velocidad de propagación del pulso. La diferencia de tiempo corresponde al desfase temporal en el punto de medición de la señal que viaja directamente al extremo cercano (pulso A) y la señal que se refleja en el extremo remoto (pulso B). El pulso C representa el pulso A reflejado varias veces [11].

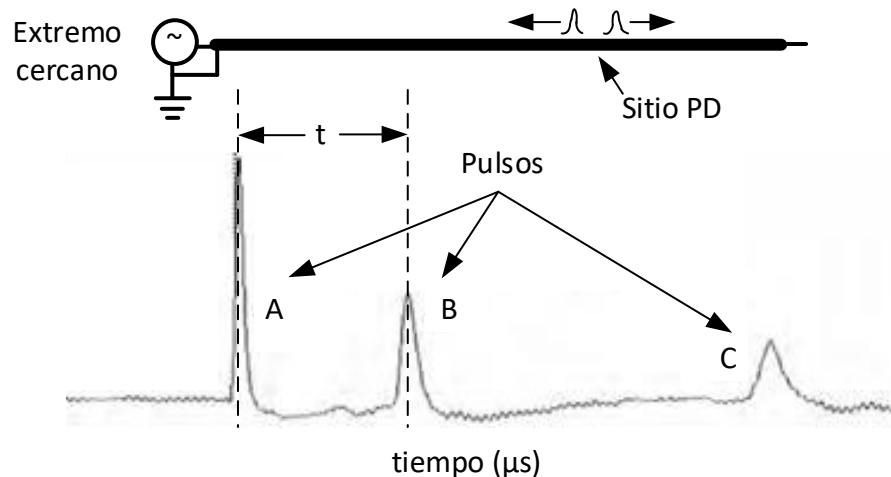


Figura 2.15. Reflexograma que muestra la ubicación de la descarga parcial en el dominio del tiempo [11].

La estimación del sitio de la descarga parcial no es suficiente para cables enterrados directamente. Varios instrumentos están disponibles en el mercado para localizar la ubicación real de la descarga parcial a lo largo del cable [11].

Dominio de la frecuencia

En el dominio de la frecuencia la distancia de la fuente de descarga parcial se estima en función de la energía y los componentes de frecuencia (espectro de frecuencia) de los pulsos. La energía calculada es mayor cerca de los sitios de las fuentes de descarga parcial. Los resultados muestran las características espectrales y la ubicación estimada para cada sitio de la fuente. Esta técnica es menos utilizada que el método en el dominio

del tiempo a pesar de ser más inmune al ruido externo y tener alta sensibilidad para distancias menores a 150 metros [11].

2.10.2.5.8. Precisión de la medición

Los parámetros específicos y no específicos descritos en la Tabla 2.11 afectan la precisión de la detección, medición y ubicación de las fuentes de descarga [11].

Tabla 2.11. Parámetros que afectan negativamente la atenuación y la resolución espacial de las descargas parciales [11].

Parámetros específicos	Parámetros no específicos
<ul style="list-style-type: none"> • Las características de propagación de ondas. <p>La atenuación de la onda se debe al tamaño y la configuración del neutro del cable, las características eléctricas del blindaje de los semiconductores o la homogeneidad del cable.</p> <p>Sistemas no homogéneos: Mezcla de construcciones (extrusión y laminación), o calibre de conductores o grosores de aislamiento mixtos, o cables nuevos y envejecidos (diferente contenido de agua y características de propagación de ondas no uniformes).</p> <ul style="list-style-type: none"> • Longitud del cable <p>Para características de propagación equivalentes, los cables largos atenúan más que los cables cortos.</p> <p>Si se conoce la longitud del cable, la velocidad de propagación de la onda debe ajustarse tomando en cuenta la construcción del cable (sistemas homogéneos o no homogéneos).</p> <ul style="list-style-type: none"> • El número, la calidad y el espaciado de los empalmes • La calidad de las terminaciones 	<ul style="list-style-type: none"> • Rendimiento de los instrumentos de PD. • Los esquemas de mitigación del ruido. • Los métodos y procedimientos de análisis. • La competencia del operador. <p>El análisis de la PD puede ser completamente automatizado, parcialmente automatizado o puesto bajo el control humano en su totalidad.</p>

Parámetros específicos	Parámetros no específicos
<ul style="list-style-type: none"> • El nivel de ruido 	

2.10.2.6. Resistencia monitoreada (MW)

La prueba de resistencia monitoreada controla las propiedades de diagnóstico del sistema de cable como la respuesta dieléctrica o las descargas parciales para usarse con los resultados de resistencia y determinar el estado del aislamiento. Un ensayo monitoreado es útil para detectar defectos que no fallan durante una prueba de resistencia simple [1], [2].

2.11. TÉCNICAS DE DETECCIÓN DE NEUTRO CONCÉNTRICO CORROÍDO

Antes de efectuar los ensayos tangente delta o de descarga parcial es importante determinar el alcance de la corrosión en el neutro concéntrico del cable. La corrosión del blindaje metálico afecta las mediciones tangente delta y limita la sensibilidad de las pruebas de descarga parcial como consecuencia de la atenuación de las señales de alta frecuencia [2]. Las siguientes técnicas son empleadas para determinar el grado de corrosión del apantallamiento.

2.11.1. REFLECTOMETRÍA EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (TRD)

La técnica de la reflectometría en el dominio del tiempo consiste en comparar la amplitud de la reflexión de la corrosión en cada cable con la reflexión de los empalmes y con el extremo lejano del sistema. La atenuación de la amplitud del pulso puede estar ligada a los cables rotos del neutro causadas por la corrosión [19].

2.11.2. MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA NEUTRA CONCÉNTRICA

El número de hebras neutrales que permanecen intactas pueden determinarse a través de la comparación de la resistencia del neutro medido con la resistencia esperada cuando es nuevo. Este método es útil para evaluar la integridad del neutro cuando los hilos se rompen en múltiples ubicaciones distribuidas a lo largo del cable, pero no es posible determinar la ubicación de la corrosión. Con los valores de voltaje y corriente medidos en el neutro, la resistencia neutra concéntrica se calcula a través de la ecuación (2.14) [19].

$$R_n = \frac{V_n(\cos \phi)}{I_n} \quad (2.14)$$

Donde:

R_n = Resistencia del neutro.

V_n = Voltaje AC aplicado en los terminales del neutro.

I_n = Corriente que fluye en el neutro.

ϕ = Ángulo entre V_n y I_n .

La resistencia teórica del neutro cuando es nuevo se obtiene con la ecuación (2.15).

$$R_{new} = \frac{R_S(1.1)}{N} \quad (2.15)$$

Donde:

R_{new} = Resistencia del neutro cuando es nuevo.

R_S = Resistencia de una hebra del neutro.

N = Número de hebras en el neutro.

La constante "1.1" se debe a la longitud neutra adicional debido a la disposición helicoidal del cable. Este factor puede oscilar entre 1.05 y 1.13 [19].

La relación descrita en la ecuación (2.16) proporciona un indicador del porcentaje de hebras que permanecen intactas [19].

$$\% \text{ hebras intactas} = \frac{R_{new}}{R_n} \times 100 \quad (2.16)$$

2.11.3. MEDICIÓN DEL VOLTAJE SUPERFICIAL

Esta técnica se aplica sobre los cables directamente enterrados. La ubicación de los neutros rotos o corroídos se identifica a través de la medición del voltaje superficial en la trayectoria del cable. El proceso es más lento en comparación con la técnica TDR [19].

2.12. FUENTES DE VOLTAJE VLF

Las fuentes de voltaje VLF son significativamente más pequeñas que los suministros de frecuencia industrial [2]. Los fabricantes proveen equipos de prueba con generadores de onda sinusoidal, coseno rectangular o ambas.

2.12.1. FUENTE SINUSOIDAL

La fuente de voltaje sinusoidal VLF es aplicable en ensayos de resistencia y de diagnóstico. Las pruebas de diagnóstico tangente delta llevadas a cabo con fuente

sinusoidal a 0.1 Hz cuentan con categorías para evaluar el sistema. La categorización se da para los sistemas de cable con aislamientos extruidos, laminados y mixtos [2].

La Figura 2.16 ilustra la forma de una señal sinusoidal VLF generada por una fuente real.

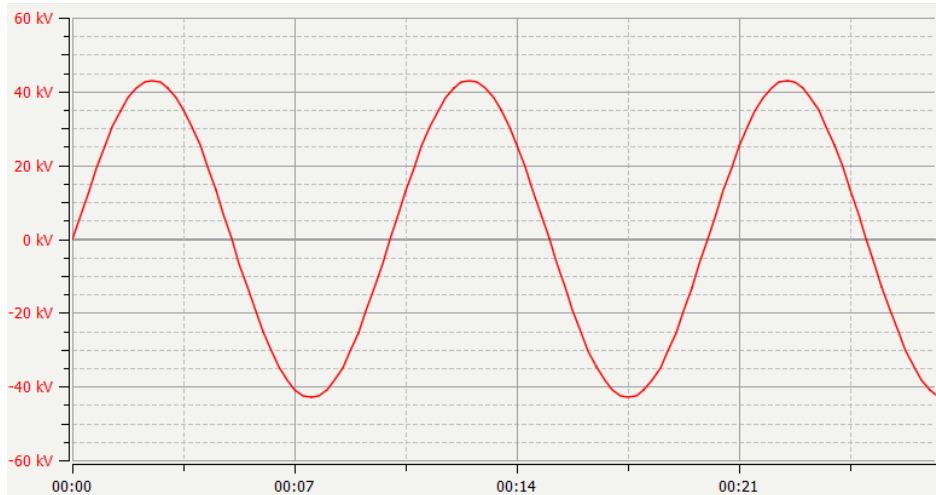


Figura 2.16. Forma de onda sinusoidal VLF [Elaboración Propia].

Los límites de capacitancia del equipo de prueba se obtienen en función del voltaje y la frecuencia de la señal de salida como se muestra en la ecuación (2.17) [27].

$$C_{m\acute{a}x} = \frac{I_{m\acute{a}x}}{2\pi \times f_{VLF} \times V_{m\acute{a}x}} \quad (2.17)$$

Donde:

$C_{m\acute{a}x}$ = Capacidad máxima de prueba de la fuente VLF.

$I_{m\acute{a}x}$ = Corriente de salida máxima de la fuente VLF.

$V_{m\acute{a}x}$ = Voltaje máximo de salida de la fuente VLF.

f_{VLF} = Frecuencia del voltaje de salida.

2.12.2. FUENTE COSENO RECTANGULAR

La forma de onda coseno rectangular no genera ondas viajeras debido al rango de frecuencia (30 Hz a 250 Hz) en que se dan los cambios de polaridad. Esta señal es adecuada para usarse en pruebas de resistencia y diagnóstico sobre cualquier tipo de aislamiento (laminado y extruido) [2]. La Figura 2.17 muestra el cambio de polaridad característica de la onda coseno rectangular VLF.

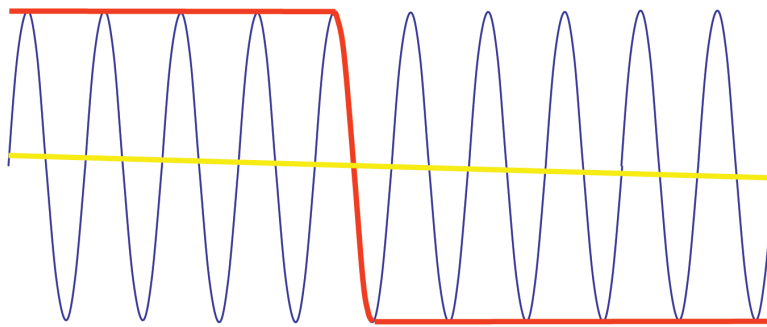


Figura 2.17. Forma de onda coseno rectangular VLF [28].

2.13.EQUIPOS PARA LOCALIZAR FALLAS EN SISTEMAS DE CABLE

2.13.1. REFLECTÓMETRO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (TDR)

El reflectómetro es utilizado para enviar pulsos de energía de corta duración al cable bajo prueba [19]. Parte de la energía que se envía se refleja en los cambios de impedancia del sistema como en los extremos (inicio y final), en las uniones, en los empalmes, en los transformadores, en las fallas (fallas de baja resistencia, conductores rotos, corrosión del blindaje metálico, empalmes separados, extremos de cable en circuito abierto, etc.) y en los cambios del tipo de cable. Si no hay reflexión, no hay cambio de impedancia a lo largo de la longitud recorrida por el pulso. La distancia entre el inicio del cable y cualquier discontinuidad o irregularidad se estima a partir de la velocidad de propagación del pulso en el cable y mediante la visualización del tiempo de reflexión de las señales. La velocidad de propagación del pulso en el cable se obtiene por medio de la ecuación (2.18) [13].

$$v_{Propagación} = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} [m/s] \quad (2.18)$$

Donde:

$v_{Propagación}$ = Velocidad de propagación del pulso en el cable.

C = Velocidad de la luz.

ϵ_r = Constante dieléctrica relativa.

2.13.2. DESCARGA CAPACITIVA (THUMPER)

El Thumper es un equipo de suficiente voltaje y energía que combinado con un TDR sirve para localizar fallas de aislamiento de alta resistencia e intermitentes. El mecanismo de prueba consiste en superar el voltaje de ruptura de la falla para producir una descarga

disruptiva a través del aire sobre o alrededor del aislamiento sólido (flashover). El sitio exacto de la falla se puede ubicar mediante el rastreo de la señal electromagnética generada por la corriente de arco o a través de la señal acústica asociada con la descarga. La clasificación energética del Thumper se calcula a través de la ecuación (2.19) [14].

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.19)$$

Donde:

E = Clasificación energética del Thumper (J).

C = Capacitancia interna del Thumper (μF).

V = Clasificación del voltaje del Thumper (kV).

La configuración del Thumper es función del voltaje de operación y de la capacitancia del sistema de cable. Se puede reducir el uso de altos voltajes innecesarios si el equipo cuenta con capacitancias internas seleccionables (Thumper de energía controlada) (ver Figura 2.18) [14].

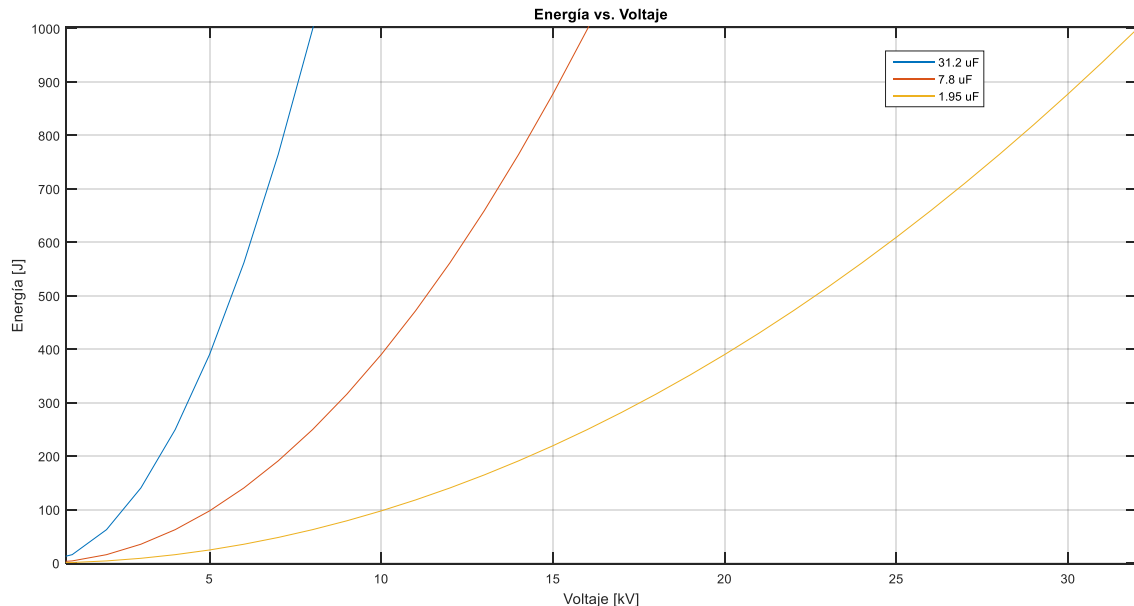


Figura 2.18. Ejemplo de la energía disponible asociada con las configuraciones de los capacitores internos del Thumper [14].

La falla en el cable se arqueará y se romperá solo si el pulso tiene suficiente duración y energía para causar el arco. La duración y energía del pulso depende de la capacitancia interna del Thumper seleccionada (ver Figura 2.19) [14].

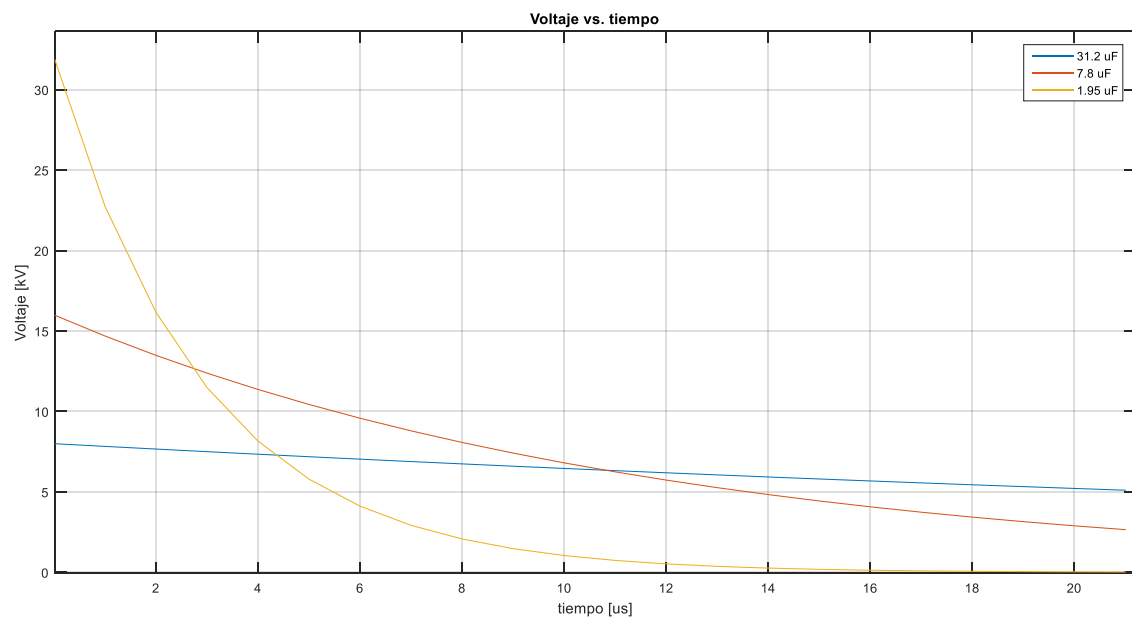


Figura 2.19. Ejemplo de curvas de duración del impulso de sobrevoltaje [14].

3. METODOLOGÍA

En esta sección se especifican los lineamientos empleados para cumplir con los objetivos descritos en el presente proyecto. La etapa inicial consiste en la recopilación de la información necesaria de los estándares, equipos y elementos de prueba de interés; en la segunda fase se amplía el tema de estudio mediante el uso de las normas y los documentos sugeridos por las directrices descritas en la etapa inicial; en la tercera fase se muestran los resultados prácticos documentados en las visitas realizadas a la EEQ y finalmente se organiza la información sintetizada de las fases uno y dos para la estructuración de la guía técnica acorde a las necesidades de la empresa eléctrica Quito. Además, se hace la recomendación de las normas internacionales investigadas para que se incluyan en las regulaciones nacionales.

3.1. COMPILACIÓN DE LA INFORMACIÓN TÉCNICA DE LOS SISTEMAS DE CABLE Y DE LA NORMATIVA

Se hizo la revisión de las normas para diseños de las redes de distribución de la Empresa Eléctrica Quito con la finalidad de obtener la información técnica de los cables empleados en las redes subterráneas de medio voltaje. También se navegó en el sitio web ArcGIS de la EEQ con el propósito de conocer parte de la infraestructura eléctrica y la topología de algunos sistemas de cable de la red de medio voltaje.

Se consultó los estándares internaciones vigentes que proporcionan información acerca de los ensayos con voltajes a muy bajas frecuencias aplicados a los cables de distribución. A través de la página web del Servicio Ecuatoriano de Normalización, se obtuvo información de las normas disponibles en el país para la aplicación de pruebas sobre los cables de potencia.

En la Tabla 3.1 se resume los principales estándares existentes a nivel local e internacional.

Tabla 3.1. Directrices para ensayar en campo sobre los cables de medio voltaje
[Elaboración Propia].

Aplicación	Normativa	Tipo de prueba
Local	NTP-IEC 60502-2:2005	Prueba HVDC
Internacional	IEC 60502-2:2014	Prueba VLF
	IEEE Std 400.2 TM -2013	Prueba VLF
	DIN VDE 0276-620:2010	Prueba VLF

Aplicación	Normativa	Tipo de prueba
	IEEE Std 400 TM -2012	Técnicas para ensayar cables de medio voltaje en campo.

Con la revisión de los estándares internacionales descritos en la Tabla 3.1, se destacó las siguientes observaciones:

La norma disponible en el país no proporciona información acerca de las pruebas VLF y sugiere la aplicación de ensayos de alto potencial directo (HVDC) en campo lo cual es perjudicial para los cables con dieléctricos extruidos.

En cuanto a las normas internacionales vigentes, la última versión del estándar IEEE es la fuente que más información proporciona para la ejecución de los ensayos a muy bajas frecuencias sobre los cables de medio voltaje.

3.2. ESTRUCTURACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE PRUEBAS DE ACUERDO CON LOS ESTÁNDARES INTERNACIONALES

En base a las conclusiones obtenidas en el paso anterior, se investigó las normas internacionales y los documentos sugeridos por los estándares de la Tabla 3.1 para proporcionar toda la información que el usuario necesita conocer al efectuar las pruebas VLF sobre los cables de medio voltaje. La información que complementa el estudio incluye normas de seguridad, procedimientos de prueba, métodos para detectar corrosión en el blindaje del cable, estándares de prueba de descarga parcial, técnicas de localización de fallas, etc., (ver Tabla 3.2).

Tabla 3.2 Normas a considerarse en la aplicación de pruebas VLF sobre los cables aislados de medio voltaje [Elaboración Propia].

Norma	Descripción
NFPA 70E-2012	Normas de seguridad
IEEE Std 510 TM -1983	
IEEE NESC C2-2007	
ANSI/NETA ATS-2009	Procedimiento de prueba en campo
ANSI/NETA MTS-2011	
IEEE Std 1617 TM -2007	Técnicas para detectar corrosión
IEC 60229:2007	Prueba de chaqueta

Norma	Descripción
IEEE Std 400.2™-2013	Pruebas en VLF
IEC 60502-2:2015	
DIN VDE 0276-620:2010	
IEEE Std 400.3™-2006	Pruebas de descarga parcial
IEC 60270:2000	
IEEE Std 1234™-2019	Localización de fallas en cables

La discontinuidad en el apantallamiento del cable puede disminuir la efectividad de las pruebas VLF. La aplicación de la norma IEEE 1234 y del estándar IEEE 1617 antes de las pruebas VLF ayudan a verificar continuidad y a conocer el grado de corrosión en el blindaje metálico respectivamente, además, forman parte de los requerimientos de la norma IEEE 400.2 y del procedimiento para ensayos de campo en cables de medio voltaje propuesto en las normas ANSI/NETA ATS y ANSI/NETA MTS.

La norma 400.3 y el estándar IEC 60270 son fundamentales para la realización de ensayos de descarga parcial mediante el uso de fuente sinusoidal VLF. Los requerimientos de estas normas se incluyen en el procedimiento ya que la EEQ está en la capacidad de llevar a cabo estas pruebas con la fuente sinusoidal VLF disponible una vez que se adquiera el módulo de descarga parcial.

Las normas de seguridad descritas en la Tabla 3.2 son de importancia por los peligros eléctricos que surgen al ensayar en alto voltaje sobre objetos de gran capacitancia. Estos estándares son citados por normas como la IEEE 400.2, IEEE 1234, entre otros.

Finalmente, la norma IEC 60229 es aplicada para conocer el estado de la chaqueta del cable. En el procedimiento establecido en los estándares ANSI/NETA ATS y ANSI/NETA MTS solo se hace referencia a inspecciones visuales en las partes accesibles del cable, por lo cual, se considera importante incluir este ensayo eléctrico para discriminar la cubierta del cable a través de una metodología práctica.

3.3. ENSAYOS EN CABLES AISLADOS CON EL EQUIPO DE PRUEBA DISPONIBLE EN LA EMPRESA ELÉCTRICA QUITO

Se realizaron varias visitas al área de redes subterráneas de la EEQ con el propósito de obtener información de los ensayos aplicados a los cables de potencia de medio voltaje.

Las primeras pruebas se realizaron en la Subestación Eléctrica Tumbaco, donde se efectuaron ensayos a muy baja frecuencia sobre una terna de cables recién instalados.

En esta visita se documentó los procedimientos, estándares y todas las consideraciones de prueba observadas durante la ejecución de los ensayos. También se obtuvo información de las características técnicas del equipo VLF utilizado.

Posteriormente se visitó la Subestación Eléctrica El Inga, donde se efectuaron pruebas VLF y mediciones de resistencia de aislamiento (prueba de MEGADO) sobre varias secciones de cables instalados en ductos. El procedimiento y todas las observaciones documentadas en esta visita es el modelo de pruebas que el personal técnico practica cuando ensayan sobre los cables de distribución.

Además, se recopiló las mediciones de varias pruebas realizadas en fechas posteriores.

En base a la experiencia de las visitas y de la información recopilada, se constató que el equipo de trabajo de la EEQ necesita de una guía técnica que abarque de forma sintetizada toda la información referente a las pruebas VLF para facilitar la ejecución de los ensayos y sirva como herramienta de capacitación para el personal técnico. Por otra parte, se evidenció que varios lineamientos establecidos en las normativas son aplicados de forma empírica e incorrecta.

En la Tabla 3.3 se muestra un resumen de los ensayos, las normas y las fuentes de voltaje utilizadas en la EEQ cuando se realizan pruebas en cables de medio voltaje.

Tabla 3.3. Métodos de prueba empleados en la EEQ sobre los cables de medio voltaje
[Elaboración Propia].

Prueba	Norma	Fuente
Resistencia VLF	IEEE Std 400.2™-2013	Sinusoidal VLF
Tangente Delta VLF		
Chaqueta	IEC 60229-2007	DC
Medición de la resistencia de aislamiento (MEGADO)	Ninguno	

3.4. ELABORACIÓN DE LA GUÍA TÉCNICA Y RECOMENDACIÓN DE LA NORMATIVA

Una vez determinados los requerimientos de prueba, se establecen los lineamientos descritos en las normativas para el compendio de la información y la construcción de la guía técnica de ensayos.

Cada sección establecida en el manual técnico de pruebas debe incluir la siguiente información:

- *Objetivo del ensayo:* Se establece los motivos por la cual se debe efectuar o considerar la prueba.
- *Norma empleada:* Se cita la referencia de donde se obtuvo toda la información descrita.
- *Las consideraciones previas:* Se indican las condiciones que el usuario debe considerar antes de cualquier acción.
- *Equipo de prueba:* Se especifican los equipos, las fuentes de voltaje y los instrumentos de medición necesarios para llevar a cabo el ensayo.
- *Aplicabilidad de la prueba:* Se da a conocer si la prueba es o no aplicable con los equipos e instrumentación disponible en la EEQ.
- *Diagrama de conexión:* Se muestran los esquemas de las conexiones de prueba proporcionadas por los estándares.
- *Procedimiento:* Se describe el proceso del ensayo, detallado y resumido.
- *Criterio de aceptación o rechazo:* Se provee los criterios de la norma para determinar si el sistema de cable pasa o no la prueba.

Finalmente se hace la recomendación de los estándares empleados en el procedimiento de pruebas para que el INEN considere incluirlas en las regulaciones del país o forme una norma nacional.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se detallan los resultados más importantes obtenidos en la aplicación de la metodología descrita en el capítulo 2. Se muestra la información recopilada de los equipos de prueba y de la sistemática utilizada durante los ensayos de los cables de medio voltaje llevadas a cabo por parte del personal técnico de la EEQ. Posteriormente, se indica la estructura del manual metodológico implementada en base a los estándares internacionales y por último se hace una recomendación de los equipos que ayudarían a mejorar la evaluación del objeto de prueba.

4.1. LEVANTAMIENTO DE LA INFORMACIÓN DE LOS OBJETOS DE PRUEBA, EQUIPOS DE ENSAYO Y NORMATIVA

4.1.1. CABLES Y ACCESORIOS DE MEDIO VOLTAJE

Las redes subterráneas de medio voltaje de la EEQ se constituyen por los cables y accesorios descritos en la Tabla 4.1, Tabla 4.2 y Tabla 4.3 según las especificaciones de la guía para diseño de las redes de distribución de la Empresa Eléctrica Quito.

Tabla 4.1. Características de los cables de 6.3 kV [29].

Tipo de cable	Tripolar	Unipolares
Número de hilos	7 o 19	
Tipo de aislamiento	PILC en aceite no migrante	XLPE o similar
Tipo de pantalla	Electrostáticas	
Chaqueta	PVC	
Aplicación	Circuitos primarios	Para las conexiones de los equipos en las cámaras de transformación

Tabla 4.2. Características de los cables de 22.8 kV [29].

Tipo de cable	Unipolares
Tipo de aislamiento	XLPE
Tipo de pantalla	Cinta de cobre aplicada de forma helicoidal.
Chaqueta	PVC
Estructura	Conductor, pantalla semiconductor, aislamiento,

	pantalla semiconductor, blindaje y chaqueta.
--	--

Tabla 4.3. Accesorios para cables de medio voltaje [29].

Accesorios para conexión y fijación de conductores	El ajuste de todos los accesorios se realiza con elementos tipo perno o del tipo preformado. No se utilizan elementos de ajuste con compresión.
Conectores para todas las derivaciones de línea	Los ramales de circuitos principales y las conexiones a transformadores y equipos se llevan a cabo con grapas apropiadas.
Fijación de los conductores en los terminales	Los conductores del primario se fijan por medio de grapas apernadas o por medio de conjuntos preformados que incluyen un dispositivo para la protección de la curvatura del conductor.

El ArcGIS de la EEQ es una herramienta útil para conocer la topología y otras características del sistema de cable especialmente cuando los ensayos son de mantenimiento. Las pruebas VLF se realizan con el objeto de prueba fuera de línea. Bajo esta consideración, los sistemas de cable quedan normalmente en la configuración radial o en derivaciones T como se muestra en la Figura 4.1 y Figura 4.2 respectivamente.

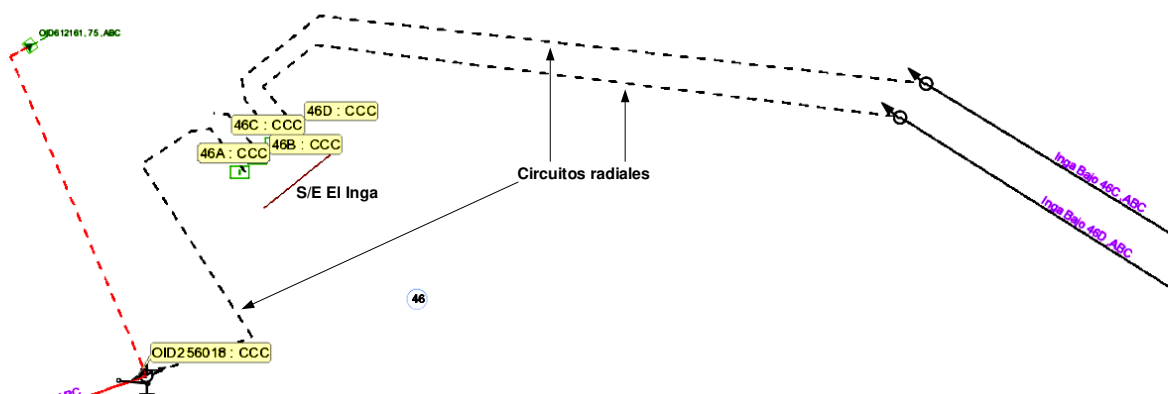


Figura 4.1. Circuitos subterráneos radiales [30].

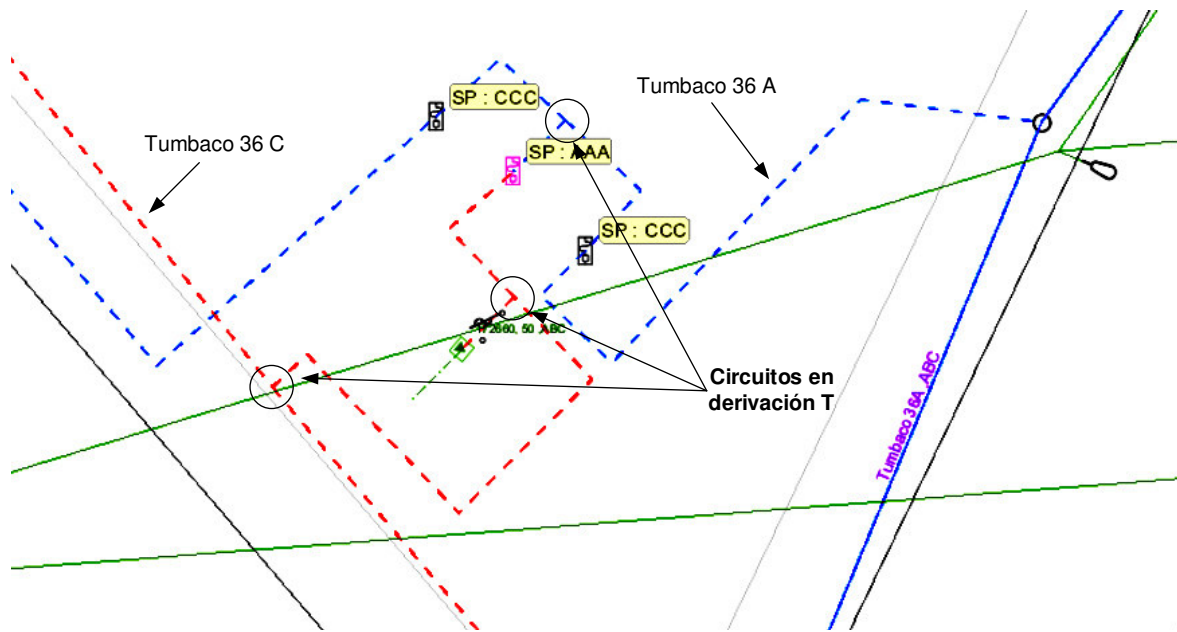


Figura 4.2. Circuitos subterráneos en derivación T [30].

4.1.2. ESPECIFICACIÓN TÉCNICA DE LOS INSTRUMENTOS DE PRUEBA

Los equipos de prueba descritos en la Tabla 4.4, Tabla 4.5 y Tabla 4.6 son las fuentes de voltaje e instrumentos de medida disponibles en el área de redes subterráneas de la EEQ para llevar a cabo los ensayos sobre los cables de medio voltaje.

Tabla 4.4. Especificación técnica del equipo probador de resistencia de aislamiento Megger MIT1025 10kV INSULATION TESTER [31].

Voltajes de prueba	500 V, 1000 V, 2500 V, 5000 V, 10000 V
Carga capacitiva	<5 s/uF a 10 kV
Descarga capacitiva	< 500 ms/uF desde 50 V a 10 kV
Rango de capacitancia	10 nF a 25 uF (5kV, 10 kV) Depende del voltaje de medición.
Rango de corriente de medición	0.01 nA a 6 mA
Resistencia máxima	20 TΩ
Rango digital del display	10 kΩ a 20 TΩ

Tabla 4.5. Especificación técnica del equipo de pruebas VLF Sinus 62 kV [27].

Marca	Megger
Voltaje de salida	
Onda Sinusoidal VLF	0 ... 44 kV _{RMS} / 0 ... 62 kV _{MÁX}
Tensión CC	±0 ... 62 kV
Voltaje rectangular VLF	0 ... 62 kV
Exactitud	± 1%
Resolución	0.1 kV
Corriente de salida	
Corriente de salida	0 ... 40 mA
Exactitud	± 1%

Resolución	10 μ A
Rango de Frecuencia	0.01 Hz ... 0.1 Hz
Carga de salida	1 μ F a 0.1 Hz a 44 kV _{RMS} Capacidad máxima de prueba 10 μ F
Tangente Delta interno	
Frecuencia de medición	0.01 Hz ... 0.1 Hz
Rango de medición	10 ⁻⁴ ... 10 ⁰
Exactitud	10 ⁻⁴
Resolución	10 ⁻⁵
Prueba en la cubierta	0 ... -20 kV CC
Localización de fallas en cubiertas	0 ... -20 kV CC Frecuencia de pulsos 0.5:1, 1:2, 1:3, 1:4, y 1.5:0.5
Seguridad	Descarga automática del objeto de prueba
Memoria interna	Al menos 1000 mediciones
Voltaje de entrada	100 V ... 264, 50/60 Hz, 2000 VA

Capacidad del equipo VLF Sinus 62 kV

Según la descripción técnica del equipo Sinus 62 kV de la Tabla 4.5, la fuente VLF está en la capacidad de probar cables con capacitancias inferiores a 1 μ F cuando se suministra un voltaje máximo de 62 kV (44 kV_{RMS}) a 0.1 Hz. Hay la posibilidad de probar cables con capacitancias mayores si se disminuye la frecuencia. La Figura 4.3 muestran las curvas de la capacitancia máxima de carga vs. el voltaje máximo de prueba para el rango de frecuencias del equipo.

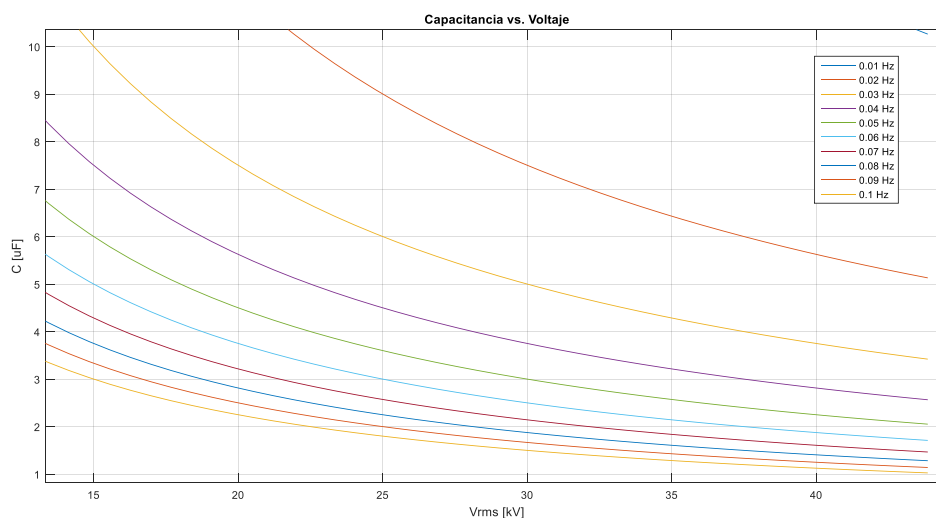


Figura 4.3. Capacidad máxima de carga en función de la frecuencia y del voltaje de prueba aplicado [Elaboración Propia].

Las curvas se obtuvieron por medio de la ecuación (2.17) con los parámetros de la fuente VLF descritos a continuación.

- Corriente máxima: 40 mA.
- Capacidad máxima: 10 μ F.

- Rango de frecuencia: desde 0.01 hasta 0.1 Hz.

Tabla 4.6. Otros equipos empleados en los ensayos [Elaboración Propia].

Equipo	Función
AEMC INSTRUMENTS MODEL 4630	Con este instrumento se mide la resistencia de la puesta a tierra y la resistividad del suelo [32].
Multímetro	Equipo utilizado para comprobar la continuidad.

4.2. ESPECIFICACIÓN DE LA METODOLOGÍA EMPLEADA EN LOS ENSAYOS

Se observaron a detalle los ensayos que el personal técnico de la empresa eléctrica Quito practica actualmente para conocer la condición de los sistemas de cable de medio voltaje. Parte de la metodología y de los criterios de evaluación documentados en esta sección se llevan a cabo desde la llegada del equipo de pruebas VLF al área de redes subterráneas de la EEQ. Otros dictámenes son criterios y experiencias del personal de pruebas.

4.2.1. METODOLOGÍA DE PRUEBAS

4.2.1.1. Pruebas en la Subestación Eléctrica Tumbaco

4.2.1.1.1. Descripción del Ensayo

Las pruebas en la subestación eléctrica Tumbaco se realizaron bajo la supervisión del grupo proveedor del instrumento de ensayos con el fin de capacitar al personal técnico de la EEQ sobre el manejo y uso del equipo de pruebas VLF. Los ensayos se efectuaron en una terna de cables monopolares, nuevos, instalados a través de ductos desde el secundario del transformador de potencia (extremo remoto) hasta la casa de control y mando (extremo local) de la subestación como se muestra en la Figura 4.4 y en la Figura 4.5 respectivamente.



Figura 4.4 Transformador de potencia “extremo REMOTO de prueba” [Elaboración Propia].



Figura 4.5. Casa de control y mando “extremo LOCAL de prueba” [Elaboración Propia].

4.2.1.1.2. Datos Técnicos del Cable

La Tabla 4.7 muestra los parámetros tomados de la cubierta del cable de la Figura 4.6 y del catálogo del fabricante. Los datos proporcionados son los mismos para las tres fases.

Tabla 4.7. Características técnicas del cable [4].

Fabricante	CONELSA
Voltaje nominal	25 kV
Tipo de conductor	Aluminio
Calibre	750 Kcmil
Material aislante	XLPE
Blindaje	Hilos de cobre
Espesor de la chaqueta	2.79
Nivel de aislamiento	100%



Figura 4.6. Características del cable descritos en la chaqueta [Elaboración Propia].

4.2.1.1.3. Equipo de Ensayos

Las pruebas se efectuaron con el equipo VLF Sinus 62 kV de la Figura 4.7.



Figura 4.7. Equipo de pruebas VLF Sinus 62 kV [Elaboración Propia].

4.2.1.1.4. Preparación del cable para las conexiones

En la Figura 4.8 se muestra el trabajo realizado en los extremos de los cables para poder hacer las conexiones de prueba y posteriormente las conexiones a la red.



Figura 4.8. Trabajo realizado sobre los extremos del cable [Elaboración Propia].

4.2.1.1.5. Procedimiento de Prueba

- 1) Antes de comenzar los ensayos, se tomó en cuenta las consideraciones descritas en la sección 4.2.1.1.6.
- 2) En el extremo local, se aterrizó el instrumento de pruebas VLF (ver Figura 4.9) y los cables cercanos al cable bajo prueba (ver Figura 4.10).



Figura 4.9. Conexión del equipo VLF a la tierra del sistema [Elaboración Propia].

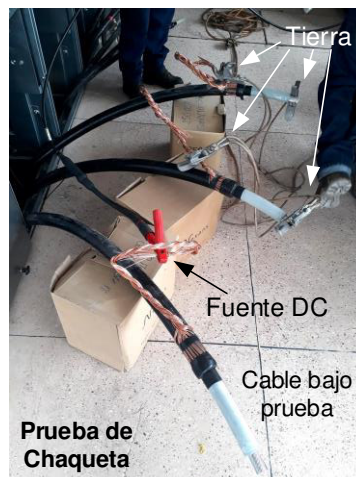


Figura 4.10. Conductores y blindajes metálicos aterrizados [Elaboración Propia].

- 3) Luego se verificó la continuidad del cable cortocircuitando el extremo remoto con el propósito de identificar la sección bajo prueba.
- 4) Se inició con el ensayo de chaqueta como se especifica en la sección 4.2.1.1.7.
- 5) Posteriormente se realizó una prueba de resistencia simple como se describe en la sección 4.2.1.1.8.
- 6) Al concluir las pruebas de voltaje soportado en todas las fases, se levantó la conexión a tierra de los cables y del equipo VLF.

En la sección 4.2.1.1.11 se establecen las observaciones realizadas del procedimiento y de los ensayos.

4.2.1.1.6. Consideraciones previas al ensayo

Puesta a tierra

Con el probador de resistencia de puesta a tierra se cercioró que el valor óhmico sea menor a 5Ω . El valor de 5Ω es una disposición para puestas a tierra de redes subterráneas contemplada en las normas para sistemas de distribución de la EEQ [29].

El valor de resistencia medido cumplió con la disposición de la norma.

Capacidad del equipo de prueba

Se estimó de forma visual la longitud del cable para asegurar que la capacitancia no supere la capacidad de la fuente VLF. La longitud estimada fue de 70 metros.

No fue relevante conocer la capacitancia exacta del cable debido a la longitud corta de la sección.

4.2.1.1.7. Prueba de chaqueta

A) Conexión

El blindaje metálico del cable bajo prueba se conectó al terminal de alto voltaje del equipo de ensayos (ver Figura 4.10).

Al finalizar el ensayo, el blindaje metálico era conectado a tierra.

B) Parámetros

El voltaje y la duración de prueba descritos en la Tabla 4.8 se utilizaron en todos los ensayos de chaqueta.

Tabla 4.8. Voltaje de prueba y tiempo de duración [Elaboración Propia].

Parámetro	Valor
Voltaje de prueba	-8 kV _{DC} . Criterio: Por cada 1 milímetro de espesor de la chaqueta, se aplica -4 kV _{DC} .
Tiempo de prueba	1 minuto

C) Resultados

El equipo de medición muestra y gráfica los valores de voltaje y corriente vs. el tiempo de duración del ensayo. La Figura 4.11 muestra los resultados obtenidos en una de las fases.

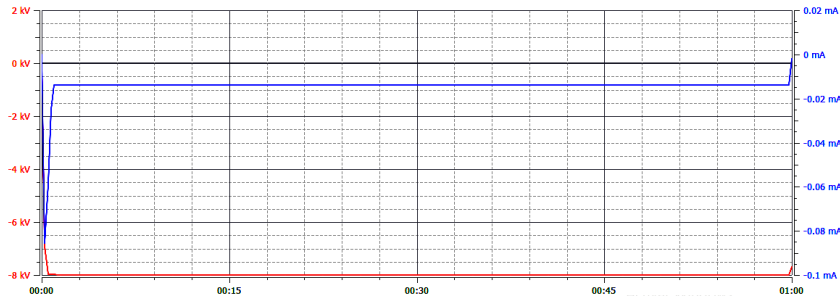


Figura 4.11. Voltaje y corriente vs. tiempo de duración [Elaboración Propia].

En la Tabla 4.9 se resume los resultados del ensayo de chaqueta de los tres cables.

Tabla 4.9. Resultado de las pruebas de chaqueta [Elaboración Propia].

Parámetros	Fase 1	Fase 2	Fase 3
$I_{\text{máx}}$ (mA)	-0.014	-0.01	-0.015
Resultado	PASA	PASA	PASA

D) Criterio de aceptación/rechazo

Si la corriente circulante es menor a 1 mA pasa la prueba, caso contrario, no pasa.

E) Evaluación de resultados

Considerando el criterio del literal D), las tres fases pasaron la prueba de chaqueta.

4.2.1.1.8. Prueba de resistencia simple VLF

A) Conexión

La conexión se realizó de la siguiente manera.

Conductor del cable bajo prueba → Terminal de alto voltaje del equipo VLF

Blindaje metálico del cable bajo prueba → Tierra del sistema

La Figura 4.12 muestra la conexión descrita.

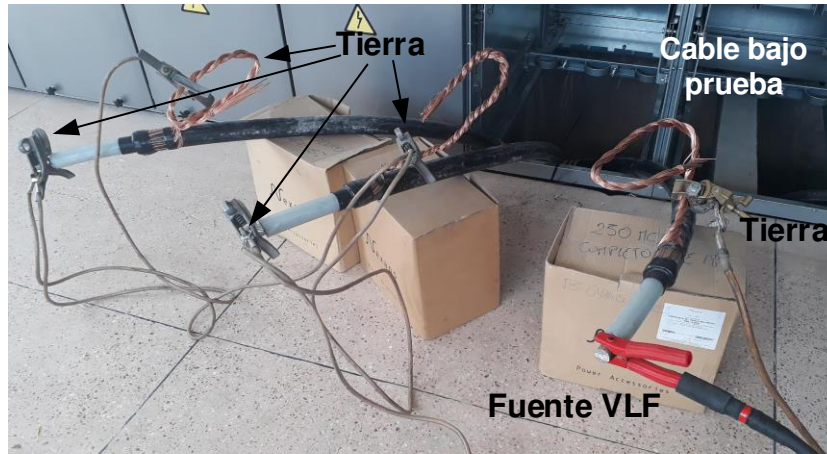


Figura 4.12. Conexión de prueba VLF resistencia simple [Elaboración Propia].
Al finalizar el ensayo, el conductor y el blindaje metálico del cable eran aterrizados.

B) Parámetros

El voltaje, tiempo y frecuencia de prueba descritos en la Tabla 4.10 se aplicaron en todos los ensayos.

Tabla 4.10. Voltaje, duración y frecuencia de ensayo [Elaboración Propia].

Parámetro	Valor
Voltaje de prueba	Sinusoidal de 43 kV _{p-p}
Tiempo de prueba	30 minutos
Frecuencia	0.1 Hz

C) Resultados

El equipo de medición muestra y gráfica el voltaje de prueba vs. el tiempo de duración del ensayo. La Figura 4.13 corresponde al resultado de prueba obtenido en una de las fases.

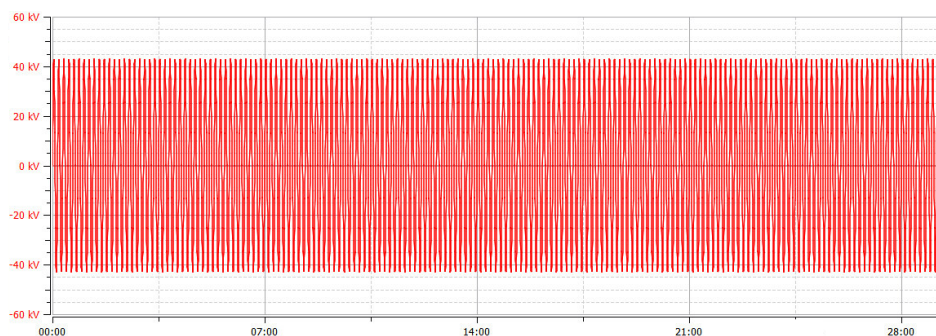


Figura 4.13. Voltaje de prueba vs. Tiempo [Elaboración Propia].

La Tabla 4.11 resume los resultados de la terna de cables.

Tabla 4.11. Resultado de las pruebas de resistencia [Elaboración Propia].

Parámetros	Fase 1	Fase 2	Fase 3

Tiempo de prueba (min)	30	26m-12s	30
Voltaje de falla (kV)	-	42.8	-
Capacitancia (nF)	12		
Resistencia (MΩ)	>101		
Resultado	PASA	NO PASA	PASA

D) Criterio de aceptación/rechazo

Si no hay interrupción del voltaje durante el tiempo de ensayo, el cable pasa la prueba, caso contrario no pasa.

E) Evaluación de resultados

Según los resultados de prueba de la Tabla 4.11, una fase no pasó el ensayo. El voltaje colapsó a los 26 minutos con 12 segundos como muestran la Figura 4.14 y la Figura 4.15.

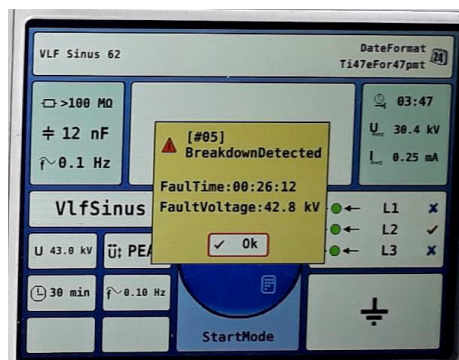


Figura 4.14. Mensaje de falla emitida por el equipo VLF [Elaboración Propia].

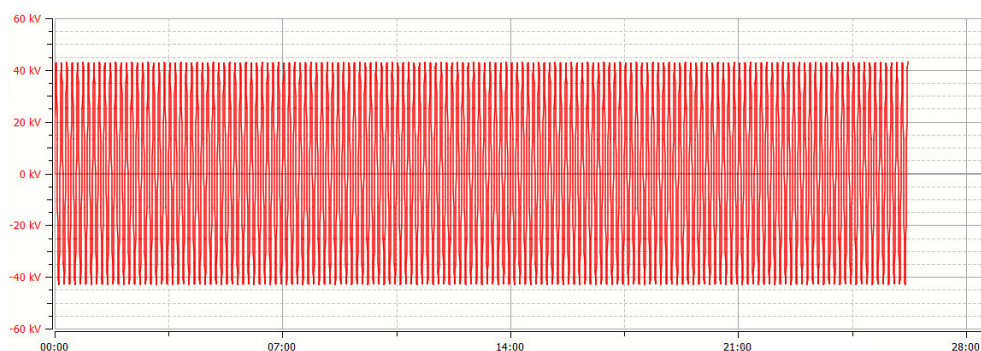


Figura 4.15. Interrupción del voltaje de prueba [Elaboración Propia].

F) Acciones tomadas

En el cable que no pasó el ensayo se procedió de la siguiente manera.

- Se localizó la falla como se describe en la sección 4.2.1.1.9.
- Después se realizó la conexión de prueba y se efectuó un nuevo ensayo de resistencia. Esta vez prueba fue exitosa como muestra la Figura 4.16.

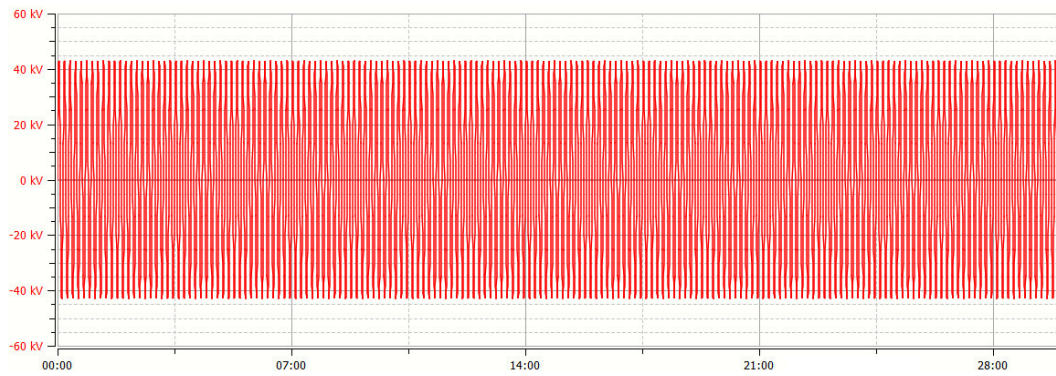


Figura 4.16. Segundo ensayo de resistencia sobre el cable fallado [Elaboración Propia].

- c) Más tarde se efectuó una prueba Tangente Delta como se describe en la sección 4.2.1.1.10.

4.2.1.1.9. Localización de Fallas

A) Método

Se aterrizó el cable fallado para inspeccionar las partes visibles.

B) Resultados

En el extremo remoto, se encontró sobre el aislamiento líneas acentuadas semejantes a arborescencias (ver Figura 4.17).



Figura 4.17. Líneas formadas en el extremo lejano del cable fallado [Elaboración Propia].

C) Análisis

La falla pudo originarse por la inadecuada manipulación del terminal durante la preparación del cable o debido a la corta distancia del extremo remoto con el suelo al momento de la prueba.

D) Acciones correctivas

Se lijó la superficie visible del aislamiento con problemas (ver Figura 4.18).



Figura 4.18. Acciones de reparación sobre del cable con falla [Elaboración Propia].

4.2.1.1.10. Prueba Tangente Delta

A) Parámetros de prueba

En este ensayo se consideraron los parámetros de prueba descritos en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12. Voltaje, número de mediciones y frecuencia de prueba [Elaboración Propia].

Parámetro	Valor
Voltaje de prueba	Sinusoidal en pasos de: 0.5 U₀: 7.21 kV U₀: 14.43 kV 1.5 U₀: 21.65 kV Donde U ₀ es el voltaje nominal fase-neutro del cable.
Número de mediciones	8
Frecuencia	0.1 Hz

B) Resultados del ensayo

La Figura 4.19 muestra los valores tangente delta promedios obtenidos en cada paso de voltaje.

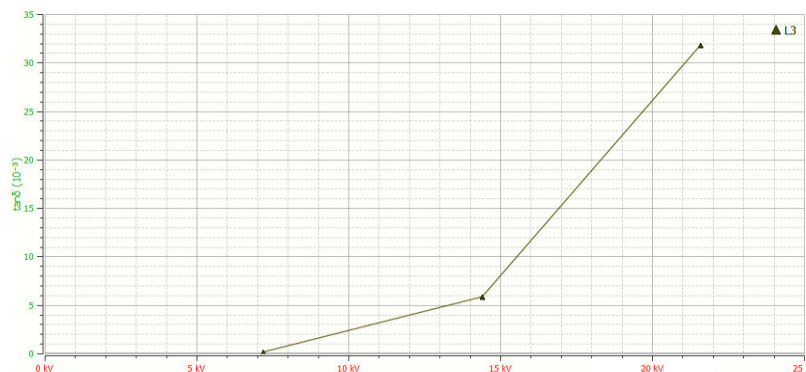


Figura 4.19. Tangente Delta Promedio vs. Voltaje de prueba [Elaboración Propia].

La Tabla 4.13 muestra los resultados tangente delta medidos y calculados por el equipo VLF, así como las evaluaciones de las mediciones en cada paso de voltaje y la recomendación final sobre el estado del cable.

Tabla 4.13. Resultados de la prueba [Elaboración Propia].

Parámetro TD	Medición / Diagnóstico
Tan δ a 0.5 U₀ (10⁻³) Mediciones tangente delta en 7.21 kV	0.12; 0.11; 0.12; 0.14; 0.12; 0.13; 0.11; 0.13
Tan δ a 1 U₀ (10⁻³) Mediciones tangente delta en 14.43 kV	5.93; 5.70; 5.66; 6.21; 5.95; 5.35; 6.36; 5.79
Tan δ a 1.5 U₀ (10⁻³) Mediciones tangente delta en 21.65 kV	34.18; 31.31; 30.14; 31.57; 29.67; 34.06; 32.87; 30.81
Tan δ a 0.5 U₀ (10⁻³) Promedio de la tangente delta en 7.21 kV	0.12
Desviación Tan δ a 0.5 U₀ (10⁻³) Estabilidad de la tangente delta a voltaje constante en 7.21 kV	0.01
Tendencia Tan δ Evaluación de las mediciones	Estable
Tan δ a 1 U₀ (10⁻³) Promedio de la tangente delta en 14.43 kV	5.87
Desviación Tan δ a 1 U₀ (10⁻³) Estabilidad de la tangente delta a voltaje constante en 14.43 kV	0.32
Tendencia Tan δ Evaluación de las mediciones	Estable
Tan δ a 1.5 U₀ (10⁻³) Promedio de la tangente delta en 21.65 kV	31.83
Desviación Tan δ a 1.5 U₀ (10⁻³) Estabilidad de la tangente delta a voltaje constante en 21.65 kV	1.71
Tendencia Tan δ Evaluación de las mediciones	Estable

Parámetro TD	Medición / Diagnóstico
$\Delta \text{ Tan } \delta=1.5 U_0 - 0.5 U_0 (10^{-3})$ Sensibilidad de la tangente delta con la variación del voltaje.	31.71
Tip up Tip up (1.5 U₀ - 1 U₀) – (1 U₀ -0.5 U₀)	20.21
Recomendación proporcionada por el equipo de pruebas	Se aconseja más estudio

C) Análisis de resultados

El resultado emitido de forma automática por el equipo VLF fue “se aconseja más estudio”. La aceptación del cable se validó por la segunda prueba de resistencia efectuada (ver Figura 4.16).

4.2.1.1.11. Observaciones de la metodología aplicada

A) Recomendaciones de seguridad

Criterios según la norma

- La norma IEEE Std 400.2 y varias normas internacionales como la IEEE Std 510, IEEE Std 1234, IEEE 400.3, ANSI/NETA ATS/MTS, etc., establecen dentro de las medidas de seguridad, el despeje y el acordonamiento del extremo local y del extremo remoto del sistema de prueba cuando se están realizando ensayos en campo sobre los cables de potencia. Además, todas las partes conductoras expuestas en el sitio de prueba tales como cables que no formen parte del ensayo deben conectarse a tierra.
- Los espacios libres seguros para voltaje alterno y voltaje continuo se establecen en la norma IEEE C2 y en la norma NFPA® 70E respectivamente.
- La norma IEEE Std 1234 reconoce a un cable como desenergizado solo si el conductor y el blindaje metálico están conectados a la tierra del sistema en el sitio de prueba y si es posible en el extremo más alejado del cable.

Observaciones

- Algunas pautas de seguridad, tales como la de cercar el área de prueba en el extremo remoto del cable y aterrizar los cables desenergizados cercanos al cable bajo prueba, no se cumplieron durante los ensayos. Tampoco hubo una persona encargada de comunicar acerca de las pruebas de alto voltaje en el extremo

remoto del cable. La Figura 4.4 y la Figura 4.20 muestran estas observaciones que deben tomarse en cuenta en los futuros ensayos.



Figura 4.20. Secciones cercanas al cable bajo prueba sin conexión a tierra [Elaboración Propia].

B) Prueba de chaqueta

Criterios según la norma

La norma IEC 60229:2007 especifica un voltaje de prueba de 4 kV_{DC} por milímetro de espesor para chaquetas fabricadas con materiales extruidos. El voltaje máximo de prueba no debe superar los 10 kV_{DC}.

En cuanto al criterio de aceptación y rechazo, la chaqueta pasa la prueba si el voltaje no colapsa durante el ensayo, de lo contrario, no pasa.

Observaciones

La norma ANSI/NETA no especifica ninguna prueba eléctrica para ensayar sobre la chaqueta de los cables en campo. Únicamente recomienda inspeccionar las partes visibles del cable. A continuación, se resalta los siguientes lineamientos de la norma IEC 60229 que no se mencionaron durante las pruebas, pero que deben tomarse en cuenta.

- El límite máximo del voltaje de prueba no debe superar los 10 kV_{DC}.
- La prueba es aplicable solo si la chaqueta es de tipo extruido.
- En cuanto al criterio de aceptación o rechazo, la norma no establece un valor de corriente de fuga en particular para asignar si pasa o no la prueba. Existen estándares en las que si se proveen valores referenciales para discriminar las mediciones. Por ejemplo, la norma alemana VDE 0276 califica a la chaqueta en buen estado si la corriente de fuga no supera los 500 μ A/km cuando se alimenta con 5 kV_{DC}. En otras directrices son menos estrictos al establecer un umbral máximo de corriente de 2 mA/km [33].

C) Prueba de resistencia simple

Criterios según la norma:

Las normas IEEE 400.2 e IEEE 400 establecen los siguientes dictámenes.

- El tiempo mínimo de prueba recomendado para un ensayo de resistencia de instalación o de aceptación es de 60 minutos a 0.1 Hz.
- La aplicabilidad de la prueba de instalación se justifica basándose de experiencias pasadas como la necesidad de verificar la calidad de la instalación o para comprobar la confiabilidad y los resultados de las pruebas de fábrica o para detectar daños durante el envío o almacenamiento del cable.
- La prueba de aceptación se justifica en base a experiencias pasadas como la necesidad de verificar la calidad de la mano de obra o para validar la confiabilidad y los resultados de las pruebas de fábrica de los subcomponentes.

Observaciones

- No se empleó los 60 minutos establecidos en la normativa. A pesar de que el tiempo mínimo recomendado para cualquier ensayo de resistencia es de 30 minutos, los estándares recomiendan emplear 1 hora en los cables nuevos a menos que se esté evaluando por segunda vez después de una reparación. El tiempo programado fue de 30 minutos, por lo cual, no se acató la disposición de la norma.
- No se definió las razones por la cual se optó por la prueba de instalación. Es importante establecer los objetivos de las pruebas ya que si el cable no presenta complicaciones durante el envío, almacenamiento o instalación convendría hacer directamente ensayos de aceptación siempre y cuando los resultados tangente delta medidos en las secciones instaladas tengan valores aceptables.
- No se efectuaron pruebas de aceptación. Cualquier error o defecto cometido en la instalación de las terminaciones no se evaluaron.

D) Prueba de diagnóstico Tangente Delta, Estabilidad de la Tangente Delta y Diferencia de la Tangente Delta.

Criterios según la norma:

La norma IEEE 400.2 establece los siguientes lineamientos.

- Una prueba de diagnóstico debe realizarse antes de un ensayo de resistencia simple o monitoreada para evaluar previamente la condición del cable. La prueba tangente delta en los sistemas envejecidos busca degradación por arborescencias de agua, mientras que en los sistemas de cable nuevos se busca contaminación.
- Las cifras de mérito dadas para los sistemas de cable antiguos no se deben aplicar en los sistemas de cable nuevos. En los nuevos sistemas se espera que el

diferencial tangente delta (DTD) sea pequeña al igual que la estabilidad temporal a voltaje constante (TDTS).

Observaciones:

- El diagnóstico tangente delta se llevó a cabo solamente en un cable de la terna. El ensayo del factor de disipación hubiera proporcionado el grado global de envejecimiento o contaminación de cada cable y una referencia de qué secciones están en riesgo de fallar durante la prueba de resistencia.
- La prueba tangente delta debía llevarse a cabo antes y después de la reparación del cable fallado para comprobar si hubo corrección del factor de pérdidas con las acciones tomadas y finalmente ratificar la evaluación con el segundo ensayo de resistencia de preferencia monitoreada por un tiempo de 30 minutos.
- La discriminación de las mediciones tangente delta se realizó utilizando las cifras de mérito dadas para los cables envejecidos. La norma establece otras cifras de mérito para los sistemas de cable nuevos. Esto a la vez desencadena un error en el último paso de voltaje seleccionado, el cual debía establecerse en 2 U0. La Tabla 4.14 muestra la diferencia entre las cifras de mérito proporcionadas para un sistema envejecido y uno nuevo. Los valores referenciales del DTD y la TD son mayores en los cables envejecidos que en los cables nuevos.

Tabla 4.14. Cifras de mérito para que un sistema de cable extruido se evalúe como “acción no requerida” [Elaboración Propia].

Tipo	TDTS (U0)	DTD	TD (U0)
Envejecido	<0.1	<5.0 a (1.5 U0 - 0.5 U0)	<4.0
Nuevo	<0.1	<0.8 a (2 U0 – 1.0 U0)	<1.0
Medido	0.32	31.71 a (1.5 U0 - 0.5 U0)	5.87

Un sistema envejecido “no requiere acción” si la DTD y la TD son menores a 5.0 y a 4.0 respectivamente. Un sistema recién instalado se evalúa como “acción no requerida” si la DTD y la TD no superan la unidad. Las mediciones tomadas en el ensayo (DTD=31.71 y TD=5.87) estuvieron fuera del rango de “acción no requerida” tanto para las cifras de mérito proporcionadas para los sistemas de cable envejecidos como para los sistemas de cable nuevos, en otras palabras, la evaluación coincidió para ambos casos. No obstante, en otros ensayos se puede cometer el error de aprobar erróneamente sistemas recién instalados con un alto

grado de pérdidas dieléctricas si no se aplica de forma correcta las cifras de mérito.

- La evaluación del estado del cable se limitó al proporcionado por el equipo VLF. No se interpretó las causas del aumento de los parámetros tangente delta ni se acató las recomendaciones proporcionadas por la norma para el diagnóstico dado. Por ejemplo, la evaluación “se aconseja un estudio adicional” emitido por el equipo VLF significa que para aprobar o rechazar el sistema de cable es necesario efectuar un ensayo de resistencia monitoreada tangente delta o de descarga parcial. Al no haber el equipo necesario para llevar a cabo una prueba de descarga parcial, se tuvo que optar por la prueba de resistencia monitoreada tangente delta.

E) Localización de fallas

Criterios según la norma:

La norma IEEE 400 hace referencia a la prueba de descarga capacitiva (Thumper) como una técnica para localizar fallas en los cables de potencia. La norma IEEE 1234 provee los lineamientos para conocer el tipo y localizar las fallas de manera óptima a través de métodos como la reflectometría en el dominio del tiempo o la descarga capacitiva.

Observaciones:

Al no disponer del equipo necesario, la localización de la falla se realizó únicamente observando las partes accesibles del cable fallado. Una inspección visual no es concluyente al momento de localizar fallas, ni en las partes visibles del cable ni mucho menos en las no accesibles. Al menos se tuvo que medir la resistencia de aislamiento para discriminar si la falla es intermitente o no lineal (revise la sección 2.7.3).

4.2.1.2. Pruebas en la Subestación Eléctrica El Inga

4.2.1.2.1. Descripción del ensayo

Se realizaron pruebas de resistencia simple en un circuito trifásico constituido por cables monopolares, nuevos, instalados desde el soporte vertical donde se suspende el alimentador primario hasta un pozo de registro ubicado cerca de la casa de control y mando de la subestación como se muestran en la Figura 4.21 y en la Figura 4.22 respectivamente.



Figura 4.21. Estructura vertical [Elaboración Propia].



Figura 4.22. Pozo de registro ubicado cerca de la casa de control y mando [Elaboración Propia].

Posteriormente los cables se direccionaron hacia la casa de control donde se efectuaron mediciones de resistencia de aislamiento (megado de cables). La Figura 4.23 muestra los cables instalados en la casa de control.



Figura 4.23. Casa de control y mando [Elaboración Propia].

4.2.1.2.2. Datos técnicos del cable

Los parámetros eléctricos del cable descritos en la Tabla 4.15 son las mismas para las tres fases.

Tabla 4.15. Características técnicas del cable bajo prueba [4].

Fabricante	CONELSA
Voltaje nominal	25 kV
Tipo de conductor	Cobre
Calibre	250 kcmil
Material aislante	XLPE
Blindaje	Cinta de cobre
Espesor de la chaqueta	2.03
Nivel de aislamiento	100

4.2.1.2.3. Procedimiento

Pruebas realizadas en el pozo de registro

- 1) Se tomó en consideración las descripciones de la sección 4.2.1.2.4.
- 2) Luego se aterrizó el equipo VLF a la tierra del sistema (Figura 4.24).



Figura 4.24. Conexión del cable de tierra del equipo de prueba VLF [Elaboración Propia].

- 3) Se inició con la prueba de resistencia como se establece en la sección 4.2.1.2.5.
- 4) Al concluir los ensayos de resistencia, se eliminó las conexiones a tierra de los cables y del equipo VLF.

Pruebas realizadas en la casa de control y mando

- 5) Se enrutó los cables hacia la casa de control y mando de la subestación para efectuar las pruebas de MEGADO descritos en la sección 4.2.1.2.6.

En la sección 4.2.1.2.7 se establecen las observaciones realizadas del procedimiento y los ensayos.

4.2.1.2.4. Consideraciones previas

Puesta a tierra

Con un probador de resistencia de puesta a tierra se cercioró que el valor de óhmico sea menor a 5Ω . El valor de 5Ω es una disposición para puestas a tierra de redes subterráneas contemplada en las normas para sistemas de distribución de la EEQ [29].

El valor de resistencia medido cumplió con la disposición de la norma.

Capacidad del equipo de prueba

Se estimó de forma visual la longitud del cable para asegurar que la capacitancia no supere la capacidad del equipo VLF. La longitud estimada fue de 90 metros.

No se fue relevante conocer la capacitancia exacta del cable debido a la longitud corta de la sección.

4.2.1.2.5. Prueba de resistencia simple

A) Conexión de prueba

Se conectó a tierra dos blindajes metálicos y todos los conductores de la terna de cables. El blindaje metálico restante se conectó al terminal de alto voltaje del equipo VLF.

La conexión descrita se ilustra en la Figura 4.25.

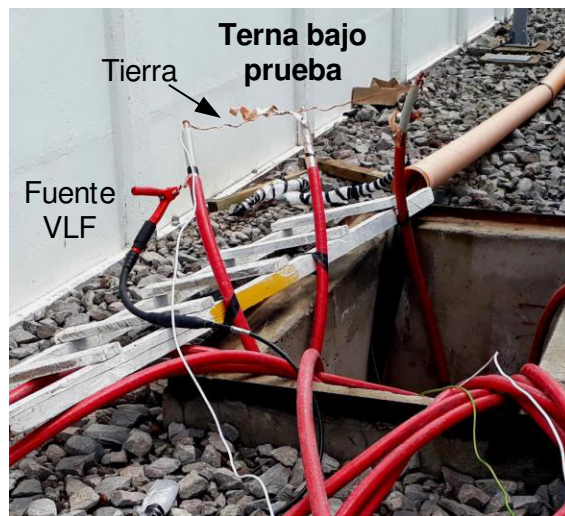


Figura 4.25. Conexión de prueba de resistencia VLF [Elaboración Propia].

Al finalizar el ensayo, el blindaje metálico del cable probado era conectado a tierra.

B) Parámetros de prueba

El voltaje, tiempo y frecuencia de prueba descritos en la Tabla 4.16 se aplicaron en todas las pruebas.

Tabla 4.16. Voltaje, duración y frecuencia de ensayo [Elaboración Propia].

Parámetro	Valor
-----------	-------

Parámetro	Valor
Voltaje de prueba	Sinusoidal de 41 kV _{p-p}
Tiempo de prueba	30 minutos
Frecuencia	0.1 Hz

C) Resultados

En la Tabla 4.17 se resume los resultados de los ensayos de resistencia de los cables probados.

Tabla 4.17. Resultado de las pruebas [Elaboración Propia].

Parámetros	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Tiempo de prueba (min)	30	30	30
Voltaje de falla (kV)	-	-	-
Capacitancia (nF)	27		
Resistencia (MΩ)	>101		
Resultado	PASA	PASA	PASA

D) Criterio de aceptación/rechazo

Si no hay interrupción del voltaje durante el tiempo de ensayo, el cable pasa la prueba, caso contrario, no pasa.

E) Evaluación de resultados

Los resultados de prueba descritos en la Tabla 4.17 muestran que las tres fases concluyeron exitosamente la prueba.

4.2.1.2.6. Medición de la resistencia de aislamiento (Prueba de MEGADO)

A) Equipo de Ensayo

Se empleó el equipo probador de aislamiento de la Figura 4.26.



Figura 4.26. Megger MIT1025 10kV INSULATION TESTER [Elaboración Propia].

B) Conexión de prueba

Los terminales del megaóhmmetro se conectaron al conductor y al blindaje metálico del cable como se ilustra en la Figura 4.27.



Figura 4.27. Conexión de megado de cables [Elaboración Propia].

C) Parámetros de prueba

En la Tabla 4.18 se establece el voltaje y el tiempo de prueba aplicado.

Tabla 4.18. Parámetros de la prueba de MEGADO [Elaboración Propia].

Parámetro	Valor
Voltaje de prueba	5 kV _{DC} Nota: El voltaje de prueba no debe sobrepasar el voltaje nominal del cable.
Tiempo de prueba	1 minuto

D) Resultados obtenidos

La Tabla 4.19 muestra los valores de resistencia medidos.

Tabla 4.19. Resultados de la prueba de megado [Elaboración Propia].

Fase	Resistencia de aislamiento (MΩ)
1	107.0
2	109.6
3	78.9

La Figura 4.28 muestra los valores tomados directamente del equipo de pruebas en cada fase.



Figura 4.28. Mediciones obtenidas en el megado de cables [Elaboración Propia].

E) Criterio de aceptación/rechazo

Primer criterio: Los valores de resistencia medidos en las tres fases no deben variar entre sí de forma significativa. Si alguna medición de resistencia no se asemeja a la mayoría, el cable no pasa la prueba.

Segundo criterio: Si ninguna de las mediciones se asemeja entre sí, se debe emplear los valores referenciales establecidos en la Tabla 4.20.

Tabla 4.20. Rangos referenciales de la prueba de MEGADO [Elaboración Propia].

Resistencia (GΩ)	Diagnóstico
R>50	Pasa la prueba
20<R<50	Efectuar un nuevo ensayo
R<20	No pasa la prueba

F) Evaluación de los resultados

La fase 3 no pasó el ensayo según el primer criterio descrito en el literal E).

G) Acciones tomadas

- Se realizó una inspección visual en los extremos de los cables para descartar anomalías.
- Luego se efectuó una nueva medición en todas las fases con los mismos parámetros de prueba establecidos en el literal C). En la Tabla 4.21 se muestran los nuevos valores de resistencia.

Tabla 4.21. Valores medidos en la segunda prueba de MEGADO [Elaboración Propia].

Fase	Resistencia de aislamiento (GΩ)
1	81.3
2	84.4
3	90.3

La Figura 4.29 muestra las mediciones tomadas del megaóhmetro.



Figura 4.29. Mediciones obtenidas en la segunda prueba de MEGADO [Elaboración Propia].

Las nuevas mediciones indican que los cables pasaron la prueba. No se obtuvo un motivo claro acerca del error cometido en las primeras mediciones.

4.2.1.2.7. Observaciones de la metodología aplicada

A) Recomendaciones de seguridad

Criterio según la norma:

La norma IEEE 510 sugiere implementar abrazaderas del tipo tornillo para que las conexiones a tierra no se desconecten accidentalmente.

Observaciones:

Durante la prueba, la tierra del equipo VLF fue desconectada accidentalmente cuando se cambió los terminales de la fuente hacia otra fase de la terna. La persona responsable de las pruebas se percató cuando el ensayo ya se estaba efectuando. Consecuencia de este incidente se paró la prueba emergentemente. Disponer de las abrazaderas tipo tornillo evitarían este tipo de contratiempos e incluso accidentes en los futuros ensayos.

B) Prueba de resistencia VLF

Criterio según la norma:

La norma IEEE 400.2 establece lo siguiente:

- La prueba de instalación se realiza antes de empalmar, terminar o energizar el cable instalado. El objetivo de la prueba es detectar daños durante el envío, almacenamiento o instalación del cable.
- La conexión de prueba recomendada es:
Conductor → Fuente VLF
Blindaje metálico → Tierra del sistema (ver Figura 7.4)
- La duración mínima recomendada en una prueba de instalación es de 60 minutos.

Observaciones:

- El ensayo de instalación se llevó a cabo sin haberse finalizado la instalación del cable (ver Figura 4.22). Por tanto, el propósito de la prueba no se cumplió a cabalidad.
- La conexión de prueba se realizó de la siguiente manera:
Conductor → Tierra del sistema
Blindaje metálico → Fuente VLF (ver Figura 4.25)
Por convención, la conexión de prueba debe realizarse tal como se indica en los estándares internacionales.
- No se empleó los 60 minutos de prueba establecidos en la normativa para los ensayos de instalación.

C) Medición de la resistencia de aislamiento (megado de cables)

Criterio según la norma:

La norma ANSI/NETA establece la siguiente metodología. Antes de comenzar con la medición, los conductores desenergizados cercanos al cable bajo prueba deben estar conectados a tierra. La resistencia de aislamiento se mide aplicando un voltaje proporcionado por el fabricante entre el conductor y el blindaje metálico del cable. La medición se compara con los valores de resistencia de fábrica. Si no se dispone de los valores del fabricante se debe utilizar los proporcionados en la Tabla 7.13. Además, se debe considerar la temperatura a la cual se realiza la prueba para corregir las mediciones en caso de ser necesario (ver sección 2.3.3).

Observaciones:

- De acuerdo con el procedimiento establecido en las normas ANSI/NETA ATS y ANSI/NETA MTS, la medición de resistencia de aislamiento debe realizarse antes de una prueba VLF para identificar y dar mayor seguimiento a aquellos cables que presenten desviaciones de la información de referencia.

- Las secciones desenergizadas cercanas al cable bajo prueba no se aterrizaron en ningún momento en lo que duró las mediciones (ver Figura 4.27). Este paso omiso pudo haber ocasionado alguna lesión o accidente eléctrico consecuencia del voltaje inducido en los conductores aledaños.
- En cuanto al voltaje aplicado, si bien se escogió los 5kV_{DC} establecidos en la norma, el personal técnico consideró que la prueba pudo haberse efectuado con cualquier otro potencial.
- Respecto al criterio de aceptación o rechazo, un aislamiento de 25 kV es aceptable si la resistencia mide como mínimo 20 GΩ según la normativa (ver numeral 3 de la guía técnica), mientras que para el personal técnico este valor es considerado crítico (ver literal E).
- Los valores referenciales de resistencia utilizados por el personal técnico de la EEQ son aplicados para cualquier clasificación de voltaje del cable (ver literal E). Los estándares internacionales proporcionan valores de referencia según el voltaje nominal del cable (ver numeral 3 de la guía técnica). Además, no se consideró la temperatura a la cual se llevó a cabo los ensayos.

4.2.1.3. Pruebas realizadas en Subestación Eléctrica El Obraje

4.2.1.3.1. Descripción del ensayo

La siguiente experiencia tiene por fin dar una idea del concepto manejado por parte del personal técnico de la EEQ respecto a la utilidad de la prueba tangente delta, resistencia y megado.

El agente fiscalizador de la Zona Sur de la EEQ solicitó al grupo de trabajo del área de redes subterráneas de la EEQ efectuar ensayos de megado, chaqueta, VLF y Tangente Delta en una terna de cables instalados desde el parque industrial El Obraje hasta la primera cámara de transformación donde se encuentran las diferentes celdas de llegada y salida hacia otros puntos de carga.

Las características de la terna de cables proporcionadas por el ente Fiscalizador son las siguientes:

- Longitud aproximada del cable: 700 metros.
- Los cables nunca han entrado en operación, pero estuvieron instalados por mucho tiempo.

4.2.1.3.2. Resultados e Informe

Los resultados de las pruebas proporcionados por la EEQ se muestran en la Tabla 4.22, Tabla 4.23 y Tabla 4.24.

Tabla 4.22. Resultados de la prueba VLF [Elaboración Propia].

Parámetros	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Voltaje (kV)	41 kV		
Tiempo (min)	30	30	30
Resultado	PASA	PASA	PASA

Tabla 4.23. Resultados de la prueba de chaqueta [Elaboración Propia].

Parámetros	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Voltaje (kV_{DC})	-8.0	-8.0	-8.0
Tiempo (min)	1	1	1
Resultado	PASA	PASA	PASA

Tabla 4.24. Resultados de la prueba de MEGADO [Elaboración Propia].

Parámetros	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Voltaje (kV_{DC})	10	10	10
Tiempo (min)	5	5	5
Resultado	45.8	39.2	54.7

No se tiene registro de los ensayos tangente delta.

4.2.1.3.3. Observaciones

- La norma IEEE 400 provee las características que se necesita conocer del sistema de cable y la información que se requiere incluir en el informe de prueba (revise la Tabla 7.7 y Tabla 7.11 de la guía técnica).
- No se efectuaron las pruebas tangente delta según la información obtenida. Estos ensayos debían realizarse para conocer el grado de envejecimiento o contaminación de los cables como consecuencia de haber estado instalados por mucho tiempo. Los resultados también habrían sido referenciales para seleccionar el tiempo en la prueba de resistencia. Los 30 minutos seleccionados son admisibles siempre y cuando los cables tengan un factor alto de pérdidas, caso contrario, se tuvo que haber ensayado con un tiempo de 60 minutos.

- Las mediciones de resistencia de aislamiento (megado de cables) se proporcionaron sin ninguna evaluación lo cual significa que no se comprende el sentido de la prueba.
- Para el personal de pruebas es más relevante conocer el estado de la chaqueta que el del blindaje metálico. Es fundamental conocer que tan roto o corroído está el apantallamiento, no solo por la sensibilidad que representa la corrosión en las mediciones tangente delta, sino también, por la importancia que tiene el blindaje metálico cuando el cable entra en operación.

4.2.2. PRUEBAS APLICABLES Y NO APLICABLES

La Tabla 4.25 y Tabla 4.26 resume los ensayos aplicables y no aplicables según el análisis realizado en la sección 4.1.2 y a la sección 4.2.1.

Tabla 4.25. Ensayos recomendados en campo para cables de medio voltaje [Elaboración Propia].

Prueba o procedimiento	Normado	Observaciones
Lineamientos de seguridad	Si	No se acata estrictamente las disposiciones de la normativa ni se dispone del equipamiento necesario.
Procedimiento de prueba	No	Las pruebas en campo se limitan a los ensayos en VLF.
Corrosión del blindaje metálico	No	Se ejerce la prueba de continuidad con un propósito distinto a detectar corrosión. Tampoco conocen valores referenciales para discriminar las mediciones. En general, no se toma en cuenta como parte del procedimiento de pruebas.
Medición de la resistencia de aislamiento	No	Este ensayo se realiza de manera empírica y no se comprenden la utilidad de la medición.
Prueba de chaqueta	Si	Ninguna
Pruebas en VLF	Si	No se acata estrictamente las disposiciones de la normativa y las

Prueba o procedimiento	Normado	Observaciones
		pruebas se limitan a las de resistencia.
Pruebas de descarga parcial	No aplicable	No se dispone del equipo necesario ni de los lineamientos de prueba.
Localización de fallas en cables	No aplicable	No se dispone del equipo necesario ni de los lineamientos de prueba.

Tabla 4.26. Ensayos VLF aplicables con la fuente Sinus 62 kV [Elaboración Propia].

Prueba	Observaciones
Resistencia	No se toma en cuenta los tiempos proporcionados en la norma.
Tangente delta	No se comprende el fin de la prueba y no se utilizan los valores referenciales (cifras de mérito) correctos para la discriminación de los resultados.
Diferencial Tangente Delta	Los voltajes no se seleccionan correctamente y no se utilizan los valores referenciales (cifras de mérito) correctos para la discriminación de los resultados.
Estabilidad Tangente Delta	No se utilizan los valores referenciales (cifras de mérito) correctos para la discriminación de los resultados.
Espectroscopía en el dominio de la frecuencia	Este ensayo no se consideró
Descarga parcial	No existe el equipo necesario
Resistencia monitoreada	Este ensayo no se consideró

Pruebas como la obtención de la tangente delta a partir de la corriente de fuga y la espectroscopía dieléctrica en el dominio del tiempo no son aplicables puesto que son exclusivos de realizarse con fuente de onda coseno rectangular.

4.3. ESTRUCTURA DE LA GUÍA TÉCNICA

En esta sección se representa gráficamente los procedimientos descritos en la guía técnica del Anexo A. En cuanto a los ensayos VLF, cabe aclarar que el manual técnico

solo cuenta con los lineamientos de prueba que pueden y podrían llevarse a cabo con fuente sinusoidal ya que es el equipo actualmente disponible en el área de redes subterráneas de la EEQ.

El diagrama de bloques de la Figura 4.30 muestra el procedimiento estructurado con las normas internacionales IEEE 400, IEEE 400.2, ANSI/NETA ATS y ANSI/NETA MTS para ensayar sobre los cables de medio voltaje en campo.

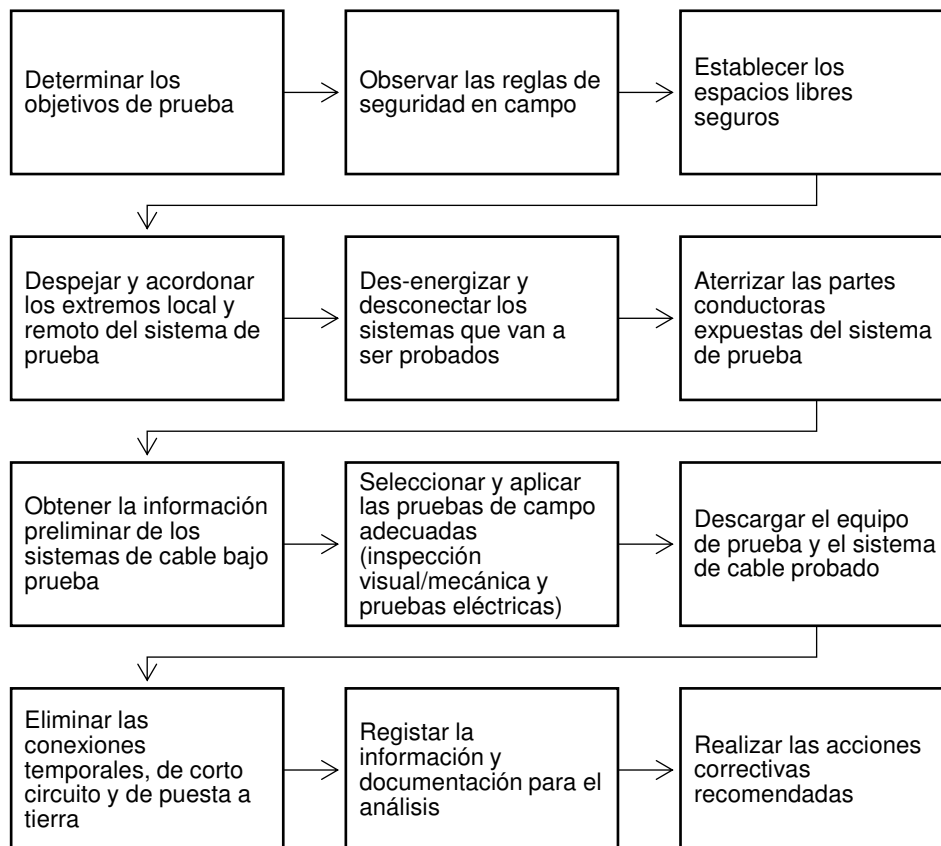


Figura 4.30. Procedimiento para pruebas en campo sobre los cables de medio voltaje [Elaboración Propia].

El diagrama de bloques de la Figura 4.31 enlista las pruebas eléctricas y el orden en que deben realizarse según los estándares internacionales ANSI/NETA ATS y ANSI/NETA MTS cuando se dispone de fuentes de excitación en muy baja frecuencia.

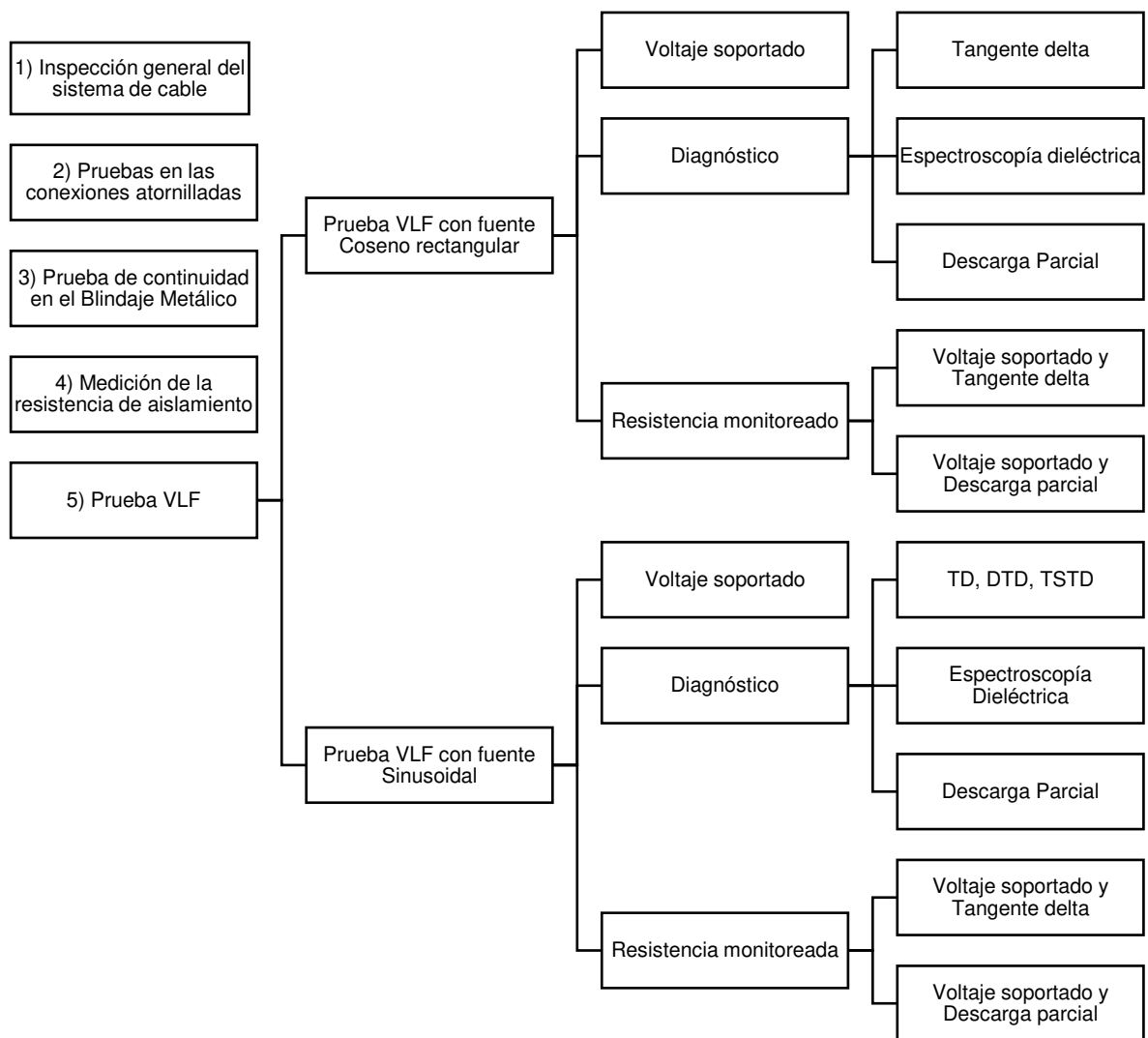


Figura 4.31. Ensayos eléctricos en campo con fuente VLF aplicados en cables de medio voltaje [Elaboración Propia].

Las pruebas de resistencia VLF se pueden realizar con cualquiera de las fuentes de voltaje (coseno rectangular o sinusoidal). Las mediciones de diagnóstico tangente delta generalmente se obtienen de forma directa cuando la prueba se lleva a cabo con fuente sinusoidal. Si el cable es excitado con señal coseno rectangular, los valores pueden ser obtenidos a través de la aproximación de Hamon descrita en la ecuación (2.6).

Las mediciones de descarga parcial efectuadas con fuente coseno rectangular son comparables con los valores de fábrica en los cables extruidos siempre que las condiciones de prueba se asemejen. Los resultados de prueba obtenidos con señal sinusoidal, no se correlacionan con las mediciones de calidad del cable.

Los lineamientos recomendados por el estándar IEEE 1234 para localizar fallas en el cable es otro procedimiento que se necesita conocer en los ensayos. En el diagrama de bloques de la Figura 4.32 se muestra el proceso recomendado por la normativa.

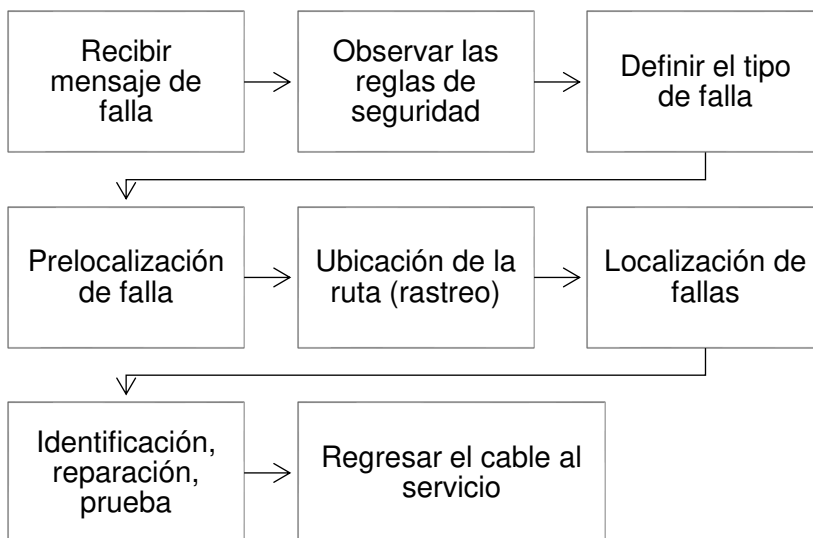


Figura 4.32. Localización de fallas para cables de potencia blindados [14].

4.4. RECOMENDACIÓN DE ESTÁNDARES

A continuación, se enlista los estándares utilizados en la estructuración de la guía técnica con el fin de facilitar la investigación en caso de que el Instituto Ecuatoriano de Normalización considere crear una norma nacional que reglamente los ensayos en campo y recomiende el uso de fuentes VLF para pruebas de aislamiento en cables concéntricos de medio voltaje.

Tabla 4.27. Normas utilizadas en la guía técnica [Elaboración Propia].

Prueba	Norma	Sección
Chaqueta	IEC 60229:2007	5
Resistencia de las conexiones eléctricas atornilladas.	ANSI/NETA ATS-2009	7.3.3
	ANSI/NETA MTS-2011	7.3.3
Continuidad y grado de corrosión del blindaje metálico	IEEE Std 1234 TM -2019	7.2.3
	IEEE Std 1617 TM -2007	7
Medición de la resistencia de aislamiento	ANSI/NETA ATS-2009	7.3.3
	ANSI/NETA MTS-2011	7.3.3
Rigidez dieléctrica VLF	IEEE Std 400.2 TM -2013	5.1, 5.2, 5.3
Factor de pérdida VLF	IEEE Std 400.2 TM -2013	5.4, 5.6

Prueba	Norma	Sección
	IEEE Std 400™-2012	6.2
Descargas parciales VLF	IEEE Std 400.2™-2013	5.5
	IEEE Std 400.3™-2006	4, 5, 6, 7, 8
	IEC 60270:2000	4, 5, 8
Localización de fallas	IEEE Std 1234™-2019	6.1, 7

El tema principal de este escrito son los ensayos VLF aplicados a los cables aislados de medio voltaje. Por tal razón, se recomienda empezar con la revisión de la norma IEEE 400.2 para comprender la importancia de las pruebas y de los estándares referenciados en la Tabla 4.27.

Las normas de la Tabla 4.27 corresponden a las últimas publicaciones existentes a excepción de los estándares ANSI/NETA ATS y ANSI/NETA MTS cuyas versiones fueron revisadas por disposición de la norma IEEE 400.2.

Todos los estándares descritos en la Tabla 4.27 contienen los lineamientos básicos de seguridad que el personal técnico necesita conocer al probar cables aislados de potencia. En la sección 2.8 se enlista otras normas exclusivas de seguridad que requieren revisión según los lineamientos de la IEEE 400.2.

Existen documentos útiles referenciados en la norma IEEE 400.2 para la aplicabilidad de las pruebas, por ejemplo, el paper de “La aproximación de Hamon para deducir el factor de pérdida dieléctrica a partir de corriente continua” es aplicable en ensayos realizados con fuente de onda coseno rectangular. Por lo contrario, las normas descritas a continuación no repercuten en el tema de estudio.

IEC 61230: Las reglamentaciones de esta norma están direccionadas a la construcción y a las pruebas de calidad efectuadas sobre el equipamiento de puestas a tierra y de cortocircuito. El estándar IEEE 400.2 básicamente hace referencia a la norma IEC 61230 para recomendar la utilización de abrazaderas y conjuntos de conexión a tierra construidas y probadas según esta normativa.

IEC 60885-3: Este estándar proporciona las directrices para los ensayos de descarga parcial únicamente cuando las pruebas se realizan en laboratorio. Un ensayo en campo no siempre se correlaciona con los resultados de las pruebas de laboratorio o de fábrica. Factores como la longitud, la estructura del sistema de cable, el equipo de medición, etc., influyen en cada tipo de prueba. Por tanto, la revisión de esta norma no da un aporte válido para las pruebas de descarga parcial realizadas en campo.

IEEE 433: Esta norma muestra los lineamientos para llevar a cabo las pruebas de aislamiento en máquinas rotativas de corriente alterna a través de la aplicación de señales VLF. El objeto de estudio del presente trabajo es exclusivamente los cables de potencia, por lo cual, no es necesario la revisión de esta directriz.

4.5. RECOMENDACIÓN DE EQUIPOS

Los equipos recomendados en este apartado son una de las varias opciones que hay en el mercado para llevar a cabo los ensayos descritos en la guía técnica del Anexo A.

4.5.1. SISTEMA DE LOCALIZACIÓN DE DESCARGAS PARCIALES

El módulo PDS 62 SIN es un acoplador exclusivo para funcionar con la fuente VLF Sinus 62. Este equipo cumple con el ancho de banda especificado en la norma IEEE 400.3 para realizar los ensayos en campo (revise el numeral 4.4 de la guía técnica).



Figura 4.33. Unidad de acoplamiento de descargas parciales PDS 62 SIN [34].

La unidad de acoplamiento de la Figura 4.33 incluye componentes externos para mejorar la sensibilidad como el filtro enchufable de alta frecuencia útil para reducir el ruido proveniente de la fuente de alto voltaje. También, provee un dispositivo generador de pulsos de bajo voltaje diseñado conforme se estipula en la norma IEC 60270 el cual es indispensable para calibrar el circuito de prueba [34].

La Tabla 4.28 muestra la descripción de la unidad de acoplamiento y de los componentes externos fundamentales para llevar a cabo el ensayo.

Tabla 4.28. Descripción de la unidad de acoplamiento PDS 62 SIN [34].

Artículo	Descripción
Unidad de acoplamiento de descargas parciales PDS 62-SIN	Voltaje máximo: 62 kV _{PICO}
	Frecuencia: Desde 0.01 Hz hasta 0.1 Hz

Artículo	Descripción
	Sensibilidad: 2pC hasta 200 nC
	Frecuencia de repetición de impulsos de DP para analizar la carga (N): 100 kHz
	Análisis de carga: Según IEC 60270
	Ancho de banda: 3 / 20 MHz (conmutable)
	Rango de medición: 0 a 16 km o $v/2=80$ m/ μ s
	Longitud mínima de cable: 75 m
Filtro	Filtro de alta frecuencia enchufable
Calibrador de descarga parcial	Conforme a la norma IEC 60270
	Rango de PD: 100 pC a 100 nC
	Alimentación: 9 V

La Figura 4.34 muestra la conexión de los componentes descritos en la Tabla 4.28 y la estructura interna de la unidad de acoplamiento en conformidad al estándar IEC 60270.

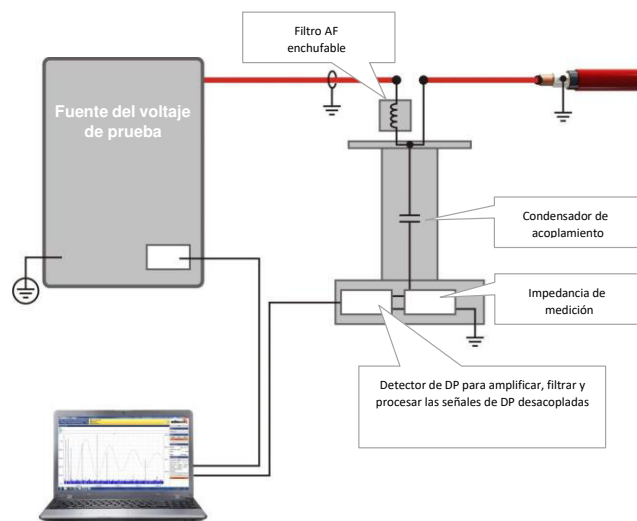


Figura 4.34. Unidad de acoplamiento PDS 62-SIN con los componentes internos y externos [34].

4.5.2. REFLECTÓMETRO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO (TRD)

El TRD de la Figura 4.35 es un reflectómetro de alcance máximo de 5 km según el factor de velocidad seleccionado y el tipo de cable. Dispone de cuatro impedancias de salida (25, 50, 75 y 100 Ω) y un factor de velocidad comprendida en un rango de 0.2 y 0.99 [35].



Figura 4.35. Reflectómetro en el dominio del tiempo TDR1000/3P [35].

4.5.3. SISTEMA DE LOCALIZACION DE FALLAS (THUMPER)

El equipo de la Figura 4.36 es un módulo localizador de fallas de reflexión de arco con voltaje variable de 4 a 12 kV. El EZ-THUMP V2 incorpora un TDR con un alcance de 7.6 km y ofrece una energía de 500 J lo cual lo vuelve ideal para localizar fallas en cables aislados de medio voltaje [36].



Figura 4.36. EZ-THUMP V2 [36].

4.5.4. INSTRUMENTACIÓN PARA DETECTAR Y LOCALIZAR CORROSIÓN EN EL BLINDAJE METÁLICO

La Figura 4.37 muestra un ejemplo de la instrumentación necesaria para detectar corrosión en el blindaje metálico a través del método de la medición de la resistencia del neutro.

Transformador de corriente Cable sensor de voltaje



Figura 4.37. Ejemplo de la instrumentación necesaria para medir la resistencia del neutro [37], [38].

La Figura 4.38 muestra un ejemplo del equipo necesario para conocer la ruta del cable.

Generador de señales Receptor sintonizado



Figura 4.38. Equipos para conocer la trayectoria del cable [39], [40].

La Figura 4.39 muestra un ejemplo del equipamiento necesario para conocer el grado de corrosión en el blindaje metálico mediante el método de la medición del voltaje superficial.

Sonda de alta frecuencia Multímetro de frecuencia selectiva



Figura 4.39. Instrumentación para medir el voltaje entre dos puntos del neutro [41], [42].

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

En esta sección se muestra un análisis general de los resultados alcanzados en la realización del presente proyecto.

- Las normas descritas en la sección 2.8 proporcionan los requerimientos para probar cables de medio voltaje en campo. La guía técnica presentada en el Anexo A muestra la unificación sintetizada de dichos estándares a fin de orientar, aclarar y corregir la metodología de pruebas que se practica actualmente en la empresa eléctrica distribuidora.
- Los equipos recomendados en la sección 4.5 tienen por fin brindar una idea del equipamiento real existente en el mercado frente a los descritos en la normativa. Los instrumentos fueron seleccionados considerando los requerimientos de los estándares internacionales y en base a las características técnicas de los cables aislados empleados en las redes de distribución de la EEQ.
- Los cables mayormente utilizados en las redes de medio voltaje (XLPE) están sometidos a diagnósticos de descarga parcial en fábrica. La evaluación se realiza empleando fuentes de alto voltaje de frecuencia industrial (50 Hz o 60 Hz). Un diagnóstico de descarga parcial en campo a estas frecuencias evaluaría la calidad del cable si los valores medidos son comparados con los proporcionados por el fabricante. En medio voltaje, probar los cables blindados de alimentación a frecuencia industrial repercutiría en la adquisición de equipos robustos de gran peso, tamaño y costo. Las mediciones de descarga parcial en VLF se pueden correlacionar con los de frecuencia de potencia solo si el diagnóstico se lleva a cabo con fuente coseno rectangular y siempre que las condiciones del cable se asemejen al escenario de fábrica o laboratorio.
- Estándares como la IEEE 400 y la IEEE 400.2, no cuentan con valores referenciales que permitan discriminar la aceptación o el rechazo del sistema del cable en función de las mediciones de descarga parcial VLF. Normas tales como la IEC 60885 e IEC 60270 son guías aplicables para diagnósticos de descarga parcial realizadas en laboratorio o fábrica, es decir, para ensayos realizados con fuente de frecuencia industrial. El estándar IEEE 400.3 provee valores referenciales para ciertos tipos de defectos cuando la prueba se lleva a cabo con fuente sinusoidal VLF, no obstante, dichas referencias no son definitivas y podrían cambiar en las próximas actualizaciones de la norma.

- La Empresa Eléctrica Quito ejerce las pruebas VLF según los lineamientos establecidos en el estándar IEEE. De acuerdo con las observaciones descritas en la sección 4.2, varias disposiciones y sugerencia de la normativa son omitidas al momento de efectuar los ensayos. Estas omisiones repercuten en la eficacia y eficiencia de los ensayos. Por ejemplo, no conocer el nivel de corrosión en el blindaje metálico podría alterar las mediciones tangente delta lo cual significa que la prueba será poco eficaz, o no evaluar la condición general del sistema antes de efectuar un ensayo de resistencia podría incrementar el tiempo empleado en las pruebas haciéndolo poco eficiente.
- La localización de fallas con Thumper y el diagnóstico de descargas parciales emplean técnicas de alto voltaje en combinación con el principio de la reflectometría en el dominio del tiempo, pero con propósitos distintos. La prueba de descarga parcial es útil para detectar y localizar defectos del tipo vacío (huecos), árboles eléctricos, sitios de tracking y lugares del aislamiento que no fallan durante una prueba de resistencia. El uso de altos voltajes de descarga capacitiva sirve para dar con los sitios fallados del sistema. Ambos procedimientos son sugeridos por las normas IEEE, por ello, en la guía técnica del Anexo A se incluyen los requerimientos y recomendaciones para los dos tipos de prueba.
- El campo de estudio de este escrito engloba a las pruebas y al diagnóstico de cables aislados de medio voltaje a través de la aplicación de señales en VLF. Existen otras fuentes de excitación adecuadas y recomendadas para evaluar estos componentes eléctricos como son: la onda de corriente amortiguada (DAC), la cual genera señales semejantes a las ocurridas a frecuencia industrial y el alto voltaje continuo (HVDC), el cual es recomendado para evaluar el aislamiento de cables laminados. Dichas pruebas están fuera del alcance del presente trabajo, no obstante, no se descarta el uso como sustitución de los ensayos VLF siempre que los métodos se apliquen según los requerimientos de los estándares adecuados.
- La norma de cables blindados de medio voltaje disponible en el INEN es una adaptación de la versión desactualizada del estándar IEC 60502, la cual provee los requerimientos de construcción y recomienda la aplicación de alto voltaje continuo (HVDC) para ensayos de campo. Esta regulación nacional no especifica el daño que se puede causar a los cables extruidos por el uso de alto potencial directo, ni provee un procedimiento de pruebas de campo. El instituto ecuatoriano de normalización necesita al menos actualizar la versión del estándar IEC 60502 en la cual se recomienda el uso de señales AC VLF o requiere implementar una

norma local que incluya un procedimiento para pruebas de campo similar al expuesto en este trabajo escrito.

- La vida útil del cable depende del estado en que se encuentre el aislamiento, por ello, existen diferentes técnicas para evaluar o probar el dieléctrico de los cables de energía. Las pruebas de diagnóstico tangente delta son útiles para valorar el grado global de envejecimiento o contaminación del sistema de cable, mientras que, las pruebas de resistencia sirven para fallar los defectos severos que comprometen el aislamiento. La norma IEEE 400.2 es la fuente de referencia que mayor aporte brinda a la aplicación y desarrollo de los ensayos en VLF. A diferencia de otros estándares, esta norma incorpora una amplia investigación de pruebas de diagnóstico, no solo para llevar a cabo los ensayos, sino también para orientar en la estructuración de valores referenciales propios a partir de las mediciones acumuladas a lo largo del tiempo.
- Todos los estándares revisados estipulan requerimientos y recomendaciones de seguridad que deben conocerse y aplicarse antes, durante y después de las pruebas de alto voltaje. Las disposiciones y sugerencias planteadas deben cumplirse a cabalidad por el peligro inminente de probar componentes eléctricos de grandes longitudes entrelazados entre sí.

5.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda revisar las actualizaciones que puedan presentar las normas IEEE 400.2 e IEEE 400.3. En las versiones actuales (2013 y 2006 respectivamente), valores referenciales como la tangente delta para sistemas de cable nuevos y los parámetros de descarga parcial no están definidos.
- Se recomienda revisar el estándar IEEE 400.1 para pruebas de alto voltaje continuo (HVDC) y la norma IEEE 400.4 para ensayos con onda de corriente alterna amortiguada (DAC) a fin de conocer las ventajas, desventajas y aplicaciones sobre los cables de medio voltaje e implementar una guía metodológica que abarque todas las técnicas de prueba que las normas ofrecen.
- Una vez que se disponga de un número adecuado de mediciones, se recomienda estructurar valores referenciales de diagnóstico tangente delta de los sistemas de cable nuevos tomando en cuenta los pasos detallados en el ANEXO H de la norma IEEE 400.2.
- A diferencia de otros métodos como la tangente delta o la prueba de resistencia, el ensayo de descarga parcial es una técnica de diagnóstico útil para dar con la

ubicación de los defectos del sistema. Los beneficios hacen que no se descarte la implementación del equipo necesario para realizar estas pruebas en un futuro. Una vez que se disponga del equipamiento, se recomienda llevar una base de datos de las mediciones de los parámetros de descarga parcial para crear valores referenciales propios que orienten en la discriminación de las siguientes pruebas. Las normas actuales, no especifican cifras de mérito concretas para evaluar las mediciones de prueba.

- Se recomienda extender el estudio a otros sistemas, máquinas o elementos de la red, por ejemplo, la norma IEEE 433 provee los lineamientos para probar el aislamiento de las máquinas rotativas de corriente alterna con VLF. También se podría incluir los requerimientos de prueba de los cables blindados de transmisión (cables aislados de alto voltaje).

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] "IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above," *IEEE Std 400™-2012*, 2012.
- [2] "IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF) (Less than 1 Hz)," *IEEE Std 400.2™-2013*, 2013.
- [3] CENTELSA, "Cables de Energía y de Telecomunicaciones S.A.," [En línea]. Available: <https://www.centelsa.com/archivos/8e6cebf3.pdf>. [Último acceso: 10 diciembre 2020].
- [4] CONELSA, "Catálogos de productos de media tensión," [En línea]. Available: <https://www.conelsa.com.ec/index.php/productos.html>. [Último acceso: 18 septiembre 2021].
- [5] ARCERNNR, "Resolución Nro. 017," *Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables*, 2020.
- [6] F. Wester, *CONDITION ASSESSMENT OF POWER CABLES USING PARTIAL DISCHARGE DIAGNOSIS AT DAMPED AC VOLTAGES*, Rotterdam, The Netherlands: Optima Grafische Communicatie, 2004.
- [7] Megger, "Prueba y Diagnósticos en Cables de Medio Voltaje," Megger, 15 julio 2021. [En línea]. Available: <https://attendee.gotowebinar.com/recording/3813421201801181710>. [Último acceso: 03 agosto 2021].
- [8] W. H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*, Las Cruces, New Mexico: CRC Press Taylor & Francis Group, 2011.
- [9] "Standard for Maintenance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems," *ANSI/NETA MTS-2011*, 2011.
- [10] "Standard for Acceptance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems," *ANSI/NETA ATS-2009*, 2009.
- [11] "IEEE Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment," *IEEE Std 400.3™-2006*, 2006.
- [12] National Electric Energy Testing, Research and Applications Center, *Time Domain Reflectometry (TDR)*, Georgia, 2016.
- [13] Georgia Tech Research Corporation and NEETRAC, "Medium Voltage Cable System Partial Discharge," Georgia, 2016.
- [14] "IEEE Guide for Fault-Locating Techniques on Shielded Power Cable Systems," *IEEE Std 1234™*, 2019.
- [15] "IEEE Recommended Practices for Safety in High-Voltage and High-Power Testing,"

IEEE Std 510-1983, 1983.

- [16] “National Electrical Safety Code,” *IEEE*, 2007.
- [17] “Standard for Electrical Safety in the Workplace,” *NFPA® 70E*, 2012.
- [18] “HIGH-VOLTAGE TEST TECHNIQUES - PARTIAL DISCHARGE MEASUREMENTS,” *IEC 60270*, 2000.
- [19] “IEEE Guide for Detection, Mitigation, and Control of Concentric Neutral Corrosion in Medium-Voltage Underground Cables,” *IEEE Std 1617™-2007*, 2007.
- [20] “Electric cables - Tests on extruded oversheaths with a special protective function,” *IEC 60229*, 2007.
- [21] “Power cables - Distribution cables with extruded insulation for rated voltages from 3.6/6 (7.2) kV up to and including 20.8/36 (42) kV,” *DIN VDE 0276-620*, 2010.
- [22] “Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ($U_m = 1.2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV) - Part 2: Cables for rated voltages from 6 kV ($U_m = 7.2$ kV) up to 30 kV ($U_m = 36$ kV),” *IEC 60502-2:2014*, 2014.
- [23] “IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems,” *IEEE Std 400™-2001*, 2001.
- [24] V. Hamon, “An Approximate Method for Deducing Dielectric Loss Factor from Direct-Current Measurements,” *Proc. IEE (London)*, vol. 99 (Monograph No. 27), p. 151–155, 1952.
- [25] H. S. H. S. a. H. P. D. Goetz, “Dielectric loss measurement of power cables using Hamon Approximation,” *Conference Proceedings of CMD2010*, 2010.
- [26] Georgia Tech Research Corporation, Diagnostic Testing of Underground Cable Systems (Cable Diagnostic Focused Initiative), 2010.
- [27] MEGGER, “VLF Seno 62 kV,” [En línea]. Available: <https://csa.megger.com/products/prueba-de-aislamiento/prueba-de-aislamiento-vlf/vlf-sine-wave-62-kv>. [Último acceso: 07 julio 2021].
- [28] G. E. Hertig, junio 2016. [En línea]. Available: https://www.editores-srl.com.ar/revistas/ie/310/hertig_onda_coseno_rectangular. [Último acceso: 01 septiembre 2021].
- [29] C. M. Marco Sosa, “Normas Para Sistemas de Distribución - Parte A Guía de Diseño de Redes de Distribución,” Quito: Empresa Eléctrica Quito, 2014.
- [30] Empresa Eléctrica Quito, “Geoportal EEQ ArcGIS,” [En línea]. Available: <https://geoportal.eeq.com.ec/webgis/>. [Último acceso: 12 diciembre 2021].
- [31] MEGGER, “Medidor de Resistencia De Aislamiento Hasta 10 kV (MIT1025),” [En línea]. Available: <https://csa.megger.com/medidor-de-resistencia-de-aislamiento-hasta-10-kv-mit1025-1>. [Último acceso: 07 Julio 2021].

- [32] AEMC, "Probador de resistencia de tierra modelo 4630," [En línea]. Available: <https://www.aemc.com/products/ground-testers/ground-tester-4630>. [Último acceso: 04 Agosto 2021].
- [33] Megger, "Prueba de cables de media tensión," 02 julio 2020. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=kwL0O-cUaWk>. [Último acceso: 12 diciembre 2021].
- [34] Megger, "PDS 62-SIN SISTEMA PORTÁTIL DE DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE DP," [En línea]. Available: <https://es.megger.com/portable-pd-detection-and-localisation-system-pds-62-sin-21>. [Último acceso: 20 diciembre 2021].
- [35] Megger, "TDR1000/3P - REFLECTÓMETRO DEL DOMINIO DEL TIEMPO O ECÓMETRO," [En línea]. Available: <https://es.megger.com/reflectometro-del-dominio-del-tiempo-o-ecometro-tdr1000/3p>. [Último acceso: 20 diciembre 2021].
- [36] Megger, "EZ-THUMP 12 kV, model V2," [En línea]. Available: <https://es.megger.com/portable-cable-fault-locator-ez-thump-v2-7>. [Último acceso: 20 diciembre 2021].
- [37] Phoenix Contact, "MOUSER ELECTRONICS 50 Hz/60 Hz Transformadores de corriente," [En línea]. Available: <https://www.mouser.ec/c/power/transformers/current-transformers/?frequency%20range=50%20Hz%2F60%20Hz>. [Último acceso: 23 febrero 2022].
- [38] LINCOLN ELECTRIC, "CABLE SENSOR DE VOLTAJE HEAVY DUTY - 30.5 M," [En línea]. Available: [https://www.lincolnelectric.com/es-es/equipment/accessories/Pages/product.aspx?product=K1811-100\(LincolnElectric\)](https://www.lincolnelectric.com/es-es/equipment/accessories/Pages/product.aspx?product=K1811-100(LincolnElectric)). [Último acceso: 20 diciembre 2021].
- [39] Megger, "Ferrolux FLG12 AUDIO FREQUENCY GENERATOR," [En línea]. Available: <https://es.megger.com/audio-frequency-generator-ferrolux-flg12-4>. [Último acceso: 20 diciembre 2021].
- [40] Megger, "Ferrolux Rx RECEPTOR FRECUENCIA DE AUDIO," [En línea]. Available: <https://es.megger.com/products/ensayo-diagnostico-localizacion-cables-averias/equipos-localizacion-de-cables-y-averias/identificacion-trazado-cables/ferrolux-rx>. [Último acceso: 20 diciembre 2021].
- [41] FLUKE, "Sonda de alta frecuencia Fluke 85RF," [En línea]. Available: <https://www.fluke.com/es-ec/producto/accesorios/sondas/fluke-85rf>. [Último acceso: 23 febrero 2022].
- [42] FLUKE, "Multímetro digital Fluke 175 de valor eficaz verdadero," [En línea]. Available: <https://www.fluke.com/es-ec/producto/comprobacion-electrica/multimetros-digitales/fluke-175>. [Último acceso: 23 febrero 2022].
- [43] ELECTRICAL ENGINEERING PORTAL, "Measurement of residual currents on a distribution feeder," [En línea]. Available: <https://electrical-engineering-portal.com/measurement-of-residual-currents-on-a-distribution-feeder?fbclid=IwAR3pVi03yN7n4q1EucwR4ugTIRCMZLIRtRfRYC0lxq7TG4N1ETNH>

HDXr6S7I. [Último acceso: 23 Febrero 2022].

- [44] "Prueba y Diagnóstico en cables de Medio Voltaje," Megger, 20 Julio 2021. [En línea]. Available: <https://attendee.gotowebinar.com/recording/757372612973494023>. [Último acceso: 30 septiembre 2021].
- [45] "IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery," *IEEE Std 43*, 2000.

7. ANEXOS

ANEXO A. GUÍA TÉCNICA

En este anexo se muestra la metodología estructurada con los estándares internacionales para evaluar en campo la condición de aislamiento de los cables y sistemas de cable de medio voltaje a través de la aplicación de señales de muy baja frecuencia “Very Low Frequency” (VLF).

1. PRUEBAS DE CAMPO PARA CABLES BLINDADOS DE MEDIO VOLTAJE

A. Objetivo

Proporcionar una metodología para efectuar los ensayos de campo sobre los cables y sistemas de cable de medio voltaje según los estándares internacionales.

B. Normativa

El procedimiento de pruebas está estructurado en base a los requerimientos de los estándares descritos en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1. Normas utilizadas en la estructuración de la metodología [Elaboración Propia].

Norma	Sección
IEEE Std 400.2™-2013	4.1, 4.2
ANSI/NETA ATS-2009	7.3.3
ANSI/NETA MTS-2011	7.3.3
IEEE Std 400™-2012	5.4, 5.5, 5.6
IEEE Std 1234™-2019	5.2, 5.3
ANSI/IEEE C2-2007	441 literal C
NFPA 70E-2012	Artículo 130

C. Procedimiento

Considere el siguiente programa para evaluar en campo los cables y sistemas de cable de alimentación apantallados.

- 1) Identifique los objetivos de prueba [1]. Seleccione el método de prueba considerando la antigüedad y el estado del sistema de cable [2]. La Tabla 7.2 proporciona una guía para justificar un ensayo de campo.

Tabla 7.2. Justificación para optar por una prueba de campo [1].

Prueba	Justificación
Instalación	La prueba se justifica de experiencias pasadas como la necesidad de

Prueba	Justificación												
	<p>verificar la calidad de la instalación o detectar daños durante el envío o almacenamiento del cable o verificar la confiabilidad y los resultados de las pruebas de fábrica.</p>												
<p>Aceptación</p>	<p>El ensayo se justifica de experiencias pasadas como la necesidad de verificar la calidad de la mano de obra o la confiabilidad y los resultados de las pruebas de fábrica de los subcomponentes del sistema (cables, empalmes y terminaciones).</p>												
<p>Mantenimiento</p>	<p>La prueba se justifica bajo las siguientes consideraciones.</p> <p>Composición del sistema de cable: Considere los registros de falla de los subcomponentes cuando están en servicio y durante las pruebas de campo.</p> <p>Importancia del sistema: Considere la importancia del sistema de cable dentro de la red. Por motivos de confiabilidad, hay sistemas de cable que pueden someterse a pruebas a pesar de tener los índices de calidad bajos, tales como la Frecuencia Media de Interrupción por kVA nominal instalado (FMIK) y el Tiempo Total de Interrupción por kVA nominal instalado (TTIK).</p> <p>La regulación Nro. ARCERNNR-017/20 establece los valores límites de los índices de calidad del servicio técnico para alimentadores de medio voltaje descritos en la Tabla 7.3.</p> <p style="text-align: center;">Tabla 7.3. Índices de calidad del servicio técnico [5].</p> <table border="1" data-bbox="639 1391 1230 1630"> <thead> <tr> <th data-bbox="647 1391 1002 1449">Alimentador</th> <th data-bbox="1002 1391 1118 1449">FMIK</th> <th data-bbox="1118 1391 1230 1449">TTIK</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td data-bbox="647 1449 1002 1507">Alta densidad (TA ≥ 50)</td> <td data-bbox="1002 1449 1118 1507">7.0</td> <td data-bbox="1118 1449 1230 1507">10.0</td> </tr> <tr> <td data-bbox="647 1507 1002 1568">Baja densidad (TA < 50)</td> <td data-bbox="1002 1507 1118 1568">9.5</td> <td data-bbox="1118 1507 1230 1568">16.0</td> </tr> <tr> <td colspan="3" data-bbox="647 1568 1230 1630" style="text-align: center;">TA: Tipo de alimentador.</td> </tr> </tbody> </table> <p>Historial de fallas: Considere aquellos sistemas de cable que han presentado un aumento significativo de fallas en los cables, juntas o terminaciones durante un período determinado (generalmente años). Las empresas distribuidoras nacionales están en la obligación de emitir informes mensuales y anuales de los índices de calidad a la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR) [5]. Por tanto, la prueba puede justificarse en función del incremento mensual o anual de los índices.</p>	Alimentador	FMIK	TTIK	Alta densidad (TA ≥ 50)	7.0	10.0	Baja densidad (TA < 50)	9.5	16.0	TA: Tipo de alimentador.		
Alimentador	FMIK	TTIK											
Alta densidad (TA ≥ 50)	7.0	10.0											
Baja densidad (TA < 50)	9.5	16.0											
TA: Tipo de alimentador.													

Prueba	Justificación
	Registros: Si dispone, analice los registros de pruebas anteriores y de instalación históricos.

- 2) Observe las prácticas de seguridad del numeral 2.
- 3) Determine los espacios libres seguros considerando el voltaje de prueba y el voltaje de los equipos energizados cercanos [2]. La Tabla 7.4 y Tabla 7.5 muestran las distancias mínimas de acercamiento en presencia de voltaje alterno y continuo respectivamente.

Tabla 7.4. Distancia de aproximación mínima de trabajo en vivo de corriente alterna [16].

Voltaje fase-fase [kV]	Distancia segura			
	Fase a tierra		Fase a fase	
	(m)	(ft)-(in)	(m)	(ft)-(in)
0.751 a 15	0.65	2-2	0.67	2-3
15.1 a 36.0	0.77	2-7	0.86	2-10
36.1 a 46.0	0.84	2-9	0.96	3-2
46.1 a 72.5	1.00	3-3	1.20	3-11

Tabla 7.5. Límites de aproximación a conductores eléctricos o partes de circuitos energizados para protección contra golpes para sistemas de Vdc [17].

Voltaje DC [kV]	Distancia segura	
	(m)	(ft)-(in)
1.1 a 5	0.5	1-5
5 a 15	0.7	2-2
15.1 a 45	0.8	2-9
45 a 75	1.00	3-2

En presencia de personas no calificadas mantenga un espacio libre de 3.05 m (10 pies) para todos los voltajes (AC o DC) hasta 50 kV, más 102 mm (4.0 pulgadas) por cada 1 kV por encima de dicho valor [17].

- 4) Despeje y acordone los extremos local y remoto del sistema de prueba para indicar que se está realizando un ensayo de alto voltaje [2]. Mantenga las comunicaciones con el personal en el extremo remoto en todo momento [14].
- 5) Desenergice y desconecte los extremos de los sistemas de cable que van a someterse a ensayo [2].
- 6) Conecte a tierra todas las partes conductoras expuestas del sistema de prueba tales como: el conductor y la pantalla metálica del cable bajo prueba; los cables desenergizados que no formen parte del ensayo; el chasis del vehículo en caso de que el generador de alto voltaje esté contenido en un remolque o camioneta; los paneles de instrumentos y otras partes conductoras accesibles al personal (ver Figura 7.1) [2], [9], [10], [15].

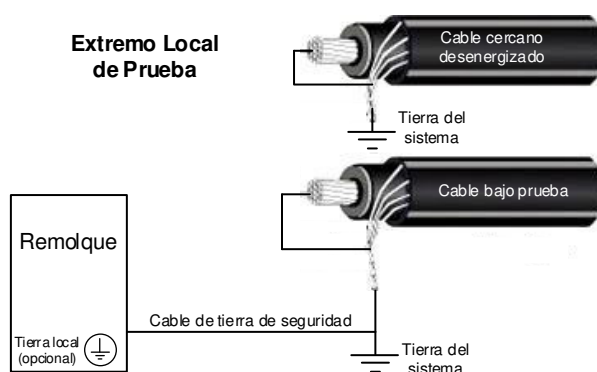


Figura 7.1. Puesta a tierra de las partes conductoras expuestas del sistema de prueba [2], [14].

Nota: Un cable está desenergizado y aterrizado solo si el conductor y el blindaje metálico están conectados a la tierra del sistema en el sitio de prueba y si es posible en el extremo más alejado del cable. Solo si se cumple con la conexión de la Figura 7.1, conecte los terminales de alto voltaje de la fuente al cable bajo prueba [14].

- 7) Si es posible, desconecte todos los equipos de los terminales del cable tales como pararrayos, transformadores, interruptores y motores, de lo contrario, asegúrese que sean capaces de resistir de manera segura el voltaje de prueba durante el ensayo, además, considere el efecto sobre los resultados de prueba [1], [2]. Revise las recomendaciones de aislamiento descritas en la Tabla 7.6.

Tabla 7.6. Recomendaciones de aislamiento en los extremos del cable [1], [2].

Tipo de aislante	Recomendación
Interruptor	Verifique con el fabricante la capacidad del dispositivo para mantener el aislamiento cuando

Tipo de aislante	Recomendación
	en un extremo se tiene el voltaje de prueba y en el otro extremo se tiene el voltaje de línea. Compruebe que la conmutación y el bloqueo del interruptor sea adecuado.
Entrehierro (Sin conexión en los terminales)	Revise que la distancia de separación sea suficiente para mantener el aislamiento.

8) Obtenga la información preliminar descrita en la Tabla 7.7 [1].

Tabla 7.7. Información preliminar del cable o sistema de cable bajo prueba [1], [2], [11].

Información	Descripción
Nombre del fabricante	Marca del cable
Año de puesta en servicio	DD/MM/AAAA
Identificación	Nombre de la subestación, número de interruptores limitantes.
Clase de voltaje	Voltaje nominal del cable
Voltaje de funcionamiento	Voltaje Fase-neutro
Tipo de aislamiento	Si es mixto, especifique
Tipo y tamaño del conductor	Si está mezclado, especifique
Ubicación de los puntos abiertos	Lugares donde el cable o las juntas son accesibles.
Capacitancia del cable	Mida la capacitancia o calcule con la ecuación (2.1) si el cable está blindado con cinta o mediante la ecuación (2.2) si el apantallamiento es de hilos de cobre. Asegúrese que la capacitancia del objeto de prueba sea menor o al menos igual a la capacidad de la fuente de voltaje.
Tipo de construcción	Enterrado directo o en ductos, con o sin chaqueta, lugar húmedo, seco o ambos.
Tipo de empalmes	Si es posible
Tipo de terminación y accesibilidad	En un poste, en SF6, en un gabinete de conmutación de frente vivo o frente muerto, sin

Información	Descripción
	conexión, premoldeado, termocontraíble, etc.
Tipo de sistema	Monofásico o trifásico
Tipo y condición del neutro	Cables concéntricos, cintas de metal o correa plana, tamaño: completo o un tercio, fase apantallada individualmente o hay un solo escudo sobre las tres fases.
Enrutamiento del cable	Especialmente con circuitos ramificados.
Condiciones de operación	Incidencia de sobrevoltajes Condiciones de carga y temperatura Comportamiento de la falla anterior

Nota: Si el sistema de cable está compuesto por secciones de diferentes tipos de cable, proporcione la información detallada de cada tramo con las ubicaciones en las que se une los diferentes tipos de cable [11].

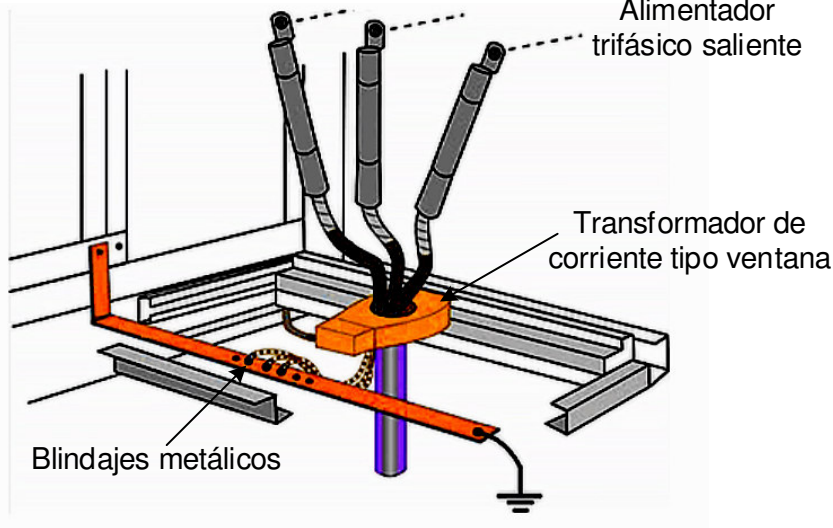
- 9) Seleccione y aplique las pruebas de campo adecuadas [1]. Inicie con la inspección visual y mecánica. Luego realice las pruebas eléctricas [9], [10]. Siga el orden descrito en las siguientes líneas.

Inspección visual y mecánica

Realice una inspección visual y mecánica como se describe en la Tabla 7.8.

Tabla 7.8. Inspección visual y mecánica [9], [10].

Pruebas de instalación o aceptación	Pruebas de mantenimiento
Compare los datos del cable con los gráficos y especificaciones. Inspeccione la cubierta y el estado del aislamiento de las secciones expuestas en busca de daños físicos (revise el numeral 5) para verificar el estado de la chaqueta mediante una prueba eléctrica).	Inspeccione las secciones expuestas, los empalmes y las terminaciones en busca de daños físicos y evidencia de sobrecalentamiento y corona.
Inspeccione la conexión a tierra del blindaje, los soportes de los cables y las terminaciones.	
Verifique que las curvas visibles del cable cumplan o superen ANSI/ICEA S-93-639 2006 (ver Anexo C) o el radio de curvatura mínimo permitido por el fabricante.	

Pruebas de instalación o aceptación	Pruebas de mantenimiento
Inspeccione la protección contra incendios en áreas comunes de cables.	
Si los cables terminan a través de transformadores de corriente tipo ventana, inspeccione para verificar que los conductores neutros y de tierra estén colocados y terminados correctamente para el funcionamiento de los dispositivos de protección (ver Figura 7.2).	
	
<p>Figura 7.2. Ejemplo de conexión de un transformador tipo ventana para medir la corriente residual de un alimentador trifásico saliente [43].</p>	

Pruebas eléctricas

- Verifique que las terminaciones estén limpias y en buen estado antes de comenzar la prueba [2].
- Con un óhmetro, mida las conexiones eléctricas atornilladas para detectar valores altos de resistencia [9], [10].

Procedimiento: Mida la resistencia de las conexiones atornilladas y compare con los valores de las conexiones similares. Investigue los valores que se desvíen en más del 50% del valor más bajo [9], [10].

- Realice una prueba de continuidad del blindaje metálico en cada cable de alimentación mediante el método del óhmetro (revise el numeral 7) [9], [10].

Nota: La corrosión del escudo metálico puede afectar las mediciones tangente delta y limitar la sensibilidad de las pruebas de descarga parcial debido a la atenuación de las señales de alta frecuencia. Si la corrosión es tan severa que no

hay continuidad, las pruebas no son válidas. Consulte el numeral 6 para determinar el alcance de la corrosión del escudo metálico [2].

- d) Mida individualmente la resistencia de aislamiento en cada cable como se indica en el numeral 3 [9], [10].
- e) Realice pruebas de aislamiento empleando técnicas en VLF [9], [10].

Nota: Inicie con las pruebas de diagnóstico para conocer la condición global del cable y brindar orientación en la duración de la prueba de resistencia [2].

Selección de los métodos de prueba

La Tabla 7.9 es una guía para conocer la utilidad y el rendimiento de cada técnica. Considere a (B) como Bueno, (A) Aceptable y (P) Pobre [2].

Tabla 7.9. Utilidad y rendimiento de los métodos de prueba VLF [2].

Condición del cable	Resistencia	MW	TD, DTD, TDTS y DS	PD
Cables con corrosión del blindaje metálico	A	A	A	P (Ver nota 1)
Amplia arborización de agua	A	B	B	P (Ver nota 2)
Pocos defectos grandes o pocos árboles eléctricos localizados.	B	A/B (Ver nota 3)	A/B (Ver nota 2)	A/B
Empalmes y terminaciones defectuosas	A/B (Ver nota 4)	A/B (Ver nota 3)	A (Ver nota 3)	A (Ver nota 2)
Aislamiento mixto (extruido y / o laminado)	B	B (Ver nota 4)	P/B (Ver nota 4)	B (Ver nota 5)
<p>NOTA 1: La cinta envejecida por corrosión y la longitud del cable son factores que disminuyen la sensibilidad de las pruebas de descarga parcial debido a la atenuación de las señales.</p> <p>NOTA 2: La prueba de descarga parcial es útil para detectar árboles eléctricos activos, sitios de tracking y huecos llenos de gas en el aislamiento del cable y accesorios. Tome</p>				

en cuenta que las condiciones de inicio de la descarga parcial en VLF es distinta a la de otras frecuencias.

NOTA 3: Considere pruebas complementarias para distinguir un defecto localizado grave del deterioro general.

NOTA 4: Esta técnica mide el promedio de todos los aislamientos bajo prueba, por tanto, considere pruebas complementarias para medir secciones individuales del aislamiento. Puede emplear técnicas TD, DTD, TDTS y DS o no VLF para diferenciar los aislamientos de cables mixtos. Si las secciones individuales no se pueden medir, el método de prueba puede no ser útil.

NOTA 5: Las diferentes características de propagación de los distintos cables (diferentes tamaños y/o aislamientos) pueden dificultar la localización de la descarga parcial.

Los numerales establecidos en la Tabla 7.10 guían al método VLF seleccionado.

Tabla 7.10. Métodos de prueba VLF [Elaboración Propia].

Prueba	Numeral
Resistencia al voltaje	4.1
Diagnóstico: Tangente delta (TDTS, DTD, DT)	4.2
Diagnóstico: Espectroscopía dieléctrica	4.3
Diagnóstico: Descarga parcial	4.4

- 10) Al finalizar los ensayos de alto voltaje, descargue el equipo de prueba y el sistema de cable probado. Emplee y controle el tiempo necesario para la descarga completa del cable [2].
- 11) Elimine todas las conexiones temporales, los puentes de cortocircuito y de puesta a tierra [2].
- 12) Registre la información y documentación de la Tabla 7.11 [1].

Tabla 7.11. Datos sugeridos en el informe [1].

Fecha, lugar y nombre de la persona que realiza la prueba.
Nombre, ubicación y longitud del sistema de cable.
Tipo, clasificación y fecha de tendido de cables y accesorios (juntas y terminaciones).
Voltaje de funcionamiento del sistema de cable.
Método de prueba, nivel de voltaje (pico y RMS), duración, frecuencia, etc.

Tipo y número de serie del equipo de prueba utilizado.
Resultados de la prueba: Pasa, No pasa o cualquier medición de la evaluación.
Voltaje de falla de prueba (voltaje instantáneo en el momento preciso donde ocurre la falla, no el rms o el voltaje de prueba máximo).
Tiempo de la prueba antes de que ocurriera la falla.
Componente del sistema de cable que falló durante la prueba, identificación y ubicación.

13) Realice las acciones correctivas en el sistema de cable [1].

2. PRÁCTICAS RECOMENDADAS DE SEGURIDAD EN CAMPO

El uso de procedimientos de seguridad es una práctica de rutina siempre que se realizan pruebas de alto voltaje [11]. Tenga presente los siguientes requerimientos y recomendaciones.

A. Objetivo

Proporcionar orientación para evitar los peligros que puedan surgir al realizar pruebas y mediciones de alto voltaje sobre objetos de gran capacitancia fuera del entorno controlado de un laboratorio [15].

B. Normativa

Los requisitos mínimos de seguridad descritos en esta sección se obtuvieron de los estándares descritos en la Tabla 7.12.

Tabla 7.12. Normas con lineamientos de seguridad [Elaboración Propia].

Norma	Sección
IEEE Std 400.2 TM -2013	4.1
IEEE Std 510-1983	1.0, 6.1, 6.2, 6.3, 6.4
IEEE Std 400.3 TM -2006	9.1, 9.2, 9.3 y 9.4
IEEE Std 400 TM -2012	5.5
IEEE Std 1234 TM -2019	5.1, 5.2, 5.3

C. Prácticas generales

Como mínimo debe haber una sola persona responsable de la realización de las pruebas y de la difusión de las instrucciones de seguridad al personal involucrado y otra persona debe encargarse de interrumpir la prueba en caso de eventos inesperados. Los ensayos deben realizarse y supervisarse por personal calificado con las guías de prueba apropiadas [15].

Acuerde antes del ensayo el uso del Equipo de Protección Personal (EPP) básico como cascos, anteojos de seguridad, zapatos de punta dura o ropa resistente al fuego o al arco [11].

Garantice la seguridad de todos los involucrados incluido el tráfico de vehículos y peatones [11]. El personal calificado no debe acercarse, ni debe permitir que otros se acerquen a ninguna parte expuesta sin conexión a tierra o normalmente energizada [16].

Tome precauciones para evitar el contacto accidental de terminales activas ya sea protegiendo o proporcionando barreras alrededor del área de prueba [15]. Recorte el área mediante el uso de cualquiera de los siguientes elementos:

- Una línea de seguridad flexible distintiva (por ejemplo, cuerdas de polipropileno amarillo y negro o cintas de tela naranja). Este método puede combinarse con el uso de conos y banderas de tráfico [15].
- Barreras de calle combinadas con cuerdas de seguridad, conos de tráfico, etc. [15].

Formule procedimientos para tratar las consecuencias de una posible falla durante cualquier prueba de alto voltaje [15]. Localice las fallas como se describe en el numeral 5 y asegúrese de contar con cuadrillas para instalar inmediatamente un nuevo cable, empalme o terminación [1], [2].

D. Puesta a Tierra

Los puentes de puesta a tierra o de cortocircuito deben conectarse a los terminales o conductores apropiados bajo el control del coordinador responsable de la prueba [15]. Considere energizados todos los terminales del sistema de prueba sin conexión a tierra [2].

Revise que la ruta y todas las conexiones a tierra sean lo más cortas posibles e identifíquelas con una marca o un código de color a menos que sea evidente [15].

Verifique que la capacidad de corriente de los cables a tierra exceda la necesaria para que puedan transportar la máxima posible y que el aislamiento del cableado temporal sea el adecuado para soportar los voltajes de prueba. Utilice un cable de cobre trenzado de al menos un calibre # 2 AWG para conectar a tierra el chasis del vehículo (cable de tierra de seguridad, ver Figura 7.1) [14], [15].

Los puentes necesarios para mantener una tierra segura deben estar en su lugar antes de desconectar las conexiones permanentes. El equipo de ensayos y los objetos bajo prueba deben estar debidamente conectados a tierra antes de

realizar o romper cualquier conexión de prueba. Tome en cuenta que los cables de puesta a tierra se conectan primero y se desconectan al final [15].

Se recomienda utilizar pinzas tipo tornillo para apretar de forma segura las conexiones a tierra y reducir el riesgo de desconexiones accidentales. Los dispositivos como las pinzas de cocodrilo están en desuso. El cable coaxial de la conexión a tierra del equipo de ensayos puede sustituirse por un cable triaxial o un cable blindado de doble conductor [2], [15].

Considere un solo sistema de puesta a tierra en el sitio de prueba. Si el manual del equipo de alto voltaje aconseja una tierra local, mantenga la caja del aparato conectada a la tierra del sistema [2].

Desenergice y conecte a tierra los sistemas de cable cuando, entre otras cosas, el conductor y el blindaje metálico tengan conexión a la tierra del sistema en el sitio de prueba y si la continuidad del blindaje no ha sido confirmada en el extremo más alejado del cable [2].

3. MEDICIÓN DE LA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO

A. Objetivo

Establecer un patrón de tendencia para evaluar el aislamiento en caso de desviaciones de la información de referencia [9], [10].

B. Normativa

El procedimiento de este ensayo está estructurado según las especificaciones de las normas ANSI/NETA ATS-2009 y ANSI/NETA MTS-2011.

C. Equipo

Probador de aislamiento.

D. Aplicabilidad

Este ensayo es aplicable con el equipo disponible en la EEQ.

E. Conexión

La Figura 7.3 muestra la conexión del probador de aislamiento al cable.

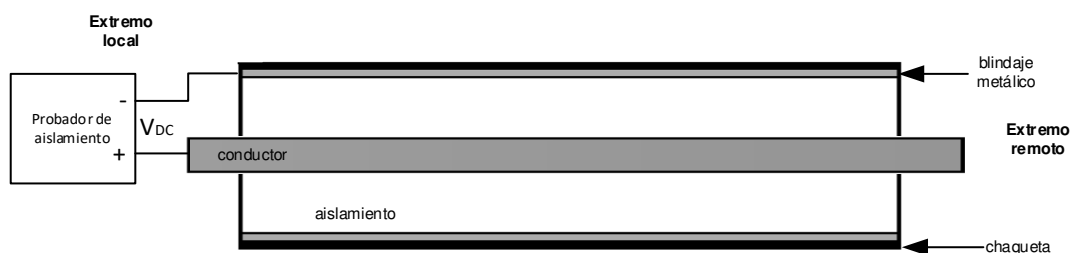


Figura 7.3. Conexión para medir la resistencia de aislamiento [9], [10], [14].

F. Procedimiento

Quite la conexión a tierra del cable que va a probar. El extremo remoto debe permanecer en circuito abierto.

Aplique voltaje entre el conductor y el blindaje metálico. Compare los valores medidos con los publicados por el fabricante o con los de la Tabla 7.13.

Tabla 7.13. Voltaje de prueba y valores mínimos recomendados de resistencia de aislamiento para cables de medio voltaje [9], [10].

Clasificación nominal del cable (kV)	Voltaje DC (kV)	Resistencia de aislamiento (MΩ)
1.0	1.0	100
2.5	1.0	500
5.0	2.5	1000
8.0	2.5	2000
15.0	2.5	5000
25.0	5.0	20000
34.5 y por encima	15.0	100000

Si la temperatura es diferente a 20°C o 40°C, corrija el valor medido con la ecuación (2.3) [9], [10].

4. PRUEBAS DE CORRIENTE ALTERNA (AC) A MUY BAJA FRECUENCIA (VLF)

4.1. Prueba de resistencia simple

A. Objetivo

Verificar la integridad del cable o sistema de cable y fallar los defectos severos a través de la aplicación de voltaje de prueba entre el conductor y el blindaje metálico [2].

B. Normativa

El procedimiento de este ensayo está estructurado según las especificaciones de la norma IEEE Std. 400.2™ versión 2013.

C. Equipo

Fuente de voltaje sinusoidal VLF.

D. Aplicabilidad

Este ensayo es aplicable con el equipo disponible en la EEQ.

E. Conexión

Quite la conexión a tierra del conductor del cable que va a probar. El extremo remoto debe permanecer en circuito abierto.

Conecte el terminal de alto voltaje VLF al conductor del cable bajo prueba. El blindaje metálico debe permanecer conectado a tierra (ver Figura 7.4).

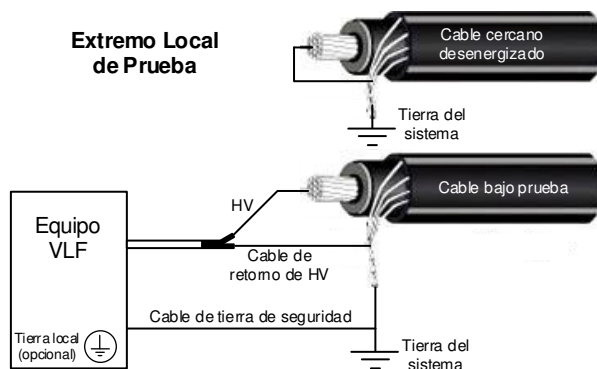


Figura 7.4. Conexión para pruebas VLF [2].

F. Voltajes y duración de prueba

La Tabla 7.14 y Tabla 7.15 muestran los voltajes y tiempos de prueba.

Tabla 7.14. Voltajes de resistencia de onda sinusoidal (ver nota 3, nota 4 y nota 5) [2].

Forma de Onda	Voltaje nominal del cable [kV]	Instalación (fase a tierra)		Aceptación (fase a tierra)		Mantenimiento (fase a tierra) (Ver nota 1 y nota 2)	
		[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	34	26	37	20	28
	25	29	41	32	45	24	34
	28	32	45	36	51	27	38
	30	34	48	38	54	29	41
	35	39	55	44	62	33	47
	46	51	72	57	81	43	61

NOTA 1: En un ensayo de mantenimiento, si el voltaje de funcionamiento es inferior al nominal del cable, realice la prueba en base al voltaje de funcionamiento. Por ejemplo, si un cable tiene una clasificación de 25 kV, pero opera a 22.8 kV, entonces el voltaje para una prueba de

mantenimiento se calcula o se selecciona según el voltaje de operación (22.8 kV). Tome en cuenta los límites de la norma IEEE (ver Tabla 2.8) para el cálculo de aquellos valores que no se encuentran en tabla.

NOTA 2: El voltaje de mantenimiento es aproximadamente el 75% el voltaje de aceptación.

NOTA 3: El aumento arbitrario de voltaje o la extensión de la duración de la prueba de los valores recomendados puede aumentar la probabilidad de una falla temprana en el servicio [1].

NOTA 4: Aumentar el voltaje por encima de $3U_0$ para compensar una disminución de ciclos de prueba no replica el rendimiento ni en la prueba ni en el servicio en comparación con el voltaje y tiempo recomendados [2].

NOTA 5: Chequee que la relación entre el valor de cresta y el valor eficaz del voltaje de prueba tenga una desviación máxima del 5% del valor ideal ($\sqrt{2} \pm 5\%$ en onda sinusoidal y $1.0 \pm 5\%$ en onda coseno rectangular). Si no se cumple con la relación, verifique que los picos positivos y negativos no difieran en más del 2%.

Tabla 7.15. Tiempos de prueba recomendados [2].

Tipo de prueba	Duración
Instalación y aceptación	60 minutos
Mantenimiento	30 minutos 60 minutos si el circuito se considera importante.
<p>Nota 1: El tiempo mínimo recomendado es de 30 minutos.</p> <p>Nota 2: Considere un tiempo de 15 a 30 minutos si la prueba se monitorea, permanece estable y no ocurre falla por al menos 15 minutos. Si el sistema presenta una falla anterior, no reduzca el tiempo en las siguientes evaluaciones.</p> <p>Nota 3: Los tiempos dados son aplicables a la frecuencia de 0.1 Hz.</p>	

F) Consideraciones previas

Si la capacitancia del cable excede las limitaciones de la fuente a 0.1 Hz, pruebe con frecuencias menores. Si es el caso, extienda la duración de prueba.

Nota: No disminuya la frecuencia por debajo de 0.01 Hz. La Figura 4.3 muestra los límites de capacidad del equipo VLF Sinus 62 kV.

Al concluir la prueba, el equipo VLF automáticamente regula a cero el voltaje de prueba y descarga el sistema de prueba.

G) Criterio de aceptación o rechazo

Pasa la prueba si el voltaje no colapsa durante el tiempo establecido, caso contrario, no pasa.

Nota: Una falla a los niveles de voltajes prescritos en la Tabla 7.14 indica que el cable está en una condición altamente comprometida.

H) Procedimiento

Eleve el voltaje de prueba al valor establecido en la Tabla 7.14 durante el tiempo dado en la Tabla 7.15.

Si el voltaje no colapsa durante el ensayo

Conecte a tierra el sistema bajo prueba.

Desconecte los terminales de la fuente y póngalos en un lugar seguro.

Si el voltaje colapsa

Conecte a tierra el sistema bajo prueba.

Desconecte los terminales de la fuente y póngalos en un lugar seguro.

Registre el voltaje de ruptura (el valor instantáneo) y el tiempo transcurrido de prueba.

Si dispone del equipo necesario, localice los defectos del cable.

Repare o reemplace el componente fallado. Tome en cuenta las siguientes sugerencias.

Si repara el sistema de cable

Antes y después de reparar, evalúe cada sección con un ensayo de diagnóstico (TD, DTD, TDTS o PD), revise el numeral 4.2.

Luego, realice una prueba de resistencia de preferencia monitoreada durante el tiempo mínimo recomendado (30 minutos).

Si instala una nueva sección

Realice una prueba de instalación en la nueva longitud.

Luego, realice una prueba de resistencia de preferencia monitoreada durante el tiempo mínimo recomendado (30 minutos).

4.2. Prueba de diagnóstico (Tangente Delta, Diferencial Tangente Delta y Estabilidad Tangente Delta)

A. Objetivo

Proporcionar una evaluación global de la pérdida dieléctrica y establecer si es probable que la sección del sistema de cable continúe funcionando correctamente en servicio [2].

B. Normativa

El procedimiento de este ensayo está estructurado según los lineamientos de la norma IEEE Std. 400.2™ versión 2013.

C. Equipo

Generador VLF sinusoidal con el equipo de medición tangente delta / diferencial tangente delta / estabilidad tangente delta.

D. Aplicabilidad

Este ensayo es aplicable con el equipo disponible en la EEQ.

E. Conexión

Revise el literal E del numeral 4.1.

F. Consideraciones previas

Las pruebas TDTS, DTD y TD funcionan mejor cuando se realizan sobre el sistema de cable en conjunto (cable, uniones y terminaciones).

Con excepción de los accesorios húmedos, las mediciones TD, DTD, y TDTS no detectan defectos singulares en los aislamientos.

Los valores medidos en una prueba de diagnóstico VLF no se correlacionan con los valores medidos a otras frecuencias.

La corrosión severa del blindaje metálico puede afectar las mediciones.

U_0 es el voltaje de operación de fase a tierra del cable.

Los tiempos de prueba establecidos son aplicables a 0.1 Hz. Para frecuencias más bajas los intervalos serán más largos.

Se consideran sistemas de cable envejecidos a aquellos que han estado en funcionamiento durante cinco años o más.

La medición TD da un valor promedio de la pérdida dieléctrica para todo el circuito probado (cable y accesorios). No proporciona información sobre cuanta variación hay de pérdida a lo largo del cable. La tangente delta vs. la longitud es una representación gráfica (a escalas logarítmicas en caso de grandes variaciones de longitud o TD) utilizada en circuitos con longitudes extensas para conocer la variación del factor de pérdidas con las características físicas de los subcomponentes individuales del sistema de cable como la longitud y la cantidad de accesorios.

G. Método

- 1) Regule el voltaje en $0.5 U_0$ y tome al menos seis mediciones TD cada 10 segundos entre cada medición. Calcule el promedio de la TD y la TDTS con la ecuación (2.10).

Nota: Es una buena práctica medir en $0.5 U_0$ para identificar los cables severamente envejecidos sin llegar a niveles de voltaje elevados.

- 2) Eleve el voltaje hasta U_0 y tome al menos seis mediciones de TD cada 10 segundos entre cada medición. Calcule el promedio de la TD, la TDTS con la ecuación (2.10) y la DTD con la ecuación (2.7).

Evaluación: Si no hay un aumento significativo de la TD con el aumento de voltaje de $0.5 U_0$ a U_0 , continúe con el siguiente paso, de lo contrario, la condición del sistema de cable se evalúa como acción requerida, revise la Tabla 7.22.

- 3) Eleve el voltaje hasta $1.5 U_0$ en sistemas envejecidos o a $2.0 U_0$ en sistemas nuevos y tome al menos seis mediciones de TD cada 10 segundos entre cada medición. Calcule el promedio de la TD y la TDTS con la ecuación (2.10).
- 4) Calcule el DTD con la ecuación (2.8) si el sistema de cable es envejecido o con la ecuación (2.9) si es nuevo.

Nota: Como último paso puede usar el voltaje de resistencia de la Tabla 7.14 con una duración de 30 minutos. Si es el caso, calcule el promedio y la TDTS de las mediciones tomadas.

- 5) Compare los valores absolutos TD, DTD y TDTS con los datos históricos del sistema de cable o con las cifras de mérito proporcionadas en el literal H.

H. Cifras de mérito

Siga el procedimiento descrito a continuación para hacer uso de las cifras de mérito y tome en cuenta las sugerencias dadas en cada numeral.

- Revise las consideraciones previas descritas en el numeral 1).
- Luego, compare las mediciones tomadas en el ensayo con las cifras de mérito establecidas en el numeral 2). La interpretación de la evaluación del sistema se detalla en la Tabla 7.22.

Nota: Revise el numeral 3) para conocer los posibles defectos del sistema en función del aumento o reducción de las mediciones (TD, DTD o TDTS).

- Si se detecta algún valor alto de las mediciones TD, DTD o TDTS, opte por alguna de las recomendaciones del numeral 4).

1) Consideraciones previas

Generalidades

Las cifras de mérito son aplicables solo si la prueba se efectuó a 0.1 Hz.

El orden de sensibilidad (empezando con la más sensible) de las mediciones al deterioro del aislamiento es TDTS, DTD, TD.

La TD está influenciada principalmente por la condición (edad, contaminación y entrada de humedad) de los diversos elementos y subcomponentes (accesorios, aislamiento del cable y pantalla metálica) del sistema de cable.

Los valores TDTS, DTD, TD pueden variar significativamente entre sí para diferentes tipos de aislamientos, instalaciones y tipos de cable.

Las cifras de mérito pueden expresarse en porcentajes (los valores dados multiplicados por 100).

Las cifras de mérito son guías útiles si se conoce el diseño preciso del sistema de cable como el tipo de blindaje, la composición del sistema, el material de aislamiento o la antigüedad, no obstante, las diferencias que se han identificado entre los criterios de una instalación específica con los datos disponibles en las tablas no son estadísticamente significativas.

Nota: Desarrollar los criterios propios para un sistema de cable en particular puede mejorar la discriminación en pruebas futuras.

Consideraciones para sistemas nuevos

Los valores dados en las tablas son provisionales (solo para información de ingeniería).

En la actualidad, no hay datos suficientes para establecer criterios de evaluación de los cables PILC y EPR no convencionales.

Los valores TDTS, DTD y TD en los cables nuevos a menudo se acercan a los límites de sensibilidad del equipo de medición. El criterio para “ninguna acción requerida” en una prueba de instalación y aceptación es menor que en un ensayo de mantenimiento. Se espera que el DTD, sea pequeño, al igual que la TDTS.

2) Tablas

La Tabla 7.16 clasifica a las cifras de mérito de acuerdo con la edad y el tipo de aislamiento del sistema de cable.

Tabla 7.16. Informativo [Elaboración propia].

Tipo de sistema	Tipo de aislamientos	Cifra de mérito
Envejecido	Dieléctricos extruidos (PE, XLPE y TRXLPE)	Tabla 7.17

Tipo de sistema	Tipo de aislamientos	Cifra de mérito
	Dieléctricos rellenos (EPR lleno de minerales, EPR resistente a descargas, XLPE relleno de minerales)	Tabla 7.18
	Aislamientos de papel impregnado de aceite (PILC)	Tabla 7.19
Nuevo	Dieléctricos extruidos (PE, XLPE y TRXLPE)	Tabla 7.20
	EPR convencionales relleno de mineral	Tabla 7.21

Tabla 7.17. Cifras de mérito para la evaluación del estado de los aislamientos envejecidos en servicio (PE, XLPE y TRXLPE) [2].

Evaluación	TDTS medida por desviación estándar en U0, [10 ⁻³]		DTD entre 0.5 U0 y 1.5 U0 [10 ⁻³]		Media TD en U0 [10 ⁻³]
No requiere acción	< 0.1	y	< 5	y	< 4
Se recomienda estudio adicional	0.1 a 0.5	o	5 a 80	o	4 a 50
Acción requerida	> 0.5	o	> 80	o	> 50

Tabla 7.18. Cifras de mérito para la evaluación del estado de los aislamientos rellenos envejecidos en servicio (por ejemplo, EPR lleno de minerales) [2].

Evaluación	Sistema de aislamiento relleno	TDTS medida por desviación estándar en U0, [10 ⁻³]		DTD entre 0.5 U0 y 1.5 U0 [10 ⁻³]		Media TD en U0 [10 ⁻³]
------------	--------------------------------	--	--	---	--	------------------------------------

Evaluación	Sistema de aislamiento relleno	TDS medida por desviación estándar en U0, [10⁻³]		DTD entre 0.5 U0 y 1.5 U0 [10⁻³]		Media TD en U0 [10⁻³]
No requiere acción	Si no es posible identificar definitivamente un aislamiento relleno ^a	< 0.1	y	< 5	y	< 35
	EPR relleno de carbono (negro)	< 0.1		< 2		< 20
	EPR relleno de minerales (rosa)	< 0.1		< 4		< 20
	EPR resistente a descargas ^b	< 0.1		< 6		< 100
	XLPE relleno de minerales ^b	----		----		< 100
Se recomienda un estudio adicional	Si no es posible identificar definitivamente un aislamiento relleno ^a	0.1 a 1.3	o	5 a 100	o	35 a 120
	EPR relleno de carbono (negro)	0.1 a 2.7		2 a 120		20 a 100
	EPR relleno de minerales (rosa)	0.1 a 1		4 a 120		20 a 100
	EPR resistente a descargas ^b	0.1 a 1		6 a 10		100 a 350

Evaluación	Sistema de aislamiento relleno	TDS medida por desviación estándar en U0, [10⁻³]	DTD entre 0.5 U0 y 1.5 U0 [10⁻³]	Media TD en U0 [10⁻³]
	XLPE relleno de minerales ^b	----	----	100 a 350
Acción requerida	Si no es posible identificar definitivamente un aislamiento relleno ^a	> 1.3	> 100	> 120
	EPR relleno de carbono (negro)	> 2.7	> 120	> 100
	EPR relleno de minerales (rosa)	> 1	> 120	> 100
	EPR resistente a descargas ^b	> 1	> 10	> 350
	XLPE relleno de minerales ^b	----	----	> 350

a. La experiencia ha demostrado que es bastante difícil identificar con precisión el tipo de aislamiento relleno del cable instalado en campo. Los problemas encontrados incluyen: registros incorrectos o faltantes, marcas borradas u oscurecidas en la cubierta del cable, coloración confusa, etc.

b. Se han recopilado datos insuficientes para realizar estimaciones precisas de los criterios, por lo cual es probable que contengan errores considerables. Los valores proporcionados sirven de orientación en caso de que encuentren estos sistemas de aislamiento.

Tabla 7.19. Cifras de mérito para la evaluación del estado de los aislamientos de papel impregnado de aceite envejecidos en servicio (por ejemplo, PILC) [2].

Evaluación	TDS medida por desviación estándar en U0, [10 ⁻³]		DTD entre 0.5 U0 y 1.5 U0 [10 ⁻³]		Media TD en U0 [10 ⁻³]
No requiere acción	< 0.1	y	-35 a 10	y	< 85
Se recomienda un estudio adicional	0.1 a 0.4	o	-35 a -50 o 10 a 100	o	85 a 200
Acción requerida	> 0.4	o	< -50 o > 100	o	> 200

Tabla 7.20. Criterios para la evaluación de cables recién instalados con aislamientos basados en PE (XLPE y TRXLPE) [2].

Evaluación	TDS a U0, [10 ⁻³]		DTD entre 2 U0 y 1.0 U0 [10 ⁻³]		Media TD en U0 [10 ⁻³]
Aceptable	< 0.1	y	< 0.8	y	< 1.0
Se aconseja más estudio	> 0.1	o	> 0.8	o	> 1.0

Tabla 7.21. Criterios para la evaluación de cables EPR de relleno mineral convencionales recién instalados [2].

Evaluación	TDS a U0, [10 ⁻³]		DTD entre 2 U0 y 1.0 U0 [10 ⁻³]		Media TD en U0 [10 ⁻³]
Aceptable	< 0.1	y	< 5	y	< 10
Se aconseja más estudio	> 0.1	o	> 5	o	> 10

Tabla 7.22. Interpretación de la evaluación del sistema de cable [2].

No se requiere acción	Evaluación: Sistema en buen estado.
------------------------------	--

	Recomendación: Devuelva al servicio y programe un ensayo en una fecha posterior.
Se recomienda un estudio adicional	Evaluación: Necesita obtener información adicional para hacer la evaluación. Recomendación: Revise el historial previo de fallas del circuito o realice un ensayo de resistencia monitoreada para mejorar el diagnóstico.
Acción requerida	Evaluación: Mal estado del aislamiento. El sistema de cable tiene un conjunto alto de características TD. Recomendación: Considere el reemplazo o reparación inmediato después de la prueba o en un futuro próximo.

3) Interpretación de las mediciones

Si hay una diferencia significativa del DTD con voltaje creciente o decreciente, o existe una variación considerable de la TDTS, entonces puede haber una sección gravemente dañada en el aislamiento del cable o accesorio.

Los resultados de las mediciones pueden estar influenciados por componentes conectados al circuito del cable que no se pueden quitar, por ejemplo, interruptores llenos de aceite.

La Tabla 7.23 y Tabla 7.24 muestran las causas por las cuales varía la tangente delta con el tiempo y voltaje respectivamente. La Tabla 7.25 indica como interpretar la variación del factor de pérdidas con la longitud del sistema.

Tabla 7.23. Variación de la tangente delta a voltaje constante (Ver Nota 1) [2].

TD	Causa	Tipo de aislamiento
Aumento	Envejecimiento (Ver Nota 2)	Extruido y papel
Disminución	Empalmes húmedos	Sistemas de cable cubiertos de plomo con aislamiento de papel
Nota 1: El aumento o la disminución de la TD no se entienden por completo.		
Nota 2: El cambio del TD con el tiempo a voltaje constante también puede verse afectado por la duración de la interrupción del voltaje experimentada		

por el sistema de cable.

Tabla 7.24. Variación de la tangente delta con el voltaje [2].

TD	Causa	Elemento
Aumento	Descargas parciales	Accesorios
	Cientos de árboles de agua grandes	Aislamientos extruidos

Tabla 7.25. Variación de la tangente delta en función de la longitud (ver Nota 1) [2].

Pendiente TD vs. longitud	Diagnóstico
Plana (pérdida independiente de la longitud)	Pérdida uniforme para todas las partes del sistema de cable.
Aleatorio (no depende claramente de la longitud)	No hay un patrón claro de pérdida. Cada longitud probada es diferente de otras en la misma área. Podría haber variaciones locales entre longitudes.
Pendiente positiva (pérdida que aumenta con la longitud)	Corrosión del escudo metálico o mal contacto entre el blindaje metálico y la capa semiconductora aislante.
Pendiente negativa (pérdida que disminuye con la longitud)	Regiones de alta pérdida de aislamiento como accesorios con pérdida o regiones con muchos árboles de agua dentro de una gran proporción del cable de baja pérdida (ver Nota 2).
Nota 1: Un sistema de cable híbrido con múltiples tipos de aislamiento puede proporcionar resultados TD, DTD y TDTS relacionados con las longitudes relativas de cada tipo de aislamiento.	
Nota 2: Considere una región de alta pérdida como una gran acumulación de agua “arborescencias acuosas severa”, un accesorio degradado, un área de alta humedad o un aislamiento de cable diferente.	

4) Recomendaciones

- a) Compare los resultados entre las fases del mismo segmento o secciones secuenciales, siempre y cuando tengan la misma configuración. Esto también se aplica a circuitos T-ramificados o complejos.

- b) Divida el circuito en subsecciones y vuelva a medir.
- c) Visualice los componentes del circuito donde sea accesible y reemplace las partes sospechosas o los accesorios especialmente si parecen ser viejos y vuelva a probar.
- d) Realice ensayos adicionales como una de resistencia simple o monitoreada o una prueba de descarga parcial para identificar el problema.
- e) Separe la respuesta de las terminaciones y de otros componentes, agregue circuitos de protección en las terminaciones.

4.3. Espectroscopía dieléctrica en el dominio de la frecuencia (FDS)

A. Objetivo

Obtener información sobre el estado del aislamiento a través de las mediciones realizadas en un rango de frecuencias y voltajes [2].

Aumentar la sensibilidad de la medición y reducir la relación señal/ruido [1].

B. Norma

El procedimiento de este ensayo está estructurado según los lineamientos establecidos en la norma IEEE Std 400.2™ versión 2013.

C. Equipo de prueba

Generador sinusoidal VLF programable con voltajes por encima de 14 kV_{RMS} con una frecuencia variable entre 0.001 Hz y 1 Hz que incluya un puente activo para medir las corrientes de pérdida armónicas en cables de potencia a altos voltajes y frecuencias de 0.1 mHz a 1 kHz [2].

D. Aplicabilidad

Este ensayo es aplicable con el equipo disponible en la EEQ.

E. Consideraciones previas

Verifique si la capacidad de la fuente de voltaje VLF es superior o igual a la capacitancia del sistema de cable.

La FDS es una prueba efectiva si se usa niveles de voltaje por encima del valor de operación.

Si la pérdida y las corrientes capacitivas aumentan juntas, significa que la TD es menos sensible a la degradación. En este caso, trace por separado la pérdida y las corrientes capacitivas en función del voltaje y la frecuencia.

Esta prueba es de uso limitado en la actualidad.

F. Procedimiento

Conecte el equipo VLF programable al sistema de cable que se va a probar.

Defina los rangos de frecuencias y de voltajes. Los tiempos de medición típicos suelen tomar menos de 15 minutos.

El puente activo mide con precisión automáticamente la constante dieléctrica compleja y la tangente delta en cada voltaje y frecuencia.

G. Evaluación

Un aumento de la TD en comparación con los valores medidos previamente indica que ha ocurrido una degradación adicional.

H. Recomendaciones

En los circuitos híbridos observe la TD con el tiempo, preferiblemente durante varios años. La interpretación es difícil para este tipo de circuitos.

Si se detecta un valor alto de pérdida, opte por las recomendaciones descritas en el numeral 4) de las pruebas de diagnóstico (TD, DTD y TDTS).

4.4. Prueba de Descarga Parcial

A. Objetivos

Utilizar como herramienta de monitoreo durante una prueba de resistencia [2].

Verificar si el aislamiento del cable está libre de defectos de descarga parcial [1].

Detectar descargas parciales durante una prueba de aceptación [1].

B. Norma

El procedimiento de este ensayo está estructurado con el respaldo de las normas descritas en la Tabla 7.26.

Tabla 7.26. Normas de referencia para pruebas de descarga parcial [Elaboración Propia].

Norma	Sección
IEEE Std 400.3 TM -2006	4.3, 5.0, 5.1, 5.3
IEEE Std 400 TM -2012	6.3
IEEE Std 400.2 TM -2013	5.5

C. Equipo de prueba

Generador de voltaje VLF sinusoidal.

Dispositivo de acoplamiento o sensor de pulsos individuales de ancho de banda amplio de al menos varias decenas de megahercios (generalmente en el rango de 5 MHz a 20 MHz) [11].

D. Aplicabilidad

No se puede efectuar esta prueba mientras no se adquiera el equipo necesario, por ejemplo, el recomendado en la sección 4.5.1.

E. Consideraciones previas al ensayo

Las fuentes VLF que emplean interruptores mecánicos no están exentos de descargas parciales [11].

No existen datos suficientes para interpretar de forma precisa los resultados de descarga parcial de los cables extruidos y de papel [2].

Los resultados del ensayo pueden estar influenciados por las descargas superficiales externas, las descargas parciales en las juntas y accesorios, la descarga tipo corona y la atenuación de las señales [2].

Verifique que la sensibilidad de las mediciones sea buena (mejor que 5 pC) en especial cuando se prueban cables extruidos [11].

Compruebe que el ruido de fondo sea bajo. Las descargas parciales con magnitudes bajas pueden no detectarse si hay un ruido de fondo alto durante la medición. Los filtros de ruido digitales mejorarán la sensibilidad de la detección [11].

F. Conexión de prueba

El extremo remoto del cable queda abierto [11].

En el extremo cercano, conecte el generador de voltaje VLF y el dispositivo de acoplamiento o sensor al sistema de cable (ver Figura 7.5) [11].

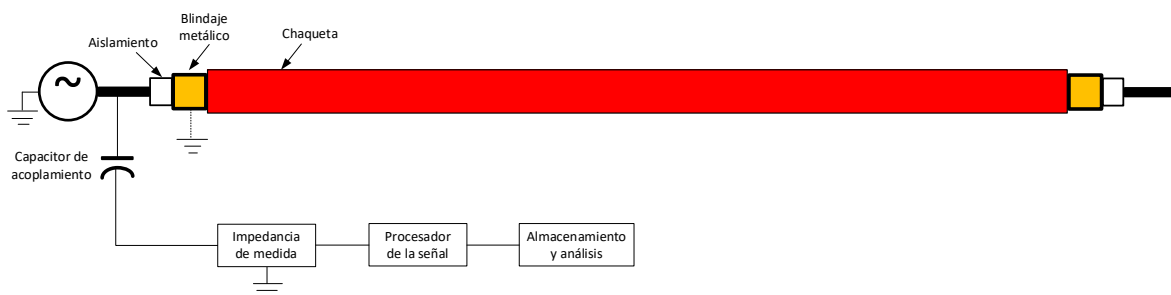


Figura 7.5. Conexión para prueba de descarga parcial con fuente externa [11].

Nota: Los cables de interconexión entre el dispositivo de acoplamiento y el objeto de prueba deben mantenerse tan cortos como sea posible para minimizar los efectos sobre el ancho de banda de detección [18].

La Figura 7.6 muestra un diagrama práctico de la forma física y conexión del dispositivo de acoplamiento.

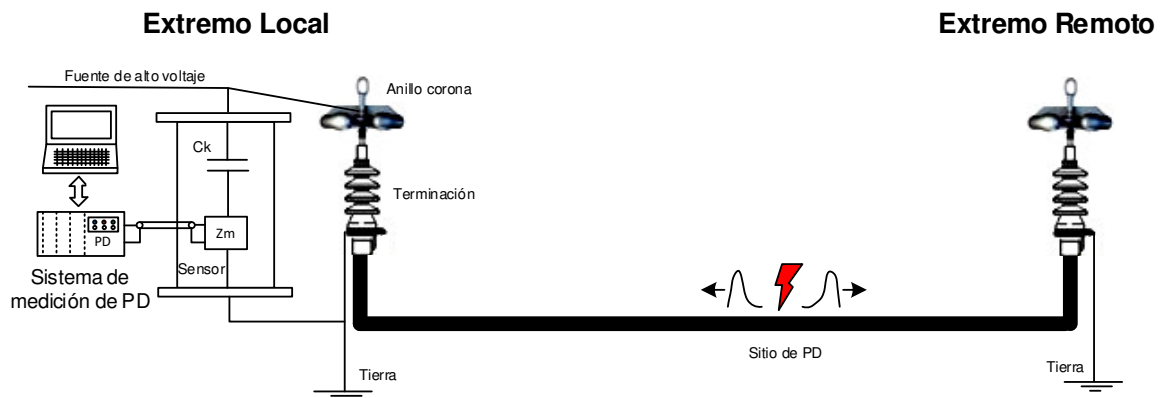


Figura 7.6. Conexión del dispositivo de acoplamiento [13].

En circuitos ramificados o para longitudes de cable muy largas, es posible instalar un detector en cada extremo para una medición simultánea de pulsos (ver Figura 7.7) [13].

Nota: Para estos casos, debe contar con los medios para sincronizar las grabaciones y transmitirlos a una estación de proceso [13].

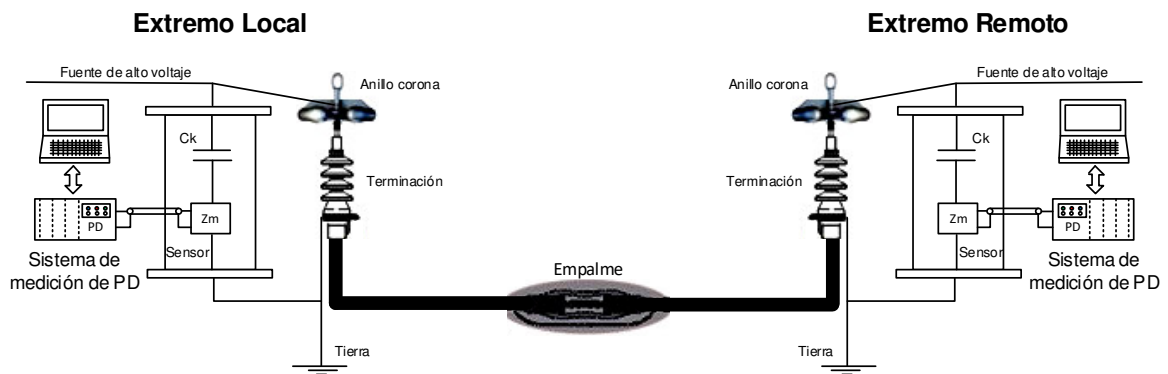


Figura 7.7. Medición secuencial en dos extremos del cable [13].

G. Método

- 1) Calibre el sistema de medición como se establece en el numeral 4.5 [11], [18].
- 2) Determine la ubicación de los empalmes del sistema mediante un TDR para distinguir las señales de descarga parcial originadas en los accesorios de las que provienen del cable [13].
- 3) Monitoree la actividad de descarga parcial mientras eleva lentamente el voltaje al nivel establecido en la Tabla 7.14 [2].
 - a) Si se producen descargas parciales antes de llegar al nivel de voltaje establecido:

Registre el voltaje de inicio de la descarga parcial (PDIV).

Mantenga o eleve el voltaje hasta los niveles de resistencia de la Tabla 7.14 durante 2 o 5 ciclos (20 o 50 segundos a 0.1 Hz) y mida la actividad de descarga parcial durante el tiempo de prueba.

Al finalizar los ciclos de prueba, reduzca el voltaje lentamente hasta que la descarga parcial se extinga y registre el voltaje de extinción (PDEV).

b) Si no se producen descargas parciales

Eleve el voltaje lentamente hasta los valores de resistencia de la Tabla 7.14 y mantenga durante 30 minutos a menos que ocurran descargas parciales.

Si ocurren descargas parciales: registre el voltaje de inicio, mantenga el voltaje durante 3 o 6 ciclos y mida la actividad de descarga parcial durante los ciclos de prueba.

Al finalizar los ciclos de prueba, reduzca el voltaje lentamente hasta apagar las descargas parciales y registre el voltaje de extinción (PDEV).

4) Realice pruebas adicionales en los cables y accesorios reemplazados.

Revise el literal H y el literal I para interpretar las mediciones de descarga parcial.

El literal J describe la información que se debe tomar de las pruebas.

H. Interpretación de mediciones

La (q) y (n) aumentan para la mayoría de las fuentes de descarga cuando aumenta el voltaje de prueba.

Para ciertos componentes 100 pC o 200 pC son un nivel peligroso (ejemplo: pistas carbonizadas), mientras que para otros 104 pC o más posiblemente no afecten el rendimiento futuro (ejemplo: descargas en dieléctricos laminados).

La Tabla 7.27 provee las características de los parámetros de PD en función del tipo de aislamiento del cable.

Tabla 7.27. Informativo [Elaboración Propia].

Descripción	Numeral
Descargas parciales en aislamientos extruidos	1)
Descargas parciales en aislamientos laminados	2)
Descargas parciales en accesorios	3)

1) Descargas parciales en aislamientos extruidos

La (q) perjudicial es baja (rango de varios picoCoulombs).

a) Cavidades

La (q) es menor a 100 pC para voltajes de prueba de hasta 2 veces el voltaje de operación.

El PDIV depende del tamaño, forma y posición de la cavidad dentro del aislamiento, así como del tipo de gas y la presión en el interior. Cualquier expansión o contracción de la cavidad afectará los parámetros (PDIV, PDEV, q y n) de la descarga parcial.

La (q) aumenta con la profundidad de la cavidad.

La (q) es menor en el (PDIV) para cables con clasificaciones de voltaje mayores si se considera la misma profundidad del defecto respecto a otro cable de menor clasificación.

Cavidades esféricas

La (q) y (n) aumentan con el área de la superficie de la cavidad.

La (q) aumenta y (n) disminuye cuando la superficie de la cavidad se vuelve conductora.

En cavidades de menor diámetro, las PD pueden cesar si la superficie se vuelve conductora o si incrementa la presión del gas al interior.

Cavidades planas

Las cavidades planas aparecen generalmente entre el blindaje semiconductor (interno o externo) y el aislamiento. Las cavidades adyacentes a un conductor o a una pantalla semiconductor usualmente tienen una (q) mayor en un medio ciclo del voltaje aplicado que en el otro.

Estas cavidades se caracterizan por la ocurrencia simultánea de las descargas parciales (la ocurrencia simultánea es detectable con sistemas de medición de banda ancha). Los detectores de baja frecuencia y ancho de banda angosto superponen los pulsos de PD. La superposición de las señales se ve reflejada en el aumento de (q) y la disminución de (n).

Cavidades entre las interfaces cable – accesorios

La PD se identifica a través de (q) y (n) en tres etapas.

Etapas 1: (q) y (n) son pequeñas.

Etapas 2: (q) y (n) aumentan a medida que avanza el tracking.

Etapa 3: Previo a la falla, (q) disminuirá y (n) aumentará significativamente.

b) Árboles eléctricos

La (q) en los árboles eléctricos es mayor que en las cavidades esféricas. Depende de la longitud del árbol en la dirección del campo eléctrico y del voltaje de prueba aplicado. En algunos casos (q) aumenta cuando crece la longitud de los canales del árbol eléctrico, en otros casos se mantiene relativamente constante, pero (n) cambia a medida que crece el árbol.

Las descargas parciales observadas a voltaje de funcionamiento son poco probables que provengan de un árbol eléctrico.

Si detecta un árbol eléctrico reemplace o repare inmediatamente la zona con defecto.

c) Alta resistencia en el blindaje del aislamiento

La resistividad de la pantalla del aislamiento aumenta a causa de contaminantes orgánicos (aceite de transformador, gasolina, etc.). Se identifican a través de (q), (n), (ϕ), la polaridad dominante y la secuencia de pulso.

Las (q) originadas entre el cable neutro y el blindaje de aislamiento (descarga parcial externa) están el rango de cientos a miles de (pC).

Este defecto rara vez provoca fallas.

d) Neutro roto

El neutro roto puede detectarse a través de un ensayo de continuidad (revise numeral 7) o mediante las técnicas del numeral 6.

Este defecto causa daños en el cable.

2) Descargas parciales en aislamientos laminados

No existe datos referenciales para cables nuevos. Los ensayos de PD no son parte de las pruebas de rutina de fábrica [11].

La (q) son significativamente mayores (van hasta más de los 10000 pC).

En los cambios de temperatura y presión es usual que la (q) esté en el rango de hasta miles de (pC) [11].

Los cables impregnados de líquido (PILC) son más resistentes a la PD que los cables XLPE. La PD se tolera durante mucho tiempo debido a la alta resistencia del aislamiento laminado [11].

3) Descargas parciales en accesorios

La evaluación de un empalme con PD es compleja y en la mayoría no concluyente (depende del tipo particular de empalme) [11].

Se identifican a través de la (q) y (n). A medida que avanza el problema, (q) permanece sin cambios mientras (n) aumenta [11].

Las gráficas de resolución por fase ayudan a diferenciar entre un defecto tipo tracking (PD superficiales) y uno tipo vacío (PD internas). La PD de una discontinuidad en el conector o el blindaje de un empalme o un cable a menudo se asemejan a una descarga de corona (ver Figura 7.8) [11].

Una PD tipo tracking originada a voltaje de funcionamiento es grave, por tanto, repare inmediatamente.

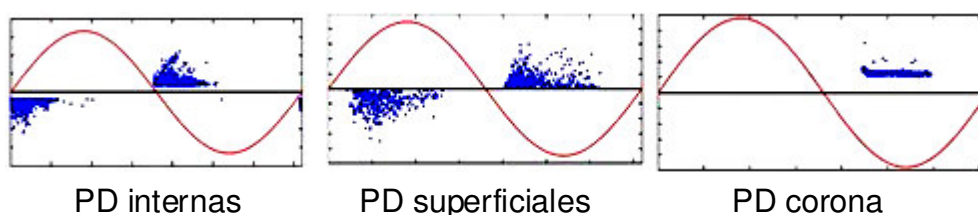


Figura 7.8. Gráficas características de resolución por fase según el tipo de descarga parcial [44].

I. Interpretación de valores PDIV y PDEV

La Tabla 7.28 muestra el comportamiento que tendrán las fuentes de descarga parcial, según las mediciones PDIV y PDEV, cuando el objeto probado sea energizado con voltaje de operación del sistema (SOV).

Tabla 7.28. Interpretación de los parámetros PDIV y PDEV [11].

Mediciones	Evaluación
$PDIV < SOV$ y $PDEV < SOV$	La PD se iniciará una vez energizado el sistema.
$PDIV > SOV$ y $PDEV < SOV$	La PD se iniciará por sobrevoltajes transitorios. Si se inician pueden ser intermitentes o autosostenibles hasta que se elimine el voltaje o podrían extinguirse por completo.
$PDIV > SOV$ y $PDEV > SOV$	La actividad de PD se iniciará por sobrevoltajes transitorios, pero se extinguirán rápidamente después de algunos ciclos de voltaje de AC. También podrán generarse si el voltaje de prueba es $> 2 V_o$. Los defectos con estas características se

Mediciones	Evaluación
	consideran inofensivos.
<p>Nota 1: El PDIV será típicamente mayor a 2 Vo en sistemas de cable muy buenos.</p> <p>Nota 2: Un PDIV mayor a 2 Vo no garantiza una larga vida al sistema de cable. Un árbol eléctrico puede iniciarse por una descarga atmosférica y causar una falla o podría activar una PD intermitente extinta en el momento de la prueba.</p>	

J. Informe de prueba

Incluya en el informe de prueba la siguiente información [11].

- Ubicación de los empalmes.
- Nivel de ruido de fondo.
- Sensibilidad: La mínima resolución de la magnitud de la descarga parcial y la forma en que se determinó.

Nota: Si la sensibilidad es inferior a la esperada, proporcione los motivos.

- La representación gráfica de las descargas parciales. Un sistema basado en computadora registra por magnitud y ubicación de origen “Mapa de descarga parcial” la información (q, ϕ , n) de cada descarga parcial detectada durante la prueba.

La Tabla 7.29 muestra los parámetros de descarga parcial que deben representarse gráficamente en el mapa de descarga parcial y en el diagrama de resolución por fase según la normativa.

Tabla 7.29. Representación gráfica de las descargas parciales [11].

Mapa de descarga parcial (Ver Figura 7.9)	En la ubicación del sitio de la PD
	La secuencia de pulso (n o N) vs. La (q) Nota: El número de eventos de PD frente a la magnitud de PD proporcionan datos útiles al propietario del sistema para la comparación de futuras pruebas de PD en el mismo circuito.
Diagrama de resolución por fase (Ver Figura 7.10)	En cada voltaje de prueba
	La (q) vs. El (ϕ) para cada evento PD registrado. Especifique el número de ciclos incluidos.

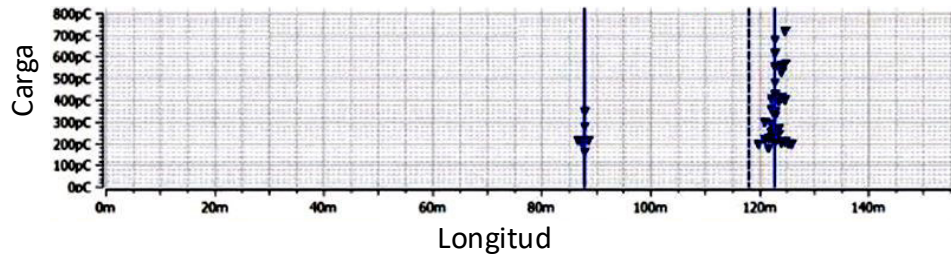


Figura 7.9. Ejemplo de un mapa de descarga parcial [44].

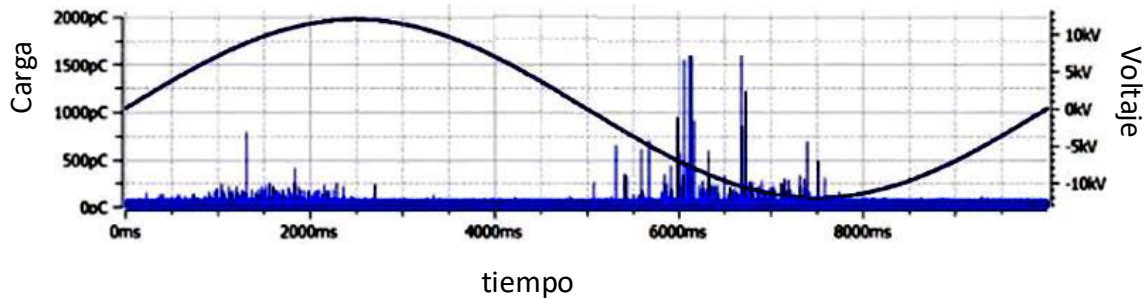


Figura 7.10. Ejemplo de un diagrama de resolución por fase [44].

- El análisis de la gravedad en caso de detectarse descargas parciales y las recomendaciones sobre las medidas correctivas tomadas.
- Cualquier otro resultado de diagnóstico pertinente al método de prueba utilizado, por ejemplo, el factor de escala de la calibración, el ancho de banda del equipo, etc.

4.5. Calibración del sistema de medición para pruebas de descarga parcial

A. Objetivo

Determinar el factor de escala k para la medición de la magnitud de PD especificada (carga aparente) [18].

B. Norma

El procedimiento de calibración está estructurado según los requerimientos de las normas descritas en la Tabla 7.30.

Tabla 7.30. Normas utilizadas en la calibración del sistema de medición de PD

[Elaboración Propia].

Norma	Sección
IEC 60270:2000	5.1, 5.2
IEEE Std 400.3 TM -2006	5.3

C. Equipo de prueba

La Figura 7.11 muestra la inclusión del calibrador en el circuito de detección y ubicación de descargas parciales.

Calibrador: Generador de voltaje escalonado (G) y condensador (C0) [18].

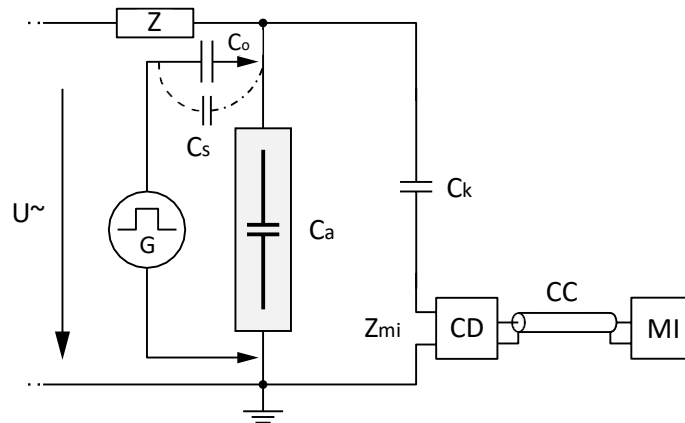


Figura 7.11. Inclusión del calibrador en el sistema para pruebas de descarga parcial [18].

Nota: Cs es la capacitancia parásita presente solo en aquellos objetos de prueba altos de varios metros de altura. Para los sistemas de cable esta es insignificante.

D. Aplicabilidad

La EEQ no puede llevar a cabo este ensayo mientras no disponga del equipo necesario, por ejemplo, el calibrador recomendado en la sección 4.5.1.

E. Consideraciones previas

Considere a la carga aparente (q) como la cantidad a medir siempre que sea posible.

Realice la calibración con cada nuevo objeto de prueba, excepto que los ensayos se realicen en objetos similares (la impedancia característica del cable y los coeficientes de reflexión de los accesorios no deben cambiar) con capacitancias dentro del $\pm 10\%$ de los valores medios.

El cable de conexión entre el generador de voltaje escalonado y el condensador C0 debe estar blindado y equipado con una terminación adecuada para evitar la distorsión del escalón de voltaje.

El capacitor C0 debe cumplir con las especificaciones de la Tabla 7.31.

Tabla 7.31. Capacitor C0 de bajo y alto voltaje.

Si C0 es de bajo voltaje	Si C0 es de alto voltaje
C0 no debe ser mayor que 0.1 Ca. Lleve a cabo la calibración con el sistema de prueba desenergizado.	No es necesario que C0 sea inferior a 0.1 Ca. Si C0 tiene un nivel de ruido de fondo suficientemente bajo para medir el nivel de

Si C0 es de bajo voltaje	Si C0 es de alto voltaje
Elimine C0 antes de energizar el circuito de prueba.	PD especificado al voltaje de prueba puede permanecer conectado al circuito de prueba.

F. Método

En el extremo remoto del cable inyecte pulsos de calibración en el rango relevante de las magnitudes esperadas (50% y 200% de la magnitud de PD especificada).

Se recomienda suministrar pulsos de 10 pC, 20 pC, 50 pC o 100 pC para determinar la sensibilidad del instrumento al pulso más pequeño.

Ajuste la ganancia (integración analógica) o el multiplicador constante (integración digital) del equipo de medición hasta que el valor de carga (pC) leído en el extremo local sea igual al del pulso de calibración.

Registre las características más significativas del sistema de medición (f1, f2, Tr).

5. Metodología para la localización de fallas en sistemas de cables

A. Norma

Este procedimiento está estructurado en base a los requerimientos de la norma IEEE Std 1234™ versión 2019.

B. Equipo para conocer el tipo de falla

Megaóhmetro: desde 500 V_{DC} hasta 10000 V_{DC}.

Óhmetro: desde 1.5 V_{DC} hasta 9 V_{DC}.

C. Aplicabilidad

Este ensayo es aplicable con el equipo disponible en la EEQ.

D. Conexión

La Figura 7.3 muestra la conexión de prueba.

E. Procedimiento

- Mediante un TDR, verifique la longitud y los puntos de referencia (empalmes, cambio del tipo de cable, terminaciones, etc.) del sistema de cable.
- Determine el nivel de corrosión del blindaje metálico con el método de la reflectometría en el dominio del tiempo, revise el numeral 6.
- Mida la resistencia de aislamiento con el equipo adecuado, revise el literal B.
Nota: Empiece la medición con un óhmetro para detectar fallas que tengan valores de resistencia dentro del rango de este instrumento.
- Clasifique la falla del cable según los valores referenciales de la Tabla 7.32.

Tabla 7.32. Tipo de falla según el valor de resistencia de aislamiento medido [14].

Resistencia	Causa	Método para ubicar la falla
R > 10 MΩ (Megaóhmetro)	Falla de alta resistencia. Ejemplo: Agujeros no carbonizados en el aislamiento o camino aislante entre el conductor y el blindaje metálico.	Reflexión de arco, revise el numeral 5.2.
	Daños mecánicos Ejemplo: Escudo metálico desintegrado, empalme separado, terminación abierta, conductor abierto.	TDR, revise el numeral 5.1.
100 Ω < R < 10 MΩ (Mega-óhmetro u óhmetro)	Falla común en cables extruidos. Sección de cable destruida y quemada. Camino conductor entre conductores. Falla empapada de agua.	Reflexión de arco, revise el numeral 5.2.
R < 100 Ω (Óhmetro)	Falla de baja resistencia o falla atornillada (impedancia de falla muy cercano a cero). Tierras conectadas. Transformador conectado. Puente carbono-metal de baja resistencia.	TDR revise el numeral 5.1.
<p>NOTA 1: El valor de 100 Ω se relaciona con el umbral por debajo del cual se puede aplicar el método TDR.</p> <p>NOTA 2: El valor de 10 MΩ es un punto de división arbitrario debido a que las fallas de alta resistencia son no lineales.</p>		

Nota: La ubicación precisa de la falla se puede rastrear o localizar con detectores acústicos o electromagnéticos. Estos detectores son útiles para cables enterrados directamente. Si el cable fallado está instalado en ductos, la ubicación debe determinarse al extraer la sección del sistema [14].

5.1. Reflectometría en el dominio del tiempo (TDR)

A. Objetivo

Identificar las superficies reflectantes (inicio de cable, empalmes, transformadores, fallas, cambios en el tipo de cable y el extremo del cable).

B. Equipo

TDR

C. Conexión de Prueba

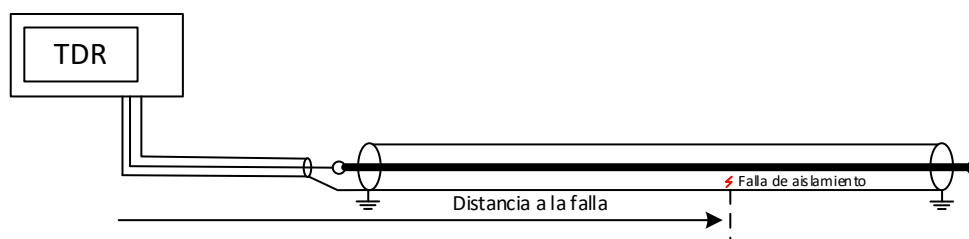


Figura 7.12. Conexión de prueba del TDR [14].

D. Aplicabilidad

No se puede efectuar esta prueba mientras no se adquiera el equipo necesario, por ejemplo, el TDR recomendado en la sección 4.5.2.

E. Consideraciones previas

Para que el TDR funcione correctamente, se requiere el acceso al menos a dos conductores paralelos (conductor/conductor o conductor/blindaje metálico) muy próximos [14].

La corrosión en el neutro concéntrico o ciertos tipos de blindajes metálicos afectan la funcionalidad del TDR atenuando y dispersando las señales de alta frecuencia incluso cuando están en condiciones relativamente nuevas (ejemplos: cables blindados con cinta o cables sin cubierta con corrosión) [14].

El método TDR es útil para localizar fallas de aislamiento con valores de resistencia de menos de 10 veces la impedancia natural del cable (Z_0) [14].

Nota: Emplee la ecuación (2.4) si no conoce la Z_0 [12].

Si la resistencia es mayor, opte por la técnica de reflexión de arco de sobrevoltaje descrita en el numeral 5.2 [14].

F. Método

En el TDR, programe la velocidad de propagación del pulso proporcionada por el fabricante del cable. Si no conoce la velocidad de propagación, opte por alguna de las siguientes recomendaciones [12].

- Calcule a partir de la ecuación (2.18) [12].
- Mida o estime la longitud del sistema de cable y varíe la velocidad de propagación hasta que la pantalla indique en el extremo lejano la misma lectura de la longitud estimada o medida [12].
- Asuma que es el 50% [12].

A partir de la visualización de las trazas y del tiempo de reflexión, identifique la distancia entre el inicio del cable y cualquier discontinuidad o irregularidad (uniones, empalmes, transformadores, fallas, cambios en el tipo de cable y los extremos del sistema).

G. Interpretación de resultados

La Figura 7.13 muestra las trazas de las posibles reflexiones de la señal.

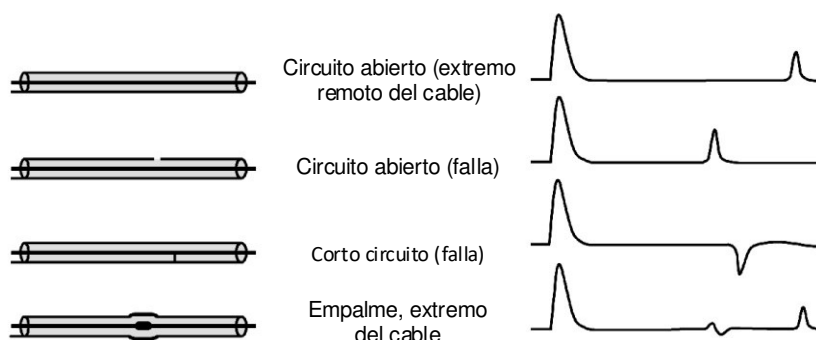


Figura 7.13. Trazas básicas de la TDR [14].

5.2. Reflexión de arco de sobrevoltaje

A. Objetivo

Convertir momentáneamente las fallas de alta resistencia o intermitentes en fallas con valores de resistencia mucho menores que la impedancia característica [14].

B. Equipo de prueba

Generador de sobrevoltaje (Thumper)

Acoplador

TDR

C. Aplicabilidad

La EEQ no puede llevar a cabo este ensayo mientras no disponga del equipo necesario, por ejemplo, el recomendado en la sección 4.5.3.

D. Conexión de prueba

La Figura 7.14 muestra la conexión del equipo de prueba.

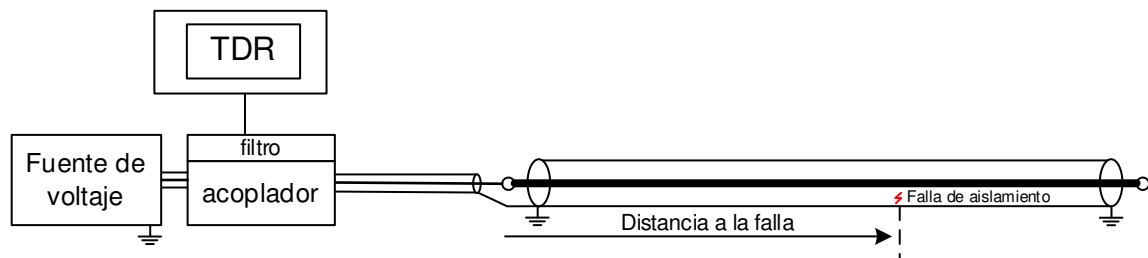


Figura 7.14. Diagrama esquemático del método de reflexión del arco de sobrevoltaje [14].

E. Consideraciones previas

Golpear a niveles de alto voltaje puede afectar las propiedades dieléctricas del sistema de cable.

Las fallas intermitentes en los cables laminados pueden ser difíciles de capturar con el TDR.

Los cables largos con mucha pérdida y los sistemas radiales con muchas ramificaciones imposibilitan la localización de la falla debido a que absorben la energía del sobrevoltaje y los pulsos del TDR reflejados.

La longitud y el número de ramificaciones pueden ser limitantes en los cables extruidos. En sistemas de distribución residencial subterránea (URD) estas características no son limitantes.

No emplee este método si hay cables con interruptores de corriente de falla en la cubierta metálica.

Los cables blindados con cinta o con neutro corroído impiden el uso y la eficacia de este método.

Configure el Thumper en función del voltaje de operación del sistema de cable y de la energía necesaria para la longitud del cable que se va a probar, revise la sección 2.13.2.

F. Método

Con la fuente de alto voltaje apagada, envíe pulsos con el TDR y visualice las reflexiones de las uniones, los empalmes, los transformadores, las irregularidades y los extremos del cable. En esta condición, los pulsos no reflejarán las fallas de alta resistencia o intermitente (ver Figura 7.15).

Luego encienda el generador de sobrevoltaje y regule la amplitud del pulso para romper y generar un arco en el lugar de la falla.

El pulso del TDR se reflejará por el arco. La falla vuelve al estado de alta resistencia después que el arco se apaga (ver Figura 7.15).

G. Análisis de resultados

Realice la comparación de las reflexiones con y sin alto voltaje aplicado.

Durante el arco, la desviación negativa se superpone en la pantalla de bajo voltaje. La desviación negativa indica la ubicación de la falla temporal de baja resistencia en la pantalla.

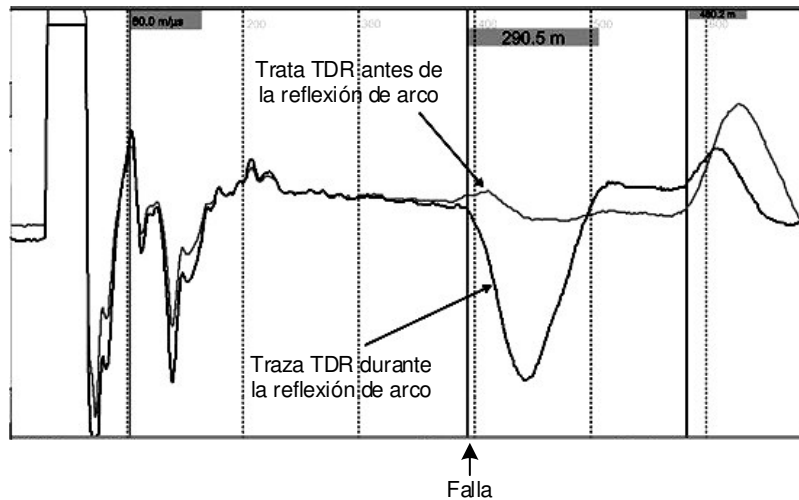


Figura 7.15. Traza de la reflexión de arco de sobrevoltaje superpuesta en la pantalla antes de encender el alto voltaje [14].

6. Técnicas para detectar y evaluar la corrosión en el neutro concéntrico.

A. Objetivo

Brindar orientación para detectar corrosión en los alambres neutros concéntricos o correas de los cables de medio voltaje [19].

B. Norma

El procedimiento de este ensayo está estructurado según los lineamientos de las normas IEEE Std 1617™ versión 2007 e IEEE Std 400.3™ versión 2006.

C. Criterio de aceptación o rechazo

El porcentaje mínimo del tamaño neutral recomendado con respecto a la atenuación aceptable es del 25% [11].

D. Procedimiento

Inicie el programa con una inspección de las secciones visibles del sistema de cable para reportar cables rotos, alambres picados o anomalías en el color [19].

Elija la técnica de detección adecuada, revise la Tabla 7.33.

Tabla 7.33. Técnicas para detectar corrosión en el blindaje metálico [19].

Método	Aplicabilidad	Numeral
--------	---------------	---------

Método	Aplicabilidad	Numeral
Reflectometría en el dominio del tiempo (TDR)	Cables instalados en ductos	1)
Medición de la resistencia del neutro concéntrico	En cables cortos (≤ 30 m) con apantallamiento de hilos de cobre	2)
Medición del voltaje superficial	Cables enterrados directamente	3)

1) Reflectometría en el dominio del tiempo (TDR)

Equipo

TDR.

Conexión

Revise la Figura 7.12.

Aplicabilidad

No se puede efectuar esta prueba mientras no se adquiriera el equipo necesario, por ejemplo, el recomendado en la sección 4.5.2.

Consideraciones previas

El cable bajo prueba debe estar desenergizado [19].

La corrosión del neutro puede ser localizada siempre que varios cables neutrales estén rotos en el mismo punto [19].

Trazas de corrosión

Si la señal TDR encuentra el extremo de un cable sin conexión a tierra o halla una rotura en el conductor o en el neutro, la traza corresponderá a un pulso de reflexión positiva muy grande con casi toda la energía reflejada (revise la Figura 7.16) [19].

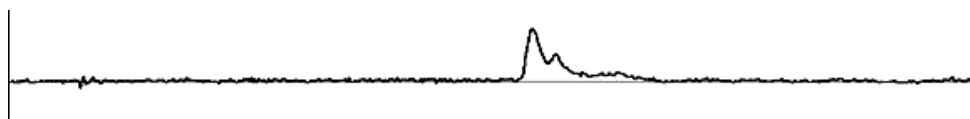


Figura 7.16. Traza TDR que indica corrosión neutra en un mismo punto [19].

Si los hilos neutros están cortados individualmente y distribuidos a lo largo de la longitud del cable, no se producen reflejos que puedan reconocerse. El extremo de la reflexión del cable se vuelve más pequeño debido a la pérdida de energía en cada rotura (revise la Figura 7.17) [19].

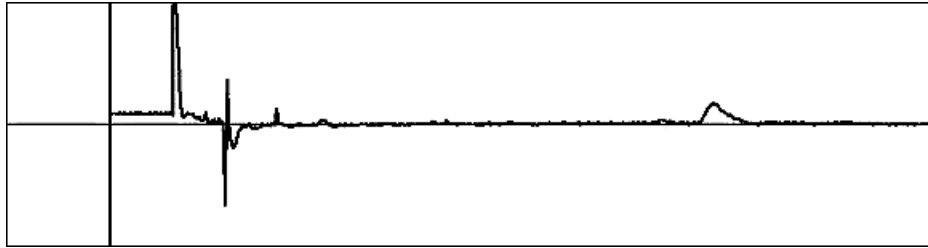


Figura 7.17. Traza TDR que indica corrosión distribuida [19].

Porcentaje del neutro roto

La Tabla 7.34 muestra los niveles de corrosión en función del tamaño de la reflexión del pulso.

Tabla 7.34. Categorías de corrosión [19].

	Alambres rotos	Tamaño de la reflexión
Nivel 1	0% a 25%	Ningún reflejo reconocible.
Nivel 2	25% a 50%	Reconocible pero más pequeño que un empalme.
Nivel 3	50% a 75%	Más grande que un empalme, pero más pequeño que el extremo del cable.
Nivel 4	75% a 100%	Más grande que el final de la reflexión del cable.

2) Medición de la resistencia del neutro concéntrico

Instrumentos de medición

La Tabla 7.35 indica la función de los equipos requeridos para efectuar la prueba.

Tabla 7.35. Equipo de medición para el método de la resistencia neutra [19].

Equipo	Función	Consideraciones
Fuente de 60 Hz	Alimenta el circuito	Si el cable neutro está conectado a la tierra del sistema, es suficiente utilizar una fuente de aproximadamente 30 A para medir la mayoría de los neutros.
Transformador de corriente	Mide la corriente en el neutro.	Utilizado cuando el neutro permanece conectado.
Cable sensor	Mide el voltaje en los terminales	Compensa la resistencia de los cables de la fuente de alimentación.

Equipo	Función	Consideraciones
	neutrales.	

Conexión

La Figura 7.18 muestra la conexión de los instrumentos de medición y el circuito equivalente si no se desconecta el cable neutro de la tierra del sistema.

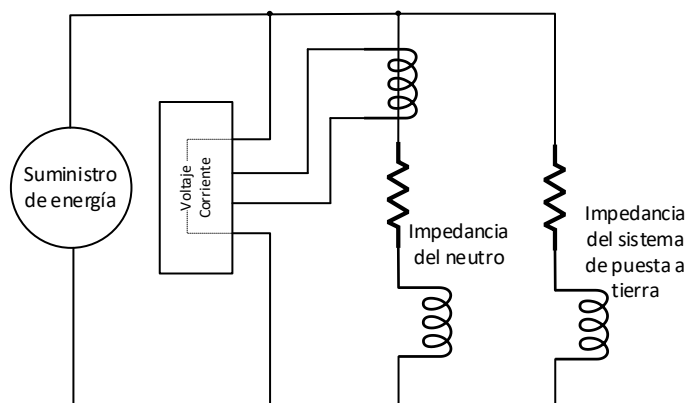


Figura 7.18. Configuración típica para la técnica de medición de resistencia [19].

Aplicabilidad

No se puede efectuar esta prueba mientras no se adquiera el equipo necesario, revise la sección 4.5.4.

Consideraciones previas

Las resistencias por 30 m de longitud de cable producen números de magnitud conveniente.

Este método no requiere que el cable bajo prueba esté desenergizado.

Necesita conocer la resistencia del neutro de una hebra dada por el fabricante.

Método

Pase una corriente a través del cable neutro.

Mida la corriente, el voltaje y el ángulo de fase en el neutro.

Nota: El ángulo de fase debe considerarse debido a la inductancia causada por la disposición helicoidal de los hilos neutrales.

Calcule la resistencia del neutro con la ecuación (2.14).

Calcule la resistencia teórica del neutro cuando es nuevo con la ecuación (2.15).

Determine el porcentaje de hebras intactas mediante la ecuación (2.16).

3) Medición del voltaje superficial

Equipo

Generador de señales con un rango de frecuencia de 500 Hz a 2000 Hz.

Receptor para localizar la ruta del circuito.

Dos sondas de metal y un voltímetro de frecuencia selectiva (equipo que mide solo la frecuencia inyectada por el generador).

Aplicabilidad

No se puede efectuar esta prueba mientras no se adquiriera el equipo necesario, revise la sección 4.5.4.

Método

Desenergice y aterrice los cables que se van a probar.

Desconecte el conductor de fase, los cables neutrales y la conexión a tierra en ambos extremos del cable bajo prueba.

Ruta del cable

En un cable que no esté bajo prueba, conecte el conductor a tierra en el extremo remoto y aplique una señal en el extremo cercano entre la fase y el neutro del cable.

Rastree la señal por encima del suelo para localizar la ruta del circuito usando el receptor sintonizado a la misma frecuencia (ver Figura 7.19).

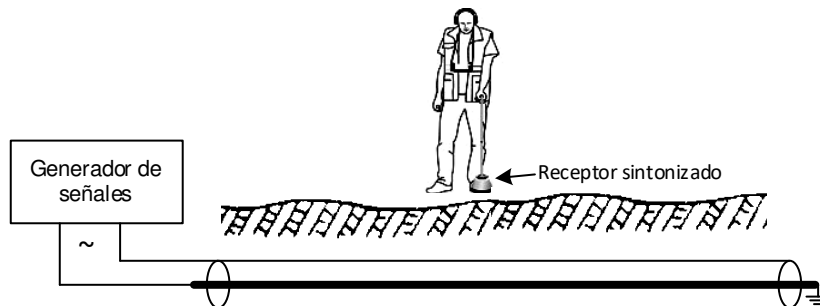


Figura 7.19. Rastreo de la ruta del cable [Elaboración Propia].

Medición del voltaje superficial

En el cable bajo prueba:

En el extremo remoto, instale un puente entre el conductor de fase y los cables neutros.

En el extremo cercano, aplique una señal eléctrica alterna comprendida en el rango de frecuencia de 500 Hz a 2000 Hz.

Mientras el generador inyecta la señal al cable, inserte dos sondas de metal en el suelo paralelas a la trayectoria del cable. Las sondas se entierran de 75

mm a 100 mm por debajo de la superficie con una separación predeterminada (normalmente alrededor de 30 m), ver Figura 7.20.

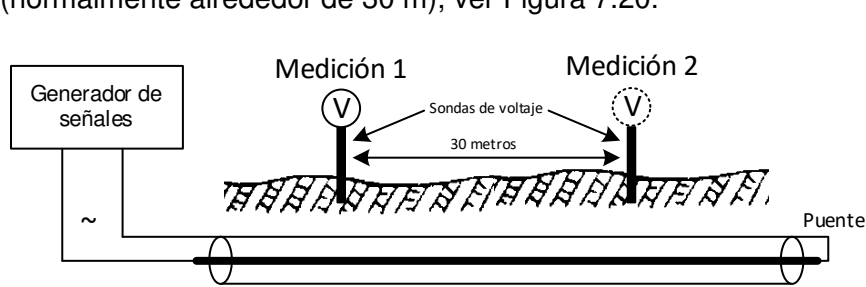


Figura 7.20. Medición del voltaje entre las sondas [Elaboración Propia].

Utilice el voltímetro de frecuencia selectiva para medir el potencial entre las sondas.

Ubicación de la zona corroída

La magnitud del voltaje diferencial entre las ubicaciones de las sondas se correlaciona con el grado de corrosión o el número de cables rotos. Dos órdenes de magnitud o más indica una corrosión significativa o varios hilos neutrales rotos.

Nota: Identifique la ubicación del problema reduciendo el espacio entre las sondas y monitoreando los voltajes en diferentes ubicaciones.

7. Medición de la resistencia del conductor y blindaje metálico (Prueba de Continuidad)

A. Objetivo

Medir la resistencia del conductor en bucle (conductor/conductor o típicamente conductor/blindaje metálico) [14].

B. Norma

El procedimiento de este ensayo está estructurado según los requerimientos de la norma IEEE Std 1234TM-2019.

C. Equipo de prueba

Óhmetro: desde 1.5 VDC hasta 9 VDC.

D. Aplicabilidad

Este ensayo es aplicable con el equipo disponible en la EEQ.

E. Conexión

Cortocircuite el extremo remoto del sistema de cable. Luego conecte los terminales del óhmetro como se indican en la Figura 7.21.

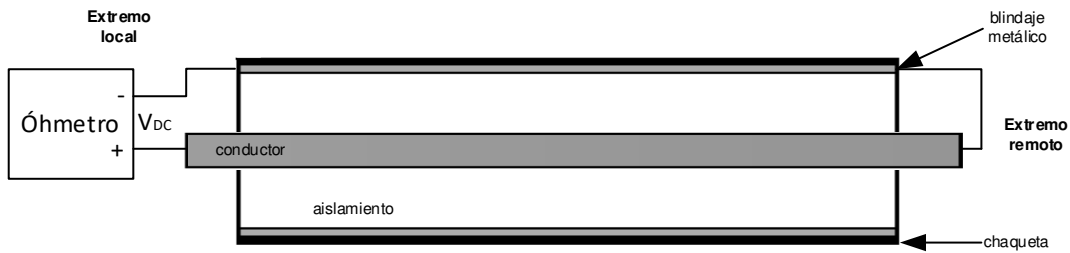


Figura 7.21. Conexión para detectar continuidad [14].

Nota: Las conexiones deben ser lo más cortas posibles y de baja resistencia.

F. Procedimiento

En el extremo local:

Desconecte la tierra de la fase y del apantallamiento del cable bajo prueba.

Conecte los terminales del óhmetro al cable y mida la resistencia.

G. Interpretación de resultados

La Tabla 7.36 muestra los problemas del conductor en función de la resistencia medida.

Tabla 7.36. Diagnóstico de fallas a partir de las mediciones de continuidad [14].

Resistencia	Evaluación	Método para ubicar la falla
$R > 1 \text{ M}\Omega$	Conductor abierto Empalme o terminación separados Falta el escudo metálico o la chaqueta.	TDR, revise el numeral 5.1.
$10 \Omega < R < 1 \text{ M}\Omega$	Fallo en serie de alta resistencia	Utilice una técnica de localización de fallas de alto voltaje, revise el numeral 5.2.
	Corrosión del escudo metálico Terminación o empalme corroídos Conductor corroído o quemado Sección de cable quemada y empapada de agua	TDR, revise el numeral 1) de los métodos para detectar corrosión en el blindaje metálico.

Resistencia	Evaluación	Método para ubicar la falla
R < 10 Ω	El cable es continuo	Si es posible, confirme la continuidad con un TDR.

5) Prueba de chaqueta

A. Norma

Los lineamientos de esta prueba se obtuvieron de la norma IEC 60229-2007.

B. Objetivo

Probar la chaqueta en un cable instalado [20].

C. Equipo de prueba

Fuente de alto voltaje DC.

D. Aplicabilidad

Este ensayo es aplicable con el equipo disponible en la EEQ.

E. Consideraciones previas

Este método es aplicable en cubiertas aplicadas por extrusión.

F. Parámetros de prueba

La Tabla 7.37 muestra el voltaje y duración para un ensayo de chaqueta.

Tabla 7.37. Voltaje y tiempo para prueba de chaqueta [20].

Voltaje de prueba	4 kV _{DC} por milímetro de grosor especificado con un máximo de 10 kV _{DC}
Duración	1 minuto

G. Procedimiento

Conecte los terminales de la fuente DC entre la pantalla del cable y el terreno y aplique el voltaje establecido [20].

H. Criterio de aceptación o rechazo

Si no hay colapso del voltaje durante la prueba pasa, de lo contrario no pasa [20].

ANEXO B. Factores de conversión de resistencia de aislamiento

Nota: Si la temperatura medida está entre los valores establecidos en las tablas, emplee interpolación aplicando una escala logarítmica base 10 al factor multiplicador [45].

Tabla 7.38. Factor de conversión a 20°C [9], [10].

Temperatura		Factor multiplicador	
°C	°F	Aparato que contiene aislamiento de aceite sumergido	Aparato que contiene aislamiento sólido
-10	14	0.125	0.25
-5	23	0.180	0.32
0	32	0.25	0.40
5	41	0.36	0.50
10	50	0.50	0.63
15	59	0.75	0.81
20	68	1.00	1.00
25	77	1.40	1.25
30	86	1.98	1.58
35	95	2.80	2.00
40	104	3.95	2.50
45	113	5.60	3.15
50	122	7.85	3.98
55	131	11.20	5.00
60	140	15.85	6.30
65	149	22.40	7.90
70	158	31.75	10.00
75	167	44.70	12.60
80	176	63.50	15.80
85	185	89.789	20.00
90	194	127.00	25.20
95	203	180.00	31.60

Temperatura		Factor multiplicador	
°C	°F	Aparato que contiene aislamiento de aceite sumergido	Aparato que contiene aislamiento sólido
100	212	254.00	40.00
105	221	359.15	50.40
110	230	509.00	63.20

Tabla 7.39. Factor de conversión a 40°C [9], [10].

Temperatura		Factor multiplicador	
°C	°F	Aparato que contiene aislamiento de aceite sumergido	Aparato que contiene aislamiento sólido
-10	14	0.03	0.10
-5	23	0.04	0.13
0	32	0.06	0.16
5	41	0.09	0.20
10	50	0.13	0.25
15	59	0.18	0.31
20	68	0.25	0.40
25	77	0.35	0.50
30	86	0.50	0.63
35	95	0.71	0.79
40	104	1.00	1.00
45	113	1.41	1.26
50	122	2.00	1.59
55	131	2.83	2.00
60	140	4.00	2.52
65	149	5.66	3.17

Temperatura		Factor multiplicador	
°C	°F	Aparato que contiene aislamiento de aceite sumergido	Aparato que contiene aislamiento sólido
70	158	8.00	4.00
75	167	11.31	5.04
80	176	16.00	6.35
85	185	22.63	8.00
90	194	32.00	10.08
95	203	45.25	12.70
100	212	64.00	16.00
105	221	90.51	20.16
110	230	128.00	25.40

ANEXO C. Radios mínimos de curvatura para el cable de alimentación

A continuación, se muestra el radio mínimo de curvatura al que pueden doblarse los cables aislados para entrenamiento permanente.

Tabla 7.40. Cables de uno y varios conductores con armadura entrelazada, chaqueta de aluminio liso o corrugado o de plomo [9], [10].

Tipo de Cable	Diámetro total del cable					
	(in) 0.75 y menos	(mm) 190 y menos	(in) 0.76 a 1.50	(mm) 191 a 381	(in) 1.51 y más grande	(mm) 382 y más grande
	Radio de curvatura mínimo como múltiplo del diámetro del cable					
Cubierta de aluminio lisa simple. Conductor no blindado, conductor múltiple o multiplexado blindados individualmente	10		12		15	
Conductor único blindado	12		12		15	
Conductor múltiple o multiplexado con escudo general	12		12		15	
Armadura entrelazada o chaqueta de aluminio corrugado sin blindaje.	7		7		7	
Conductor múltiple blindados individualmente	12/7 ^a		12/7 ^a		12/7 ^a	
Conductor múltiple	12		12		12	

con blindaje general			
Cubierta de plomo	12	12	12
^a 12 x diámetro de conductor blindado individual, o 7 x diámetro total del cable, el que sea mayor.			

Cables con chaqueta metálica y armadura entrelazada

- Revise la Tabla 7.40 para cables con armadura entrelazada, cubierta de aluminio liso o corrugado o cubierta de plomo.

Cables blindados con cinta plana o con alambre

- El radio de curvatura mínimo para todos los cables blindados con cinta plana o con alambre es doce veces el diámetro total del cable.

Cables blindados con cinta

- El radio de curvatura mínimo para cables blindados con cinta indicado anteriormente se aplica a los cables con cinta plana o corrugada aplicada helicoidalmente o cables blindados con cinta corrugada aplicada longitudinalmente.
- El radio de curvatura mínimo para un cable de un solo conductor es doce veces el diámetro total.
- Para cables de conductores múltiples o de conductor simple multiplexado que tienen conductores blindados encintados individualmente, el radio mínimo de curvatura es doce veces el diámetro de los conductores individuales o siete veces el diámetro total, el que sea mayor.
- Para cables de conductores múltiples que tienen un blindaje de cinta sobre el conjunto, el radio mínimo de curvatura es doce veces el diámetro total del cable.

Cables blindados con alambres

- El radio de curvatura mínimo para un cable de un solo conductor es ocho veces el diámetro total.
- Para cables de conductores múltiples o conductore simple multiplexado que tienen conductores individuales blindados con alambres, el radio mínimo de curvatura es ocho veces el diámetro de los conductores individuales o cinco veces el diámetro total, el que sea mayor.
- Para cables de varios conductores que tienen un blindaje con alambres sobre el conjunto, el radio mínimo de curvatura es ocho veces el diámetro total del cable.

ORDEN DE EMPASTADO