

UCUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Eléctrica

Análisis de los aspectos técnicos de aplicación y ensayos previos a la
puesta en servicio de instalaciones eléctricas subterráneas de la Empresa
Eléctrica Azogues C. A.

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero
Eléctrico

Autores:

Marjuri Gabriela Chacon Campoverde

CI: 1600352601

marjuri.chacon@gmail.com

Víctor Israel Zhigue Tene

CI: 1105871089

vzhigue@gmail.com

Director:

Ing. Walter Javier Dután Amay, Mgtr.

CI: 0301522892

Cuenca, Ecuador

05-agosto-2022

Resumen:

La correcta operación de los sistemas eléctricos subterráneos a lo largo de su vida útil, depende en gran parte de las pruebas de campo de instalación, aceptación y mantenimiento. Las pruebas para la aceptación y puesta en servicio de los sistemas eléctricos subterráneos en la Empresa Eléctrica Azogues C.A, se han desarrollado mediante diversos criterios técnicos, que se analizan en el presente trabajo. Se lleva a cabo la descripción de las características de los cables empleados en sistemas de distribución, aspectos constructivos, tipos de fallas; y la revisión de normativas, guías y datos técnicos de cables. Se presentan los criterios para la prueba de resistencia de aislamiento en cables, con esta información se desarrolla el análisis de los datos recopilados por la EEACA. Los resultados de las pruebas son contrastados con los valores referenciales de normas IEEE, ANSI/NETA. Se elabora un manual para la ejecución de pruebas de aceptación para cables (resistencia de aislamiento), además se presentan las conclusiones y recomendaciones acorde a los resultados del análisis.

Palabras claves: Resistencia de aislamiento. Sistemas subterráneos. Cables aislados para medio voltaje. IEEE Std. 400-2012. ANSI/NETA ATS-2017.

Abstract:

The correct operation of underground electrical systems throughout their useful life depends largely on the installation, acceptance and maintenance field tests. The tests for the acceptance and commissioning of underground electrical systems in Empresa Eléctrica Azogues C.A., have been developed by means of different technical criteria, which are analyzed in this work. A description of the characteristics of the cables used in distribution systems, constructive aspects, types of failures, and the review of regulations, guides and technical data of cables are carried out. The criteria for testing insulation resistance in cables are presented, and with this information, the analysis of the data collected by EEACA is developed. The results of the tests are contrasted with the reference values of IEEE, ANSI/NETA standards. A manual is prepared for the execution of acceptance tests for cables (insulation resistance), and conclusions and recommendations are presented according to the results of the analysis.

Keywords: Insulation resistance. Underground systems. Medium voltage insulated cables. IEEE Std. 400-2012. ANSI/NETA ATS-2017.

Índice del Trabajo

Capítulo 1: Planteamiento del problema.....	19
1.1. Introducción.....	19
1.2. Justificación.....	20
1.3. Alcance	21
1.4. Objetivos	22
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	22
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	22
Capítulo 2: Características de los sistemas subterráneos, cables y accesorios	24
2.1. Sistemas subterráneos	24
2.1.1. <i>Definición</i>	24
2.1.2. <i>Ventajas de sistemas subterráneos</i>	24
2.1.3. <i>Sistemas subterráneos en Ecuador</i>	26
2.2. Componentes de un sistema subterráneo	28
2.2.1. <i>Cable subterráneo</i>	28
2.2.2. <i>Equipos de pedestal</i>	29
2.2.3. <i>Terminaciones y empalmes de cables</i>	31
2.2.4. <i>Descargadores de sobretensiones y puesta a tierra</i>	34
2.2.5. <i>Ductos, pozos, tapas y cámaras eléctricas</i>	36
2.3. Cable subterráneo	41
2.3.1. <i>Características principales de cables</i>	41

2.3.2.	<i>Tipos de cables</i>	47
2.3.3.	<i>Cables utilizados en la EEACA</i>	52
2.4.	<i>Accesorios</i>	54
2.4.1.	<i>Accesorios para media tensión</i>	54
2.4.2.	<i>Accesorios para baja tensión</i>	62
Capítulo 3: Análisis de fallas en cables subterráneos		65
3.1.	<i>Tipos de fallas</i>	65
3.1.1.	<i>Fallas en circuito abierto</i>	65
3.1.2.	<i>Fallas en circuito cerrado</i>	66
3.2.	<i>Causas más comunes de fallas</i>	66
3.2.1.	<i>Causas generales</i>	66
3.2.2.	<i>Causas directas</i>	67
3.2.3.	<i>Causas indirectas</i>	68
3.2.4.	<i>Causas desconocidas</i>	69
3.3.	<i>Factores de degradación</i>	69
3.3.1.	<i>Estrés térmico</i>	70
3.3.2.	<i>Estrés eléctrico</i>	70
3.3.3.	<i>Arborescencias de agua</i>	70
3.3.4.	<i>Factores químicos</i>	71
3.3.5.	<i>Corrosión de la pantalla metálica</i>	71
3.3.6.	<i>Estrés eléctrico en terminales</i>	71
3.4.	<i>Fallas más comunes en cables</i>	71

3.4.1.	Descripción general.....	71
3.4.2.	Falla de baja resistencia.....	72
3.4.3.	<i>Falla de alta resistencia</i>	73
3.4.4.	<i>Falla intermitente</i>	73
3.4.5.	<i>Cable cortado</i>	74
3.5.	Métodos para prevención y detección de fallos.....	75
3.5.1.	<i>Generalidades</i>	75
3.5.2.	<i>Descargas parciales</i>	75
3.5.3.	<i>Microscopia digital 3D</i>	76
3.5.4.	<i>Rayos X</i>	77
3.5.5.	<i>Very low frequency</i>	78
Capítulo 4:	Pruebas en cables de distribución subterránea.....	80
4.1.	Pruebas de campo.....	80
4.1.1.	<i>Normativa IEEE Std. 400-2012</i>	80
4.1.2.	<i>Norma ANSI/NETA ATS-2017</i>	89
4.2.	Descripción general y métodos de pruebas.....	100
4.2.1.	<i>Tipos de métodos de prueba</i>	100
4.3.	Pruebas de voltaje DC vs pruebas de voltaje AC.....	103
4.3.1.	<i>Pruebas de voltaje DC</i>	103
4.3.2.	<i>Ventajas y Desventajas de Pruebas con DC</i>	104
4.3.3.	<i>Método de Prueba con DC</i>	105
4.3.4.	<i>Pruebas de Voltaje AC</i>	107

4.4.	Equipo de Pruebas: AEMC Megóhmetro 10 kV - C.A 6550.....	108
4.4.1.	<i>Tipo de Mediciones.</i>	109
4.4.2.	<i>Tipo de conexión del equipo.</i>	110
4.4.3.	<i>Relaciones de Calidad del asilamiento DAR, PI.....</i>	111
4.4.4.	<i>Función, Ingreso de Temperatura.....</i>	115
4.4.5.	<i>Tecla GRAPH.</i>	116
4.4.6.	<i>Software de Transferencia de Datos.</i>	118
4.4.7.	<i>Guía de Medición de Aislamiento.</i>	119
	Capítulo 5: Resultados y Conclusiones	123
5.1.	Resultados Obtenidos.	123
5.1.1.	<i>Análisis de normativas.</i>	123
5.1.2.	<i>Normativas Aplicadas.....</i>	124
5.1.3.	<i>Análisis de pruebas ejecutadas.</i>	124
5.1.4.	<i>Manual de Desarrollo de la Prueba de Aceptación para Cables (Resistencia de Aislamiento).</i>	129
5.2.	Conclusiones.....	133
5.3.	Recomendaciones	134
	Bibliografía.....	136

Índice de Figuras

Figura 2. 1 <i>Área de concesión de la Empresa Eléctrica Azogues C.A</i>	27
Figura 2. 2 <i>Componentes del sistema subterráneo</i>	28
Figura 2. 3 <i>Detalle constructivo de empalmes encintados en cable monofásico con aislamiento extruido</i>	33
Figura 2. 4 <i>Detalle constructivo de empalmes encintados en cable monofásico con aislamiento extruido</i>	34
Figura 2. 5 <i>Partes de un descargador de sobretensión, conector tipo codo apartarrayos Chardon</i>	35
Figura 2. 6 <i>Soporte plano para montaje de equipos</i>	38
Figura 2. 7 <i>Principales tipos de pozos</i>	39
Figura 2. 8 <i>Tapa de hormigón y marco de acero para pozo</i>	40
Figura 2. 9 <i>Formación de una superficie equipotencial uniforme a través de una pantalla semiconductor</i>	45
Figura 2. 10 <i>Pantalla sobre aislamiento</i>	46
Figura 2. 11 <i>Cable subterráneo de media tensión con apantallamiento en neutro concéntrico y aislamiento XLPE</i>	49
Figura 2. 12 <i>Cable subterráneo de media tensión con apantallamiento en neutro concéntrico y aislamiento TRXLPE</i>	50
Figura 2. 13 <i>Cable Cu XLPE 2 AWG – Centelsa</i>	53
Figura 2. 14 <i>Cable Cu XLPE 1/0 AWG - Centelsa</i>	53
Figura 2. 15 <i>Cable Cu XLPE 2/0 AWG - Centelsa</i>	53

Figura 2. 16 Terminal premoldeado para uso exterior (A) e interior (B): tipo contráctil en frío clase 25 Kv.....	56
Figura 2. 17 Empalme premoldeado de una pieza - partes.	57
Figura 2. 18 Empalme premoldeado de tres piezas - partes.	58
Figura 2. 19 Barras premoldeadas de conectores múltiples - 5 vías - partes.....	59
Figura 2. 20 Bushing de parqueo aislado.	60
Figura 2. 21 Conector tipo codo Chardon – partes.	61
Figura 2. 22 Conector de operación sin carga cuerpo en T - clase 35 kV – partes.....	62
Figura 2. 23 Barras de sumergibles, baja tensión.	63
Figura 2. 24 Barras de distribución sumergibles – RG distribuciones S.A.	64
Figura 3. 1 Falla en circuito abierto.....	65
Figura 3. 2 Falla en circuito cerrado.....	66
Figura 3. 3 Ingreso de humedad en el cable.	69
Figura 3. 4 Disposición inadecuada en ductos.	70
Figura 3. 5 Circuito equivalente de falla.....	71
Figura 3. 6 Tipos de fallas.	72
Figura 3. 7 Falla de baja resistencia.	72
Figura 3. 8 Falla de alta resistencia.	73
Figura 3. 9 Falla intermitente.....	74
Figura 3. 10 Cable cortado.....	74
Figura 3. 11 Descarga parcial en capa semiconductor externa.	76

Figura 3. 12 <i>Falla vista desde microscopia digital 3D.</i>	76
Figura 3. 13 <i>Rayos X sobre cable de 110kV.</i>	78
Figura 3. 14 <i>Ensayo VLF en cables.</i>	79
Figura 4. 1 <i>Medición de aislamiento con tensión fija.</i>	110
Figura 4. 2 <i>Conexión prueba con cable.</i>	111
Figura 4. 3 <i>Corrientes en la prueba de resistencia de aislamiento.</i>	112
Figura 4. 4 <i>Resultado de medición del DAR/PI</i>	114
Figura 4. 5 <i>Ingreso de valores para la tecla TEMP.</i>	116
Figura 4. 6 <i>Gráfica obtenidas por C.A 6550.</i>	117
Figura 4. 7 <i>Ampliar la gráfica obtenida.</i>	117
Figura 4. 8 <i>Curva de la corriente en función del tiempo.</i>	118
Figura 4. 9 <i>Curva de la corriente en función de la tensión.</i>	118
Figura 4. 10 <i>Esquema del terminal de guarda.</i>	121
Figura 5. 1 <i>Histograma de frecuencia.</i>	127

Índice de Tablas

Tabla 4. 1	<i>Valores de prueba de resistencia de aislamiento – Aparatos y sistemas eléctricos distintos de las máquinas rotativas.</i>	96
Tabla 4. 2	<i>Radios mínimos para cables de alimentación - Cables de una o varios conductores con armadura entrelazada, cubierta de aluminio liso o corrugado o cubierta de plomo.</i>	97
Tabla 4. 3	<i>Factores de conversión de la resistencia de aislamiento (20°C).</i>	98
Tabla 4. 4	<i>Factores de conversión de la resistencia de aislamiento (40°C).</i>	99
Tabla 4. 5	<i>Valores y condiciones del DAR.</i>	113
Tabla 4. 6	<i>Valores y condiciones del PI.</i>	114
Tabla 4. 7	<i>Valores de tensiones aplicables durante la prueba de resistencia de aislamiento.</i>	122
Tabla 5. 1	<i>Reportes de pruebas - EEACA - Valores de resistencia de aislamientos.</i>	125
Tabla 5. 2	<i>Valores de frecuencia por rango.</i>	126

Apéndices

Apéndice A. Datos técnicos del cable XLPE Cu 2 AWG 25 kV 133%.	143
Apéndice B. Datos técnicos del cable XLPE Cu 1/0 AWG 25 kV 133%.	144
Apéndice C. Datos técnicos del cable XLPE Cu 2/0 AWG 25 kV 133%.	145
Apéndice D.1. Modelo de las pruebas en red subterránea Azogues.	146
Apéndice D.2. Modelo de las pruebas en red subterránea Azogues.	147
Apéndice E.1. Informes de medición de resistencia de aislamiento – EEACA.	148
Apéndice E.2. Informes de medición de resistencia de aislamiento – EEACA.	149
Apéndice E.3. Informes de medición de resistencia de aislamiento – EEACA.	150
Apéndice E.4. Informes de medición de resistencia de aislamiento – EEACA.	151
Apéndice E.5. Informes de medición de resistencia de aislamiento – EEACA.	152
Apéndice E.6. Informes de medición de resistencia de aislamiento – EEACA.	153

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Marjuri Gabriela Chacon Campoverde en calidad de autora y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis de los aspectos técnicos de aplicación y ensayos previos a la puesta en servicio en instalaciones eléctricas subterráneas de la Empresa Eléctrica Azogues C.A.", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 05 de agosto de 2022



Marjuri Gabriela Chacon Campoverde

C.I: 1600352601

Cláusula de Propiedad Intelectual

Marjuri Gabriela Chacón Campoverde, autora del trabajo de titulación "Análisis de los aspectos técnicos de aplicación y ensayos previos a la puesta en servicio en instalaciones eléctricas subterráneas de la Empresa Eléctrica Azogues C.A.", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 05 de agosto de 2022



Marjuri Gabriela Chacon Campoverde

C.I: 1600352601

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Víctor Israel Zhigue Tene en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Análisis de los aspectos técnicos de aplicación y ensayos previos a la puesta en servicio en instalaciones eléctricas subterráneas de la Empresa Eléctrica Azogues C.A.", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 05 de agosto de 2022



Víctor Israel Zhigue Tene

C.I: 1105871089

Cláusula de Propiedad Intelectual

Víctor Israel Zhigue Tene, autora del trabajo de titulación "Análisis de los aspectos técnicos de aplicación y ensayos previos a la puesta en servicio en instalaciones eléctricas subterráneas de la Empresa Eléctrica Azogues C.A.", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 05 de agosto de 2022



Víctor Israel Zhigue Tene

C.I: 1105871089

AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestros más sinceros agradecimientos a:

La Universidad de Cuenca, en especial a la Facultad de Ingeniería y sus docentes por abrirnos sus puertas para nuestra formación profesional y humana.

Al Ing. Juan Sanango Fernández, por brindarnos su amistad, enseñanzas y experiencias, a lo largo de este camino. Siempre dispuesto a brindar un consejo y una mano amiga.

A nuestro director Ing. Walter Javier Dután por el tiempo, paciencia y enseñanzas aportadas al desarrollo de este trabajo de titulación.

A amigos, amigas y familiares que han formado parte fundamental de esta etapa de crecimiento personal y académico.

Marjuri Chacon Campoverde

Víctor Zhigue Tene

DEDICATORIAS

A mi querida madre Magdalena y a mi querido padre José quiénes con su amor y apoyo incondicional me han guiado y acompañado en mi vida.

A mi hermano Yeltsin por ser una de las razones para esforzarme y seguir luchando cada día.

A mis amigos y amigas que me han brindado su cariño, conocimiento y guía.

Marjuri Chacon Campoverde

A mi madre Olga a mi padre Emilio por ser fuentes de inspiración en cada momento de mi vida y un apoyo incondicional.

A mis hermanos Carlos y Leonardo por brindarme su confianza y amistad en todo mi camino académico y humano.

A mis amistades.

Víctor Zhigue Tene

Capítulo 1: Planteamiento del problema

1.1. Introducción

Los sistemas de distribución primaria y secundaria pueden ser construidos de forma aérea o subterránea. En todas las áreas residenciales, rurales, comerciales de baja densidad e industriales predomina la construcción aérea. En áreas comerciales de alta densidad de carga, predominan los sistemas subterráneos. En los últimos años, se ha prestado más atención a la construcción subterránea especialmente en nuevas áreas residenciales e industriales.

En el Ecuador, la Ley Orgánica del Servicio Público De Energía Eléctrica, en su artículo 65 establece que “Las redes eléctricas para atender el servicio eléctrico en lotizaciones, urbanizaciones y edificios de propiedad horizontal, deberán ser subterráneas”.

La “Comisión de Homologación de Unidades de Propiedad de Redes Subterráneas (CHUPRS)” ha estandarizado y homologado los materiales y equipos que conforman las Unidades Constructivas; y definido un sumario de especificaciones técnicas de los materiales y equipos eléctricos de mayor uso en el sistema de distribución de redes subterráneas.

En el presente trabajo se realiza un análisis de los requerimientos y criterios de aceptación y puesta en servicio de las instalaciones de sistemas subterráneos en la Empresa Eléctrica Azogues C. A.

Además, se revisan las principales características de cables usados en este tipo de sistemas, especialmente en distribución, enfocándose también en los aspectos constructivos de las instalaciones eléctricas. Se examinan las normativas que rigen las pruebas para las instalaciones con cables subterráneos y sus accesorios, y finalmente

se presentan recomendaciones basadas en criterios técnicos para llevar a cabo las pruebas de recepción de instalaciones subterráneas.

Este trabajo de titulación consta de cinco capítulos. En el Capítulo 1, se presenta el planteamiento del problema, antecedentes, justificación y objetivos. En el Capítulo 2, se exponen las características de los sistemas subterráneos, cables y accesorios, para sistemas de medio voltaje en distribución subterránea. En el Capítulo 3 se analizan los tipos generales de fallas en cables subterráneos. El Capítulo 4 comprende las pruebas en cables de distribución subterránea y las normativas nacionales e internacionales con base en los criterios de la empresa distribuidora para la aceptación y puesta en servicio de instalaciones subterráneas. Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan los resultados, conclusiones y recomendaciones del presente trabajo de titulación.

1.2. Justificación

En la actualidad un porcentaje considerable de los nuevos sistemas de distribución son construidos de manera subterránea; por lo tanto, es necesario el estudio de sus características y normativa que regulan la construcción, funcionamiento y operatividad de los nuevos sistemas implementados.

Las razones principales que impulsan la implementación de los circuitos subterráneos son la estética, seguridad y dificultad de suplir el crecimiento de la demanda en áreas de alta densidad de carga debido a las limitaciones que presentan las redes aéreas. Esta situación se presenta particularmente en áreas patrimoniales, históricas, residenciales, parques, áreas de vida silvestre y áreas escénicas; donde el impacto visual es un factor importante.

Las principales aplicaciones de los circuitos subterráneos son la distribución residencial subterránea, ramales o anillos subterráneos que abastecen barrios residenciales o centros de alta densidad de carga. En las salidas de alimentadores de

subestaciones y conexiones a transformadores de tipo pedestal para clientes industriales, comerciales, urbanizaciones o lotizaciones se construyen instalaciones de tipo subterráneo. Otros usos son cruces de carreteras o cruces de líneas de transmisión.

La construcción subterránea tiene un nivel de inversión elevado, en general, no es posible establecer un valor fijo, pues los costos varían ampliamente en función de las condiciones de la instalación particular. Sin embargo, la tecnología en cables, conectores y equipos de instalación han avanzado considerablemente, haciendo que las instalaciones de distribución subterránea sean más confiables, rápidas y menos costosas.

Los cables normalmente se instalan en bancos de ductos revestidos de hormigón o con material de relleno, debajo de calles, aceras o callejones. Las canalizaciones pueden ser secciones de hormigón prefabricado o PVC revestido de hormigón. Los bancos de ductos son las estructuras para los cables primarios y secundarios. Los pozos distribuidos en el circuito permiten el acceso a los cables para su conexión y derivación. Los transformadores se encuentran en cabinas a nivel o subterráneas, pero también en lugares adecuados o accesibles de las edificaciones existentes.

Debido a la naturaleza de la construcción civil de las instalaciones subterráneas, los fallos, averías o daños en un sistema subterráneo se tornan más complejos de localizar, por ende, se requiere un tiempo medio de reparación mucho mayor en comparación a un sistema aéreo convencional.

1.3. Alcance

En el desarrollo de este trabajo de titulación se examinan las características de los cables y accesorios que se emplean en los sistemas subterráneos, así como las fallas más comunes que se presentan en los cables durante su transporte, instalación y

funcionamiento. Se interpretan las pruebas de aceptación y puesta en servicio de las instalaciones eléctricas subterráneas.

Se lleva a cabo el análisis de las normativas para las pruebas de aceptación de instalaciones subterráneas de los cables y sus accesorios; además, se revisan las hojas técnicas de los aspectos constructivos de cables y terminaciones que se emplean los sistemas eléctricos subterráneos, con el fin de llegar a un consenso de los valores de resistencia de aislamiento que deben cumplir los cables empleados en los circuitos subterráneos.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones respecto a las pruebas de aceptación y recepción de los cables subterráneos, además se proporciona un manual para el desarrollo de las pruebas de aceptación; tanto del proceso para las pruebas como los niveles de aislamiento aceptados de los circuitos subterráneos.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Analizar los requerimientos para la aceptación y puesta en servicio de las instalaciones que involucran cables y sus accesorios en distribución subterránea en la Empresa Eléctrica Azogues C. A.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar las características de los cables para instalaciones en sistemas de distribución.
- Analizar los aspectos constructivos de instalaciones con cables subterráneos y sus accesorios.
- Analizar los requerimientos para pruebas y aceptación de instalaciones con cables subterráneos y sus accesorios en la Empresa Eléctrica Azogues C. A.

- Presentar los resultados y recomendaciones respecto a las pruebas para recepción de instalaciones subterráneas.

Capítulo 2: Características de los sistemas subterráneos, cables y accesorios

2.1. Sistemas subterráneos

El sistema de distribución está constituido por el conjunto de líneas troncales, ramales, seccionamientos y protecciones que alimentan a los transformadores de distribución y redes secundarias. Pueden estar instaladas en configuración aérea y subterránea. (Poveda, 2004)

2.1.1. Definición

Las redes subterráneas, son todas las instalaciones que han sido diseñadas con la finalidad de entregar energía eléctrica directamente a los consumidores, bajo los parámetros adecuados y establecidos en las normativas vigentes tales como: niveles de tensión, frecuencia, confiabilidad y disponibilidad del servicio. Este proceso se lleva a cabo mediante el uso de cables de alta tensión, baja tensión y alumbrado público; los mismos que se instalan en ductos.

Haciendo referencia a transformadores, equipos de seccionamiento y de protección tanto en alta y baja tensión, estos se instalan en cámaras subterráneas o en cubículos superficiales. Todos los equipos instalados bajo estas condiciones deben poseer características especiales para soportar diferentes condiciones a las que serán sometidos, tales como; altas temperaturas, humedad, poca ventilación, etc.

Los cables usados en los sistemas de distribución subterránea poseen un aislamiento especial, tanto para el uso en alta tensión, baja tensión, alumbrado público y acometidas.

2.1.2. Ventajas de sistemas subterráneos

Entre las principales ventajas que los sistemas eléctricos subterráneos brindan para sus usuarios se pueden destacar: ornato, seguridad, capacidad, fallas. (Viteri

Piedra, 1973), en los siguientes párrafos de este apartado se analizarán cada una de ellas de forma general.

Ornato. La importancia del ornato especialmente en áreas céntricas de las ciudades y de nuevos asentamientos humanos como urbanizaciones, es un factor muy relevante a considerar. Al trasladar todas las instalaciones eléctricas de distribución y telecomunicaciones hacia un sistema subterráneo, lejos de la vista de los peatones, el lugar toma una apariencia menos caótica, más transitable y los paisajes del lugar se pueden observar de mejor manera, dejando de lado las redes de cables aéreos que producen una compleja contaminación visual. Razones por las cuales, los entes de control ya sean municipales o gubernamentales exigen la aplicación de sistemas subterráneos en los cascos urbanos y nuevas construcciones.

Seguridad. En sistemas aéreos, los cables y equipos instalados se encuentran a pocos metros de ventanas de edificaciones y personas por lo cual, el riesgo de contacto está presente y se lo considera significativo. Los sistemas subterráneos anulan este factor de riesgo, lo que brinda mayor grado de seguridad, tanto para usuarios comunes evitando accidentes de contacto, como para el personal especializado de mantenimiento. Las recomendaciones para garantizar el nivel de seguridad de las instalaciones se mencionan a continuación:

- Poseer el plano exacto del recorrido de los cables.
- Cumplir la normativa respecto a la profundidad de las canalizaciones y construcción de ductos y pozos.
- Realizar la instalación siguiendo las normativas ya sean nacionales o internacionales de acuerdo con los requerimientos de las empresas distribuidoras.
- Contar con personal debidamente capacitado y entrenado para sistemas subterráneos.

Capacidad. Al usar redes subterráneas la capacidad eléctrica aumenta significativamente, en comparación con las redes aéreas, debido a la facilidad de instalar cables de diámetro mayor y varios circuitos en redes subterráneas. Cuando se usan redes aéreas, el peso de los conductores exige estructuras más robustas y por ende equipos más pesados para suplir a la misma demanda inicial, además de brindar un mal aspecto al entorno, ocupando grandes espacios.

Fallas. La principal causa de la disminución de fallas en los sistemas subterráneos, se debe a que los cables y equipos no se encuentran a la intemperie, esto evita en gran medida que las líneas sufran accidentes por factores externos como caída de objetos sobre los cables y que los equipos sean blancos fáciles de vandalismo o daños por condiciones atmosféricas. En los sistemas subterráneos, las fallas no son tan comunes, la topología de cables enterrados dificulta el acceso a los mismos, y los equipos instalados en cámaras están protegidos de manipulación externa, además la mayoría de ellos cuentan con sistemas contra incendios que no permiten catástrofes mayores. Mejorando la continuidad del servicio brindado por las diferentes empresas distribuidoras.

La contraparte de los sistemas subterráneos es la localización de fallas. y el incremento en los tiempos medios de reparación. Es importante indicar que los valores económicos de implementar un sistema subterráneo son elevados en comparación con sistemas aéreos, por lo que se prefiere sistemas subterráneos para lugares como centros históricos y nuevas urbanizaciones.

2.1.3. Sistemas subterráneos en Ecuador

Algunos de los trabajos académicos desarrollados en el Ecuador en cuanto a sistemas eléctricos subterráneos se mencionan a continuación:

- Homologación de las unidades de propiedad y unidades de construcción del sistema de distribución eléctrica de redes subterráneas.

- Manual de procedimientos para la construcción de las redes eléctricas subterráneas para la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte S.A.
- Proyecto de especificaciones técnicas para el diseño de redes subterráneas de la empresa Eléctrica Regional Centro Sur S.A.
- Manual para la construcción de líneas subterráneas a 69 kV en la provincia del Guayas.
- Análisis descriptivo del soterramiento de las redes de distribución de electricidad en la regeneración urbana del centro histórico de la ciudad de Loja.
- Diseño de redes eléctricas subterráneas para seguridad energética.
- Metodología del diseño de una red en media tensión subterránea, bajo normas NATSIM.
- Manual de redes subterráneas del centro histórico de la ciudad de Cuenca.

La Empresa Eléctrica Azogues es una de las 9 empresas que prestan el servicio público de distribución y comercialización de energía eléctrica, cumpliendo con los requerimientos de calidad de producto y servicio. Su área de concesión consta de $1\,150.21\text{ km}^2$, donde el 53% corresponde al cantón Cañar, el 47% restante pertenece a localidades ubicadas en las provincias de Cañar y Chimborazo (ACR, 2020). Además, tiene como cliente al gran consumidor Unión Cementera Nacional - Guapán. En la figura 2.1 se puede observar el área de servicio de la EEACA.

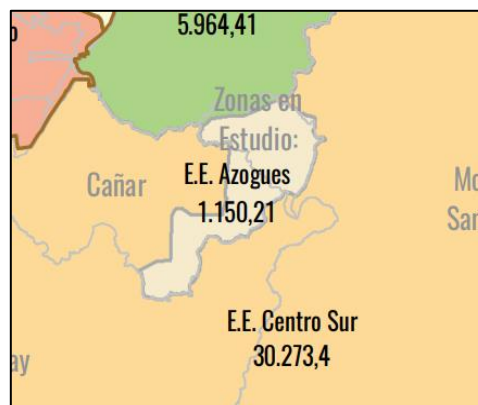


Figura 2. 1 Área de concesión de la Empresa Eléctrica Azogues C.A

Fuente: (ACR, 2020)

2.2. Componentes de un sistema subterráneo

Un sistema de distribución subterránea, está compuesto por diferentes equipos e infraestructura, como se muestra en la figura 2.2. Los principales son:

- Cables subterráneos.
- Equipos tipo pedestal.
- Terminaciones y empalmes de cables.
- Descargadores de sobretensiones y sistemas de puesta a tierra.
- Soportes para equipos.

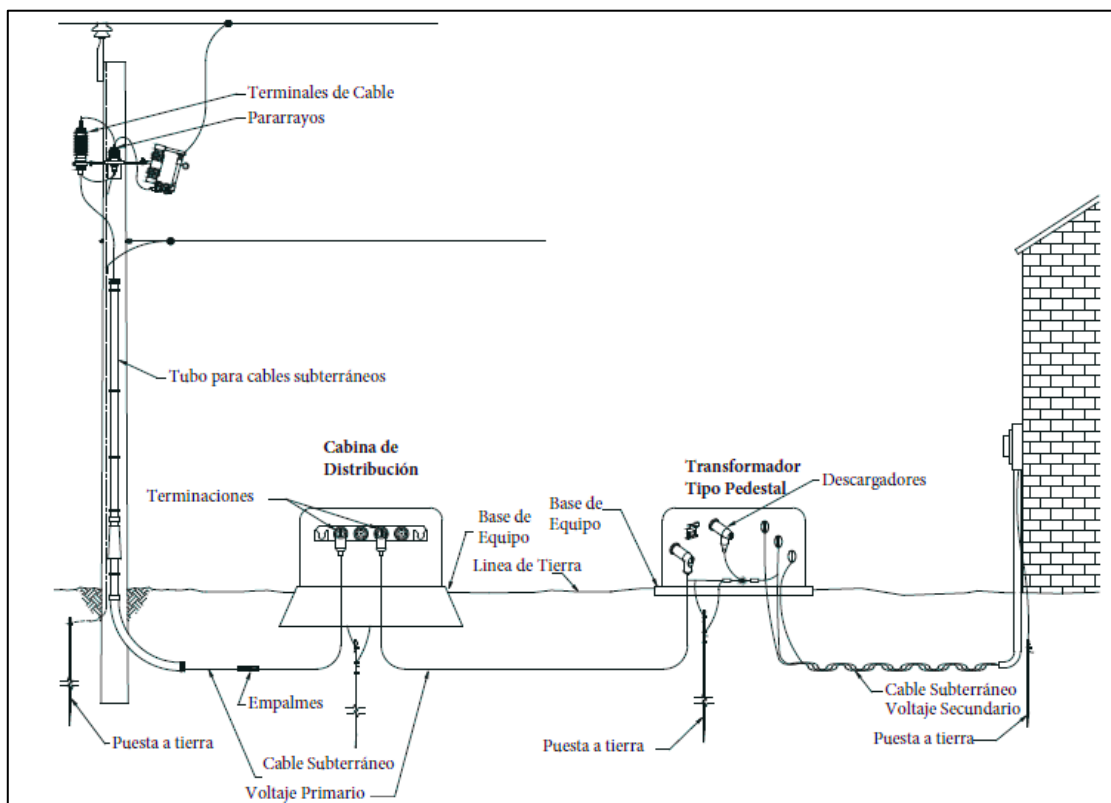


Figura 2. 2 Componentes del sistema subterráneo.

Fuente: (E. Thomas & Bill, 2008, p. 2)

2.2.1. Cable subterráneo

Cables. “Los cables se construyen utilizando una variedad de materiales para los conductores, el aislamiento, el apantallamiento y el blindaje” (N.H Malik et al., 1997, p. 241). Entre los materiales más usados para la fabricación de los conductores se

encuentran el cobre y el aluminio con un nivel de pureza mayor al 99,5 %. Entre los factores determinantes en la selección del material para el conductor se encuentran: la resistividad (ρ), el costo y características técnicas de fabricación y manejo.

2.2.2. Equipos de pedestal

Los diferentes equipos tipo pedestal son: transformadores, dispositivos de protección y conmutación. (E. Thomas & Bill, 2008). Por lo general estos equipos se encuentran ubicados en cámaras eléctricas.

Cámaras eléctricas. Infraestructura diseñada y utilizada para almacenar diferentes componentes eléctricos en su interior, tales como: transformadores, interruptores y equipos de seccionamiento. Para el caso de Ecuador el ente regulador encargado de normar su adecuado diseño y construcción, es el MERNNR (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables) con base en las siguientes normativas, tanto en la obra civil y eléctrica.

Normativa para obra civil:

- INEN: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- ACI: Código de Construcción para Concreto Reforzado.
- ASTM: Organismo Internacional de Normalización de EEUU.
- AASHTO: Sistema de clasificación de suelos.

Normativa para obras eléctricas:

- IEC: Comisión Electrotécnica Internacional.
- ISO: Organización Internacional de Normalización.
- INEN: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- NEC: Código Eléctrico Nacional.
- ASTM: Organismo Internacional de Normalización de EEUU
- ICEA: Asociación de Ingenieros de Cables.

- NEMA: Asociación de Fabricantes Eléctricos.
- NTE-IET: Norma Tecnológica de Edificación.
- IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

Las cámaras eléctricas, deben de cumplir de forma general con especificaciones técnicas como: uso exclusivo de energía eléctrica, resistentes a esfuerzos, ventilación adecuada, resistente al fuego, impermeable y hermética, con acabados adecuados. Además de contar con acceso libre desde la vía pública para el personal calificado. Según el uso de las cámaras se las puede clasificar en:

- Cámaras de transformación.
- Cámaras de seccionamiento.
- Cámaras dobles (seccionamiento y transformación)

Dimensiones de cámaras. “Las dimensiones interiores de las cámaras dependen directamente de la potencia, número de transformadores y de las medidas de los equipos a instalarse, pudiendo variar sus medidas en función de las distancias mínimas de seguridad para evitar accidentes de las personas que trabajen dentro de ésta” (MEER, 2018a, p. 22).

Transformadores. Como parte fundamental de cualquier sistema de corriente alterna están los transformadores. Ellos cambian los niveles de voltaje y corriente del flujo de potencia, manteniendo (excepto por una pequeña parte de pérdidas eléctricas) el mismo flujo de potencia total. (Willis, 2004)

Un transformador es una máquina eléctrica estática la cual mediante inducción electromagnética transforma voltajes y corrientes eléctricas alternas o pulsantes entre dos o más devanados a la misma frecuencia y usualmente a valores diferentes de voltaje y corriente. (NTE INEN 2110:98 Transformadores. Definiciones, 1998)

Para distribución eléctrica subterránea, se emplean transformadores de tipo monofásico o trifásico de acuerdo al circuito, de tipo sumergible o pedestal (Pad

Mounted) debido a la protección integrada en el devanado primario, cuenta con protección contra sobretensiones y pararrayos.

2.2.3. Terminaciones y empalmes de cables

Terminaciones. Las terminaciones están “diseñadas para su uso en recintos sellados en los que la rigidez dieléctrica externa depende de un dieléctrico líquido o gaseoso especial, y en los que la temperatura ambiente del medio que rodea inmediatamente la terminación puede alcanzar los 65 °C” (IEEE Std 48, 2020, p. 11). Estas son empleadas en los sistemas de media y baja tensión para disminuir o controlar los esfuerzos eléctricos que se presentan en el aislamiento del cable, para retirar e interrumpir la pantalla semiconductora, adicionalmente dan al cable una distancia de fuga y hermeticidad extra (Boldrini Valdivia, 2018).

La norma IEEE 48TM – 2020 regula los requisitos y procedimientos de prueba para las terminaciones de cables de corriente alterna (IEEE Std 48, 2020). Las terminaciones se clasifican de acuerdo a lo siguiente:

Terminación de clase 1. Proporciona “Un control de la tensión eléctrica para la terminación del apantallamiento del cable; proporciona un aislamiento externo entre el conductor o conductores del cable y la tierra; y proporciona un sello al final del cable contra la entrada del ambiente externo; y mantiene la presión de diseño de funcionamiento, si la hay, del sistema de cables” (IEEE Std 48, 2020, p. 11). Esta clase se subdivide en los tres tipos siguientes:

- Clase 1A: para uso en cables de dieléctrico extruido.
- Clase 1B: para uso en cable dieléctrico laminado.
- Clase 1C: explícitamente para sistemas de cables presurizados.

Terminación de clase 2. “Proporciona un control de la tensión eléctrica para la terminación de la pantalla de aislamiento del cable, y proporciona un aislamiento externo entre el conductor o conductores del cable y la tierra”. (IEEE Std 48, 2020, p. 12)

Terminación de clase 3. “Proporciona un control de la tensión eléctrica para la terminación del blindaje del aislamiento del cable.” (IEEE Std 48, 2020, p. 12)

Empalmes. Son las uniones y la restauración de todas las partes del cable, estos deben ser correspondiente con el cable a unirse en todas las características eléctricas y mecánicas con el conductor a empalmarse. (Boldrini Valdivia, 2018). Existen empalmes para media y baja tensión.

Empalmes de media tensión. Los empalmes en medio voltaje son empleados para obtener una longitud más larga del cable y para reparar el cable cuando se tengan fallas. Entre las principales características constructivas, (MEER, 2018a, p. 57) se tienen:

- Brindar protección contra la humedad.
- Cumplir con la norma IEEE Std. 404.
- No requiere herramientas especiales para su instalación.
- Tipo de empalme contraíble en frío y premoldeado.
- La capacidad de corriente de empalme deberá ser mayor que la capacidad de corriente del cable donde se usará este.
- Construido en caucho: EPDM curado con peróxido (premoldeado) y de silicona de alta calidad (contraíble en frío).
- Los empalmes son adaptados para las siguientes condiciones: al aire, enterrados, sumergidos continuamente o durante periodos en agua a una profundidad que no exceda los 7 m y temperatura ambiente de -30 a 50 °C.

Empalmes de baja tensión. Este tipo de empalme es empleado para unir los conductores de bajo voltaje y proporcionar protección contra la humedad sobre el área empalmada. Entre las principales características constructivas (MEER, 2018a, p. 58) se tienen:

- Son empleadas para lugares expuestos: a la intemperie, directamente enterrados o sumergidos.
- Cumple con la normativa de sello de exposición al agua ANSI C119.1.
- Se pueden emplear los diferentes tipos de empalmes (cinta y premoldeados).

En la figura 2.3, se observa un ejemplo de los detalles constructivos de un empalme encintado en cable monofásico con aislamiento extruido y en la figura 2.4 se observa un ejemplo de la construcción de un empalme premoldeado recto permanente (Campozano Tuba & Tubón Capuz, 2020).

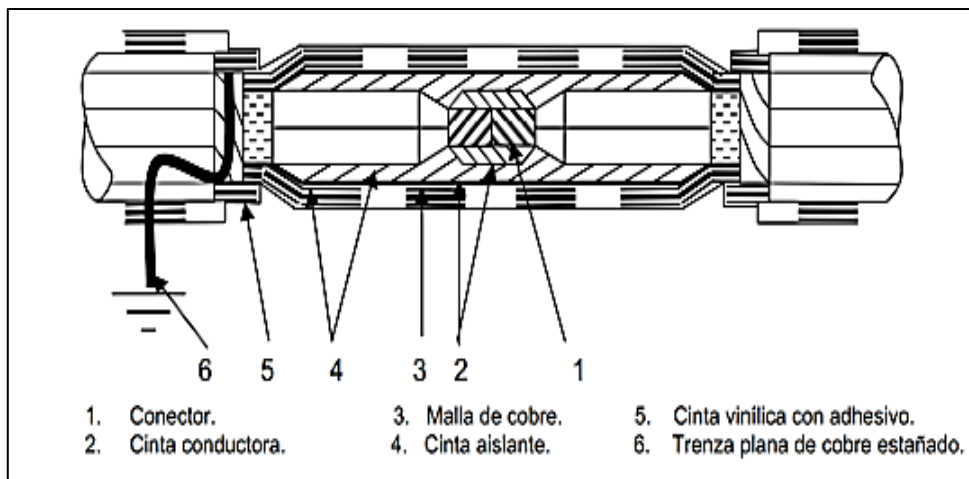


Figura 2. 3 *Detalle constructivo de empalmes encintados en cable monofásico con aislamiento extruido.*

Fuente: (Campozano Tuba & Tubón Capuz, 2020, p. 99)

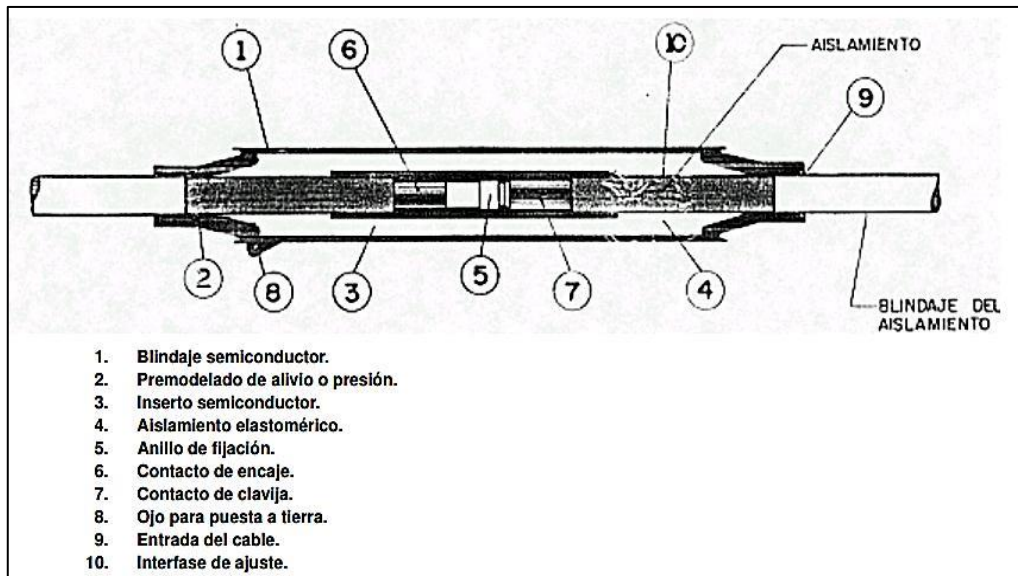


Figura 2. 4 Detalle constructivo de empalmes encintados en cable monofásico con aislamiento extruido.

Fuente: (Campozano Tuba & Tubón Capuz, 2020, p. 100)

2.2.4. Descargadores de sobretensiones y puesta a tierra

Los efectos transitorios de sobretensiones producidas por rayos u otros fenómenos, son causa de fallos, mismo que son evacuados por los descargadores de sobretensiones en el sistema subterráneo. A la par, tienen que contar con un correcto sistema de puesta a tierra, el mismo que estará en contacto óptimo con el suelo (puesta a tierra).

Descargadores. Los descargadores de sobretensión o también llamados pararrayos son instrumentos de protección contra voltajes elevados transitorios. Estos efectos transitorios causan daños graves en el sistema eléctrico, por este motivo el uso de este tipo de dispositivos es imprescindible en la red eléctrica. Entre las principales características constructivas de los descargadores (Campozano Tuba & Tubón Capuz, 2020, p. 189), se encuentran:

- Cumplir con las normativas vigentes: IEEE 386 y IEEE C62 11-2012.
- Poseer una protección aislada de frente muerto.
- Impedir el paso de corriente a tierra cuando la tensión sea nominal.

- Tener una conexión para puesta a tierra.
- Ser diseñados para boquillas y conectores de operación con carga de 200 A.
- Ser construidos para utilizarse en instalaciones sumergibles.
- No sufrir daños una vez puesto en marcha y soportar varias actuaciones.

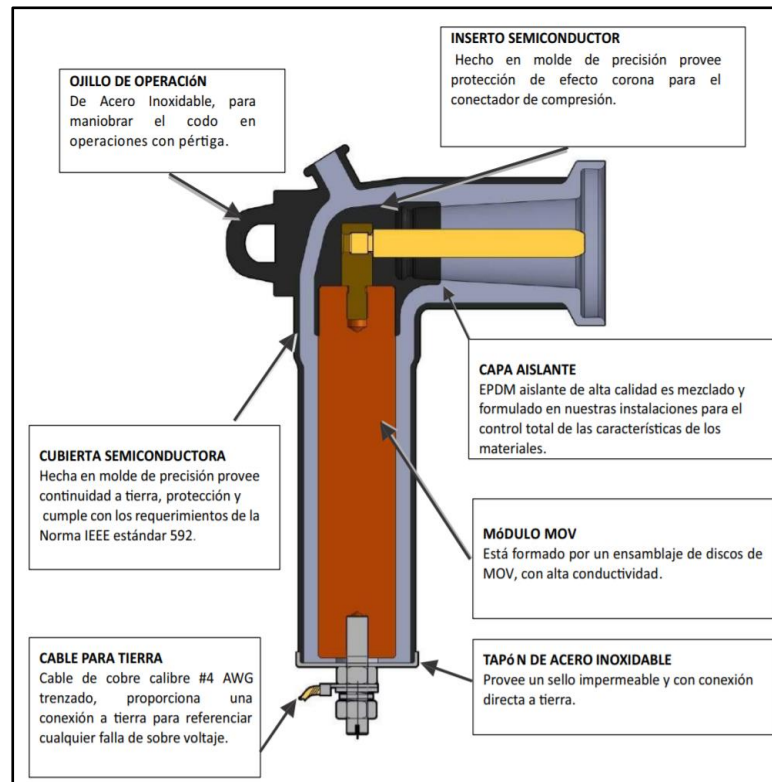


Figura 2. 5 Partes de un descargador de sobretensión, conector tipo codo apartarrayos Chardon.

Fuente:(Chardon Group, 2020, p. 2)

Puesta a tierra. Los sistemas de puesta a tierra tienen como función principal proteger a las personas, equipos e instrumentos, disipando las corrientes en caso de fallas. Resisten a los esfuerzos mecánicos y la corrosión, para garantizar la confiabilidad de los centros de transformación. Dentro de los centros de transformación existe dos tipos de sistemas de puesta a tierra: sistema de puesta a tierra de servicio y el sistema de puesta a tierra de protección, en base al estudio de este trabajo de titulación solo se trata el segundo tipo de sistema de puesta a tierra.

Sistema de puesta a tierra de protección. son las líneas a tierra con sus correspondientes electrodos de puesta a tierra que son conectados directamente a tierra, esto con la finalidad de proteger a las personas de contacto con voltajes peligrosos.

Los sistemas de puesta a tierra poseen ciertas características constructivas específicas, entre las más notables según (Campozano Tuba & Tubón Capuz, 2020; Iberdrola, 2014) se menciona:

- Cumplir con la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC).
- Todas las partes metálicas de un equipo necesitan ser conectadas al sistema de puesta a tierra.
- Los electrodos de la puesta a tierra no pueden ser de aluminio.
- El fabricante garantizará que los electrodos posean una vida útil de 15 años.
- Los sistemas de puesta a tierra son ubicados en los centros de transformación y los terminales del circuito secundario del transformador.
- No incorporar conductores, electrodos o elementos metálicos al sistema de puesta al diseño de la instalación eléctrica.

2.2.5. Ductos, pozos, tapas y cámaras eléctricas

Los componentes del sistema subterráneo son colocados en lugares apropiados cumpliendo parámetros de seguridad, dimensiones, calidad de materiales, etc., para garantizar su correcta operación y funcionamiento. Del adecuado diseño y construcción de los bancos de ductos, pozos y cámaras eléctricas depende en gran medida la confiabilidad del sistema eléctrico subterráneo.

Banco de ductos. Estructuras diseñadas y construidas para el tendido de conductores, basados en criterios homologados tales como: seguridad, diámetros de tuberías, dimensiones de zanjas, material de relleno, separación entre ductos, etc. (MEER, 2018c). En (MEER, 2018a) se especifica los siguientes parámetros técnicos:

- Separadores de tuberías. El material debe ser láminas de PVC, separación mínima horizontal y vertical entre ductos de un mismo banco es de 5cm, independiente del diámetro de tubería y nivel de tensión empujado. La distancia longitudinal entre los separadores es de 2.5m.
- Material de relleno. Para el caso en acera se aplica arena y opcionalmente hormigón de 140 kg/cm² de requerir una elevada resistencia mecánica. En el fondo de la zanja se emplea una cama del mismo material de 5cm, obteniendo la superficie regular y uniforme, de tal manera que toda la primera fila de los ductos repose sobre la misma en toda su longitud. Cuando se debe aplicar el relleno sobre la calzada, debe emplearse hormigón con resistencia mínima de 180 kg/cm², hasta 10 cm por encima del ducto superior.
- Distancia entre banco de ductos y otros servicios. Este valor no debe ser inferior a 25 cm, no se instalará ductos de otros servicios cercano a ductos eléctricos.
- Profundidad. Este valor depende del lugar en que se instalaran, se considera con respecto a la parte superior de los ductos. Para el caso de lugares no transitados por vehículos la profundidad mínima es de 0.6 m, mientras que para lugares transitados por vehículos este valor es de 0.8 m.

En (MEER, 2018b), se especifican detalladamente, la cantidad, lista de materiales y dimensiones, de estructuras en redes subterráneas de distribución incluyendo los bancos de ductos. (Véase en la Figura 2.6).

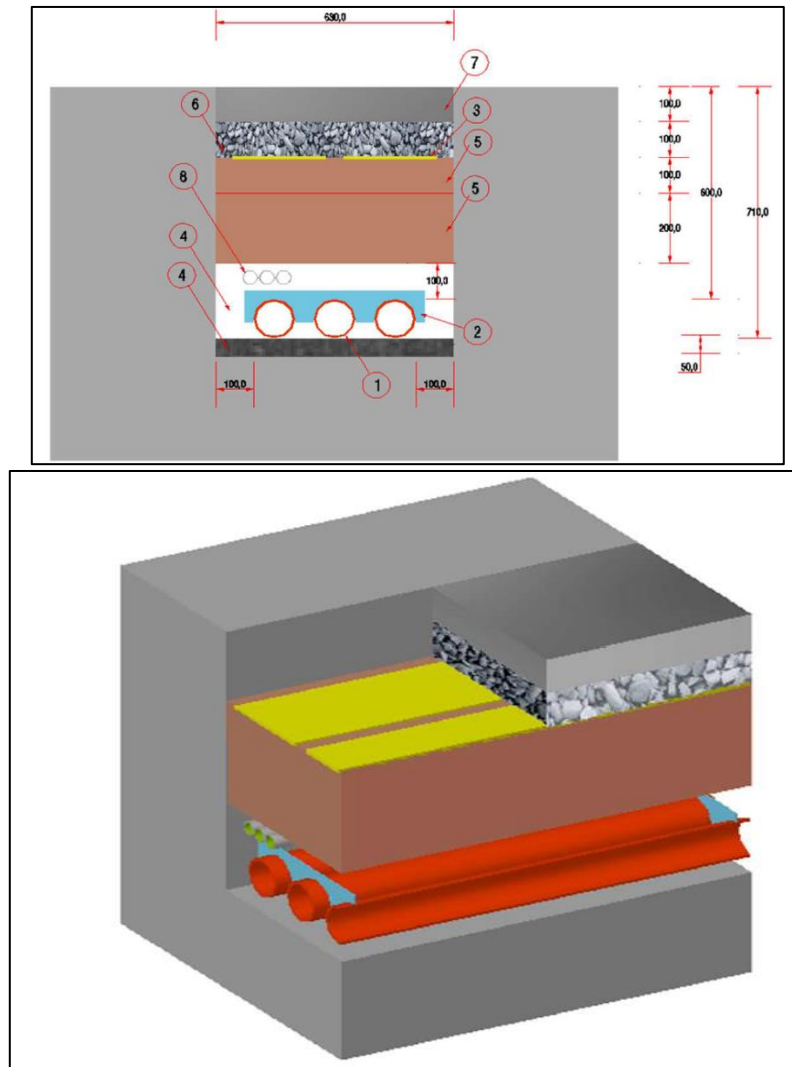


Figura 2. 6 Soporte plano para montaje de equipos.

Fuente: (MEER, 2018b, p. 4)

Pozos. Se usan generalmente cuando existan cambios de dirección, transiciones aéreas a subterráneas y a lo largo de los tramos rectos del circuito, por lo general se encuentran entre 30 a 60 metros, deben mantenerse organizados cables y accesorios dentro del mismo, brindando espacio de trabajo limpio. El material del cual están contruidos son paredes de hormigón armado de 210 kg/cm^2 para el caso de calzada o de mampostería de ladrillo o bloque de hormigón pesado cuando se realizan en acera. En todos los casos el espesor mínimo será de 12 cm. (MEER, 2018a).

Dependiendo del uso y tipo de circuito, los pozos se construirán de acuerdo a las dimensiones interiores establecidas en la homologación (MEER, 2018a), de forma

cuadrada o rectangular, en casos especiales se construirá pozos de forma octogonal. En veredas y calles, donde se construyan los pozos y ductos por lo general existen instalaciones de agua potable, alcantarillado, teléfonos, energía eléctrica, etc. Por lo que se debe coordinar con las entidades responsables de cada uno de ellos.

Se debe de considerar y analizar siempre el nivel freático de la zona donde se construirán los pozos, este factor determina el tipo de piso que se empleará, entre los que se tiene:

- Piso con hormigón y drenaje.
- Piso sin hormigón y material filtrante.
- Piso con hormigón y material filtrante.

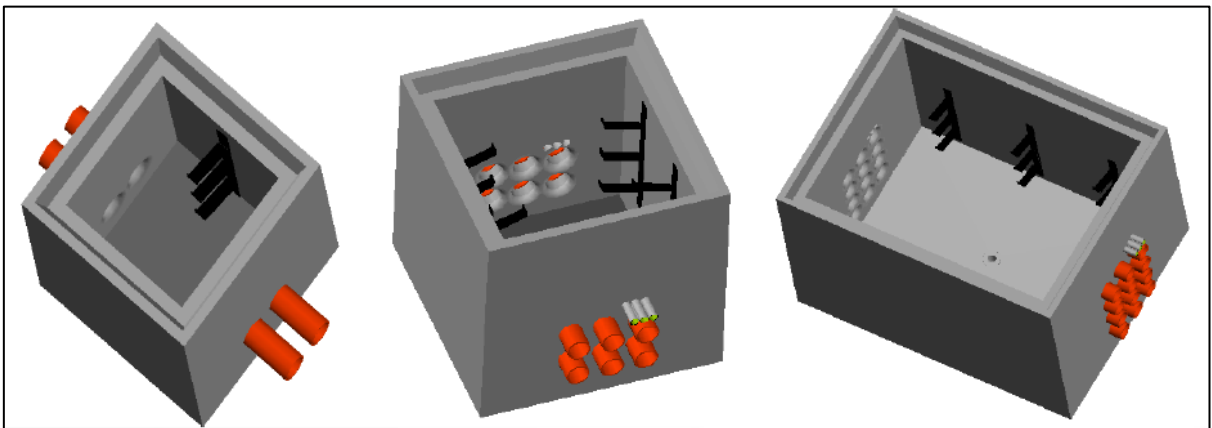


Figura 2. 7 Principales tipos de pozos.

Fuente: (MEER, 2018b)

Tapas. La protección física de los cables y equipos instalados dentro de los pozos, son las tapas de hormigón que poseen un marco y brocal metálico a base de pletina de acero de espesor de 4mm y 50mm por 75mm de alto, cobertura de 110 grados. El hormigón de la tapa debe poseer resistencia de 210 kg/cm², 70 mm de espesor en vereda y 150mm en calzada. El marco y el brocal deben poseer un recubrimiento de pintura anticorrosiva, al menos dos capas.

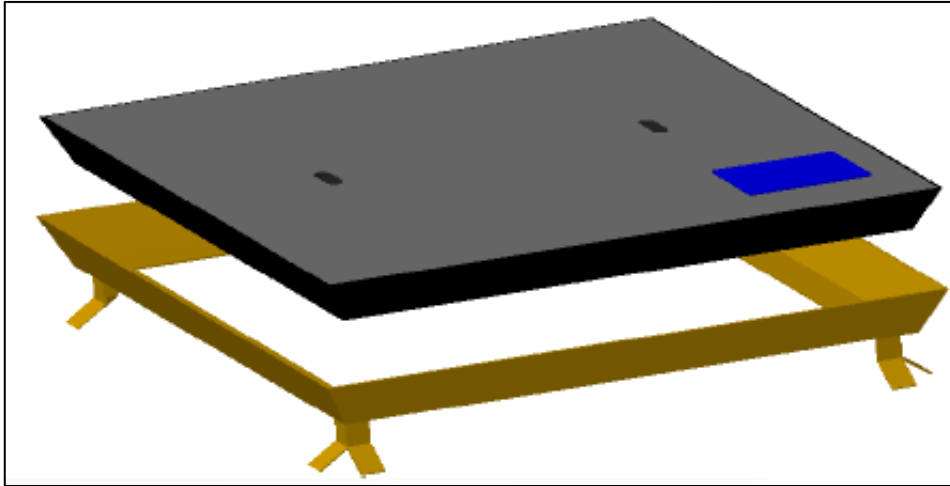


Figura 2. 8 Tapa de hormigón y marco de acero para pozo.

Fuente: (MEER, 2018b)

Las tapas se deben identificar mediante relieve o placa de hierro fundido, debe constar las siglas de empresa distribuidora, nivel de voltaje MV/BV, año de fabricación y numeración de la tapa.

Cámaras eléctricas. El (MEER, 2018a) define los parámetros eléctricos requeridos, materiales de construcción, diseños propuestos, iluminación interior, ventilación, drenaje, planos de distribución, detalles constructivos y otros según su aplicación. Entre los requerimientos básicos se debe cumplir con la estética, seguridad, operatividad y la necesidad eléctrica. Se deben regir a cumplir con normativas y reglamentos tanto nacionales como internacionales.

Entre las principales especificaciones técnicas generales para obras civiles de las cámaras eléctricas se menciona:

- Uso exclusivo de energía eléctrica.
- Se construirá previa verificación de las especificaciones técnicas de los equipos a instalar.
- Buscar el sitio más idóneo desde el punto de vista eléctrico considerando la estructura existente.

- Debe ser resistente a esfuerzos externos, ventilación adecuada, resistente a fenómenos ambientales, impermeable, hermético.

Otro parámetro de diseño, son las dimensiones de la cámara, estos valores son dependientes de la potencia, número de transformadores, medidas de los equipos a instalarse, respetando siempre las distancias mínimas de seguridad. Ningún tipo de cámara eléctrica podrá ser inferior a las siguientes medidas: Largo = 3m, Ancho = 2.2m (Transformador Monofásico); 3.7m (Transformador Trifásico), Alto = 3m. Pueden estar ubicadas de forma subterránea o a nivel del piso, dentro de ellas cuentan con equipos de maniobra, protección y transformadores. Contar con buen acceso para el personal encargado del mantenimiento. Las cantidades y tipo de material empleado se encuentra detallado en (MEER, 2018b)

2.3. Cable subterráneo

La mayoría de cables en distribución subterránea son conductores de una sola fase, por lo general se emplea el tipo de cable concéntrico-neutro, conformado por un conductor de aluminio o cobre, aislamiento extruido, y neutro concéntrico; este último consiste en varios hilos de cobre enrollado concéntricamente sobre el aislamiento, el neutro concéntrico tiene la capacidad de transportar la corriente de retorno de un sistema conectado a tierra. Se usan principalmente para aplicaciones de líneas trifásicas como suministro de energía a clientes comerciales e industriales, transiciones aéreo subterráneas, etc. (Short, 2006).

2.3.1. Características principales de cables

Conductor. Su función principal es la de transmitir la corriente a través del cable, además de brindar resistencia a la tracción mecánica a la cual será sometido el mismo. Entre las características más importantes del conductor se tienen: el tipo de material del cual está construido, la flexibilidad, la forma de construcción y las dimensiones. Como

se mencionó anteriormente, en la sección 2.2.1, los materiales más usados son: el cobre y el aluminio, con una singular mejora del cobre sobre el aluminio en cuanto a características eléctricas y mecánicas. El precio en el mercado de conductores de cobre, ha llevado a que se incremente el uso de conductores de aluminio, sumado a su bajo peso en comparación con el cobre, mismo que es aprovechado en sistemas de distribución.

El factor de la flexibilidad, se puede modificar de dos maneras: mediante el proceso de recocido del material con la finalidad de suavizarlo o a su vez aumentando el número de alambres que lo forman. Esto permite obtener cables con diferentes flexibilidades, de acuerdo al número de alambres (Boldrini Valdivia, 2018).

La escala mayormente usada, para clasificar los cables es la AWG, (American Wire Gauge), adoptada en Estados Unidos y de forma similar en Ecuador, la escala se basa en dos diámetros y siguiendo una ley de progresión geométrica para diámetros intermedios. Los diámetros bases acordados son: 0.46 pulgadas (calibre 4/0) y 0.0050 (calibre 36), existen 39 progresiones entre estos dos valores.

Para el caso de secciones mayores a (4/0), su nomenclatura o definición se la realiza de manera directa en base al diámetro o área del conductor. La unidad utilizada es el Circular Mil, que representa el área del círculo de un mil de diámetro, las siglas correspondientes a este caso son: MCM - Mil Circular Mil.

Tipos de aislamiento. La función principal del aislamiento consiste en limitar la corriente eléctrica dentro del conductor y contener el campo eléctrico en su estructura, evitando que la corriente fluya por caminos no deseados.

Papel impregnado. En sus inicios, se lo consideraba como el único dieléctrico empleado para sistemas subterráneos, se encuentra compuesto por fibras de celulosa que mediante un proceso de entrelazado se obtiene el papel. "El cable aislado con papel sin humedad se impregna con una sustancia para mejorar las características del

aislante. Las sustancias más usuales son: el aceite viscoso, el aceite viscoso con resinas refinadas, el aceite viscoso con polímeros de hidrocarburos, aceite de baja viscosidad y las parafinas microcristalinas del petróleo.” (Rodríguez & Roberto, 2002). Las condiciones y requisitos del papel impregnado deben ser evaluadas por las áreas eléctricas y mecánicas, debido al funcionamiento que se le da. Sin embargo, las condiciones climáticas como humedad, luz solar, tensión mecánica complican el uso de un solo material, siendo importante el uso de otros diseños gruesos con dos o más capas.

Aislamiento tipo seco. Se los obtiene mediante un proceso de polimerización al que han sido sometidos algunos hidrocarburos, se clasifican en dos grupos: termoplásticos y termofijos. Los materiales más usados son el policloruro de vinilo (PVC), polietileno (PE), etileno propileno (EPR) y el polietileno reticulado (XLPE). Los termoplásticos cuentan con la característica que al someterlos a calor su propiedad de plasticidad permite modificarlos a voluntad, los cuales pueden recuperar sus propiedades iniciales luego de enfriarse manteniendo la forma inicial. En cambio, con los termofijos luego de un proceso inicial similar al anterior en los siguientes calentamientos no se reblandecen (Rodríguez & Roberto, 2002)

Las condiciones bajo las cuales opera el conductor tales como: humedad en el aislamiento, el valor de la tensión aplicada en AC, además de irregularidades mecánicas como cavidades, impurezas, protuberancias localizadas en las pantallas semiconductoras, a la larga disminuyen la vida útil del cable lo que implica a presentar fallas en su operación. Para el caso del espesor del aislamiento, como se mencionó anteriormente, se encuentra definido de acuerdo al nivel de voltaje que el conductor soportará por un determinado tiempo. Esta característica corresponde a normativas tales como ANSI/IEEE, en las que se establecen valores de acuerdo a las siguientes clasificaciones:

- Nivel de aislamiento del 100%.
- Nivel de aislamiento del 133%.
- Nivel de aislamiento del 173%.

Pantallas eléctricas. Producto de aplicar un valor de tensión entre un conductor eléctrico y el plano tierra o a su vez entre dos conductores, el material dieléctrico intermedio se somete a esfuerzos eléctricos, lo que a la larga dependiendo del tiempo de aplicación y magnitud del mismo deteriora el material dieléctrico. La solución se basa en el control de este fenómeno, el mismo que se puede lograr mediante el uso de pantallas eléctricas, confinando el campo eléctrico.

El principio básico de los campos eléctricos se presenta al aplicar un nivel de tensión a materiales dieléctricos conectados en serie con una permitividad diferente, de tal manera que la pantalla cree una distribución radial y simétrica de los esfuerzos eléctricos con orientación al lugar de máxima resistencia del aislamiento. Los conductores en servicio con potencial aplicado se encuentran confinados bajo esfuerzos eléctricos de tipo radial, tangencial y longitudinal. Para el caso del tipo radial, esto siempre se encuentra en el aislamiento de los cables energizados, el aislamiento cumplirá su función siempre y cuando el campo eléctrico se encuentre distribuido uniformemente. Para el caso de esfuerzos tangenciales, se relacionan con campos radiales no simétricos que por lo general se presentan en sistemas de varios conductores sin pantalla. Para el caso de esfuerzos longitudinales, siempre se relacionan con presencia de tensiones superficiales a lo largo del cable. “La función principal de las pantallas engloba reducir el peligro de descargas eléctricas al personal o en presencia de productos inflamables, para el caso de conductores desnudos a lo largo de la trayectoria de instalación, se puede presentar una diferencia de potencial de magnitud considerable entre la cubierta de cable y tierra.” (Boldrini Valdivia, 2018, p. 31).

De acuerdo a la localización y función las pantallas en los cables de energía se los puede clasificar de la siguiente manera:

- Pantalla semiconductor sobre el conductor.
- Pantalla sobre el aislamiento.

Pantalla semiconductor en el conductor. Para casos en los cuales se someten los conductores a tensiones de 2 kV y superiores, por lo general se emplean pantallas semiconductoras a base de cintas semiconductoras, el material depende del diseño del cable. La función principal es la de evitar la concentración de esfuerzos eléctricos presentes en los hilos del conductor. Lo que se busca con esta inclusión es obtener una superficie equipotencial uniforme, en donde las líneas de fuerza del campo eléctrico sean perpendiculares. Otra función, no menos importante, es evitar la ionización en los intersticios entre el conductor y el aislamiento, debido a que, si el aislamiento fuera colocado directamente sobre el conductor, la curvatura de los alambres brindará las condiciones necesarias para creación de burbujas de aire, las que al encontrarse sometidas a una diferencia de potencial terminarán ionizando el aire y deteriorando el aislamiento. La solución se encuentra en colocar la pantalla semiconductor, la que contiene una superficie uniforme.

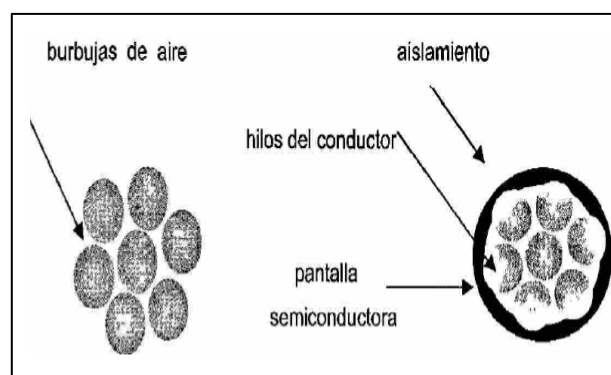


Figura 2. 9 Formación de una superficie equipotencial uniforme a través de una pantalla semiconductor.

Fuente: (Boldrini Valdivia, 2018, p. 33)

Pantallas sobre el aislamiento (electroestática). Para cables diseñados para tensiones de 5 kV o más se hace uso de pantallas electrostáticas colocadas en el aislamiento, la misma que se encuentra formada por una pantalla semiconductora y una pantalla metálica, para el caso de aislamiento seco, esta puede ser elaborada por una capa de materiales termoplásticos o termo fijo semiconductor, o a su vez por una cinta semiconductora. En el caso de cable con papel impregnado en aceite se emplean cintas de papel CB (Carbon Black) semiconductoras.

La pantalla metálica por lo general está constituida por alambres, cintas planas o la combinación de ellas. El diseño de la pantalla está fabricada en base a dos funcionamientos, para conducir corrientes de falla o como pantalla neutra.

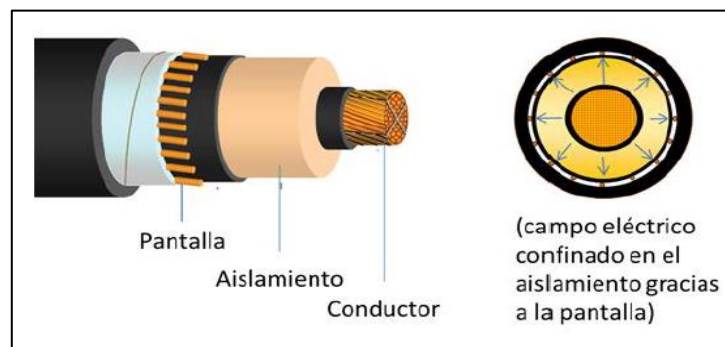


Figura 2. 10 Pantalla sobre aislamiento.

Fuente: (Boldrini Valdivia, 2018, p. 33)

Chaqueta. También denominada cubierta del conductor, la función que cumple es la de proteger al cable y su estructura de los agentes externos del medio ambiente que lo rodean, entre las que se tienen: producción, transporte, operación e instalación para su uso final. Entre los tipos de cubiertas más usados se tiene:

- **Metálicas:** Por lo general el material más utilizado es el plomo y sus diferentes aleaciones, en casos muy específicos se tiene uso de aluminios.
- **Termoplásticas:** El tipo de material más usado es el Policloruro de Vinilo (PVC), y los polietilenos de baja y alta densidad.

- **Elastoméricas:** Para este caso se hace uso de del neopreno, policloropreno específicamente, y el Hypalon (polietileno clorosulfonado)
- **Cubiertas textiles:** Por lo general se trata de una combinación de yute impregnado en asfalto el que se encuentra recubierto con baño de cal y talco.

2.3.2. Tipos de cables

En el Ecuador, los niveles de tensión están establecidos por la (ARCERNNR-002, 2020, p. 6), los cuales son:

- Bajo Voltaje: menor igual a 0,6 kV
- Medio Voltaje: mayor a 0,6 y menor igual a 40 kV
- Alto Voltaje grupo 1: mayor a 40 y menor igual a 138 kV
- Alto Voltaje grupo 2: mayor a 138 kV

Dentro de las redes eléctricas subterráneas de distribución, los niveles de tensión usados por las 11 Empresas Eléctricas Públicas Estratégica Corporación Nacional de Electricidad (CNEL EP) y 9 Empresas Eléctricas Distribuidoras que proporcionan el servicio de energía eléctrica, (ATLAS ENERGÉTICO - ACERNNR, 2021, p. 47) , son los siguientes:

Media Tensión:

- | | |
|-----------|-----------|
| ▪ 6,3 kV | ▪ 13,8 kV |
| ▪ 7,62 kV | ▪ 19,9 kV |
| ▪ 7,96 kV | ▪ 22 kV |
| ▪ 12,7 kV | ▪ 22,8 kV |
| ▪ 13,2 kV | ▪ 34,5 kV |

Baja Tensión:

- 110 V
- 240 V

Estos valores de media y baja tensión implican el uso específico de ciertos tipos de cables que cumplen con las normativas del país según lo dictaminado en la Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica - LOSPEE en el artículo 15 numeral 3 (LOSPEE, 2018, p. 6), donde habilita al Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables – MERNNR la definición de los aspectos constructivos, habilitantes y las normas que se emplean en el país. Con esta base, el MERNNR ha creado el Manual de Homologación de las Unidades de Propiedad (UP) en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica; en el presente caso de estudio se analiza la sección 2 el Manual de Construcción del Sistema de Distribución Eléctrica de Redes Subterráneas (MEER, 2018a, p. 55,56). Debido a que la función de estos es transmitir una corriente y tensión preestablecidas, se requiere que estén diseñados para cumplir con los requerimientos. Por este motivo se han construido los cables con aislamiento termoestable, para media tensión se utilizarán cables monopolares con conductor de cobre aislado a base de polietileno reticulado (XLPE) o polietileno reticulado retardante (TRXLPE); y para baja tensión se utilizarán cables con conductor de cobre con aislamiento a base de polietileno (PE) y chaqueta de policloruro de vinilo (PVC) resistente a la humedad (Boldrini Valdivia, 2018, p. 23,25).

Tipo de cables para media tensión. Entre los principales tipos de cables utilizados para media tensión se puede mencionar los siguientes:

Cable de polietileno reticulado (XLPE). Es una cadena polietileno cruzada, este vulcaniza o retícula empleando agentes químicos y/o físicos como la presión, temperatura, vapor, reordenado así las cadenas moleculares de polietileno termoplástico para obtener un polietileno reticulado con cadenas moleculares dieléctricas. Este tipo de cadenas tienen

propiedades mejoradas en comparación con las cadenas originales de polietileno termoplástico.

Entre estas propiedades se encuentran: bajas pérdidas, resistencia a la humedad, vida útil aproximada de 50 años, rigidez dieléctrica elevada, reducción del espesor del aislamiento, mayor rigidez mecánica, temperatura de manejo elevada y un costo menor (Boldrini Valdivia, 2018, p. 23,25). Además, su temperatura máxima de: operación es de 90°C , en sobrecarga es de 130°C y de cortocircuito es de 250°C (Centelsa, 2008, p. 7). En la figura 2.11 se presentan las partes de un cable de media tensión.

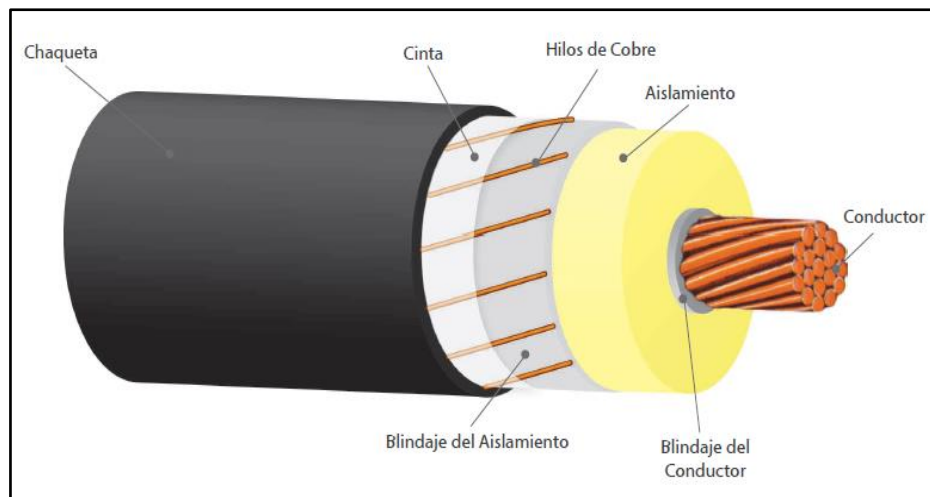


Figura 2. 11 Cable subterráneo de media tensión con apantallamiento en neutro concéntrico y aislamiento XLPE.

Fuente:(Centelsa, 2008, p. 9)

Cable de polietileno reticulado retardante a la arborescencia (TRXLPE). La arborescencia es un fenómeno eléctrico que produce la formación de surcos o caminos en el interior del aislamiento, esto origina que circulen cargas desde el conductor hacia el apantallamiento. Este fenómeno aparece comúnmente cuando existe humedad y altos campos eléctricos que producen la degradación del polímero (Centelsa, 2008, p. 6).

Los cables TR-XLPE presentan cualidades muy similares que los cables XLPE anteriormente mencionados, con la diferencia que tienen mayor resistencia a la humedad, resultando en disminución de problemas de arborescencia en el aislamiento. Este tipo de

aislamiento permite realizar instalaciones enterradas directamente, enterradas en ductos con exposición a la luz solar, en ductos y sumergidos en agua completamente (Centelsa, 2008, p. 6). En la figura 2.12 se presentan las partes de un cable de media tensión.

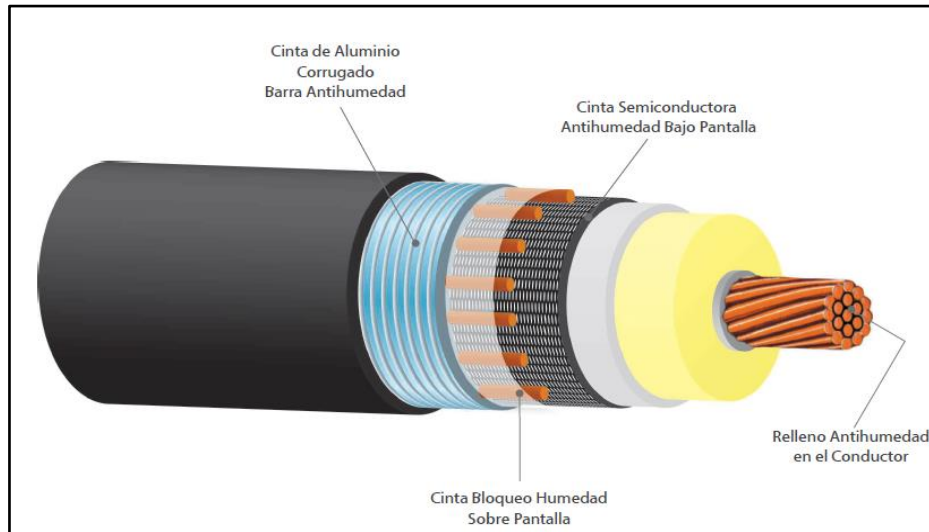


Figura 2. 12 Cable subterráneo de media tensión con apantallamiento en neutro concéntrico y aislamiento TRXLPE.

Fuente: (Centelsa, 2008, p. 9)

Cable de etileno propileno o cable de polietileno (EPR4). En los cables de polietileno, al igual que en los cables XLPE, se aplica el proceso de reticulación o vulcanización, logrando así que los materiales adquieran características termoestables. Este tipo de cable está constituido por conductores de cobre suave, con una pantalla semiconductora sobre estos, su aislamiento es individual y de polietileno. Tiene una vida útil de larga duración, una menor expansión durante el calentamiento y posee mejores propiedades a altas temperaturas, mayor resistencia a la ionización y a la humedad, y alta flexibilidad. Finalmente, las temperaturas máximas son: 90°C en operación normal, 130°C en sobrecarga, y 250°C en cortocircuito (Centelsa, 2008, p. 6,7).

Nivel de aislamiento. El espesor del aislamiento es determinado por la tensión entre fases y las características del sistema. Generalmente se especifica el nivel de voltaje que el cable puede soportar durante cierto tiempo. En la norma ANSI/IEEE se establece el

porcentaje de nivel de aislamiento. (Boldrini Valdivia, 2018, p. 30). Los cables se subdividen en tres categorías en correspondencia con el aislamiento:

- **Nivel de aislamiento de 100%.** En este nivel de aislamiento los cables no pueden operar con falla a tierra en el sistema por un periodo de tiempo mayor a un minuto.
- **Nivel de aislamiento de 133%.** En este nivel de aislamiento los cables no pueden operar con falla a tierra en el sistema por un periodo de tiempo mayor a una hora.
- **Nivel de aislamiento de 173 %.** En este nivel de aislamiento los cables no pueden operar con falla a tierra en el sistema por un periodo de tiempo mayor a un minuto, pero para este caso el aislamiento del cable está elaborado para soportar continuamente el voltaje de la línea del sistema.

Cables de red de media tensión caso Ecuador. Para el sistema de distribución para media tensión, se utilizan cables monopolares con conductores de cobre aislados con polietileno reticulado termoestable (XLPE) o polietileno reticulado retardante a la arborescencia (TRXLPE) para voltajes: 15 kV, 25 kV y 35 kV. En el país existen dos niveles de aislamiento aplicados según (MEER, 2018a, p. 55):

Nivel de 100%. Los cables con este nivel de aislamiento se emplean en los sistemas con neutro conectado sólidamente a tierra y dotado con dispositivos de protección, estos hacen que las fallas a tierra se eliminen lo más rápido posible, con un tiempo promedio de 1 minuto. Las características principales según este nivel son (MEER, 2018a):

Conductor	→ Cobre suave
Forma del conductor	→ Cableado concéntrico
Tipo de aislamiento	→ Polietileno reticulado XLPE o TRXLPE
Pantalla sobre el aislamiento	→ Semiconductor de polietileno reticulado removible o de alta adherencia
Tipo de pantalla electrostática	→ Cinta metálica o alambre de cobre
Chaqueta	→ Material termoplástica PVC (Color rojo)

Nivel de 133%. Los cables con este tipo de aislamiento son designados para sistemas con neutro aislado. Estos son empleados cuando no se pueden cumplir los requisitos de eliminación de la falla del nivel de 100% de aislamiento. Esto es aplicable cuando existe una seguridad razonable de la sección que presenta la falla, se podrá desenergizar con un lapso de tiempo no superior a una hora. También se aplica este nivel cuando se desea tener un aislamiento superior del 100% (MEER, 2018a, p. 55).

Cables de red de baja tensión caso Ecuador. “Para red secundaria subterránea se utilizan cables con conductor de cobre, aislamiento de 2.000 V con polietileno (PE) y chaqueta de policloruro de vinilo (PVC) resistente a la humedad”. (MEER, 2018a, p. 56). Las características principales de este tipo de cables son:

Conductor	→	Cobre suave
Tipo de aislamiento	→	Polietileno (PE)
Chaqueta	→	Policloruro de vinilo (PVC)

2.3.3. Cables utilizados en la EEACA

La Empresa Eléctrica Azogues C.A. para sus sistemas de distribución subterráneo, en correspondencia con el Manual de Construcción de Sistema de Distribución Eléctrica de Redes Subterráneas (Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2018), emplea cables de cobre de aislamiento tipo XLPE para un nivel de tensión de 25 kV y el nivel de aislamiento de estos cables son del 100% (en desuso) y 133%. Entre los cables que emplea la EEACA, se encuentran:

- Cable XLPE Cu 2 AWG 25kV 133% PC PVC SR ECU RJO.

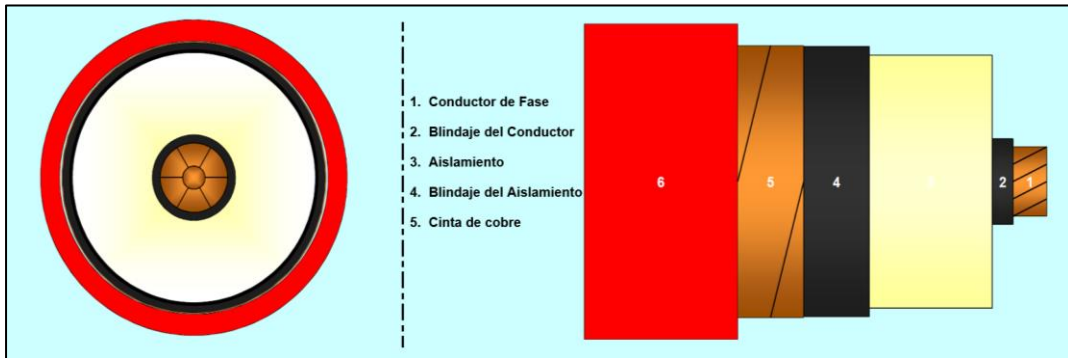


Figura 2. 13 Cable Cu XLPE 2 AWG – Centelsa.

Fuente: (Centelsa - 209206, 2017), (Apéndice A)

- Cable XLPE Cu 1/0 AWG 25kV 133% PC PVC SR ECU RJO.

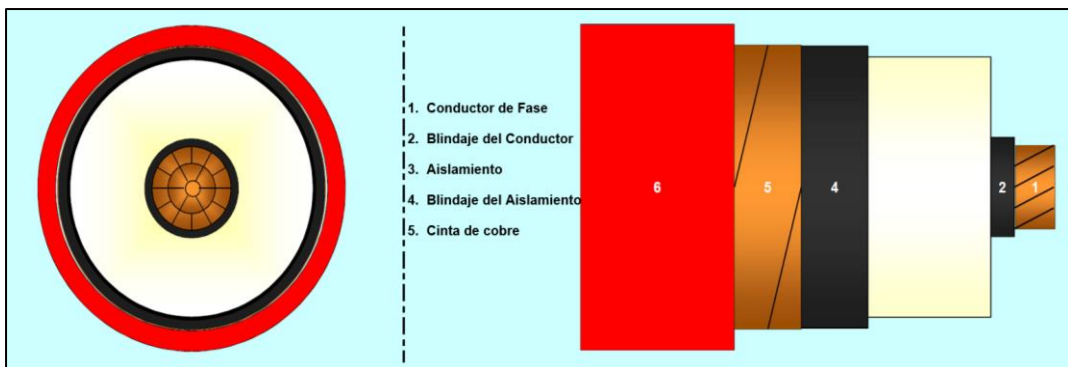


Figura 2. 14 Cable Cu XLPE 1/0 AWG - Centelsa.

Fuente: (Centelsa - 209207, 2017), (Apéndice B).

- Cable XLPE Cu 2/0 AWG 25kV 133% PC PVC SR ECU RJO.

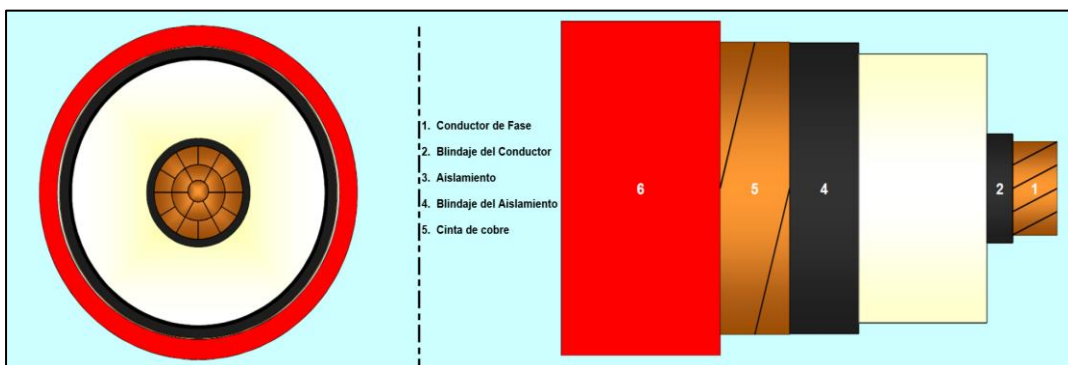


Figura 2. 15 Cable Cu XLPE 2/0 AWG - Centelsa.

Fuente: (Centelsa - 209207, 2017), (Apéndice C).

2.4. Accesorios

Las restricciones de fabricación, transporte e instalación, requieren que el uso de accesorios como: empalmes, terminales, conectores; tanto para redes de media tensión como para baja tensión. Estos permiten conectar los cables y equipos, además de permitir realizar las transiciones de una red aérea a una red subterránea y viceversa. Los accesorios procuran mantener la mayor parte de todas las características físicas de los cables; por ejemplo: en los cables apantallados se debe mantener la continuidad de la pantalla en los empalmes, para evitar acciones externas o internas que afecten al material de forma localizada. (S. Thomas & James, 2009, p. 61).

2.4.1. Accesorios para media tensión

Terminales. Los cables de media tensión son construidos con el objetivo de que los esfuerzos eléctricos que se producen en el aislamiento de los mismos sean distribuidos de forma uniforme. Cuando el cable se corta, retira o interrumpe los esfuerzos eléctricos se deforman provocando esfuerzos adicionales en el aislamiento, además pierdan su hermeticidad y su distancia de fuga. Los puntos de corte se convierten en áreas de falla del aislamiento, estos se previenen con la instalación de las terminaciones. El armado de los terminales con los empalmes y los cables se realizan con relación de los datos técnicos de cada elemento, para garantizar la máxima compatibilidad en aislamiento, tolerancias y niveles de funcionamiento. (Endesa, 2018, p. 77).

Los terminales están constituidos básicamente por dos partes, de acuerdo con su función, según el informe de (Endesa, 2018, p. 78) se tiene:

- **Parte mecánica.** Está conformado por los elementos de conexión del conductor, cubierta externa y pantalla de apantallamiento.
- **Parte eléctrica.** Está conformado por componentes y materiales que soportan el gradiente eléctrico en el punto medio del terminal y en las zonas de transición entre el cable y el terminal.

La clasificación de las terminaciones se realiza según la norma IEEE 48TM – 2020 en terminaciones de: clase 1, clase 2 y clase 3; de acuerdo con lo indicado en la sección 2.2.3.1.

Tipos de terminales. Para clasificar los tipos de terminales empleados en media tensión, primero se selecciona el nivel de aislamiento entre 100 % o 133% y luego se elige el calibre de conductor, esto se realiza según la topología de las líneas subterráneas. Con estas consideraciones los terminales se dividen según (Endesa, 2018, p. 15), en terminales de exterior, terminales en GIS o SF6 y terminales inmersos en aceite. Considerando el alcance de este trabajo, únicamente se analizan los empleados en el país.

- **Terminales de exterior.** Este tipo de terminales debido a su estructura, forma de fabricación y materiales empleados, son idóneos para el contacto con el medio ambiente, este tipo de terminales son denominados de exteriores. A su vez estos se subclasifican en (Endesa, 2018, p. 78) termoretráctiles y premoldeados. Actualmente en la Empresa Eléctrica Azogues se emplean los terminales de exterior tipo premoldeados.

Premoldeados. Los terminales premoldeados, donde el aislador está constituido por lo menos de dos partes aislantes, posee un núcleo y el revestimiento exterior (HidroCantábrico, 2005). Este aislador está conectado a una base metálica, la cual es soportada por una placa, que es montada sobre aisladores de pedestal que es apoyada sobre una estructura metálica donde se instala el terminal. Para que el campo eléctrico sea controlado, la interfase entre el cable y el terminal, se instala dentro del aislador un cono deflector elástico preformado. En el extremo superior se protege el arranque del conector con una pantalla contra las descargas parciales.

“Este tipo de terminal permite aislar la pantalla del soporte metálico, esto es indispensable para las conexiones especiales de las pantallas flotantes de un extremo. La unión del conductor del cable al conector, se realiza por fundas de conexión a presión. Estas conexiones son diseñadas para resistir los esfuerzos térmicos y

electromecánicos durante un cortocircuito y en funcionamiento normal” (Endesa, 2018, p. 15).

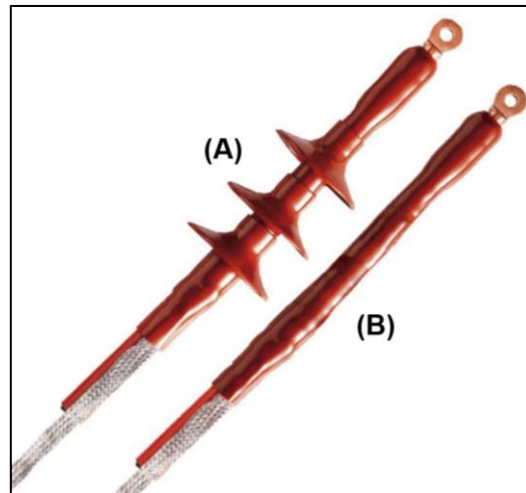


Figura 2. 16 Terminal premoldeado para uso exterior (A) e interior (B): tipo contráctil en frío clase 25 Kv.

Fuente: (ARAGCU, 2022)

Empalmes. Debido a que las redes eléctricas subterráneas requieren conectar diferentes conductores, se emplean los empalmes compuestos con un cuerpo premoldeado que se instala entre los extremos del cable, con el fin de asegurar el funcionamiento y la continuidad del servicio eléctrico. Para que no se interrumpa el funcionamiento normal o en régimen de sobrecarga, se seleccionan las características: composición, sección, tolerancias de fabricación, tipo del cable; con la finalidad de que la unión tenga la misma naturaleza de los cables, evitando que la resistencia eléctrica aumente entre los dos; además, los empalmes tendrán las mismas corrientes de cortocircuito que el cable en el cual se instalará (Endesa, 2018, p. 12). Los empalmes están constituidos por dos partes principales, esto de acuerdo a la función que realizan:

- **Parte mecánica.** Está conformada por los elementos de conexión del conductor y la pantalla del cable en sus dos extremos del empalme, así como las cubiertas externas.

- **Parte eléctrica.** Está conformada por los elementos y materiales de la parte central del empalme y las zonas de transición, entre el empalme y el cable, estos tienen la función de tolerar el gradiente eléctrico.

Con respecto a las formas de conexión se tienen dos tipos de empalmes: empalmes termorretráctiles y premoldeados, en base al interés de este trabajo de titulación se analizará los empalmes de tipo premoldeados.

Empalmes premoldeados. Los empalmes premoldeados pueden ser de dos tipos según el número de piezas: una pieza y tres piezas.

- **Empalmes premoldeados de una pieza.** Contiene una pieza principal que tiene electrodos de alta tensión interna, una capa aislante, una capa externa semiconductora, la conexión entre el empalme y el cable es asegurada por una memoria elástica del mismo material de fabricación del empalme. Este puede ser de goma de etileno propileno (EPR) o goma silicona. Además, el empalme tiene una carcasa de protección que posee una resistencia mecánica al igual que la cubierta del cable.

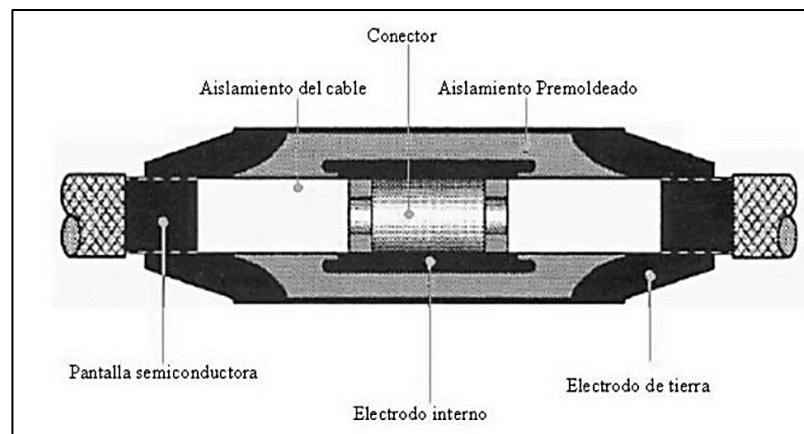


Figura 2. 17 *Empalme premoldeado de una pieza - partes.*

Fuente: (Endesa, 2018, p. 13)

- **Empalmes premoldeados de tres piezas.** Su aislamiento principal tiene dos conos premoldeados, llamados adaptadores, posee una unidad de resina epoxi, que es

semejante al cuerpo principal del empalme. Al igual que el empalme premoldeado de una pieza, este tipo tiene una carcasa de protección de iguales características.

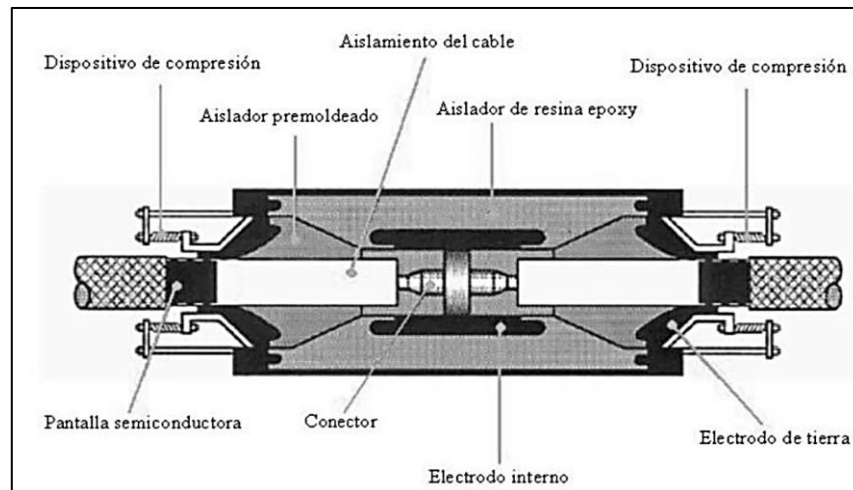


Figura 2. 18 *Empalme premoldeado de tres piezas - partes.*

Fuente: (Endesa, 2018, p. 14)

Barras desconectables. Estos son dispositivos elaborados para seccionar circuitos, establecer anillos y realizar derivaciones en redes subterráneas de media tensión, se usan en las cámaras eléctricas o pozos de derivación. Las barras desconectables tienen como ventaja facilitar el mantenimiento y cambio de elementos en los circuitos en caso de fallo o daño. (Camposano Tuba & Tubón Capuz, 2020, p. 115; MEER, 2018a, p. 47).

Las características constructivas principales de los barrajes desconectables, con base en (MEER, 2018a, p. 47) son: poseer una capacidad de 200 A para apertura con carga y de 600 A para apertura sin carga; pueden ser de 2,3,4,5 y 6 vías; tienen una base de cobre de alta pureza que une las vías; tanto las vías como el cuerpo del barraje están recubiertas con caucho EPDM (Etileno Propileno Dieno tipo M). El soporte del montaje es de acero inoxidable, el cual puede girar sobre su eje para que su operación se realice en diferentes ángulos, el punto de conexión está en el soporte de la puesta a tierra, es necesario una barra por fase y es necesario colocar tapones aisladores en las vías no utilizadas.

Barras premoldeadas para 200/600 A, 15 kV. Este tipo de barras tiene de 3 a 6 posiciones y se emplean en cámaras subterráneas y armarios de seccionadores, facilitando

empalmar o establecer anillos y seccionalizar alimentadores. En su salida de 600 A se utilizan cables y equipos del alimentador primario, que son atornillados para mejor sujeción y prevenir desconexiones espontáneas debido a que no tienen carga.

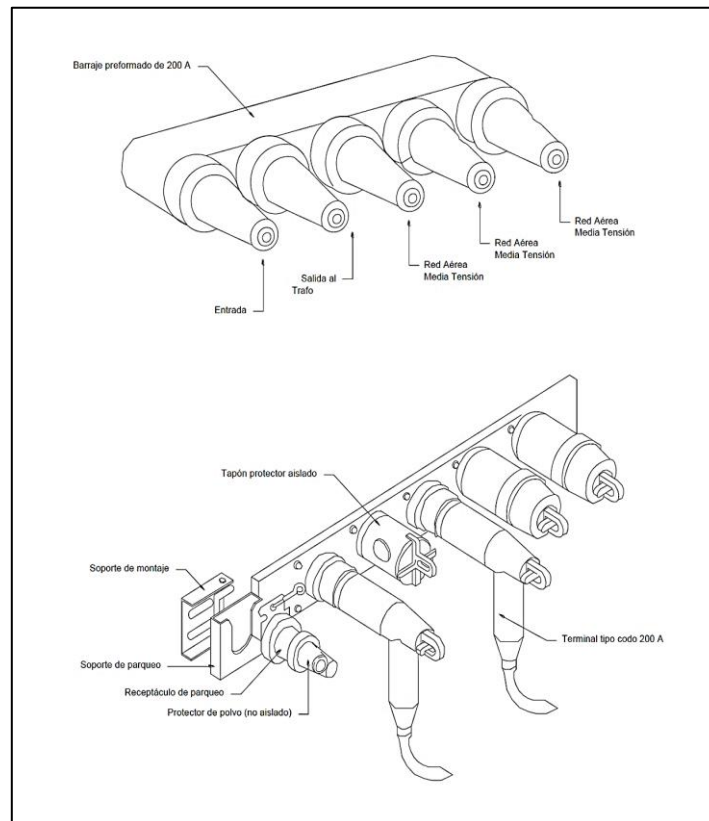


Figura 2. 19 Barras premoldeadas de conectores múltiples - 5 vías - partes.

Fuente: (Aucapiña Quinde & Niola Morocho, 2012, p. 179)

Bushing insert o bushing de parqueo aislado. Este dispositivo se conecta dentro de las cámaras subterráneas, en el soporte de montaje (soporte de parqueo) que está en el barraje desconectable, como se puede observar en la figura 2.21. Además, se encuentran en los transformadores de pedestal y sumergibles. Los conectores tipo codo desconectables son instalados en el bushing insert como conectores de acoplamiento, para que el cable permanezca energizado, pero en un lugar fijo y seguro. Estos pueden ser temporales o permanentes, permitiendo realizar el mantenimiento de una red o de un transformador. (Camposano Tuba & Tubón Capuz, 2020; MEER, 2018a).

Los bushing de parqueo aislado cumplen con los estándares IEEE Std 386-2006, tienen un conector de cable a tierra, poseen un perno de ojo de acero inoxidable, además, este tipo de bushing son moldeados con un material aislante EPDM (Etileno Propileno Dieno tipo M) de alta calidad tratado con peróxido. Las características eléctricas y mecánicas serán elaboradas para que sus componentes tengan la factibilidad de intercambiarlas (MEER, 2018a).



Figura 2. 20 *Bushing de parqueo aislado.*

Fuente: (MEER, 2018a, p. 52)

Conectores. Son elementos empleados para conexión entre los cables y los equipos de los sistemas eléctricos, entre los conectores más empleados dentro del país se tienen los siguientes:

Conector tipo codo. Son utilizados para realizar la incorporación del cable al sistema de conectores aislados separables, facilitando de esta forma la interconexión de los cables con los demás equipos como: transformadores, barras, entre otros. Con base en la norma ANSI/IEEE 386 vigente, estos codos otorgan una configuración de frente muerto que elimina las partes activas evitando riesgos de contacto no previstos, brindando además un blindaje en casos de inundación de las cámaras. Este tipo de conector es aplicado a transformadores tipo pedestal, frente muerto, interruptores, celdas, barras desconectables y otros. Estos tienen

un diseño de elementos intercambiables mediante los cuales se pueden realizar conexión y desconexiones de forma más sencilla y rápida al sistema (MEER, 2018a, p. 43).

Las características constructivas de los conectores tipo codo son: “Operan con carga hasta de 200 A, disposición de funcionamiento con pértiga, posible conexión a tierra, son moldeados con el caucho aislante EPDM de alta calidad, tiene un conector de cobre y un electrodo de cobre estañado que opera con carga en una punta de arqueo y un anillo de operación de acero inoxidable” (MEER, 2018a, pp. 43-44).

El conector de tipo de codo de 200 A, puede funcionar con carga cuando esté conectado al bushing insert, es decir este puede ser empleado en las redes eléctricas subterráneas para conectar los cables a los transformadores, barras de derivación y equipos de seccionamiento (Camposano Tuba & Tubón Capuz, 2020, p. 119).

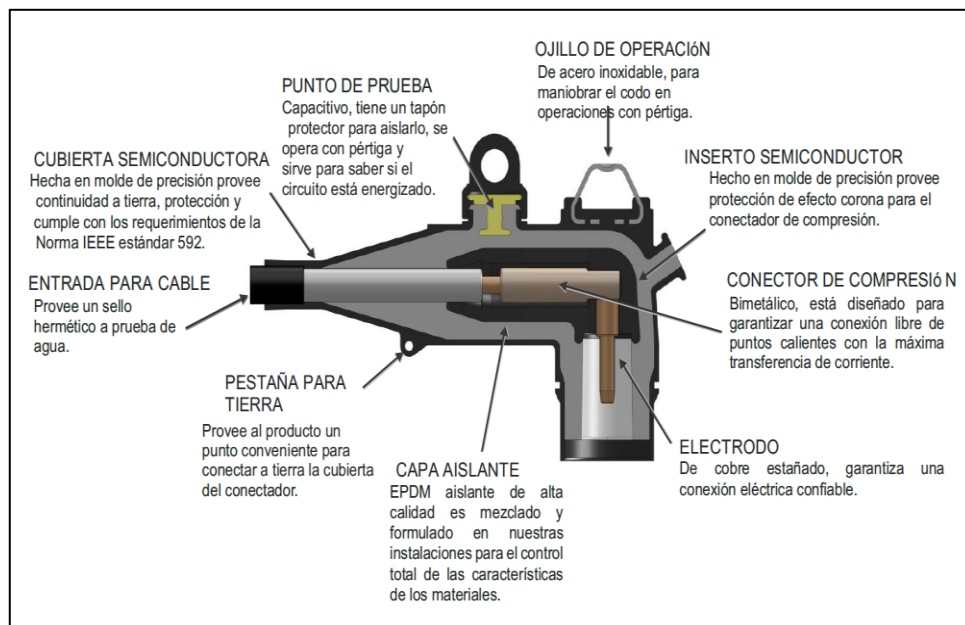


Figura 2. 21 Conector tipo codo Chardon – partes.

Fuente: (Chardon Group, 2020, p. 2)

Conector tipo T. Es un tipo de conector separable con una topología en T apantallado, su cuerpo premoldeado es fabricado por inyección, por su diseño no se recomienda usar en operaciones de conexiones y desconexiones, además, tiene un blindaje completo, con un frente muerto y son sumergibles al 100 %. Su parte posterior queda aislada, por ende, sirve

de conexión para un nuevo conector separable y su capacidad es de 600 – 900 A, para funcionamiento sin carga. Los conectores de tipo T son específicos para aplicarse en salidas o derivaciones de circuitos de medio voltaje y con la factibilidad de un acoplamiento de conectores separables (MEER, 2018a, pp. 44-45).

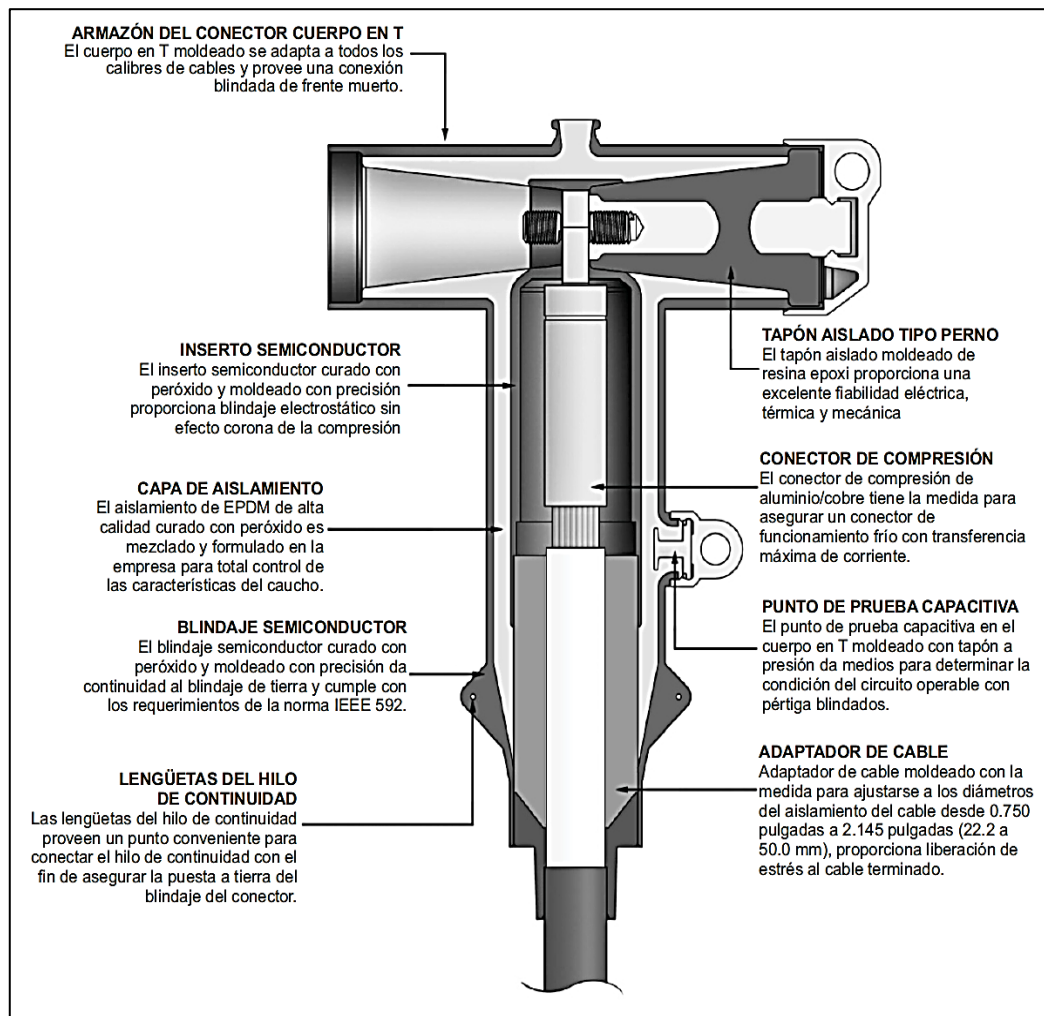


Figura 2. 22 Conector de operación sin carga cuerpo en T - clase 35 kV – partes.

Fuente: (Chardon Group, 2020, p. 2)

2.4.2. Accesorios para baja tensión

Empalmes. Los empalmes se eligen de acuerdo con las especificaciones de red eléctrica donde se construye la obra. Las aplicaciones principales de los empalmes en baja tensión son para: lograr una longitud más extensa del cable, reparar el cable cuando se producen fallas, para conexión de acometidas domiciliarias y derivaciones de la red (MEER,

2018a). Existen varios tipos de empalmes que se pueden emplear para cables unipolares de bajo aislamiento (TTU) o conductores de cobre y cubierta externa de PVC, para baja tensión (Aucapiña Quinde & Niola Morocho, 2012, p. 139).

Para un correcto montaje en obra, los empalmes incluirán todos los elementos necesarios de construcción y de limpieza. Las tecnologías admitidas en correspondencia de las normativas para baja tensión son de: resina, contraíble en frío, gel, termo contracción y cinta. Los tipos de empalmes mencionados anteriormente serán diseñados para ser usados en exteriores, enterrados directamente o sumergidos (Aucapiña Quinde & Niola Morocho, 2012, p. 139). De acuerdo con (MEER, 2018), los empalmes deben cumplir con la norma ANSI C119.1., de sello de seguridad ante exposición al agua.

Barras. Las barras son conectores sumergibles, que se instalan en los pozos de revisión con el objeto de tener varias derivaciones para acometidas o ramales secundarios. Se instalan 4 barras de derivación, una para cada fase, y otra para el conductor neutro.

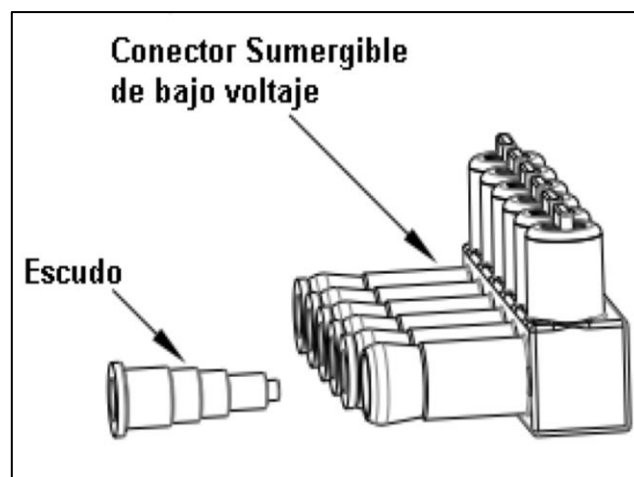


Figura 2. 23 *Barras de sumergibles, baja tensión.*

Fuente: (Camposano Tuba & Tubón Capuz, 2020, p. 134)



Figura 2. 24 *Barras de distribución sumergibles – RG distribuciones S.A.*
Fuente: (RG distribuciones S.A., 2022)

Tablero de distribución. Los tableros de distribución se utilizan para dividir organizadamente las acometidas a los medidores de energía; estos son elaborados en plástico. En su interior poseen barras de 200 A de capacidad para las fases y de 400 A para el neutro, tienen espacio de 10 interruptores termográficos mínimo y espacio para el tablero de control de alumbrado y los tableros tendrán protección IP65 (equipo hermético al polvo y contra el agua)(Aucapiña Quinde & Niola Morocho, 2012; Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2018).

Capítulo 3: Análisis de fallas en cables subterráneos

3.1. Tipos de fallas

Se denomina falla, a la condición física que ocasiona la avería en un cable o que no permite que el mismo retenga o mantenga la tensión de servicio requerida. (INDUCOR S.A, 2010, p. 4)

En la búsqueda de los diferentes tipos de fallas y su correcta calificación se consideran aspectos de seguridad, tales como la desconexión total de las fuentes de alimentación de la parte del circuito a ser probado, con el objeto de brindar las condiciones de seguridad para el personal que lleva a cabo las labores de operación y mantenimiento. Paralelamente se consideran las características del sistema, entre las que se tienen: conductor, tipo de instalación, características del circuito eléctrico, condiciones ambientales.

Las fallas en sistemas de distribución subterráneos según (Liu et al., 2016) se pueden clasificar en dos tipos:

- Fallas en circuito abierto.
- Fallas en circuito cerrado.

3.1.1. Fallas en circuito abierto

Este tipo de fallas se presentan debido a una discontinuidad por el camino que recorre la corriente, causado por una rotura de los conductores de la fase.

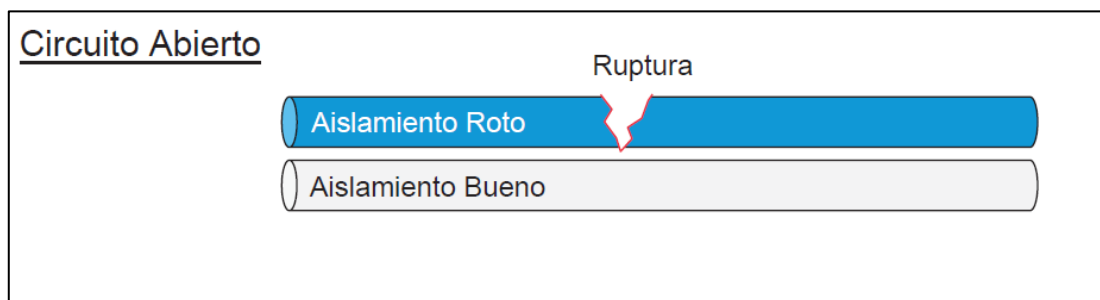


Figura 3.1 *Falla en circuito abierto.*

Fuente: (NTT, 2017)

3.1.2. Fallas en circuito cerrado

En esta clasificación entran todas aquellas que se presentan como cortocircuitos en el momento que se pierde la resistencia del aislamiento, lo que produce falla entre conductores o a su vez fallas de línea a tierra.

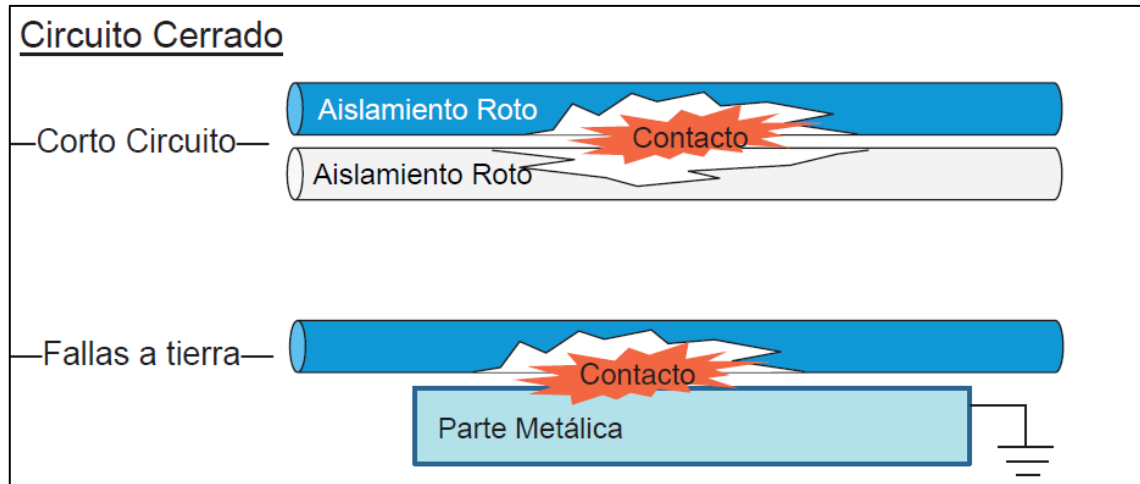


Figura 3. 2 *Falla en circuito cerrado.*

Fuente: (NTT, 2017)

Además, se pueden encontrar una gran variedad de casos de fallas en sistemas eléctricos subterráneos; entre los principales: circuitos abiertos, falla a tierra, cortocircuitos, etc.; que ocurren en las instalaciones en operación, variando su incidencia de acuerdo con el tipo de falla.

3.2. Causas más comunes de fallas

De acuerdo con los datos recopilados por (Macias, 1974, p. 51), las causas más comunes para fallas en cables subterráneos se pueden dividir en cuatro grupos: causas generales, directas, indirectas y desconocidas.

3.2.1. Causas generales

Este caso hace referencias a fallas producidas en el conductor, las cuales se encuentran directamente relacionadas con el aislamiento. Entre las principales se tienen:

- **Fracturas del aislamiento.** Entre éstas se tienen cortes y defectos del mismo; sus principales causas son la humedad y el deterioro del aislamiento como consecuencia del componente aislante.
- **Corrosión del aislamiento.** Se encuentra siempre presente en cables con chaqueta de plomo, el proceso químico de la electrólisis produce corrosión reduciendo el espesor efectivo del aislamiento, produciendo fallas en el cable.
- **Humedad.** Generalmente presente en el aislamiento, lo que ocasiona fallas denominadas arborescencia de agua, consiste en micro cavidades llenas de humedad.
- **Perforación del cable.** No es necesaria la presencia de humedad para que se produzcan las siguientes fallas:
 - Conductores defectuosos.
 - Abultamiento del aislamiento consecuencia de presiones internas.
 - Polimerización de compuestos.
 - Evidencia de compuestos carbonizados.

En la mayoría de los casos la falla se produce por el desarrollo de la presión interna en el punto de falla, en muy pocas ocasiones se debe al voltaje. Un caso especial es el calor, debido a que ocurre la perforación sin la presencia de humedad, en otros casos este calor puede ser consecuencia de una sobrecarga del conductor o por factores externos en ambos casos la disipación del calor se realiza sobre la superficie del mismo.

3.2.2. Causas directas

Se hace referencia a causas las cuales son consecuencia de fallas desarrolladas en la fabricación y también se incluyen fallas producto del tiempo de servicio del conductor. Entre la causas principales se tienen:

- **Defectos iniciales del aislamiento.** Principalmente debido a un espesor delgado producto de errores en la fabricación o por defectos estructurales resultado de fallas en los procesos de elaboración.
- **Deterioro del aislamiento del cable.** Consecuencia del uso, por lo que se pueden mencionar:
 - Deterioro del aislamiento en cables de 10 años de edad o menos.
 - Deterioro del aislamiento de cables de 10 años a 20 años de edad.
 - Deterioro del aislamiento de cables mayores a 20 años de edad.

3.2.3. Causas indirectas

Se basan en causas externas al conductor, es decir por factores ajenos al sistema eléctrico subterráneo. Se identifican las siguientes causas:

- **Fallas en cables adyacentes.** El aislamiento se funde o carboniza, lo que ocasiona averías en el sistema propio y aledaños.
- **Descarga eléctrica.** En este caso el aislamiento es perforado por una fuente de alto voltaje. No es común este tipo de falla; cuando ocurre, los factores causantes son evidentes.
- **Daños mecánicos.** Este tipo de daño involucra directamente penetración de humedad a través de una ruptura en el aislamiento, la falla puede ocasionar la pérdida del compuesto aislante. Las principales causas son:
 - **Vibraciones.** Producto del paso de automóviles pesados sobre la acera, puede ocasionar que el aislamiento del cable se rompa cerca de los soportes o en los ductos.
 - **Expansión.** El movimiento diario del cable con vibraciones diarias en carga, puede ocasionar fatiga y roturas del aislamiento, lo que provoca rozaduras causantes

- **Causas externas.** Originadas por implementos de trabajo como: vibradores, herramientas de corte, etc. La causa de falla por lo general es evidente, en otros casos un examen de localización de falla indicará el motivo de falla.
- **Daños causados durante la instalación.** Se generan daños debido a ranuras o canales en el aislamiento generados por piedras, concreto roto en el ducto, etc. Este tipo de fracturas en forma de ranuras profundas o surcos se causan generalmente sobre el aislamiento, una causante puede ser la fuerza excesiva de halar el cable en el proceso de instalación.

3.2.4. Causas desconocidas

Los conductores a simple vista no presentan daños en su estructura. Cuando la evidencia disponible de forma directa o indirecta no da una explicación razonable de la falla. Se recomienda que el uso de esta clasificación sea reducido y se motiva siempre a buscar el motivo de falla.

3.3. Factores de degradación

En gran porcentaje las fallas en cables aislados se presentan debido a que el estrés eléctrico local será mayor que la rigidez dieléctrica del material usado como aislante. Con el pasar del tiempo el aislamiento presenta degradación y envejecimiento debido a varios factores que acuerdo a (Chancusig Chiliguano, 2021) son:



Figura 3. 3 Ingreso de humedad en el cable.

Fuente:(L Agudelo & Velez, 2018, p. 1)

3.3.1. Estrés térmico

El aumento de temperatura provoca el estrés térmico, que es consecuencia principalmente de dimensionamientos incorrectos, someter al cable a trabajos prolongados con corrientes elevadas. El nivel de degradación dependerá del tipo de aislamiento que contenga, específicamente los cables que contengan aislamiento seco pueden operar con un límite térmico más flexible para el caso de sobrecargas o cortocircuitos.



Figura 3. 4 Disposición inadecuada en ductos.

Fuente: (L Agudelo & Velez, 2018, p. 2)

3.3.2. Estrés eléctrico

La presencia de contaminantes, defectos de fabricación, roturas en el aislamiento, protuberancias, mala adherencia de capas semiconductoras, mala instalación de chaquetas; son las causas más comunes para que el conductor presente estrés eléctrico.

3.3.3. Arborescencias de agua

Se denominan de esta forma a las roturas microscópicas que se encuentran dentro del aislamiento generadas por humedad, impurezas o contaminación; se desarrollan formando caminos internos en el aislamiento, lo que produce pérdidas, degradando al conductor y consecuentemente aumenta el riesgo de falla.

3.3.4. Factores químicos

El constante contacto con agentes químicos tales como hidrocarburos, fertilizantes, agua, etc., provoca deformaciones en el aislamiento que dañan la homogeneidad del cable lo que consecuentemente ocasiona estrés eléctrico localizado.

3.3.5. Corrosión de la pantalla metálica

“Se produce debido al ingreso de humedad por medio de la chaqueta” (L Agudelo & Velez, 2018, p. 2).

3.3.6. Estrés eléctrico en terminales

Debido a procesos mal ejecutados en la instalación, por factores ambientales no adecuados como la presencia de humedad o ingreso de contaminantes al aislamiento, que ocasionan reducción de la rigidez dieléctrica, misma que se puede evidenciar mediante la aplicación de pruebas de diagnóstico como: Medición de Tangente Delta, Descargas Parciales y Reflectometría.

3.4. Fallas más comunes en cables

3.4.1. Descripción general

El circuito equivalente de una falla se muestra en la siguiente figura, la misma que se encuentra conformada por la propia resistencia de falla R_f , que se encuentra en paralelo con un descargador V_d .

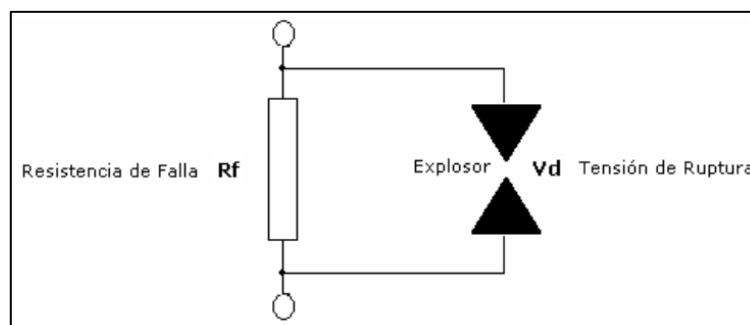


Figura 3. 5 Circuito equivalente de falla.

Fuente: (INDUCOR S.A, 2010, p. 4)

De acuerdo, al tipo de falla los valores que deben tomar la resistencia de falla R_f como el descargador V_d varían mucho, teniendo rangos de $R_f > 1k\Omega$ y $V_d > 1kV$. Las fallas mayormente se presentan en derivación entre el conductor y la pantalla, esto no descarta otras combinaciones. En la figura 3.6 se presenta algunas posibles fallas:

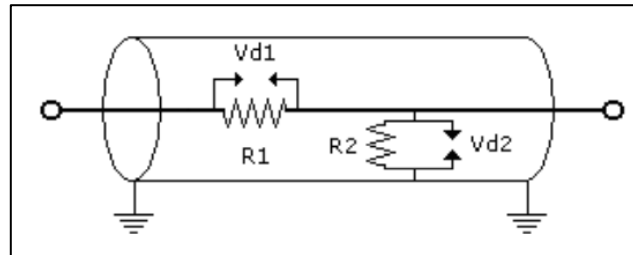


Figura 3. 6 Tipos de fallas.

Fuente: (INDUCOR S.A, 2010, p. 4)

Donde:

V_{d1} y V_{d2} , representan la tensión de descarga.

R_1 y R_2 , representan la resistencia de continuidad y de aislación a tierra.

3.4.2. Falla de baja resistencia

Para este caso el cable bajo prueba presenta continuidad entre sus extremos lo que indica que la resistencia serie $R_1 = 0$. Para el caso de la resistencia de falla a tierra R_2 , es un valor muy bajo o inferior comparándola con la resistencia de aislación R_a , todo esto tomado en un cable que se encuentre en buenas condiciones.

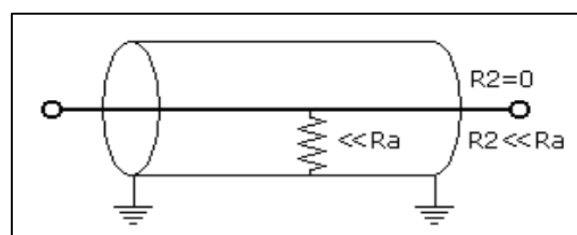


Figura 3. 7 Falla de baja resistencia.

Fuente: (INDUCOR S.A, 2010, p. 5)

3.4.3. Falla de alta resistencia

Para este caso, la continuidad entre los extremos del conductor bajo prueba se mantiene es decir $R_1 = 0$. La tensión de falla a tierra es mayor que la tensión continua de ensayo, lo que conlleva que, al aplicar al cable, la tensión V_e , no se producirán descargas disruptivas en la falla, analizando la corriente medida de pérdida i_p , se puede concluir que la resistencia de falla a tierra R_2 es menor que la resistencia de aislación R_a .

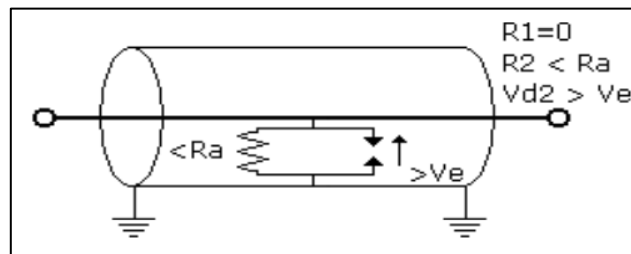


Figura 3. 8 Falla de alta resistencia.

Fuente: (INDUCOR S.A, 2010, p. 5)

3.4.4. Falla intermitente

Se las conoce también como fallas tipo “flash”, de forma similar en este caso el cable presenta continuidad entre sus extremos $R_1 = 0$, Cuando el cable se encuentra bajo tensión de ensayo V_e , la corriente de pérdidas medida i_p , es pequeña, lo que conlleva a tener en este caso $R_2 \cong R_a$. Analizando el tiempo que se somete bajo prueba, se tiene que para un tiempo t_1 , el cual sea menor al tiempo de mínimo de ensayo exigido por la normativa denominado t_e , se producen descargas en la zona de falla, lo que provoca un aumento brusco de i_p , consecuentemente una caída de V_e a un valor muy cercano a cero. Luego de producirse la primera descarga, el cable puede volver a tener las condiciones iniciales de ensayo y se puede producir otras descargas espaciadas en el tiempo o a su vez que la primera descarga modifique el t_1 , y se produzca un aumento brusco de i_p , cada vez que la tensión de ensayo llegue al valor de ruptura V_{d2} . (INDUCOR S.A, 2010, p. 5)

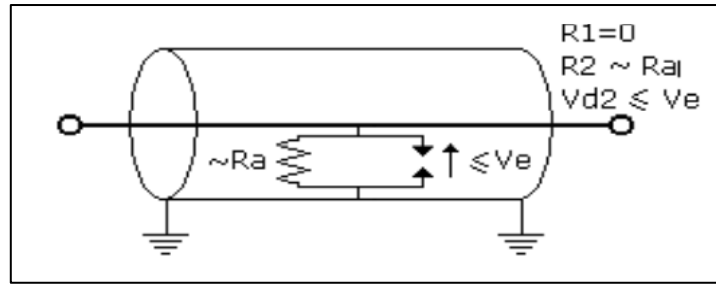


Figura 3. 9 *Falla intermitente*

Fuente: (INDUCOR S.A, 2010, p. 5)

3.4.5. Cable cortado

Para el análisis de este caso, no existe continuidad en los extremos del cable que se encuentra bajo prueba, por lo tanto, $R_1 \sim R_a$. Se tiene que la resistencia de falla a tierra R_2 , es mayor que la resistencia de aislación R_a , y de la misma manera V_{d1} y V_{d2} , son mayores que la tensión de ensayo. Los elementos presentados en el circuito equivalente para los casos anteriores pueden variar significativamente, lo que conlleva a que sean casos independientes cada uno de ellos, lo que hace posible una clasificación según el tipo de falla, de la misma manera no se puede descartar una combinación de estas fallas como un caso completamente real.

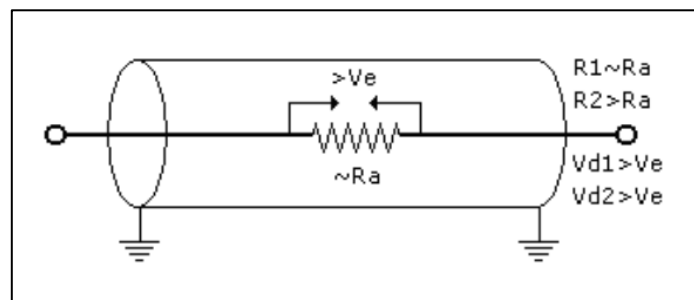


Figura 3. 10 *Cable cortado.*

Fuente: (INDUCOR S.A, 2010, p. 6)

3.5. Métodos para prevención y detección de fallos

3.5.1. Generalidades

En todo el análisis de los fallos en cables subterráneos, la prevención es una parte importante enfocada en el mantenimiento, debido a que mantener el sistema representa menor gasto que reparar. Las técnicas actuales para el diagnóstico brindan las opciones de controlar y determinar a futuro que tipo de falla se puede presentar en el sistema, sin tener que desenterrar el cable. De acuerdo al análisis realizado por (Tayupanta Albán et al., 2017) los métodos más reconocidos a nivel mundial son los siguientes:

- Descargas parciales.
- Microscopia digital 3D
- Rayos X
- De muy baja frecuencia (Very low frequency)

3.5.2. Descargas parciales

En el proceso de fabricación de los cables se debe tomar especial cuidado debido a que fallas en el mismo por más pequeñas que sean terminarán en fallas significativas en los sistemas eléctricos subterráneos, evidencia de esto son las pequeñas burbujas de aire (gas) de baja rigidez dieléctrica no controladas en la fabricación, quedando aprisionadas en el interior formando discontinuidades, las cuales al momento de energizar el conductor dan como resultado la diferencia de potencial, con el valor de tensión energizado el conductor se puede llegar al valor disruptivo del aire encerrado, lo que termina en descargas parciales. “Más del 90% de los puntos débiles en el aislamiento de los cables de MT/AT, generan descargas parciales antes de convertirse en falla” (INDUCOR S.A, 2010).

Esta técnica de medición se considera un indicador importante con el cual se puede determinar el nivel de degradación que está soportando el conductor, se usa de forma continua para realizar tareas de mantenimiento.

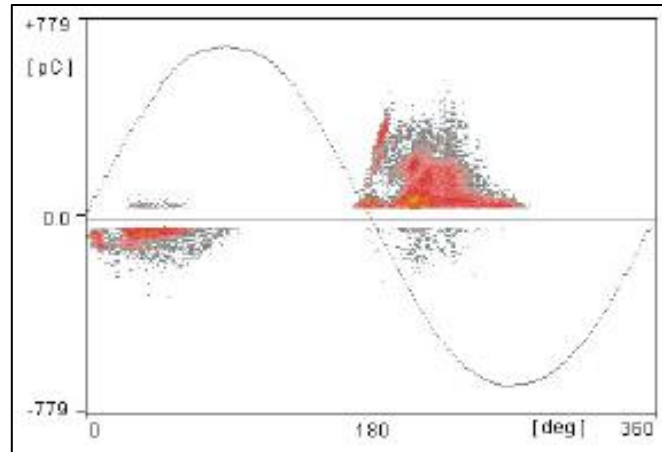


Figura 3. 11 Descarga parcial en capa semiconductor externa.

Fuente: (Porfiri, 2009, p. 2)

3.5.3. Microscopia digital 3D

Esta técnica es la combinación de la iluminación violeta y el uso de tintas penetrantes, su uso se centra en el análisis y confirmación de los resultados obtenidos en las pruebas eléctricas, la ventaja de este método es la visualización de las fallas, otras pruebas solo pueden detectar o mensurar las fallas. En la figura 3.12 se muestra un tipo de falla en la parte semiconductor interna.

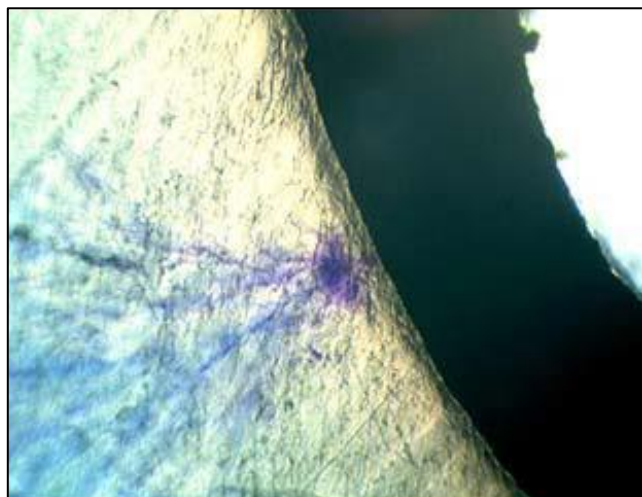


Figura 3. 12 Falla vista desde microscopia digital 3D.

Fuente: (Porfiri, 2009, p. 4)

3.5.4. Rayos X

Se lo considera como un aliado indispensable en el análisis forense del origen de los daños ocasionados en cables, accesorios de sistemas eléctricos subterráneos, es la herramienta previa al desarme de la muestra bajo análisis donde el investigador obtiene antes del desarme una clara evidencia del origen del daño que llevo al colapso del sistema. Se lo usa también en sistemas en servicio, para la estimación de la degradación ascendente, por lo que se lo incluye dentro de los denominados ensayos no destructivos, su aplicación permite detectar la presencia, tamaño y posición de defectos como grietas y fisuras, trazas de carbón, oclusiones gaseosas, o impurezas.

Usa radiaciones electromagnéticas las cuales se propagan a la velocidad de la luz, con una menor longitud de onda y una mayor energía, conocida también como penetración de luz visible. Se propaga siguiendo una línea recta sin desviaciones por campos eléctricos o magnéticos externos. Debido a que los rayos atraviesan los cuerpos opacos sin reflejarse ni refractarse son absorbidos en mayor o menor medida dependiendo el espesor o densidad del material a atravesar. El análisis de forma visual se concentrará en la búsqueda de un contraste ya sea en blanco y negro, o a su vez a color.

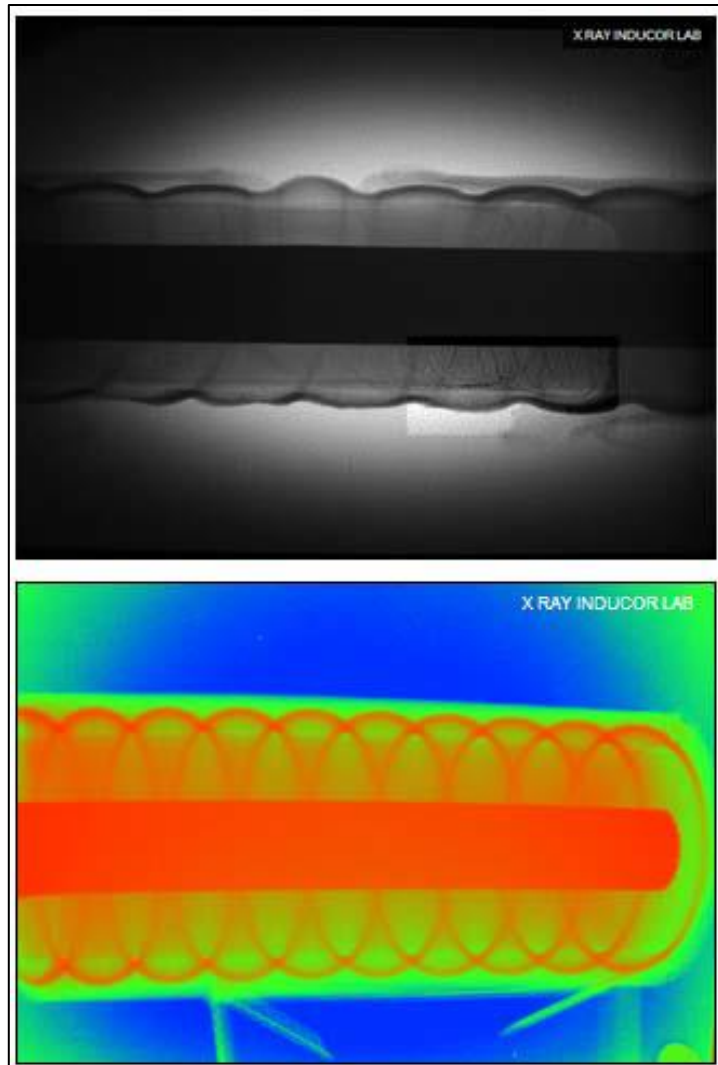


Figura 3. 13 Rayos X sobre cable de 110kV.

Fuente: (Porfiri, 2009, p. 5)

3.5.5. De muy baja frecuencia (Very low frequency)

Según la (IEEE SA - P400, 2019) se denomina equipo de ensayo bajo la denominación VLF (Muy baja frecuencia), todo aquel que se encuentre en la capacidad de generar una señal de corriente alterna cuya frecuencia este dentro del rango de 0.01 Hz a 1Hz. Históricamente muy usados para realizar pruebas de máquinas rotantes, donde al trabajar en muy baja frecuencia para el caso de 0.1 Hz, la duración de un ciclo completo corresponde a 10 segundos, diferencia de los 16.6 milisegundos correspondientes a 60 Hz. De la misma

manera, se ha usado para realizar pruebas en el dieléctrico de los cables y muy ocasionalmente para pruebas de aisladores, interruptores y tableros eléctricos.

En la actualidad estos equipos se comercializan con tensiones de hasta 200 kV, se debe considerar al momento de elegir un equipo VLF, su capacidad de carga máxima de prueba, en lo cual se tienen modelos desde los 2 μF hasta los 55 μF .

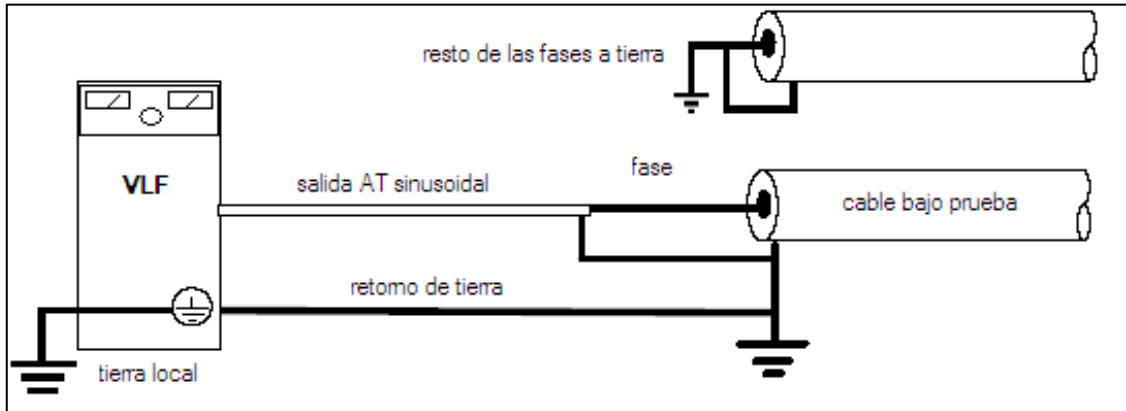


Figura 3. 14 *Ensayo VLF en cables.*

Fuente: (Porfiri, 2009, p. 8)

Capítulo 4: Pruebas en cables de distribución subterránea

4.1. Pruebas de campo

Para sistemas de distribución subterránea, se realizan pruebas de campo que tienen como objetivo principal comprobar el estado de los cables instalados en el sistema, identificando posibles fallas y si su aislamiento es el idóneo para la red instalada. Con el fin de comprobar el aislamiento del sistema de cables, se emplean desde pruebas sencillas como las pruebas de resistencia de aislamiento, que dan como resultado una valoración de aprobado o no aprobado, hasta pruebas más complejas donde se realiza el análisis de los resultados, por ejemplo: detectar descargas parciales, respuesta dieléctrica, entre otras.

El análisis de las pruebas de campo en cables subterráneos, se lleva a cabo en base a las siguientes normas:

- IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above – IEEE Std. 400-2012.
- Guide for Field Testing of Laminated Dielectric, Shielded AC Power Cable Systems Rated 5 kV to 500 kV Using High Voltage Direct Current (HVDC) – IEEE Std. 400.1-2018.
- Standard for Acceptance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems – ANSI/NETA ATS-2017.
- Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery – IEEE Std. 43-2013.

4.1.1. Normativa IEEE Std. 400-2012

Esta guía posee una visión generalizada de los métodos disponibles para ejecutar las pruebas eléctricas en campo de los sistemas de cables apantallados. Su objetivo principal es asistir en la selección de la prueba más idónea según la situación de interés. Detalla las fuentes que se utilizan para realizar las pruebas de campo. Además, dentro del material no

se aborda: el análisis de los resultados, los niveles de tensión o el tiempo de aplicación de las pruebas eléctricas de campo.

Se describen las ventajas y desventajas de los métodos de pruebas, se los tabulan por categorías para facilitar la comparación entre los diferentes ensayos de campo con los tipos de fuentes de tensión. Se han añadido nuevos métodos de ensayos y se han incluido en la categoría de respuesta dieléctrica: factor de disipación, corriente de fuga y espectroscopia; también se incluye la reflectometría en dominio del tiempo y las imágenes infrarrojas térmicas como pruebas de aislamiento complementarias.

Clasificación de las pruebas de campo. Con base en lo establecido en el estándar (IEEE Std. 400, 2012), las pruebas de campo de los cables se agrupan en tres categorías diferentes:

- Pruebas de Instalación
- Pruebas de Aceptación
- Pruebas de Mantenimiento

Existen otras pruebas de campo que se realizan antes de poner en funcionamiento el sistema, estas no valoran el aislamiento de los cables, son desarrolladas como medidas de precaución general y verificación de la ausencia de impedancias bajas de la fase a la tierra, antes de reenergizar, por tal motivo no son analizadas dentro de la norma.

Pruebas de instalación. Estas pruebas son empleadas para verificar tramos del cable luego de su instalación, pero antes de su puesta en funcionamiento. Son realizadas con mayor frecuencia en el sector industrial y de energía, éstas tienen como propósito identificar daños en el transporte, el almacenamiento o su instalación. La ventaja de esta prueba es que se realiza sólo en tramos de cable; como dato adicional se debe tener precaución durante la prueba con los extremos del cable para evitar una fuga excesiva o una descarga eléctrica.

Pruebas de aceptación. Estas pruebas son desarrolladas antes de la puesta en servicio, primero se verifica que, durante el transporte, la manipulación y la instalación no se

han dañado los componentes de los sistemas de cables. Segundo, se identifica la calidad de ejecución para determinar que el equipo ha sido acondicionado con éxito a todos los nuevos componentes en el sitio y se han eliminado todas las imperfecciones relevantes para el aislamiento. Cuando uno de los cables o accesorios no supera las pruebas, se debe reparar o sustituir y repetir la prueba de aceptación hasta que el sistema de cables cumpla con los requerimientos establecidos.

Dentro de la normativa (IEEE Std. 400, 2012, p. 18), se hace énfasis en que “no es probable que las pruebas de alta tensión, con niveles de tensión y duración inferiores a las pruebas de fábrica, de cables y accesorios nuevos correctamente instalados y sin defectos causen una reducción significativa de su vida útil prevista”.

Pruebas de mantenimiento. Estas pruebas evalúan el estado actual de los sistemas de cables en servicio. Para proteger y mejorar la fiabilidad del sistema es necesario que se realicen supervisiones periódicamente para verificar el envejecimiento del aislamiento y posterior a esto, tomar las medidas correctivas en correspondencia con los resultados. En base a pruebas anteriores a cables similares en diseño y condiciones de servicio, se pueden establecer criterios de decisión. Además, existe la posibilidad que el sistema de cables no pueda soportar los niveles y duraciones de tensión, que estaban diseñados de forma inicial en las pruebas de fabricación; por lo que en las pruebas de mantenimiento se deben emplear niveles de tensión más bajos o con duraciones más cortas, o una combinación de ambos. Estas pruebas se realizan en períodos no críticos y en condiciones planificadas, con la finalidad de reducir los costos y continuidad del servicio.

Parámetros y condiciones para el análisis de los datos de las pruebas de campo. Luego de un análisis general de las diferentes pruebas de campo, se realiza la selección del tipo de prueba a ejecutarse, considerando: posibles daños de los sistemas de cables y los requisitos de puesta en servicio. En el presente análisis, las pruebas consideradas son las de aceptación, en las cuales los parámetros se definirán de acuerdo con la calidad, la fiabilidad,

los resultados de las pruebas de fabricación y la experiencia acumulada por parte del personal técnico. Para identificar el tipo de pruebas de aceptación que se emplean en los sistemas de cables se revisan los datos de las pruebas de fabricación, además de las especificaciones de los cables y accesorios.

Dentro de la normativa (IEEE Std. 400, 2012, p. 9), se recomienda un previo análisis de las normas: “NEMA WC74-2006/ANSI/ICEA S-93-639, ANSI/ICEA S-108-720-2004, IEC 60502-2, IEC 60840, IEC 62067, IEEE Std. 404TM, IEEE Std. 386TM y IEEE Std. 48TM”. Las características eléctricas que se consideran son las pruebas de rutina: resistencia a la tensión, descargas parciales, factor de disipación, resistencia de aislamiento, resistencia de ruptura en corriente alterna y resistencia a la ruptura por impulsos; los datos de estas pruebas se toman como referencia para las pruebas de los componentes de los sistemas de cables.

Para el análisis de los datos y resultados obtenidos en las pruebas, la normativa (IEEE Std. 400, 2012) establece la importancia de tener en consideración los siguientes aspectos:

- “El entorno de las pruebas de campo (humedad, presión barométrica, temperatura, ruido eléctrico ambiental, etc.) puede influir en los resultados”(IEEE Std. 400, 2012, p. 9).
- Las características de la fuente de tensión, la forma de onda o frecuencia, nivel de tensión, entre otros; esto debido a que las pruebas de campo difieren en condiciones, ocasionando que los resultados no sean fácilmente comparables.
- Los componentes de los sistemas de cables envejecen de forma natural durante el servicio, esto ocasiona que las características de los componentes cambien con el tiempo. Los cambios en los valores medidos no implican necesariamente que los componentes fallen en el futuro. Por esta razón los valores obtenidos en campo deben ser evaluados con cuidado y ser comparados con sistemas de cables similares y con rendimiento conocido.

- Es recomendable referirse a los criterios de prueba que se encuentran dentro de la normativa, para las decisiones de aceptación o mantenimiento.

Las condiciones de funcionamiento también influyen sobre los sistemas de cables, y deben ser analizadas. En el estándar (IEEE Std. 400, 2012, p. 10) se indican:

- Tensión, carga y temperaturas normales de funcionamiento.
- Máxima sobretensión posible resultante de condiciones de conmutación, sobretensión o falla.
- Configuración del sistema de cables: alimentadores, tipo de conexión a tierra, etc.
- Corriente máxima normal, de emergencia y de cortocircuito.
- Ubicación húmeda o seca, directamente enterrada o en ductos.
- Otros factores de envejecimiento: configuración de la instalación, etc.

Registro de información. Según la norma (IEEE Std. 400, 2012, p. 11), la información que se muestra a continuación se debe registrar en cada prueba de campo realizada con la finalidad de ser analizada en el futuro y mantener un registro de las condiciones en las cuales se realizaron las pruebas:

- Nombre, ubicación y longitud del sistema de cables.
- Tipo de cables y accesorios (empalmes y terminaciones), clasificación y fecha de colocación.
- Tensión de funcionamiento del sistema de cables.
- Método de prueba, nivel de tensión (Pico y RMS), duración, frecuencia, etc.
- Equipo de ensayo empleado (tipo y número de serie).
- Resultados de las pruebas: aprobado, suspenso o medidas de evaluación basada en la técnica de ensayo.
- Nivel de tensión de prueba.
- Tiempo en la prueba.
- Fecha, lugar y nombre de la persona que realiza la prueba.

Clasificación de las pruebas de campo. En esta sección se detallan de forma generalizada los diferentes métodos de prueba de campo que se han empleado y se han reportado para los sistemas de cables apantallados:

- Resistencia a la tensión.
- Respuesta dieléctrica.
 - Factor de disipación.
 - Corriente de fuga.
 - Tensión de recuperación.
 - Corriente de polarización/despolarización.
- Descarga parcial.
 - Medición eléctrica.
 - Medición acústica.
- Reflectometría en el dominio del tiempo.
- Imágenes térmicas por infrarrojo.

Con base en la confiabilidad y calidad del sistema de cables eléctricos apantallados, se consideran los siguientes tres aspectos para las pruebas de campo y el análisis de los resultados (IEEE Std. 400, 2012, p. 12):

- Un aislamiento sano sin daños o envejecido puede soportar un nivel de tensión mayor en comparación a uno que posee estos defectos, en consecuencia, el nivel de resistencia de aislamiento será menor.
- La prueba de campo debe evitar la disminución de la vida útil de los cables.
- El nivel de tensión y la duración son elementos de suma importancia e inseparables, del rendimiento del circuito del cable durante y después de la prueba. Las tensiones y duraciones recomendadas para las pruebas se basan “en extensas pruebas de campo y en datos empíricos procedentes de experimentos”(IEEE Std. 400, 2012, p. 12).

La supervisión de las propiedades del aislamiento y el efecto de la tensión durante las pruebas de resistencia, ayudan a mejorar la evaluación del estado del aislamiento. Las pruebas con niveles de tensión y duraciones recomendadas para cada tipo, se encuentran detalladas en las siguientes normativas:

- IEEE Std 400.1-2018, IEEE Guide for Field Testing of Laminated Dielectric, Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and above with High Direct Current Voltage.
- IEEE Std 400.2-2013, IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF).
- IEEE Std 400.3-2006, IEEE Guide for Partial Discharge Testing of Shielded Power Cable Systems in a Field Environment.
- IEEE P400.4, Draft Guide for Field-Testing of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with Damped Alternating Current Voltage (DAC).

Resistencia a la tensión. Para las pruebas de resistencia se aplica un nivel de tensión nominal o superior por un período de tiempo determinado, estas pruebas son aplicables a los diferentes tipos de cables y accesorios. Estas se dividen en dos clases de pruebas:

- Prueba de resistencia simple (no supervisada): Se aplica una tensión de prueba y se registra la capacidad de mantener la tensión, hace que los puntos débiles del circuito fallen durante la aplicación de la tensión y que los resultados obtenidos se detallan como pasa o no pasa. Estas pruebas son las elementales de las pruebas eléctricas del aislamiento de los cables, esta no detecta los fallos o los efectos que se produzcan en el aislamiento, la tensión de prueba es superior a la tensión nominal.
- Prueba de resistencia monitoreado: se aplica una tensión de prueba y se obtienen atributos adicionales que se emplean para determinar si el sistema pasa o tiene una falla, estos atributos son propiedades de diagnóstico avanzadas.

Se han definido varios tipos de tensión para las pruebas de campo de resistencia de aislamiento, la tensión aplicada puede ser: Corriente Alterna (AC), Corriente Directa (DC), Muy Baja Frecuencia (VLF) o Damped AC - Amortiguada AC (DAC). La tensión de prueba está en el rango de 1.5 hasta 3.0 veces la tensión de funcionamiento nominal.

Para las pruebas de campo de tensión de muy baja frecuencia (VLF), se utiliza una tensión con una frecuencia entre 0,01 Hz a 1,0 Hz para todos los tipos de aislamiento de los cables. Este tipo de tensión se emplean principalmente para cables de distribución, para un resultado más amplio se pueden medir las descargas parciales y la respuesta dieléctrica detalla en la norma (IEEE Std. 400.2, 2013).

La tensión AC amortiguada (DAC) se describe en la norma (IEEE Std. 400.4, 2016), la frecuencia empleada es entre 20 Hz y 500 Hz, éstas “se generan cargando el objeto de prueba hasta un nivel de tensión predeterminado y descargando después la capacitancia del objeto de prueba a través de una inductancia adecuada” (IEEE Std. 400, 2012, p. 14). En el período de carga el elemento es sometido a una tensión, que aumenta continuamente a una velocidad en correspondencia a la tensión de prueba analizada, en el período de descarga la frecuencia depende del objeto de prueba y de la inductancia. Por la menor duración de la excitación y el decrecimiento de la tensión, los resultados de las pruebas de campo de DAC son diferentes en comparación a la prueba de tensión AC.

La tensión directa es la más antigua dentro de las pruebas de aislamiento de cables laminados. El equipo empleado para esta prueba es ligero y compacto y requiere una potencia de entrada pequeña. Dentro de la normativa (IEEE Std. 400.1, 2018), se explica con detalle el desarrollo de esta prueba para cables blindados con dieléctricos laminados. El análisis de las pruebas de campo de corriente directa de alto voltaje (HVDC) es menos eficaz para detectar ciertos tipos de defectos en el aislamiento de los sistemas de cables en comparativa que la tensión AC. La mayoría de fabricantes no emplean el método HVDC en las pruebas de resistencia para su producción, ya que en las últimas décadas se han determinado efectos

adversos sobre el aislamiento de cables XLPE envejecidos. Esta prueba acumula cargas espaciales en el aislamiento del XLPE, las cuales si permanecen el aislamiento pueden producir fallos en los cables cuando se vuelva a repetir una tensión de AC, en la norma (ICEA S-94-649, 2021) se determinan los niveles de tensión y las duraciones utilizadas en las pruebas HVDC de los cables nuevos. La norma (IEEE Std. 400, 2012) recomienda que las pruebas de resistencia con tensión HVDC, no se empleen para cables con de 5 años de uso.

Selección del método de prueba y su aplicación. Para obtener un menor grado de incertidumbre en el diagnóstico de las pruebas, se puede combinar entre dos o más métodos de prueba, que al desarrollarse juntas sus ventajas se complementen entre ellas.

Para la elección del método de prueba a aplicar, primero se debe tener en cuenta el objetivo de la prueba, es decir, si las pruebas son para instalación, aceptación o de mantenimiento. En segundo lugar, la empresa distribuidora tiene que analizar los tipos de cables y accesorios que se van a probar, las características eléctricas, tasa de fallos, la instalación (enterrada o en ductos) y la longitud del sistema de cables que se van a analizar. En caso de existir una tasa de fallos conocida, el método a emplearse debe tener la capacidad de clasificarlos. En tercer lugar, es importante reparar los componentes dañados que no han logrado superar la prueba, dependiendo si se cambiará solo el punto de falla o el tramo de cable dañado. En cuarto lugar, se analiza las ventajas y desventajas de los métodos de prueba, así como experiencias de otros ensayos con sistemas de cables y problemas similares como base de datos iniciales.

Finalmente, la empresa distribuidora debe tener en consideración que existe una constante evolución en el desarrollo técnico de los equipos de pruebas y el conocimiento técnico relacionado con las propiedades de diagnóstico. Por este motivo se recomienda establecer la mejor tecnología de evaluación y revisar el alcance de los estudios según las necesidades de las pruebas a realizarse.

4.1.2. Norma ANSI/NETA ATS-2017

Esta guía abarca las pruebas e inspecciones para evaluar la idoneidad de la puesta en servicio y la recepción definitiva de los equipos y sistemas de energía eléctrica. Esto con la finalidad de asegurar que los equipos y sistemas eléctricos están en correcto funcionamiento, cumplen con los estándares aplicables y las tolerancias del fabricante, además de estar en concordancia con las características del diseño. Las especificaciones de funcionamiento no pretenden determinar todos los problemas de seguridad asociados al uso.

Requisitos de organización y personal de pruebas. Las pruebas deben ser realizadas por personal capacitado, con el debido conocimiento y experticia en su ejecución. Además, éstas serán desarrolladas de manera independiente, para garantizar la imparcialidad en los procedimientos y resultados de las mismas. La organización de pruebas debe tener la documentación correcta para demostrar que cumple con los requisitos.

Los técnicos necesitan la experticia y entrenamiento en los elementos a evaluarse, llevando las pruebas de forma segura y con conocimiento de los riesgos que conllevan las mismas.

Seguridad y precauciones. Esta guía incluye los procedimientos de seguridad específicos, debido a que la mayoría de las pruebas e inspecciones recomendadas implican un elevado riesgo. Las medidas que se necesita tener en consideración son:

- Ley de Seguridad y Salud en el Trabajo.
- ANSI/NFPA 70E, Norma para la seguridad eléctrica en el lugar de trabajo (ANSI/NFPA 70E, 2018).
- Procedimientos operativos de seguridad local y estatal.
- Prácticas de seguridad del propietario

Se requiere la presencia de un técnico responsable, que será designado para supervisar que se cumplan las normas de seguridad en las pruebas. Todos los equipos estarán desenergizados y conectados a tierra para realizar las pruebas.

El equipo de debe estar calibrado, en óptimas condiciones eléctricas y mecánicas. Además, este medirá con precisión los valores obtenidos en las pruebas, la forma de la onda y frecuencia de los equipos, tendrán que ser coherentes para el desarrollo de los ensayos

Calibración del equipo. Los equipos son calibrados para que mantengan la exactitud nominal de cada instrumento, la precisión será directamente atribuible al Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST). Los instrumentos serán calibrados de acuerdo con el siguiente programa de frecuencia (ANSI/NETA ATS, 2017) :

- Instrumentos de campo: analógico y digital, 12 meses con máximo.
- Instrumentos de laboratorio: 12 meses con máximo.
- Equipos especiales arrendado: 12 meses con máximo.

Para equipos de prueba, las etiquetas de calibración que contienen la fecha tienen que ser visibles, la calibración estándar es mayor en comparación a otros equipos y se recomienda llevar registro de las fechas y resultados de los equipos calibrados o probados.

Informe de la prueba. Para las pruebas se lleva un informe detallado y organizado donde se describirá el desarrollo del tipo de prueba realizada. Los datos y valores que se incluyen de forma general, según la norma (ANSI/NETA ATS, 2017, p. 14), son:

- Resumen del proyecto.
- Descripción de los equipos de prueba.
- Descripción de los ensayos.
- Configuración de dispositivos.
- Datos de las pruebas.
- Análisis y recomendaciones.

Además de estos datos iniciales, para el informe de la prueba, “la organización de pruebas proporcionará una o varias copias del informe completo, como se especifica en el contrato de pruebas de aceptación” (ANSI/NETA ATS, 2017, p. 14). Los requisitos mínimos

que se incluyen para llevar un registro de los datos de la prueba en base a la norma (ANSI/NETA ATS, 2017) son :

- Identificación de la organización de pruebas.
- Identificación del equipo.
- Datos de la placa (las características).
- Humedad, temperatura y otras condiciones que puedan afectar a los resultados de las pruebas y/o calibraciones.
- Fecha de inspección, pruebas, mantenimiento, y/o calibraciones.
- Identificación del técnico de pruebas.
- Detalle de las inspecciones, pruebas, mantenimiento, y/o calibraciones que deben realizarse y registrarse.
- Registro de los resultados luego de la calibración correspondiente.
- Indicación de los resultados tal como se encuentran y como se dejan, según el caso.
- Identificación de todos los resultados de las pruebas que estén fuera de las tolerancias especificadas.
- Espacios suficientes para poder indicar todos los resultados y comentarios.

Procedimiento de inspección y pruebas. Para analizar los equipos eléctricos de potencia y de los sistemas, primero se inspecciona la parte visual y mecánica de los elementos o materiales, luego se realizan las pruebas eléctricas a los mismos y finalmente se obtienen resultados en estas dos áreas. En función del interés de este trabajo, se tratan los dos siguientes elementos:

Cables de bajo voltaje – 600 $V_{m\acute{a}x}$. Primero para la parte de inspección visual y mecánica la norma (ANSI/NETA ATS, 2017, p. 39), detalla el siguiente proceso:

- Comparar los datos de los cables con: los planos y las especificaciones.
- Inspeccionar las secciones expuestas del cable, para revisar daños físicos y que la conexión concuerde con el diagrama unifilar.

- Verificar las conexiones eléctricas atornilladas.
- Examinar los conectores de comprensión aplicados para comprobar que los cables coincidan y tenga una hendidura correcta.
- Inspeccionar la correcta identificación y disposición de los cables.
- Comprobar el aislamiento de la cubierta del cable y su estado.

Luego, para las pruebas eléctricas la norma (ANSI/NETA ATS, 2017) describe los siguientes lineamientos:

- Realizar las mediciones de resistencia a través de las conexiones atornilladas con un óhmetro de baja resistencia.
- “Ejecutar la prueba de resistencia del aislamiento en cada conductor con respecto a la tierra y a los conductores adyacentes. El potencial aplicado será de 500 voltios para cables de 300 voltios y de 1000 voltios para cables de 600 voltios. La duración de la prueba será de un minuto“(ANSI/NETA ATS, 2017, p. 39).
- Desarrollar las pruebas de continuidad para comprobar la correcta conexión del cable.
- Verificar la resistencia uniforme de los conductores en paralelo.

Con los resultados de los ensayos eléctricos se realiza el siguiente análisis en base a la norma (ANSI/NETA ATS, 2017, p. 40):

- Los valores de resistencia al aislamiento deberán estar en concordancia con los datos brindados por el fabricante, en caso de ausencia de estos datos se emplea la tabla 4.1. Se analizarán valores de resistencia menores a aquellos de la tabla 4.1.
- Verificar la continuidad del cable.
- Se debe realizar un análisis a las desviaciones en la resistencia entre los conductores paralelos.

Cables de media y alta tensión. Primero, para la parte de inspección visual y mecánica la norma (ANSI/NETA ATS, 2017, p. 41), detalla el siguiente proceso:

- Comparar los datos de los cables con los planos y las especificaciones.
- Examinar las secciones expuestas de los cables en busca de daños físicos.
- Inspeccionar la puesta a tierra de la pantalla, los soportes del cable y las terminaciones.
- Verificar que los dobleces visibles de los cables cumplen o superan el radio de curvatura mínimo publicado por la ICEA y el fabricante.
- Comprobar la ignifugidad en las zonas comunes de los cables.
- Si los cables están terminados a través de transformadores de corriente, verificar que los conductores neutros y de tierra están correctamente colocados y que los apantallamientos están correctamente terminados, para el funcionamiento de los dispositivos de protección.
- Examinar la cubierta del cable y el estado del aislamiento.

Luego, para las pruebas eléctricas la norma (ANSI/NETA ATS, 2017, p. 41) establece los siguientes lineamientos:

- Realizar una prueba de resistencia de aislamiento individualmente en cada conductor y apantallamiento, conectando el resto a tierra. Aplicar la tensión de acuerdo con los datos publicados por el fabricante. En caso de ausencia de los datos publicados por el fabricante, utilizar la tabla 4.1.
- Realizar una prueba de continuidad del apantallamiento en cada cable de alimentación.
- De acuerdo con las normas: ICEA, IEC, IEEE y otras normas consensuadas para cables de energía, las pruebas pueden ser de corriente continua, corriente alterna de alta frecuencia, corriente alterna de muy baja frecuencia o corriente alterna amortiguada (DAC). Estas fuentes pueden utilizarse para realizar las pruebas de resistencia del aislamiento y pruebas de diagnóstico de referencia como: el análisis de descargas parciales y el factor de potencia o la disolución de descarga parcial, y el factor de potencia o el factor de disipación. La selección se hará tras una evaluación

de los métodos de prueba disponibles y una revisión del sistema de cables instalado.

Entre los métodos de prueba disponibles se encuentran:

- Resistencia dieléctrica
 - Tensión dieléctrica soportada en corriente continua (DC).
 - Tensión dieléctrica soportada de muy baja frecuencia (VLF).
 - Tensión dieléctrica soportada de frecuencia de potencia (50/60 Hz).
 - Tensión de corriente alterna amortiguada (DAC)
- Pruebas de diagnóstico de referencia.
 - Factor de potencia/ factor de disipación (tan delta).
 - ✓ Frecuencia de la potencia (50/60 Hz).
 - ✓ Frecuencia muy baja (VLF)
 - Resistencia del aislamiento de DC
 - Descarga parcial
 - ✓ En línea (50/60 Hz)
 - ✓ Fuera de línea
 - × Frecuencia de alimentación (50/60 Hz)
 - × Frecuencia muy baja (VLF)

Con los valores obtenidos en los ensayos de las pruebas visuales y mecánicas se realiza el siguiente análisis de los resultados con base en la norma (ANSI/NETA ATS, 2017, p. 43):

- El radio de curvatura mínimo al que pueden doblarse los cables aislados para la formación permanente deberá ser conforme a la tabla 4.2.

Con los resultados de los ensayos eléctricos, se lleva a cabo el siguiente análisis de los resultados en base a la norma (ANSI/NETA ATS, 2017, p. 43):

- Los valores de resistencia al aislamiento deberán estar en concordancia con los datos brindados por el fabricante, en caso de ausencia de estos datos se emplea la tabla 4.1.
- El apantallamiento deberá mostrar continuidad. Investigar los valores de resistencia superiores a $10\Omega \times 0.31 \text{ km}$ de cable.
- Si no se observan evidencias de problemas o fallos de aislamiento al final del tiempo total de aplicación de tensión durante la prueba, se considera que la muestra de ensayo ha superado la prueba.

Tabla 4. 1

Valores de prueba de resistencia de aislamiento – Aparatos y sistemas eléctricos distintos de las máquinas rotativas.

Clasificación nominal del equipo en Voltios	Tensión de prueba mínima, DC	Resistencia de aislamiento mínima recomendada en $M\Omega$
250	500	25
600	1 000	100
1 000	1 000	100
2 500	1 000	500
5 000	2 500	1 500
8 000	2 500	2 500
15 000	2 500	5 000
25 000	5 000	10 000
34 500	5 000	100 000
46 000 y por encima	5 000	100 000

Nota:

- *A falta de normas consensuadas sobre las pruebas de resistencia al aislamiento, el Consejo de Normalización sugiere los valores representativos anteriores.*
- *Véase la tabla 4.3 y 4.4 para los factores de corrección de la temperatura.*
- *Los resultados de las pruebas dependen de la temperatura del material aislante y de la humedad del entorno ambiente en el momento de la prueba.*
- *Los datos de las pruebas de resistencia al aislamiento pueden utilizarse para establecer un patrón de tendencia. Las desviaciones de la información de referencia permiten evaluar al aislamiento.*
- *Para los cables de media tensión, los valores indicados son típicos. La geometría del conductor y del aislamiento, la temperatura y la longitud total del cable deben tenerse en cuenta.*
- *La geometría del conductor y del aislamiento, la temperatura y la longitud total del cable deben tenerse en cuenta según los datos publicados por los fabricantes para establecer los criterios mínimos de resistencia del aislamiento.*

Fuente: (ANSI/NETA ATS, 2017)

Tabla 4. 2

Radio s mínimos para cables de alimentación - Cables de una o varios conductores con armadura entrelazada, cubierta de aluminio liso o corrugado o cubierta de plomo.

Tipo cable	En el diámetro total del cable					
	pulgadas	mm	pulgada	mm	pulgadas	mm
	0.75 y menos	190 y menos	s 0.76 a 1.50	191 a 381	1,51 y mayor	382 y mayor
Radio de curvatura mínimo como múltiplo del diámetro del cable						
Vaina de aluminio liso de conductor simple sin apantallar, conductor múltiplo o multiplexado, con conductores apantallados individualmente	10		12		15	
Conductor único apantallado	12		12		15	
Conductor único apantallado, conductor múltiplo o multiplexado con apantallamiento general	12		12		15	
Blindaje interconectado o corrugado, vaina de aluminio sin apantallamiento	7		7		7	
Conductor múltiplo con conductor individual, conductor blindado individualmente	12/7 ^a		12/7 ^a		12/7 ^a	
Acoplador múltiplo con mono escudo	12		12		12	
Vaina de plomo	12		12		12	

Nota: ANSI/ICEA S-93-639/NEMA WC 74-2000, 5-46 kV Cable de alimentación Apantallado para Uso en la Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica, Apéndice I- Radios de curvatura Recomendados para los Cables y Tabla I1 - Radios mínimos para cables de alimentación.

a. 12 veces el diámetro individual del conductor apantallado, o 7 veces el diámetro total del cable, lo que sea mayor.

Fuente: (ANSI/NETA ATS, 2017)

Tabla 4. 3

Factores de conversión de la resistencia de aislamiento (20°C).

Temperaturas de ensayo a 20 °C			
Temperatura		Multiplicador	
° C	°F	Inmerso aparatos que contengan aceite aislante	Aparatos que contengan aislamiento sólido distintos de máquinas rotativas
-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
100	212	254,00	40,00
105	221	359,15	50,40
110	230	509,00	63,20

Nota: Derivado de *Stitch en Time, La guía completa de pruebas de aislamiento eléctrico, Megger.*

$$\text{Fórmula: } R_c = R_a \times K$$

Donde:

R_c → Es la resistencia corregida a 20 °C

R_a → Es la resistencia medida a la temperatura de Prueba Temperatura de Prueba.

K → Es el multiplicador Aplicable

Ejemplo: Prueba de Resistencia en el Aislamiento de Inmersión en Aceite a 104 °F

R_a → 2 MΩ @104 °C

K → 3.95

R_c → $R_a \times K$

R_c → 2.0x 3.95

R_c → 7.9 MΩ @ 20 °C

Fuente: (ANSI/NETA ATS, 2017)

Tabla 4. 4

Factores de conversión de la resistencia de aislamiento (40°C).

Temperatura		Temperaturas de ensayo a 40 °C	
		Multiplicador	
°C	°F	Aparatos con aislamiento de aceite sumergido	Aparatos que contengan aislamiento sólido distintos de máquinas rotativas
-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
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

Notas:

*Derivado de *Stitch in Time* de Megger, La guía completa de pruebas de aislamiento eléctrico.*

El coeficiente de Resistencia de Aislamiento se basa en la reducción a la mitad de la resistencia de aislamiento al cambio de temperatura.

La tabla de aparatos que contienen aislamiento de aceite sumergido utiliza un cambio de 10° C con la reducción a la mitad de la temperatura.

La tabla de aparatos con aislamiento sólido utiliza un cambio de 15° C con la reducción de la temperatura a la mitad.

$$\text{Fórmula: } R_c = R_a \times K$$

Donde:

R_c → Es la resistencia corregida a 40 °C.

R_a → Es la resistencia medida a la Temperatura de Prueba.

K → Es el multiplicador aplicable.

Ejemplo: Prueba de Resistencia en el Aislamiento de inmersión en aceite a 68° F /20°C

R_a → 2 MΩ @68° F /20

$$K \rightarrow 0,40$$

$$R_c \rightarrow R_a \times K$$

$$R_c \rightarrow 2,0 \times 0,40 = 0,8 \text{ M}\Omega @40^\circ \text{C}$$

Fuente: (ANSI/NETA ATS, 2017)

4.2. Descripción general y métodos de pruebas

Las pruebas se realizan en equipos nuevos, después de instalarse y en equipos existentes para evaluar su estado. Los fabricantes prueban sus equipos antes de salir al mercado, se las conoce como pruebas FAT (Factory Acceptance Test). El interés de este trabajo de titulación son las pruebas de campo, usadas para evaluar el estado del equipo instalado, para buscar indicios de necesidad de mantenimiento correctivo o reemplazo total del equipo, para llevar un registro del deterioro gradual del equipo. De acuerdo con (Gill, 2009) las pruebas eléctricas en equipos se pueden dividir en las siguientes:

- Tipos de pruebas.
 - Pruebas de aceptación.
 - Pruebas de mantenimiento de rutina.
 - Pruebas especiales de mantenimiento.
- Tipos de métodos de prueba.

4.2.1. Tipos de métodos de prueba

Las pruebas que se realizan en los equipos consisten en verificar, el nivel de aislamiento, propiedades eléctricas y diversos factores relacionados con la operación general del sistema; por lo general se pueden dividir los tipos de pruebas en:

- Pruebas de aislamiento sólido.
- Pruebas de líquidos aislantes.
- Pruebas de relés y dispositivos de protección.
- Prueba de resistencia del electrodo de puesta a tierra.
- Prueba de falla en gases.
- Prueba de inspección mediante infrarrojos.

Prueba de aislamiento sólido. El material de aislamiento varía de acuerdo a los requerimientos eléctricos del equipo, entre ellos se tienen: dieléctricos sólidos, líquidos o gaseosos, encargados de evitar el flujo de electricidad entre diferentes puntos de potencial. La finalidad de esta prueba es evaluar la integridad del material aislante, por lo general se aplica un voltaje de alto potencial para establecer la corriente de fuga, el valor resultante indica la condición del aislamiento, lo que conlleva a determinar deterioro o fallas inminentes. Esta prueba aplica voltaje AC (Corriente Alterna) denominada prueba destructiva, o DC (Corriente Directa) llamada prueba continua, la prueba con AC puede causar daños considerables en el equipo sin poder ingresar a servicio posterior, la prueba con DC muy rara vez daña al equipo bajo prueba (Gill, 2009).

La prueba usando corriente alterna (AC), tiene como resultado dos opciones “Aprobado/ No aprobado”, si el equipo falla o muestra un valor de corriente de fuga excesiva, queda inutilizable, caso contrario el equipo aprueba, como resultado solamente se indica el estado del equipo como “Bueno” o “Malo”, mas no un margen de seguridad del equipo. La prueba usando corriente continua (DC), refleja más allá de las opciones “Aprobado/ No aprobado”, evalúa el estado del equipo en ese momento, mide el valor de corriente de fuga durante el proceso y se compara con valores de pruebas anteriores. “Sin embargo, la prueba de alto potencial de DC se considera una prueba destructiva si el voltaje de prueba no se aplica en pasos de control predeterminados. Las pruebas de voltaje de DC se pueden realizar a voltajes más bajos, que son pruebas no destructivas, como la resistencia de aislamiento, la relación de absorción dieléctrica y el índice de polarización” (Gill, 2009).

Prueba de líquidos aislantes. Se encuentran en transformadores y otros equipos eléctricos, de igual manera están propensos a deterioro y contaminación, poseen efectos perjudiciales en las propiedades dieléctricas del líquido aislante. Los elementos causantes del deterioro del aislante son la humedad, el calor, el oxígeno, catalizadores producto de

mezclas entre ácidos y lodos, etc. Se recomiendan realizar pruebas periódicas para el control del líquido aislante.

Pruebas de dispositivos de protección. Se incluyen relés de protección, disyuntores en general y equipos asociados, tales como transformadores de instrumentos y cableado, el objetivo de la prueba es garantizar que los dispositivos puedan realizar su función de protección básica en condiciones de funcionamiento real, los tipos de pruebas se clasifican en pruebas de puesta en servicio, pruebas de mantenimiento de rutina y pruebas de verificación.

Prueba de resistencia del electrodo de puesta a tierra. El sistema de puesta a tierra es importante debido a que mantiene un punto de referencia a tierra para la seguridad del equipo y personal, proporciona un punto de evacuación para descargas atmosféricas, evita el alto voltaje inducido en el sistema de energía. Por lo tanto, se requieren pruebas periódicas al sistema de puesta a tierra.

Prueba de análisis de gas. Se compone de análisis de partículas en gas y de prueba de residuos combustibles en el gas aislante, las impurezas en el medio dieléctrico se dan por el calor excesivo debido a la carga del transformador, o arcos y chispas dentro del aceite aislante, parte del aceite en el transformador se descompone y genera gases combustibles, que luego se disuelven en el aceite y eventualmente se liberan y se mezclan con el nitrógeno produciendo impurezas.

Prueba de inspección por infrarrojos. Se usa la tecnología infrarroja para constatar puntos calientes en interruptores y partes energizadas del sistema eléctrico; son útiles para el mantenimiento e inspecciones de rutina con la finalidad de encontrar malas conexiones, empalmes, terminaciones o líneas sobrecargadas.

4.3. Pruebas de voltaje DC vs pruebas de voltaje AC

Empleando tensión en el aislamiento, se crea una corriente que consta de dos componentes, una corriente de carga (I_C) y una corriente de fase (I_F): la corriente de carga esta adelantada 90° a la corriente de fase, al sumar las dos corrientes se obtiene la corriente total (I_T), misma que es absorbida por el aislamiento.

4.3.1. Pruebas de voltaje DC

Al aplicar un voltaje DC al aislamiento, se inyecta un valor alto de corriente que disminuye con el tiempo. La corriente mínima se debe a la fuga o pérdida de potencia mediante el aislamiento. En la práctica real, mediante la prueba DC el efecto de absorción dieléctrica se torna mínimo con el tiempo. Las pérdidas por absorción dieléctrica son sensibles a los cambios de humedad de un aislamiento y a otros contaminantes. Pequeñas variaciones en la humedad de un aislamiento se reflejan en un aumento en la absorción dieléctrica (Gill, 2009). La corriente absorbida por el aislamiento puede analizarse en varias componentes como:

- Corriente de carga capacitiva.
- Corriente de absorción dieléctrica.
- Corriente de fuga superficial.
- Corriente de descarga parcial (Efecto Corona)
- Corriente de fuga volumétrica.

Corriente de carga capacitiva. A medida que aumenta el tiempo de aplicación de la tensión, la corriente disminuye. Es la corriente de carga inicial cuando se aplica tensión, por ende, no tiene incidencia en la evaluación de la prueba con DC. Las lecturas de la prueba no deben realizarse hasta que la corriente haya disminuido a un valor suficientemente bajo.

Corriente de absorción dieléctrica. De igual manera es dependiente del tiempo, alta en un inicio y disminuye a medida que aumenta el tiempo, pero a un ritmo más lento que la

corriente de carga capacitiva. La corriente de absorción dieléctrica se puede dividir en dos corrientes denominadas corrientes de carga reversible e irreversible.

Corriente de fuga superficial. Se debe a la conducción en la superficie del aislamiento, donde se encuentran el conductor con los puntos de potencial de tierra. Esta corriente no es deseada en la prueba, por lo que debe ser eliminada limpiando la superficie del conductor.

Corriente de descarga parcial (Corona). Es causada por el sobreesfuerzo del aire en las irregularidades del conductor, debido a la alta tensión de prueba, esta corriente debe ser eliminada de la prueba mediante el uso de un blindaje de control de tensión. Esta corriente no se produce por debajo de los 4 000V.

Corriente de fuga volumétrica. Fluye a través, del propio volumen de aislamiento, es usada para evaluar las condiciones del sistema bajo prueba. Requiere de cierto tiempo para que se estabilice antes de registrar las lecturas de la prueba.

4.3.2. Ventajas y desventajas de pruebas con DC

Las pruebas con tensión DC, se realizan de forma general para probar los equipos y aparatos eléctricos, este tipo de pruebas poseen ventajas y desventajas mismas que varían de acuerdo a las siguientes circunstancias específicas:

Ventajas:

- Se usan de manera general en equipos cuya carga capacitiva es alta, como los cables.
- La prueba de tensión continua se considera menos dañina para el aislamiento en comparación a la prueba con tensión alterna.
- El tamaño y peso del equipo se reducen significativamente en comparación a usar equipos para prueba de tensión alterna.
- La prueba puede detenerse antes de llegar al fallo.

Desventajas:

- Los esfuerzos en los equipos y maquinas eléctricas como: transformadores, motores y devanados son elevados para tensión continua a comparación de aplicar tensión alterna.
- Luego de la prueba con tensión DC, se debe realizar descarga de la carga residual.
- El tiempo de aplicación de la prueba DC, es superior a una prueba AC.
- Es dependiente de condiciones como la temperatura, humedad, tensión aplicada.
- La tensión aplicada no puede estar uniformemente distribuida en el aislamiento.

4.3.3. Método de prueba con DC

De acuerdo a lo analizado se puede realizar con tensión DC, dos pruebas en aislamientos solidos con aplicación de tensión continua:

- Prueba de resistencia de aislamiento.
- Prueba de tensión de alta tensión (Hi-Pot).

Prueba de resistencia de aislamiento. Se realiza con tensiones en el rango de 100 V a 15 000 V, se emplea el equipo denominado megóhmetro mismo puede ser manual, o electrónico, presenta la resistencia del aislamiento en megaohmios. Las características del aislamiento son dependientes de la temperatura, la humedad y demás factores ambientales. Por lo que posterior a las pruebas se debe realizar la corrección a la temperatura estándar para el equipo bajo prueba. Este tipo de prueba es una señal de las tendencias de deterioro indica el nivel de contaminación del aislamiento y los problemas futuros que se pueden presentar al sistema de aislamiento. Los métodos comunes de acuerdo a (Gill, 2009) para la medición de la resistencia del aislamiento son:

- Lecturas de corta duración.
- Prueba de la relación de absorción dieléctrica (DAR).
- Prueba de índice de polarización (PI)
- Lecturas de tensión escalonada.

Lecturas de corta duración. Mide el valor de la resistencia de aislamiento durante un corto periodo de tiempo 30 s o 60 s, mediante una lectura puntual situada en la curva de valores de la resistencia de aislamiento. La lectura brinda una aproximación estimada del aislamiento. Es importante comparar estos valores con las lecturas anteriores, una tendencia de valores bajo es indicativo de aislamiento deteriorado, se debe normalizar todas las lecturas a 20 °C, teniendo en cuenta los valores de la humedad.

Prueba de relación de absorción dieléctrica (DAR). Un buen sistema de aislamiento indica valores de resistencia de aislamiento elevados conforme aumenta el periodo de tiempo que se aplica la tensión. Caso contrario indica un sistema de aislamiento malo, que se encuentre contaminado por humedad, suciedad, mostrando valores con tendencia baja. El DAR, indica el estado del aislamiento a los 60 s y a los 30 s de la prueba. Un valor resultante inferior a 1.25, es indicativo de mal aislamiento e incentiva a una investigación y posible reparación del aislamiento.

Prueba de índice de polarización (PI). Es la aplicación especializada de la prueba de absorción dieléctrica (DAR), La PI relaciona la resistencia de aislamiento de 10 minutos y la resistencia de aislamiento a 1 minuto. Un valor de PI inferior a 1 es indicativo de deterioro del equipo y la necesidad de un mantenimiento de forma inmediata, esta prueba es usada por lo general para equipos tipo seco como, transformadores, cables, maquinas rotativas etc.

Lecturas de tensión escalonada. Usando tensión de forma escalonada, a medida que se aumenta la tensión un aislamiento débil mostrará valores inferiores de resistencia en el aislamiento, esto no era visible con valores de tensión bajos. El envejecimiento y daños físicos en el aislamiento limpio y seco solo son evidentes a tensiones elevadas, aplicando este tipo de prueba. La prueba de tensión escalonada es muy valiosa cuando se la realiza de forma periódica.

Prueba de alta tensión (Hi-Pot). Esta prueba puede aplicarse como una prueba de tensión de paso, la tensión máxima se aplica gradualmente durante periodos de 60 – 90 s. A continuación, la tensión máxima se mantiene durante 5 minutos, realizando lecturas de

corriente de fuga cada minuto. La tensión máxima se aplica en un número de incrementos iguales por lo general, no menos de ocho y cada paso se mantiene por el mismo intervalo de tiempo de 1 – 4 minutos. Al finalizar cada intervalo se registra la lectura de la corriente de fuga o de la resistencia de aislamiento, se traza una gráfica en función de estos valores lo que indica el estado del sistema de aislamiento.

“Las pruebas de mantenimiento rutinarias se realizan con una tensión máxima igual o inferior al 75% de la tensión de prueba máxima permitida para las pruebas de aceptación, o al 60% de la tensión de prueba de fábrica” (Gill, 2009).

Prueba de absorción dieléctrica (Hi-Pot). Se la realiza a valores de tensiones muy elevados, fácilmente superan los 100 kV. La tensión se aplica durante un periodo de tiempo prolongado de 5 a 15 minutos, realizando lecturas periódicas de resistencia de aislamiento o de la corriente de fuga. Si el aislamiento está en buenas condiciones, la resistencia de aislamiento aparente aumentará a medida que avance la prueba. Las pruebas de absorción dieléctrica son independientes del volumen y la temperatura del aislamiento sometido a prueba (Gill, 2009).

4.3.4. Pruebas de voltaje AC

Al aplicar voltaje AC en un aislamiento, se obtiene un alto valor de corriente que permanece constante, debido a que la corriente alterna carga y descarga el aislamiento, lo que implica que el campo dieléctrico nunca llegue a establecerse completamente debido a que la polaridad de la corriente se invierte cada medio ciclo. Cuando se inyecta tensión AC las corrientes que el aislamiento absorbe son debido a la carga de la capacitancia, a la absorción dieléctrica, a corriente de fuga DC, efecto corona.

Corriente de carga capacitiva. Para el voltaje AC, este valor es constante y dependiente del voltaje, de la constante del material dieléctrico y de la geometría o forma del aislamiento.

Corriente de absorción dieléctrica. Al establecer el campo dieléctrico en un aislamiento, las moléculas del dipolo intentan alinearse con la dirección del campo, por la naturaleza del voltaje AC, se invierten continuamente y nunca se alinea completamente, la energía requerida es función del tipo de material, de la contaminación y la frecuencia eléctrica.

Corriente de fuga. Todos los tipos de materiales dieléctricos conducirán un valor mínimo de corriente, si la tensión aumenta más de un nivel soportado por el material, los electrones se desprenden de las moléculas, por lo que la corriente pasará a través del aislamiento, al final la conductividad excesiva genera puntos calientes y fallas del material aislante, mediante la corriente de fuga descontrolada.

Efecto corona. La sobrecarga en un espacio de aire en el aislamiento ocasiona que las moléculas neutras se dividan formando iones con carga positiva y negativa, los vacíos son ocasionados por altas temperaturas o estrés físico, defectos de fábrica, instalación defectuosa u operación incorrecta. El efecto corona descompone el aire en ozono que combinado con agua forma ácido nítrico generando calor sobre el aislante, derivando en deterioro del aislamiento, las pérdidas del efecto corona aumentan proporcionalmente en relación con la tensión de operación del sistema.

4.4. Equipo de pruebas: AEMC megóhmetro 10 kV - C.A 6550

El equipo AEMC megóhmetro C.A 6550 es un medidor de resistencia de aislamiento portátil con una tensión de hasta 10 kV. Además, posee un rango de medición desde 10 k Ω hasta 25 T Ω , cuenta con una corriente de carga de 5mA, además que posee de 3 filtros para optimizar la estabilidad de la medición. Las principales especificaciones técnicas del equipo son las siguientes:

Funciones. El equipo es denominado de alta gama portátil, usado para la medida de aislamientos eléctricos y resistencias eléctricas de muy altas magnitudes, sobre una carcasa robusta con tapa, posee una pantalla gráfica y su funcionamiento puede ser mediante baterías

o conectado a la red eléctrica. El C.A 6550, realiza medidas de aislamiento con una tensión de hasta 10 000 V. Entre sus principales funciones se tienen:

- Mide tensión, frecuencia y corriente de entrada.
- Medida cuantitativa y cualitativa del aislamiento.
 - Con tensión de prueba fija, 500,1000,2500,5000,10 000 V_{DC} .
 - Con tensión ajustable, 40, 10000 V_{DC} .
 - Con tensión rampa, desde los 40 hasta los 1100 V_{DC} .
 - Con escalón de tensión desde los 40 hasta los 10 000 V_{DC} .
 - Prueba de Ruptura Precoz, Prueba de Ruptura al Límite.
 - Ratios de calidad DAR/PI, DD (Índice de descarga dieléctrica)
 - Resistencia medida en función de la temperatura de referencia.
- Medida de la capacidad del circuito probado.
- Medida de corriente residual.

Software PC. El programa viene incluido con el instrumento de medición, se recomienda su instalación en sistemas operativos basados en Windows en la versión XP, o superiores. Entre las funcionalidades más destacadas de este software son:

- Transferencia de datos entre el equipo y un pc.
- Imprimir protocolos de pruebas personalizadas.
- Crear hojas de datos (Excel)
- Configurar y utilizar el instrumento mediante conexión USB.

4.4.1. Tipo de mediciones

Medida de aislamiento. Este tipo de prueba se lleva a cabo sobre un objeto que no se encuentra bajo tensión. Para poder realizar esta medición con la mayor exactitud posible se necesitan conocer valores tanto de temperatura como humedad, medirlos con un

higrómetro separado e ingresarlos al equipo como datos para correcciones, luego de la prueba se almacenarán junto a los resultados obtenidos de las mediciones.

Principio de medida. “El instrumento genera una tensión de prueba continua igual a la tensión nominal elegida UN entre los bornes + y -. Más precisamente, el valor de esta tensión depende de la resistencia que se va a medir. El instrumento mide la tensión y la corriente presentes entre los dos bornes y deduce de éstos el valor de $R = V / I$ ” (Chauvin, 2021)

Con tensión fija. El selector conmutador se debe colocar en la posición U-FIXED, seguido con las teclas de selección $\uparrow \downarrow$, elegir el valor de tensión de prueba fija entre: 500, 1 000, 2 500, 5 000 ó 10 000 V_{DC} . El instrumento entrega la tensión seleccionada si la resistencia a medir es superior a $R_n = U_n / 1mA$. Caso contrario la tensión de salida es inferior a U_n .

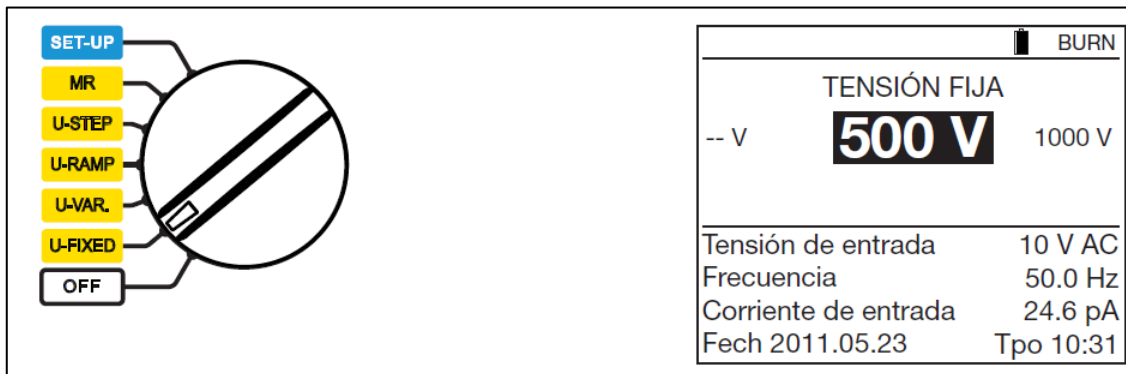


Figura 4. 1 Medición de aislamiento con tensión fija.

Fuente: (Chauvin, 2021)

4.4.2. Tipo de conexión del equipo

El realizar las conexiones de forma correcta es determinante para obtener valores que correspondan con la realidad de las mediciones. Para este instrumento se tienen tres formas de conectar: aislamiento débil, aislamiento alto y aislamiento en cable, las cuales van de acuerdo con el uso particular del equipo. En todos los casos, el dispositivo bajo prueba debe

ser desconectado de la red eléctrica. Considerando el alcance de este trabajo, únicamente se analizan la conexión para cables.

Aislamiento en cable. Para el tipo de prueba de aislamiento en cables, la forma de conexión entre el cable bajo prueba y el equipo C.A 6550 se debe realizar de la siguiente manera: conectar el cable de alta tensión rojo entre la pantalla y el borne positivo (+) del instrumento, además, conectar el cable de alta tensión negro entre el alma y el borne negativo (-) del instrumento, finalmente se debe conectar el cable de alta tensión azul entre el aislante y el borne (G) del instrumento C.A 6550. La función de la bornera G es liberar de las corrientes de fuga de superficie, se debe envolver el aislante con un hilo conductor.

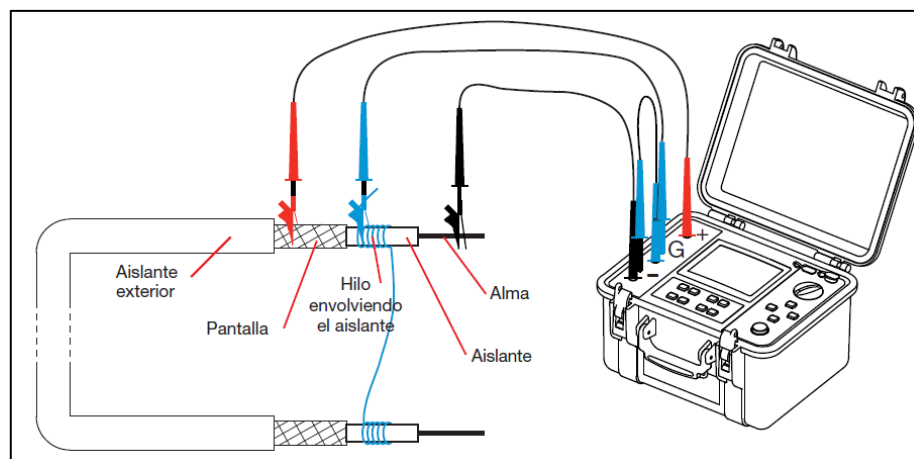


Figura 4. 2 Conexión prueba con cable.

Fuente: (Chauvin, 2021)

4.4.3. Relaciones de calidad del aislamiento DAR, PI

Las relaciones de calidad conocidas como DAR y PI, en esencia son mediciones de resistencia a través del tiempo, las cuales se expresan como proporciones donde la resistencia medida en el tiempo final t_2 , se divide por una medida al inicio de la prueba denominado t_1 . Bajo la premisa que la temperatura de aislamiento no varía significativamente durante la ejecución de la prueba se considera que las relaciones de calidad DAR/PI, son

independientes de la temperatura a la que se encuentre el dispositivo bajo prueba. Se recomienda un rango de temperatura igual o inferior a 40°C.

Razón de absorción dieléctrica (DAR). De acuerdo a (Garay, 2009) , cuando a un material se le aplica una tensión sus cargas eléctricas se alienan produciendo el fenómeno denominado polarización. Ahora para energizar el aislamiento de un material, se requiere de una corriente que desplazase estas cargas eléctricas, a medida que pasa el tiempo la cantidad de corriente disminuye hasta quedar constante manteniendo las cargas en su nueva posición, a este comportamiento se conoce como absorción dieléctrica. La corriente que circula por un material, se puede clasificar en tres componentes:

- Corriente Capacitiva Geométrica.
- Corriente de Absorción.
- Corriente de Conducción.

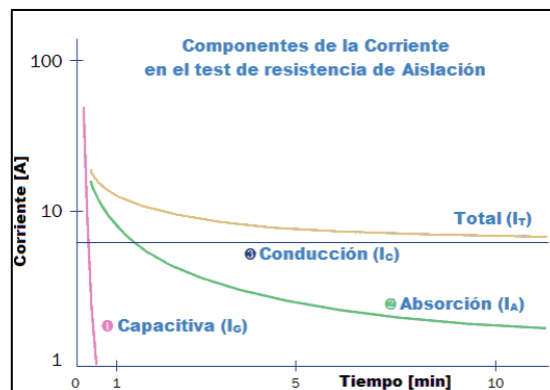


Figura 4. 3 Corrientes en la prueba de resistencia de aislamiento.

Fuente: (Garay, 2009)

La a corriente geométrica y de absorción son dependientes del tiempo, su resultado ya sea corriente total o resistencia serán dependientes del tiempo, este tipo de mediciones se las puede realizar mediante el uso de un micro amperímetro o un megóhmetro como el A.C 6550. El DAR, usa la medición de corrientes de absorción y conducción primero para 30 segundos y luego para 1 minuto como la razón entre ellas. Dado que el voltaje aplicado es constante todo el tiempo, este parámetro de aislamiento se puede obtener directamente de la

resistencia de aislación medida. (Garay, 2009). Coincide también (Chauvin, 2021), que lo define como la siguiente relación y brinda los siguientes valores para su consideración.

$$DAR = \frac{R_{60s}}{R_{30s}}$$

Donde:

R_{60s} = Resistencia de aislamiento medida a los 60 segundos.

R_{30s} = Resistencia de aislamiento medida a los 30 segundos.

La interpretación de los resultados obtenidos se puede analizar en base a la tabla 4.11:

Tabla 4. 5

Valores y condiciones del DAR

Valor del DAR	Condición de aislamiento
<1.25	Insuficiente
<1.6	Bueno
>1.6	Excelente

Fuente: (Chauvin, 2010)

Índice de Polarización (PI). Al igual que lo indicado para el DAR, se define el Índice de Polarización como la razón de la suma de las corrientes de absorción y conducción correspondientes a 1 y 10 minutos (Garay, 2009). Se expresa de la siguiente manera y sus valores referenciales son:

$$PI = \frac{R_{10 \text{ Minutos}}}{R_{1 \text{ Minuto}}}$$

Donde:

$R_{10 \text{ Minutos}}$ = Resistencia de aislamiento medida a los 10 minutos.

$R_{1 \text{ Minuto}}$ = Resistencia de aislamiento medida al minuto 1.

Tabla 4. 6

Valores y condiciones del PI.

Valor del PI	Condición de aislamiento
<1	Peligroso
<2	Insuficiente
<4	Bueno
>4	Excelente

Fuente: (Chauvin, 2021)

En el equipo C.A 6550, los tiempos definidos para la medición tanto del DAR como el PI son aquellos estudiados anteriormente, se realiza la medición de estos valores de acuerdo con el tipo de prueba y el tiempo de ejecución del mismo de manera automática. El procedimiento para medir en el equipo es: pulsar la tecla CONFIG, seleccionar con las teclas \uparrow , \downarrow , DAR o PI. Pulse CONFIG para salir del menú y empiece la medida pulsando el botón START/STOP, la prueba se detendrá automáticamente y los valores obtenidos para el DAR/PI se visualizarán en la pantalla del equipo C.A 6550.

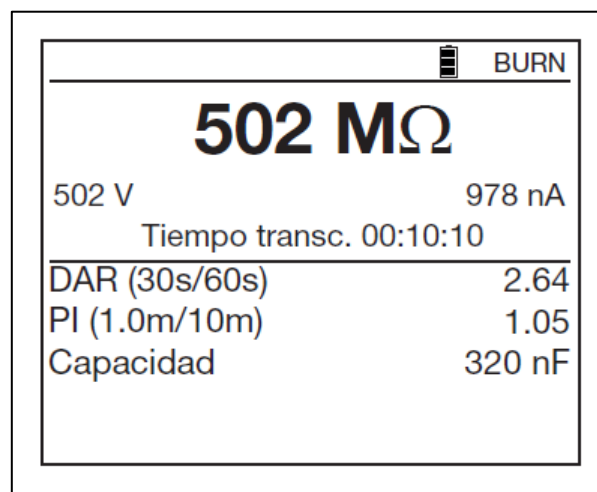


Figura 4. 4 *Resultado de medición del DAR/PI*

Fuente: (Chauvin, 2021)

4.4.4. Función, ingreso de temperatura

Como se indicó, la variación de temperatura se ve reflejada en cambios en la medición de la resistencia de aislamiento, un aumento de la temperatura de 10°C se ve reflejado en una disminución del 50% de la resistencia de aislamiento y viceversa, una disminución de 10°C se refleja en una duplicación del valor de la resistencia de aislamiento. Por lo que en el equipo C.A 6550, una vez finalizada la medición y únicamente en el modo U-VAR y U-FIXED, se permite llevar el resultado de la medida a una temperatura que no sea a la que se realizó el ensayo. Esto con la finalidad de obtener los resultados bajo los mismos criterios, lo que permitirá realizar comparaciones y análisis de los resultados obtenidos.

El procedimiento para ingresar los valores en el equipo C.A 6550 es el siguiente, primero realizar la medida en modo U-FIXED o U-VAR, luego finalizada la medición presione la tecla TEMP. Con las flechas seleccionadoras $\uparrow \downarrow$ y $\leftarrow \rightarrow$ introduzca los distintos parámetros que se requieren.

- Temperatura ambiente.
- Humedad ambiente.
- Temperatura de la sonda.
- Temperatura de referencia de R_c . (Temperatura a la cual se desea calcular)
- ΔT para R/2, la variación de la temperatura conocida o estimada para obtener una disminución a la mitad de la resistencia de aislamiento.

Nota: Si el coeficiente ΔT , no se conoce se puede realizar el cálculo a partir de 3 medidas como mínimo, efectuadas sobre un mismo dispositivo a distintas temperaturas. El cálculo realizado por el equipo es el siguiente:

$$R_c = K_T * R_T$$

Donde:

R_c = Resistencia de aislamiento llevada a 40°C

R_T = Resistencia de aislamiento medida a temperatura T.

K_T = Coeficiente definido de la siguiente manera.

$$K_T = \frac{1}{2}^{(40-T)/\Delta T}$$

Donde:

ΔT = Diferencia de temperatura para la cual el aislamiento se reduce a la mitad.

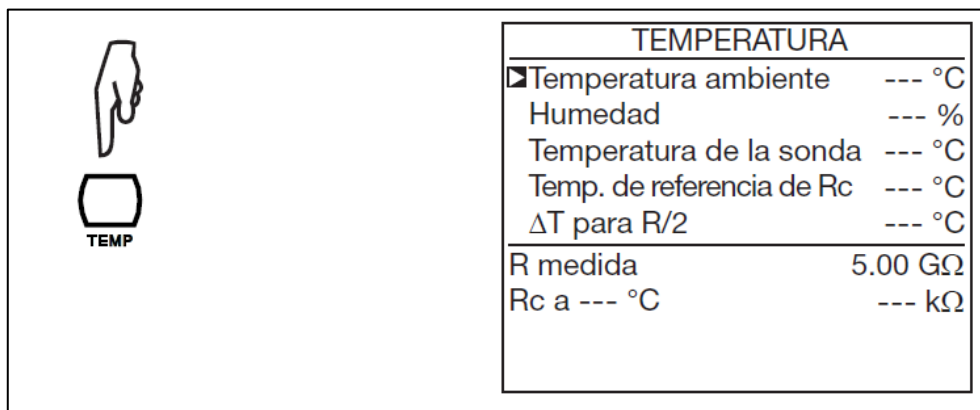


Figura 4. 5 Ingreso de valores para la tecla TEMP.

Fuente: (Chauvin, 2021)

4.4.5. Tecla GRAPH

Gracias a la pantalla LCD, que posee el equipo C.A 6550, se pueden visualizar las representaciones gráficas de los ensayos realizados, durante la medida y al final de cada una de ellas al presionar la tecla GRAPH mostrara las gráficas correspondientes. La primera pantalla muestra la resistencia de aislamiento en función del tiempo es decir $R(t)$ además de la tensión en función del tiempo $U(t)$. Estas gráficas son el resultado de las muestras que se obtienen durante la medida.

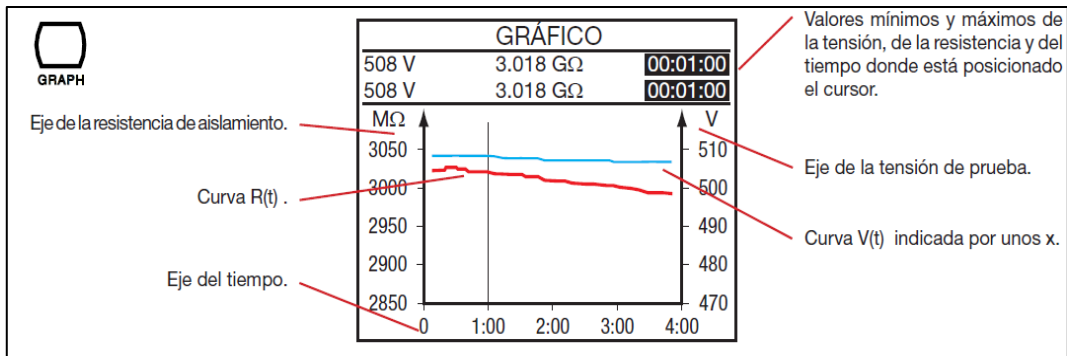


Figura 4. 6 Gráfica obtenidas por C.A 6550.

Fuente: (Chauvin, 2021)

Durante la medida. No existe la posibilidad de utilizar los cursores $\leftarrow \uparrow \rightarrow \downarrow$, cada nueva medida se añade automáticamente a la curva y los valores se los puede visualizar en una línea colocada en la parte superior del gráfico.

Después de la medida. Cuando el tiempo ubicado en la parte superior derecha de la pantalla parpadea, es indicativo del modo cursor. Las teclas $\leftarrow \rightarrow$, tienen la función de mover el cursor a lo largo de la curva, los valores mínimos y máximos en la posición del cursor se visualizan en dos líneas arriba de la zona del gráfico. De acuerdo al rango de la escala vertical de la izquierda, se pueden mover la escala vertical y la curva. En el modo de prueba U-RAMP o U-STEP se puede ampliar la imagen.

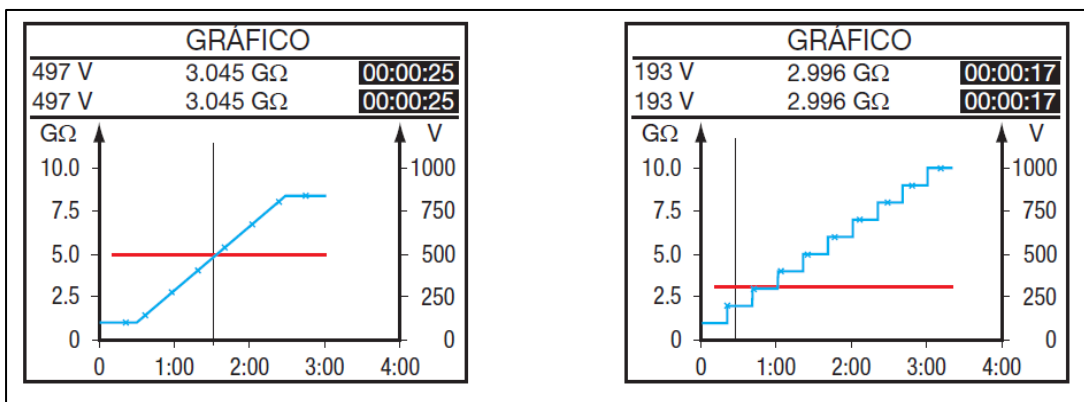


Figura 4. 7 Ampliar la gráfica obtenida.

Fuente: (Chauvin, 2021)

Para poder cambiar de gráfica se lo realiza mediante la tecla DISPLAY, y se obtiene la curva de la corriente en función del tiempo. De la siguiente manera.

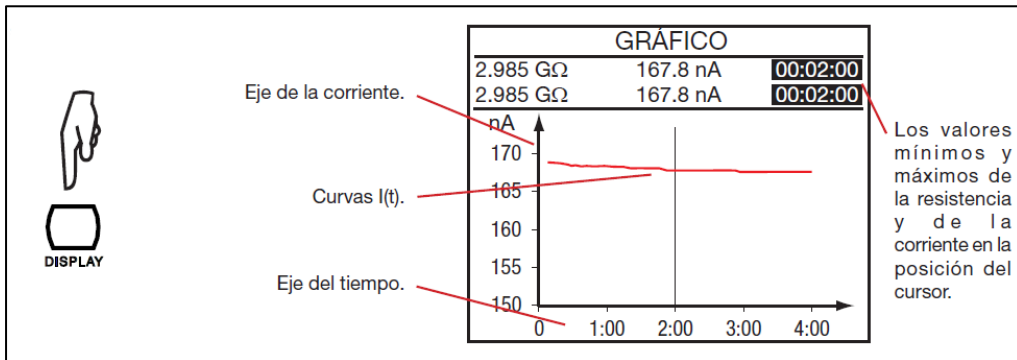


Figura 4. 8 Curva de la corriente en función del tiempo.

Fuente: (Chauvin, 2021)

Otra opción de grafica es media la tecla DISPLAY presiónela nuevamente, y se puede obtener la curva de la corriente en función de la tensión, (No disponible para la opción U-STEP).

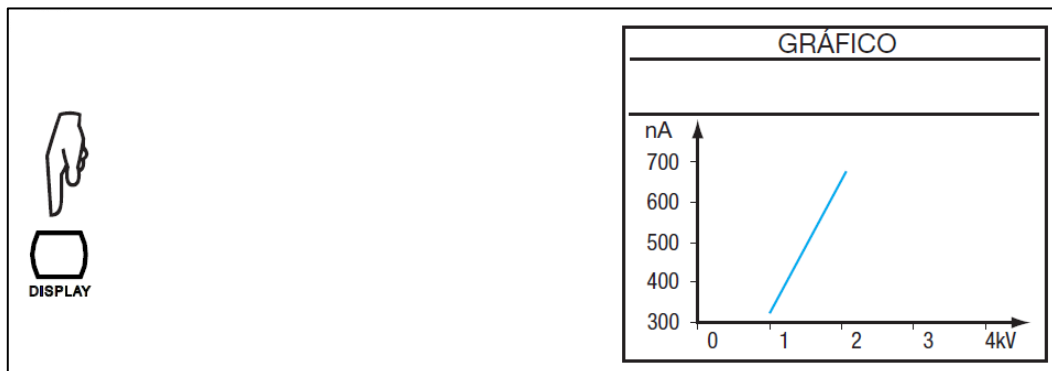


Figura 4. 9 Curva de la corriente en función de la tensión.

Fuente: (Chauvin, 2021)

4.4.6. Software de transferencia de datos

El software suministrado con el equipo denominado DataView® es el medio de transferencia de datos almacenados en el equipo C.A 6550, y el computador, además permite exportar medidas y presentarlas en modo informe. El procedimiento a seguir es:

- Instalar el software suministrado en el equipo de cómputo ya sea mediante CD o descargando el archivo de la página oficial del fabricante.
- Colocar el conmutador seleccionador, en cualquier posición diferente a OFF. La velocidad de comunicación debe ser de 38 400 baudios para el instrumento y para el PC.
- Conecte el cable OPTICO-USB, suministrado con el equipo desde el C.A 6550 y la PC.
- Cuando el equipo se encuentra conectado a la PC, en la pantalla LCD del C.A 6550 aparecerá la palabra REMOTE, el instrumento ya no responde a los comandos del usuario, las teclas y el conmutador están inactivos excepto el apagado del instrumento posición OFF.
- Acabada la transferencia de datos, se desconecta el cable OPTICO-USB y el equipo vuelve a funcionar normalmente.

4.4.7. Guía de medición de aislamiento

La Guía de Medición de Aislamiento para los Megóhmetros de 50 V a 5 000 V_{DC} de Chauvin® Arnoux (Chauvin Arnoux, 2010), menciona que la calidad de los aislamientos de los conductores es afectado y disminuye con el paso de los años. Este deterioro provoca el acortamiento de la vida útil de la resistividad eléctrica del aislante de los conductores, produciendo el aumento de las corrientes de fuga. Las corrientes de fuga producen daños severos tanto en los equipos, personas y costo de mantenimiento. Es necesario diferenciar entre los tipos de pruebas de aislamiento, ya que aparte de tomar los valores de las mediciones para puesta en marcha de los elementos o equipos, también se detecta el envejecimiento y degradación prematura.

En primer lugar, la prueba de rigidez dieléctrica o prueba de perforación esta mide la capacidad de un aislamiento para resistir una sobretensión de una duración media sin que se generen una descarga disruptiva. Esta prueba principalmente garantiza que se respeten las

normas de construcción para las líneas de fuga y a las distancias de aislamiento, se puede emplear tensión alterna o tensión continua para el desarrollo de esta prueba. Los resultados obtenidos en la prueba son expresados en kilovoltios (kV), son medidas con un dielectrómetro. Además, la prueba de rigidez dieléctrica tiende a ser medianamente destructiva en correspondencia con los niveles de tensión que se apliquen, por este motivo este tipo de prueba se limita a equipos o elementos nuevos.

En segundo lugar, la prueba de resistencia de aislamiento no es destructiva en condiciones normales, se aplica una tensión continua de una magnitud inferior que, para la prueba de rigidez dieléctrica, los resultados obtenidos se expresan en: $k\Omega$, $M\Omega$, $G\Omega$ y $T\Omega$, que son medidos con un megaóhmetro. La resistencia de la prueba expresa la calidad del aislamiento entre dos elementos conductores, esto se aplica para tener un seguimiento de del envejecimiento de los aislantes durante el período de servicio o para una instalación eléctrica.

Entre los factores que influyen directamente en las pruebas de medición están: la temperatura, humedad y la corriente que circula. En un aproximado el incremento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la temperatura reduce a la mitad la resistencia de aislamiento y la disminución de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ de la temperatura duplica el valor de la resistencia de aislamiento. La tasa de humedad influye en la resistencia de aislamiento en función de la contaminación de las superficies, además se procura que las mediciones de las resistencias del aislamiento no se realicen si la temperatura es menor que la de punto de rocío.

Mediciones de grandes aislamientos. Para mediciones de aislamientos superiores a $1\text{ }G\Omega$, “las mediciones pueden verse falseadas por la circulación de corrientes de fuga que avanzan en la superficie de los aislantes, a través de la humedad y de los contaminantes superficiales, cuya resistencia ya no es muy grande y por lo tanto insignificante frente a la resistencia del aislante que se desea caracterizar” (Chauvin Arnoux, 2010, p. 7). Para quitar esta corriente de fuga superficial se incluye un tercer terminal de conexión denominado

guarda. “Este terminal de protección deriva el circuito de medida y reinyecta la corriente de superficie en uno de los puntos de prueba sin pasar por la medición” (Chauvin Arnoux, 2010, p. 7). En la figura 4.25 se tienen dos circuitos, en el primer circuito no está incluido el terminal de guarda, el valor medido incluye la corriente de fuga i y la corriente de superficie indeseable I_1 dando como resultado de una falsa lectura de la resistencia del aislamiento. En el segundo circuito solo se mide la corriente de fuga i , la conexión de guarda evacua la corriente de superficie I_1 dando el valor correcto de la resistencia del aislamiento.

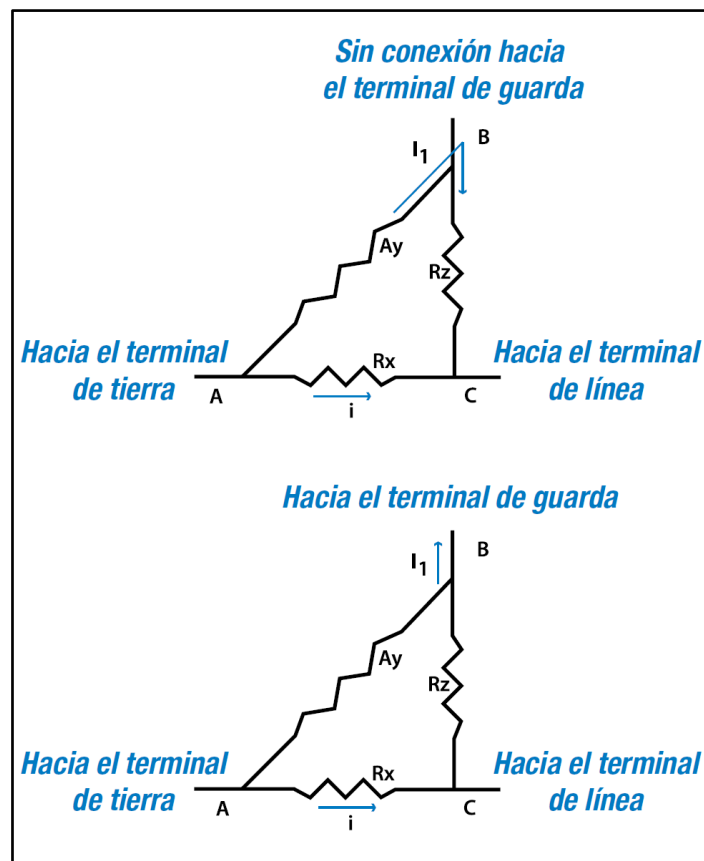


Figura 4. 10 Esquema del terminal de guarda.

Fuente: (Chauvin Arnoux, 2010)

Determinación de las tensiones de prueba. Además de analizar la norma (IEEE Std. 43, 2014) y la norma (ANSI/NETA ATS, 2017) para la tabla 4.14, según (Chauvin Arnoux, 2010, p. 7) existen “una gran variedad de normas locales e internacionales que define estos valores para los instrumentos eléctricos (IEC 60204; IEC 60439; IEC 60598...)”. Se

recomienda contactarse con el fabricante del cable o equipo, para conocer los términos de tensiones de ensayo aplicables. En la tabla 4.7 (Chauvin Arnoux, 2010), se presenta las directrices para las tensiones de prueba, las lecturas de la resistencia de aislamiento se toman luego de aplicar la tensión de prueba por un periodo de 1 minuto.

Tabla 4. 7

Valores de tensiones aplicables durante la prueba de resistencia de aislamiento.

Tensión de servicio cable/ equipo (V)	Tensión continua de prueba (V_{DC})
24 a 50	50 a 100
50 a 100	100 a 250
100 a 240	250 a 500
440 a 550	500 a 1 000
2 400	1 000 a 2 500
4 100	1 000 a 5 000
5 00 a 12 000	2 500 a 5 000
> 12 000	5 000 a 10 000

Fuente: (Chauvin Arnoux, 2010)

Capítulo 5: Resultados y conclusiones

5.1. Resultados obtenidos

5.1.1. Análisis de normativas

Con base en lo tratado en el capítulo 4, donde se exponen las normativas, el equipo y la teoría sobre las pruebas en cables de distribución subterránea, se lleva a cabo el siguiente análisis que incluye los valores de aceptación para la prueba de resistencia de aislamiento y los valores de tensiones de prueba recomendados.

La normativa IEEE Std. 400-2012, presenta información relevante respecto al tipo de pruebas en campo y evaluación del aislamiento para cables eléctricos de $5kV$ y superiores. La guía da un criterio de selección para la prueba de campo más idónea de acuerdo a las necesidades que cada evaluador presente.

La norma ANSI/NETA ATS-2017, contiene las pruebas e inspecciones para evaluar la correcta puesta en servicio y la recepción definitiva de los equipos y sistemas de energía eléctrica, incluyendo cables.

Del estudio de normativas, se consolida la información más relevante para los ensayos en cables de la Empresa Eléctrica Azogues C.A, seleccionando la prueba de resistencia de aislamiento en DC, como la mejor opción. Para comparar los valores obtenidos en las pruebas en campo se considerará la tabla 4.1 de la norma ANSI/NETA ATS-2017, en la que se establecen los valores correspondientes a resistencia de aislamiento, nivel de funcionamiento del sistema y valor de tensión de ensayo. Además, las normativas IEEE tratadas nos brindan una guía para el desarrollo de la prueba, exponiendo su fundamento teórico y los ensayos registrados en campo bajo condiciones controladas y no controladas.

El equipo necesario para llevar a cabo la prueba de resistencia de aislamiento, es el megóhmetro, que se encarga de medir y registrar la tensión aplicada de prueba al cable y la corriente que circula por el mismo, de esta relación se obtiene la resistencia de aislamiento.

Este resultado debe ser llevado al valor de temperatura estándar (20 °C), mediante el factor de corrección indicado en la tabla 4.3, que pertenece a la norma ANSI/NETA ATS-2017 para realizar la comparación bajo las mismas condiciones.

Finalmente, el equipo empleado para realizar la prueba de resistencia de aislamiento debe encontrarse en excelentes condiciones tanto mecánicas como eléctricas, esto se logra ejecutando el mantenimiento recomendado por el fabricante, además, de la correcta calibración según las normas detalladas en este documento, al menos una vez cada doce meses en los centros autorizados.

5.1.2. Normativas aplicadas

De las normativas presentadas, las bases teóricas y la información recolectada de la EEACA se determina que los valores mínimos recomendados para aprobar el ensayo de resistencia de aislamiento, corresponden a los indicados en la tabla 4.1 de este documento, que pertenece a la tabla 100.1 de la normativa (ANSI/NETA ATS, 2017).

En cuanto al procedimiento para realizar esta prueba, se fundamenta en las normativas (ANSI/NETA ATS, 2017; IEEE Std. 400, 2012), que presentan la secuencia de actividades y recomendaciones a seguir para ejecutar el ensayo de resistencia de aislamiento de forma estandarizada, obteniendo valores comparables entre diferentes ensayos en condiciones similares.

5.1.3. Análisis de pruebas ejecutadas

De acuerdo a la información obtenida, de las pruebas realizadas por la Empresa Eléctrica Azogues C.A. y los ensayos ejecutados en campo en sistemas eléctricos subterráneos, previo a la puesta en servicio se recolectó la siguiente información.

Prueba en redes subterráneas Azogues. Analizando los documentos correspondientes a pruebas realizadas en redes subterráneas de la Empresa Eléctrica Azogues C.A. (Apéndice D), se divide en tres secciones de pruebas.

- Inspecciones Visuales.
- Operaciones Manuales.
- Pruebas Eléctricas de aceptación.

Inspecciones visuales. Son las primeras pruebas que se desarrollan, para verificar el estado inicial de los equipos y el sistema eléctrico. Comprende desde la parte constructiva, alineación, calibración y etiquetado en correspondencia a las especificaciones técnicas, planos y diseños.

Operaciones manuales. En estas pruebas se verifica que los componentes mecánicos del sistema eléctrico, funcionen sin problemas y libremente, además, que se encuentren debidamente ajustados.

Pruebas eléctricas de aceptación. Son las últimas pruebas que se ejecutan, en las cuales se evalúa el correcto funcionamiento de todos los equipos, cables y accesorios que conforman el sistema eléctrico subterráneo. Valorando su operatividad, bajo criterios establecidos por la Empresa Eléctrica Azogues C.A, obteniendo resultados de Correcto/Incorrecto (EEACA, 2012) y con las observaciones respectivas en el caso de ser necesarias.

Reportes de pruebas. De la información brindada por la EEACA (Apéndice E), informes de medición de resistencia de aislamiento, se han extraído los siguientes valores que son tabulados en la tabla 5.1. Se realiza, un diagrama de frecuencias acumuladas evaluando porcentajes, valores máximos, mínimos y medios.

Tabla 5. 1

Reportes de pruebas - EEACA - Valores de resistencia de aislamientos.

Descripción	Tipo de conductor	Longitud [m]	Resistencia de aislamiento [$G\Omega$]
-------------	-------------------	--------------	--

Salida alimentador Cojitambo Fase A		250	659
Salida alimentador Cojitambo Fase B		250	639
Salida alimentador Cojitambo Fase C		250	640
Cojitambo 1	XLPE Cu 3/0 133%	120	1 400
Cojitambo 2		120	1 100
Cojitambo 3		120	1 500
Virgen Pamba Fase A		50	407
Virgen Pamba Fase B		50	801
Virgen Pamba Fase C		50	709
Alimentador a padmounted		30	869
Alimentador a padmounted		50	1 100
Alimentador a padmounted		60	404
Alimentador a padmounted		60	864
Alimentador a padmounted	XLPE Cu 2 133 %	60	771
Alimentador a padmounted		40	632
BEC		-	898
BEC		-	1812
BEC		-	560

Fuente: EEACA

Con los valores tabulados, se realiza una segmentación de información obteniendo la frecuencia de los valores en el rango clasificado, la tabla 5.2 indica estos valores.

Tabla 5. 2

Valores de frecuencia por rango.

Clase [GΩ]	Frecuencia absoluta	Frecuencia absoluta acumulada	Frecuencia relativa	Frecuencia relativa acumulada	Frecuencia relativa [%]	Frecuencia relativa acumulada [%]
[404 - 685)	7	7	0,39	0,39	38,89	38,89
[685 - 967)	6	13	0,33	0,72	33,33	72,22

[967 - 1248)	2	15	0,11	0,83	11,11	83,33
[1248 - 1530)	2	17	0,11	0,94	11,11	94,44
[1530 - 1812)	1	18	0,06	1,00	5,56	100,00

Fuente: Elaboración propia.

De los valores indicados en la tabla 5.2 se obtiene la siguiente gráfica 5.1, que se analizará a continuación.

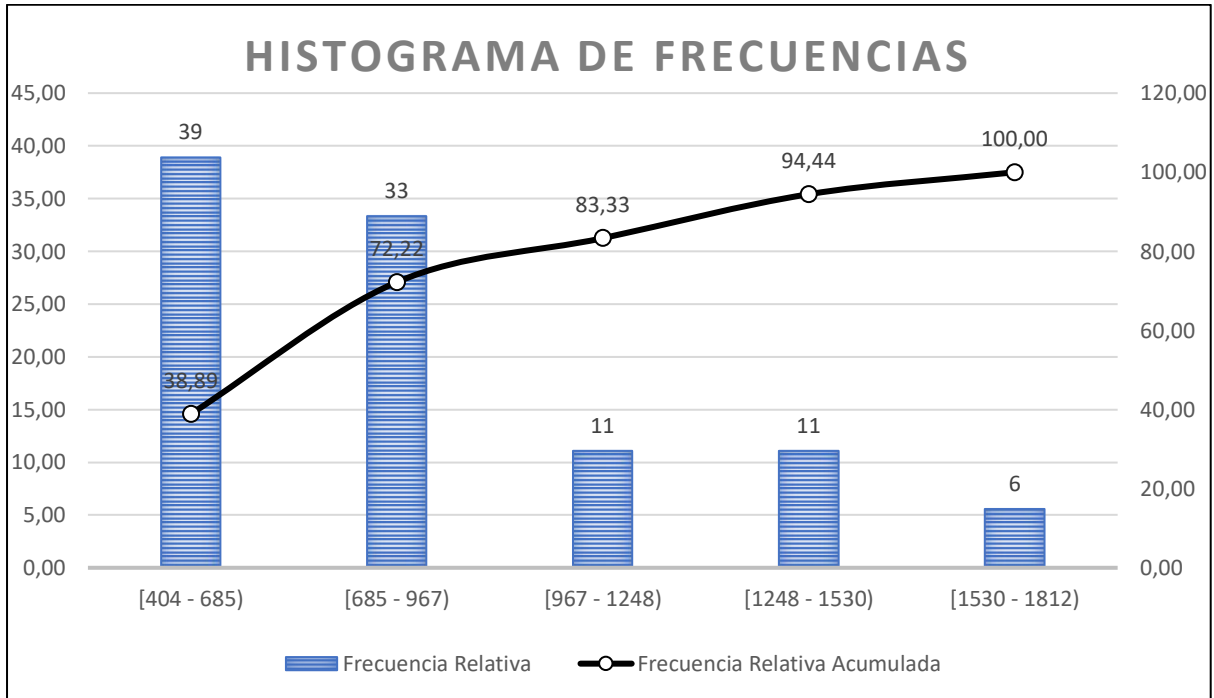


Figura 5. 1 Histograma de frecuencia.

Fuente: Elaboración propia.

Frecuencia relativa. En la figura 5.1, analizando el histograma de frecuencias la mayor concentración de datos, se encuentran en los intervalos desde [404 – 685][GΩ] hasta [685 – 967][GΩ], que representan el 72.22% de valores de resistencia de aislamiento medidos en campo. Además, se determina que es un histograma de tipo asimétrico sesgado a la derecha positivo, reafirmando que la mayor concentración de datos medidos se encuentra en los primeros intervalos del análisis.

El intervalo [404 – 685][GΩ], se compone por la mayor cantidad de muestras, con el 38.89% a comparación del segundo intervalo más poblado [685 – 967][GΩ], con el 33.33%.

La diferencia entre estas dos frecuencias de 5.56%, determina que es más probable obtener datos de resistencia de aislamiento medidos en el primer intervalo.

Los intervalos desde $[967 - 1248][G\Omega]$ en adelante representan el complemento de la muestra, con frecuencias relativas iguales para $[967 - 1248][G\Omega]$ y $[1248 - 1530][G\Omega]$, de 11.11%. En el intervalo $[1530 - 1812][G\Omega]$, se tiene la frecuencia relativa correspondiente al 5.56% que representa la menor concentración de datos del total de la muestra estudiada, lo que se infiere como una baja probabilidad de obtener valores de resistencia de aislamiento medidos.

Valores de frecuencia mínimos, máximos y medios. De la tabla 5.2 y de la figura 5.1, se analizan los datos obtenidos y se determina que los valores mínimos de frecuencia relacionado con las pruebas de resistencia de aislamiento se encuentran en el intervalo $(1530 - 1812)[G\Omega]$, con 1 dato. Los valores medios de frecuencia, se ubican en el intervalo $[685 - 967][G\Omega]$ con 6 datos. Los valores máximos de frecuencia se localizan en el rango $[404 - 685][G\Omega]$, con 7 datos.

Frecuencia relativa acumulada. En la figura 5.1 con respecto a la curva de color negro y aplicando el Principio de Pareto 80/20, se determina que el 72.22% de datos se distribuyen en el intervalo $[404 - 967][G\Omega]$ lo que representa 13 de las 18 muestras estudiadas, otorgando mayor prioridad y probabilidad de obtener estos valores. La diferencia del porcentaje, el 27.78% se encuentra distribuido para datos superiores a 967 $[G\Omega]$, los cuales se interpretan como poco probables y menos representativos para determinar los valores mínimos de resistencia de aislamiento.

Finalmente, del análisis de las frecuencias relativas, frecuencias relativas acumuladas y valores mínimos, máximos y medios, se demuestra que, es más probable obtener mediciones entre $[404 - 967][G\Omega]$, lo que concuerda con el valor mínimos para la resistencia de aislamiento en los cables respecto a la tabla 4.1.

5.1.4. Manual de desarrollo de la prueba de aceptación para cables (resistencia de aislamiento)

Recopilación de lo mencionado en las secciones 5.1.1 a 5.1.3, donde se analizó las normativas y pruebas ejecutadas, se presenta el siguiente: Manual de Ejecución de las Pruebas de Aceptación para Cables, donde se encuentran mencionados los principales criterios de prueba, seguridad, inspecciones visuales, operaciones manuales y la información relevante que se deben incluir en el informe final de ensayo además de la forma recomendada de realizar la prueba de resistencia de aislamiento.

Criterios para las pruebas.

- La prueba de aceptación para los cables que se realizará es la prueba de resistencia de aislamiento en corriente continua (DC), según se indica en las normas: (IEEE Std. 400, 2012) y (ANSI/NETA ATS, 2017).
- Las pruebas de resistencia de aislamiento se realizarán con el Megóhmetro, mismo que debe poseer el mantenimiento y la calibración recomendada por el fabricante y por las normativas.
- Los resultados obtenidos de resistencia de aislamiento deben ser consistentes con los datos del fabricante, en caso de no existir estos valores, la tabla 4.1 de este documento correspondiente a la normativa (ANSI/NETA ATS, 2017). Indica los valores que se deben aplicar de tensión de prueba, el valor de resistencia de aislamiento mínimo a obtener, de acuerdo al nivel de tensión de funcionamiento del cable.
- Tomar en cuenta la influencia que posee el entorno de prueba en los resultados como: la humedad, temperatura, ruido eléctrico ambiental, entre otros. De ser necesario realizar la respectiva corrección.
- Los técnicos eléctricos que desarrollan los ensayos tienen que estar calificados de acuerdo a la norma (ANSI/NETA ETT, 2022).

Seguridad en las pruebas.

- Los técnicos deben usar todo el equipo de protección personal, especialmente guantes dieléctricos, además, reducir el acceso de personal al área de trabajo al mínimo.
- Las pruebas se realizarán con personal calificado, que ejecuten las medidas de seguridad correspondientes, debido al riesgo que estas presentan.
- Todo el sistema de cables debe estar desenergizado y conectado a tierra, antes de realizar los ensayos.
- El sistema estará desconectado de equipos y elementos, para evitar la influencia de estos en las mediciones, además, prevenir que la tensión de prueba aplicada cause daños en los mismos.
- Los ensayos se ejecutarán en condiciones ambientales estándares, recomendadas por las normas, evitando días de precipitaciones e influencia de contaminantes en el área.
- De ser necesario, se delimita el área de trabajo, evitando el paso de transeúntes, vehículos y personas extrañas al equipo de trabajo.

Inspecciones visuales.

- Verificar que las instalaciones y especificaciones de los cables, concuerden con lo expuesto en las especificaciones técnicas aprobadas.
- Inspeccionar secciones expuestas en los cables, buscando posibles daños físicos.
- Determinar que exista suficiente espacio de trabajo, que permita acceder a todos los equipos de manera sencilla y segura.
- Los cables y accesorios han sido identificados, ajustados e instalados correctamente.

- Comprobar que las curvaturas o dobleces visibles de los cables, cumplan o superen el radio de curvatura mínimo publicado por la ICEA y el fabricante Tabla 4.2.

Operaciones manuales.

- Separar el cable bajo prueba, con respecto a tierra y con otros cables, para evitar descargas eléctricas.
- Comprobar que los componentes mecánicos funcionen libremente y sin problemas, como topes mecánicos y accesorios que se encuentren debidamente ajustados e instalados.

Prueba de resistencia de aislamiento en cables de medio voltaje.

- Comprobar que los extremos del cable, no presenten daños por ingreso de agua, humedad, u otros agentes contaminantes.
- Verificar la continuidad en el cable/terminaciones a probarse.
- El cable a probarse debe descargarse a tierra durante el mismo tiempo que se va a realizar el ensayo (1 minuto). Antes de ejecutar la prueba y luego de ella respectivamente.
- Realizar la prueba de puesta a tierra del sistema, este valor no debe ser superior a 25Ω . Como se lo indica en el artículo 250.56 de la norma (NEC, 2005).
- Realizar una primera prueba de resistencia de aislamiento, de acuerdo a la tabla 4.1, en los cables sin terminaciones o empalmes. Registrar este valor.
- Llevar a cabo una segunda prueba de resistencia de aislamiento, de acuerdo a la tabla 4.1, en los cables con terminaciones o puntas armadas. Registrar este valor.
- Realizar la corrección del valor medido, de acuerdo a la tabla 4.3, a la temperatura estándar. Registrar los valores corregidos.
- Si el equipo, posee trazado de curvas, almacenar esta gráfica, para comparaciones futuras.

- Comparar los valores obtenidos de las mediciones de resistencia de aislamiento con los valores de la tabla 4.1 y determinar si el cable se encuentra apto/no apto. Para ingresar a servicio.
- Si el resultado es no apto, se deben realizar las correcciones necesarias y volver a realizar el ensayo.
- Volver el sistema a su estado inicial, para que pueda entrar a operación con todos sus equipos y accesorios correctamente instalados.

Informe de prueba.

Los datos que se recomienda registrar en el informe de prueba son:

- Fecha.
- Hora.
- Lugar.
- Temperatura ambiente.
- Humedad relativa o condiciones meteorológicas.
- Resumen del Proyecto.
- Descripción de los equipos de prueba.
- Fecha de inspección, pruebas, mantenimiento o calibraciones del equipo de prueba.
- Descripción de los ensayos.
- Configuración del equipo.
- Descripción del cable, sus terminaciones y la fecha de instalación.
- Identificación del circuito.
- Nombre del operador de la prueba.
- Registro de programa de prueba: hora, tensión, lecturas de resistencia de aislamiento y corriente.
- Análisis y recomendaciones.

5.2. Conclusiones

El presente trabajo de titulación, revisa las bases teóricas de los requerimientos para el proceso de aceptación y puesta en servicio de las instalaciones eléctricas subterráneas que involucran cables. Se presentan los componentes principales que integran un sistema eléctrico de distribución subterráneo, se analizan los tipos de fallas que presentan los cables en su funcionamiento, con la finalidad de conocer los factores que deterioran el aislamiento. Se recopiló información de las normativas que tratan el proceso y criterios técnicos para la evaluación y desarrollo de las pruebas en cables eléctricos subterráneos. Posteriormente de la evaluación de ventajas y desventajas de los ensayos revisados, se selecciona la prueba de resistencia de aislamiento que concuerda con el criterio de aceptación para los cables por la EEACA. Finalmente se examinaron muestras de pruebas ejecutadas en campo, obteniendo resultados comparables con los criterios seleccionados, además, brindando un manual de desarrollo de la prueba de aceptación para cables (resistencia de aislamiento).

Los tipos de cables normados para media tensión en Ecuador son: Cable de Polietileno Reticulado (XLPE), Cable de Polietileno Reticulado Retardante a la Arborescencia (TRXLPE) y Cable de Polietileno (EPR4). Debido a sus características como: bajas pérdidas, resistencia a la humedad, vida útil aproximada de 50 años, rigidez dieléctrica elevada, reducción del espesor de aislamiento, mayor rigidez mecánica, altas temperaturas de manejo y un menor costo en el mercado, se emplea en la empresa distribuidora EEACA el cable tipo XLPE de cobre con nivel de aislamiento al 100% y 133%, hasta una tensión máxima de 25kV.

Con respecto a los accesorios de redes subterráneas se clasifica según su nivel de tensión en media y baja. Entre los que se mencionan los tipos de terminales, tipos de empalmes, barras desconectables, barras premoldeadas, bushing de parqueo aislado, tipos de conectores y tableros de distribución. Describiendo las características mecánicas y eléctricas de cada uno de ellos. Todas estas partes son contrastadas con las Unidades de Propiedad y Manual de Construcción para sistemas subterráneos elaborado por el MERNNR.

El método de prueba es seleccionado de acuerdo a las ventajas y desventajas que presentan, en base a las necesidades del sistema de cables a probarse. Resultado de este análisis y criterios aplicados en la EEACA, es la prueba de resistencia de aislamiento en tensión continua, debido a que se considera menos dañina para el aislamiento, el tamaño y peso del equipo de prueba es menor en comparación a sus similares y la prueba no provoca el fallo del cable. El equipo empleado es el Megóhmetro digital diseñado para trabajo en campo, el nivel de tensión del equipo estará en concordancia con los parámetros requeridos en la prueba.

La norma ANSI/NETA ATS-2017, en su tabla 100.1, indica los valores mínimos recomendados para la tensión de prueba, resistencia de aislamiento y tiempo de ejecución de acuerdo al voltaje de funcionamiento del sistema. Como valor mínimo de resistencia de aislamiento para circuitos de 25 kV se tiene 10 GΩ y tiempo de aplicación de un minuto. El equipo usado debe de contar con el registro de calibración y mantenimiento, de acuerdo a la hoja técnica de su fabricante, en caso de no contar con dicha información la norma ANSI/NETA ATS-2017, recomienda realizarla al menos una vez al año. Es necesario llevar un registro histórico de los valores, parámetros y gráficas obtenidas en las pruebas, con la finalidad de ser evaluadas en el futuro y conocer las condiciones en las cuales se realizaron. Las condiciones atmosféricas como: temperatura, humedad relativa, ruido eléctrico, entre otras, son factores que afectan al aislamiento del cable, por ende, es necesario realizar las correcciones adecuadas a los resultados de las pruebas, como lo indica la tabla 100.14 de la ANSI/NETA ATS-2017.

5.3. Recomendaciones

Con el fin de mejorar los métodos y pruebas aplicadas en campo, se recomienda realizar la calificación del personal técnico encargado de pruebas, mediante la capacitación constante y la correspondiente certificación.

Para evitar la interrupción del sistema eléctrico, mejorar la confiabilidad del mismo y evitar daños futuros, se requiere elaborar el registro histórico de las pruebas ejecutadas en los conductores y sus accesorios con todos los datos disponibles para evaluaciones y mantenimientos futuros en los sistemas eléctricos subterráneos.

Los valores mínimos para la prueba de resistencia de aislamiento, empleados en este trabajo están sujetos a las normativas disponibles, por este motivo se sugiere actualizar frecuentemente estos valores en correspondencia al cambio o actualización de las normas respectivas.

Implementar en la Empresa Eléctrica Azogues C.A, estudios y planes de mantenimiento para cables y sus accesorios de los sistemas eléctricos subterráneos, basándose en normativas tanto nacionales como internacionales debidamente actualizadas.

Bibliografía

ACR, A. (2020). *ATLAS DEL SECTOR ELÉCTRICO ECUATORIANO 2017—2020* | ARIAE.

<https://www.ariae.org/servicio-documental/atlas-del-sector-electrico-ecuatoriano-2017-2020>

ANSI/NETA ATS. (2017). *ANSI/NETA Standard for Acceptance Testing Specifications for Electrical Power Equipment and Systems*. 262.

<https://webstore.ansi.org/Standards/NETA/ANSINETAATS2017>

ANSI/NETA ETT. (2022). *ANSI/NETA ETT, InterNational Electrical Testing Association / NETA*. <https://www.netaworld.org/standards/ansi-neta-ett>

ANSI/NFPA 70E. (2018). NFPA 70E: Norma para la Seguridad Eléctrica en Lugares de Trabajo (2018). *Catalogo NFPA*. <https://www.catalogonfpa.org/producto/nfpa70e-2018/>

ARAGCU. (2022). *TERMINACIÓN INTERIOR UNIPOLAR TERMOCONTRAÍBLE 25KV 3-1X(70-240)MM2, S/TERMINAL TYCO ELECTRONICS*.

<https://www.aragcu.com/brand/tyco-electronics>

ARCERNNR-002, 2020. (2020). *Regulación Nro. ARCERNNR-002/20—Calidad del servicio de distribución y comercialización de energía eléctrica* (p. 35). ARCERNNR.

<https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2020/12/Res-ARCERNNR-017-2020.pdf>

ATLAS ENERGÉTICO - ACERNNR. (2021). *Atlas del Sector Eléctrico Ecuatoriano* (p. 146). <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/04/Atlas2021.pdf>

- Aucapiña Quinde, J. O., & Niola Morocho, J. C. (2012). *Proyecto de especificaciones técnicas para el diseño de redes subterráneas de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur S.A.* <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1929>
- Boldrini Valdivia, O. (2018). Trabajo de suficiencia profesional titulado: Evaluación de la calidad del aislamiento en terminaciones de línea de transmisión subterránea en 69kV de CV-Congata power line – planta headworks a partir de hipot vlf (very low frequency). *Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa*. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/6513>
- Campozano Tuba, J. P., & Tubón Capuz, S. D. (2020). *Manual de procedimientos para la construcción de las redes eléctricas subterráneas para la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte S.A.* <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/34878>
- Centelsa. (2008). *Cables para media tensión* (Cables y Tecnología, p. 36) [Técnico]. Centelsa. <https://centelsa.com/boletines/colombia/boletin-cables-para-media-tension.pdf>
- Centelsa - 209206. (2017). *Datos Técnicos—Cable XPLE 2 AWG, Centelsa 209206* (p. 1).
- Centelsa - 209207. (2017). *Datos Técnicos—Cable XPLE 1/0 AWG, Centelsa 209207* (p. 1).
- Chancusig Chiliguano, K. G. (2021). *Determinación de procedimientos para la localización de fallas en redes eléctricas soterradas de medio voltaje utilizando el sistema Megger Centrix 2.0 de la Empresa Eléctrica Quito*. <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/7959>
- Chardon Group. (2020). *Codo Apartarrayo Chardon Clase 15 kV y 25 kV* (p. 4). Chardon Taiwan Corporation.

<https://www.chardongroup.com/upload/web/Catalogs/SpanishCatalog/IEEEELB200A/1525LEA.pdf>

Chauvin, A. (2010). *Guía de la Medición de Aislamiento*. https://www.chauvin-arnoux.com/sites/default/files/documents/cat_guia_de_medicion_de_aislamiento.pdf

Chauvin, A. (2021). *Manual de Instrucciones C.A 6650, C.A 6555*. <https://www.chauvin-arnoux.es/sites/default/files/HLHBUXHV.PDF>

Chauvin Arnoux. (2010). *Guía de la Medición de Aislamiento* (p. 28).

EEACA, E. (2012). *Pruebas en Redes Subterráneas Azogues Etapa 1* (p. 9). Empresa Eléctrica Azogues C.A.

Endesa, D. (2018). *Especificaciones técnicas particulares de líneas subterráneas de alta tensión >36 kV. I*, 84.

Garay, C. (2009). *Razón de Absorción Dieléctrica Para Diagnosticar el Estado de una Aislación* [Universidad de Chile].

Gill, P. (2009). *Electrical Power Equipment Maintenance and Testing* (CRC Press). Taylor & Francis Group.

HidroCantábrico. (2005). *Aisladores de composite para cadenas de aislamiento de líneas aéreas AT* (Tecnico N.º 1; hc energía, p. 17).

https://www.hcenergia.com/recursos/doc/Colaboradores/Proveedores/Electricidad/Ingenieria/1359860300_14112011104552.pdf

Iberdrola. (2014). *Diseño de puestas a tierra en centros de transformación en edificio de otros usos, de tensión nominal. I*, 39.

ICEA S-94-649. (2021). ICEA Standard for Concentric Neutral Cables Rated 5 Through 46 kV. *Insulated Cable Engineers Association (ICEA)*, 1-140.

https://www.techstreet.com/ieee/standards/icea-s-94-649-2021?product_id=2232561

IEEE SA - P400. (2019). SA Main Site. <https://standards.ieee.org/ieee/400/7618/>

IEEE Std. 43. (2014). IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Electric Machinery. *IEEE Std 43-2013 (Revision of IEEE Std 43-2000)*, 1-37.

<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6754111>

IEEE Std 48. (2020). *IEEE SA - IEEE 48-2020* (p. 49). IEEE.

<https://standards.ieee.org/ieee/48/6208/>

IEEE Std. 400. (2012). IEEE Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above—Redline. *IEEE Std 400-2012 (Revision of IEEE Std 400-2001) - Redline*, 1-159.

IEEE Std. 400.1. (2018). IEEE Guide for Field Testing of Laminated Dielectric, Shielded AC Power Cable Systems Rated 5 kV to 500 kV Using High Voltage Direct Current (HVDC). *IEEE Std 400.1-2018 (Revision of IEEE Std 400.1-2007)*, 1-23.

<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8633029>

IEEE Std. 400.2. (2013). IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Using Very Low Frequency (VLF)(less than 1 Hz). *IEEE Std 400.2-2013*, 1-60.

<https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2013.6517854>

IEEE Std. 400.4. (2016). IEEE Guide for Field Testing of Shielded Power Cable Systems Rated 5 kV and Above with Damped Alternating Current (DAC) Voltage. *IEEE Std 400.4-2015*, 1-62. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2016.7395998>

INDUCOR S.A, I. (2010). *Capacitación y entrenamiento en técnicas de ensayos, diagnóstico y detección de fallas en cables subterráneos de energía.*

https://www.inducor.com.ar/articulostecnicos/localizacion_de_fallas_parte1.pdf

L Agudelo, & Velez, M. (2018). Definición De Índices De Salud Para Cables De Media Tensión Aislados En XLPE. *INTERCOLOMBIA S.A E.S.P.*, 8.

Liu, J., Dong, X., & Chen, X. (2016). *Fault_location_and_service_restoration_for_electrical_distribution_systems* (Vol. 1).

https://www.researchgate.net/publication/316937260_Fault_location_and_service_restoration_for_electrical_distribution_systems

LOSPEE. (2018). *Ley Orgánica del Servicio Público de Energía Eléctrica* (p. 24).

Macias, G. (1974). *Estudio de los métodos para localizar fallas en cables subterráneos de sistemas de distribución eléctrica.* [Escuela Superior Politécnica del Litoral].

<https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/25943b15-0074-46f1-95cb-4d8e97a1caf3/D-6615.pdf>

MEER. (2018a). *Manual de construcción del sistema de distribución eléctrica de redes subterráneas.*

https://www.unidadespropiedad.com/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=873

MEER. (2018b). *Manual de las unidades de construcción, unidades de propiedad.*

https://www.unidadespropiedad.com/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=875

MEER. (2018c). *Marco teórico para la homologación de las unidades de propiedad y unidades de construcción del sistema de distribución eléctrica de redes subterráneas.*

[https://www.unidadespropiedad.com/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper
&Itemid=872](https://www.unidadespropiedad.com/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=872)

Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2018). *Manual de construcción del sistema de distribución eléctrica de redes subterráneas*.

[https://www.unidadespropiedad.com/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper
&Itemid=873](https://www.unidadespropiedad.com/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=873)

NEC. (2005). *Código Eléctrico Nacional* (p. 1470).

[https://tsapps.nist.gov/notifyus/docs/wto_country/DOM/full_text/pdf/DOM223\(spanish\).pdf](https://tsapps.nist.gov/notifyus/docs/wto_country/DOM/full_text/pdf/DOM223(spanish).pdf)

N.H Malik, A. A. AL-Arainy, & M. I. Qureshi. (1997). *Electrical Insulation in Power Systems*. CRC Press.

NTT, T. R. (2017). *Metallic Cable Fault Location Search Technology*. https://www.ntt-review.jp/archive/ntttechnical.php?contents=ntr201708pf1.pdf&mode=show_pdf

Porfiri, P. (2009). *Detección, análisis y prevención de fallas en cables subterráneos técnicas de descargas parciales—Very Low Frequency – Microscopia Digital 3D – Rayos X*. https://www.inducor.com.ar/articulos tecnicos/deteccion_analisis_y_prevenccion_de_fallas_en_cables_subterraneos.pdf

RG distribuciones S.A. (2022). *Barrajes y Empalmes de Baja Tensión*.

<https://www.rgd.com.co/index.php/producto/barrajes-y-empalmes-de-media-tension/>

Rodríguez, M., & Roberto, J. (2002). *Método para evaluar la calidad del aislamiento en terminales de media tensión a partir de pruebas de Hi-Pot*.

<http://cd.dgb.uanl.mx/handle/201504211/4450>

Short, T. A. (2006). *Electric Power Distribution Equipment and System*. EPRI Solutions, Inc.

- Tayupanta Albán, W. F., Santillán Gallegos, M. H., Paucar Estrada, H. E., & Freire Miranda, J. E. (2017). *Gestión del mantenimiento de cables subterráneos de media tensión en el sistema eléctrico del Bloque 31 operado por Petroamazonas EP*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Thomas, E., & Bill, D. (2008). *Underground Distribution System Design Guide*. CRN.
<https://www.cooperative.com/programs-services/bts/Documents/Reports/03-08UnderDistSystemDesignGuide.pdf>
- Thomas, S., & James, M. (2009). *Lineman and Cablemans Field Manual* (Vol. 2). The McGraw-Hill Companies. <https://www.kobo.com/us/en/ebook/lineman-and-cablemans-field-manual-second-edition>
- Viteri Piedra, R. (1973). *Estudio de las redes subterráneas de distribución eléctrica*.
<http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/9068>

APÉNDICE

Apéndice A. Datos técnicos del cable XLPE Cu 2 AWG 25 kV 133%.

DATOS TÉCNICOS		XLPE Cu 2AWG 25kV 133% PC PVC SR ECU RJO		209206	
Diagrama Transversal		Diagrama Longitudinal			
1. CONDUCTOR DE FASE / NORMA Cu ASTM B496 Calibre / Área AWG / mm ² 2 33.63 Clase de Cableado B Compactado Diámetro / Número de Hilos mm / N° 6.81 7 Resistencia D.C. a 20°C (Nominal) 0.5230 ohm/km Carga de Rotura (Informat.) 744 kg Corriente de CC 1.00 seg (kA) (Informat.) 4.79 kA		FASES Monopolar		IDENTIFICACIÓN DE FASES 1. Color Chaqueta Rojo	
2. BLINDAJE DEL CONDUCTOR XLPE Semiconductor Extruido Espesor mín / Diámetro mm 0.30 8.41		3. AISLAMIENTO XLPE Espesor mín/nom - Diámetro mm 7.75/8.13 24.83 Temperatura / Tensión - Nivel Aislamiento 90°C 25kV 133% Tensión de prueba 0 kV AC Resistencia de aislamiento a 15.6°C 2866 Mohm-km Gradiente de Tensión (a tensión de diseño) 3.17 kV / mm		6. CHAQUETA PVC Espesor mín / Diámetro mm 1.78 30.98	
4. BLINDAJE DEL AISLAMIENTO XLPE semiconductor extruido Removible Espesor mín / Diámetro mm 0.76 25.51		DATOS GENERALES Diámetro Peso Total (mm kg/km) 30.98 1136 Resistencia A.C. a 90°C 0.0671 ohm/km Inductancia y Capacitancia 0.332 mH/km 265 pF/m Reactancias Inductiva y Capacitiva 0.125 ohm/km 10.0 kohm-km AMPACIDAD (Según NEC Tabla 310-77.78) 155 A Tcond 90°C, Tamb 20°C, 3 conductores en cada conducto eléctrico, FC 100%, RHO 90 TENSIÓN HALADO Chaqueta Conductor(es) 136 kg 235 kg Radio de Curvatura / Presión Lateral 372 mm 445 kg/m NORMAS ASTM B496, ICEA S-93-639		EMPAQUE EN CARRETE Carrete No B3017HI P.Bruto (kg) 136 1444 Longitud (m) 1000 1444 Diámetro (mm) 1700 Ancho (mm) 1008 Diam. Int. (mm) 800	
5. CINTA DE COBRE 1 Cinta de cobre 0.064 mm 15.0% Traslape Corriente de CC 1.00 seg (kA) (Informat.) 0.76 kA		MARCACIÓN Impresión en Tinta CENTELSA XLPE Cu 90°C 2 AWG 25kV 133% PC PVC SR - EXTRADESIZABLE - COLOMBIA Nota: Leyenda a intervalos máximos de 1 metro.		Los Medidores de longitud de CENTELSA, son de Precisión Clase I, cuyo error máximo permitido de la longitud medida es del 0.25% (Nota: clase II=±0.5%, clase III=±1.0%)	
Observaciones y/o Desviaciones:					
Los valores aquí indicados están sujetos a las tolerancias normales de manufactura y/o de normas.					

Apéndice B. Datos técnicos del cable XLPE Cu 1/0 AWG 25 kV 133%.

DATOS TÉCNICOS		XLPE Cu 1/0AWG 25kV 133% PC PVC SR ECU		209207	
Diagrama Transversal		Diagrama Longitudinal			
1. CONDUCTOR DE FASE / NORMA Cu ASTM B498 Calibre / Área AWG / mm ² 1/0 53.51 Clase de Cableado B Compactado Diámetro / Número de Hilos mm / Nº 8.52 mín 18 Resistencia D.C. a 20°C (Nominal) 0.3287 ohm/km Carga de Rótura (Informat.) 1184 kg Corriente de CC 1.00 seg (kA) (Informat.) 7.62 kA		FASES Monopolar		IDENTIFICACIÓN DE FASES 1. Color Chaqueta Rojo	
2. BLINDAJE DEL CONDUCTOR XLPE Semiconductor Extruido Espesor mín / Diámetro mm 0.30 10.12		3. AISLAMIENTO XLPE Espesor mín/nom - Diámetro mm 7.75/8.13 26.54 Temperatura / Tensión - Nivel Aislamiento 90°C 25kV 133% Tensión de prueba 64 kV AC Resistencia de aislamiento a 15.6°C 2552 Mohm-km Gradiente de Tensión (a tensión de diseño) 2.96 kV / mm		6. CHAQUETA PVC Espesor mín / Diámetro mm 1.78 33.23	
4. BLINDAJE DEL AISLAMIENTO XLPE semiconductor extruido Removible Espesor mín / Diámetro mm 1.02 28.78		DATOS GENERALES Diámetro Peso Total (mm kg/km) 33.23 1420 Resistencia A.C. a 90°C 0.4195 ohm/km Inductancia y Capacitancia 0.332 mH/km 265 pF/m Reactancias Inductiva y Capacitiva 0.125 ohm/km 10.0 kohm-km AMPACIDAD (Según NEC Tabla 310-77-7B) 200 A Torno: 90°C, Tinte: 20°C, 3 conductores en cada conducto eléctrico, FC: 100%, RHD 90 TENSIÓN HALADO Chaqueta Conductor(es) 146 kg 375 kg Radio de Curvatura / Presión Lateral 369 mm 445 kg/m NORMAS ASTM B498, ICEA S-93-639, UL 1072			
2, 3 y 4: Aplicación por Proceso Extrusión Simultánea y Curado en Seco PANTALLA METÁLICA 5. CINTA DE COBRE 1 Cinta de cobre 0.064 mm 15.0% Traslape Corriente de CC 1.00 seg (kA) (Informat.) 0.82 kA		EMPAQUE EN CARRETE Carrete No B3017HI P Bruto (kg) Diámetro (mm) 1700 Longitud (m) 1000 1728 Ancho (mm) 1008 Diam. Int. (mm) 800			
Observaciones y/o Desviaciones:		MARCACIÓN Impresión en Tinta CENTELSA XLPE Cu 90°C 1/0AWG 25kV 133% PC PVC SR - EXTRADESIZABLE - COLOMBIA Nota: Leyenda a intervalos máximos de 1 metro.			
Los valores aquí indicados están sujetos a las tolerancias normales de manufactura y/o de normas.					

Apéndice C. Datos técnicos del cable XLPE Cu 2/0AWG 25 kV 133%.

DATOS TÉCNICOS		XLPE Cu 2/0AWG 25kV 133% PC PVC SR ECU		209208	
Diagrama Transversal		Diagrama Longitudinal			
1. CONDUCTOR DE FASE / NORMA Cu ASTM B498 Calibre / Área AWG / mm ² 2/0 67.44 Clase de Cableado B Compactado Diámetro / Número de Hilos mm / N° 9.57 min 18 Resistencia D.C. a 20°C (Nominal) 0.2608 ohm/km Carga de Rotura (Informat.) 1482 kg Corriente de CC 1.00 seg (kA) (Informat.) 9.60 kA		FASES Monopolar		IDENTIFICACIÓN DE FASES 1. Color Chaqueta Rojo	
2. BLINDAJE DEL CONDUCTOR XLPE Semiconductor Extruido Espesor mín / Diámetro mm 0.30 11.17		3. AISLAMIENTO XLPE Espesor mín/nom - Diámetro mm 7.75/8.13 27.59 Temperatura / Tensión - Nivel Aislamiento 90°C 25kV 133% Tensión de prueba 64 KV AC Resistencia de aislamiento a 15.6°C 2393 Mohm-km Gradiente de Tensión (a tensión de diseño) 2.86 kV / mm		6. CHAQUETA PVC Espesor mín / Diámetro mm 1.78 34.28	
4. BLINDAJE DEL AISLAMIENTO XLPE semiconductor extruido Removible Espesor mín / Diámetro mm 1.02 28.81		5. CINTA DE COBRE 1 Cinta de cobre 0.064 mm 15.0% Traeslape Corriente de CC 1.00 seg (kA) (Informat.) 0.85 kA		DATOS GENERALES Diámetro Peso Total (mm kg/km) 34.28 1582 Resistencia A.C. a 90°C 0.3330 ohm/km Inductancia y Capacitancia 0.332 mH/km 285 pF/m Reactancias Inductiva y Capacitiva 0.125 ohm/km 10.0 kohm-km AMPACIDAD (Según NEC Tabla 310-77.78) 230 A Tórnido 90°C. Tamb 20°C. 3 conductores en cada conducto eléctrico. FC 100%. RH0 90 TENSION HALADO Chaqueta Conductor(es) 151 kg 472 kg Radio de Curvatura / Presión Lateral 411 mm 445 kg/m NORMAS ASTM B496, ICEA S-93-639, UL 1072	
2, 3 y 4: Aplicación por Proceso Extrusión Simultanea y Curado en Seco PANTALLA METÁLICA 1 Cinta de cobre 0.064 mm 15.0% Traeslape		EMPAQUE EN CARRETE Carrete No B3018HI P.Bruto (kg) 1934 Longitud (m) 1000 Diámetro (mm) 1800 Ancho (mm) 1058 Diam. Int. (mm) 900		MARCACIÓN Impresión en Tinte CENTELSA XLPE Cu 90°C 2/0 AWG 25kV 133% PC PVC SR - EXTRADESIZABLE - COLOMBIA Nota: Leyenda a intervalos máximos de 1 metro.	
Observaciones y/o Desviaciones:					
Los valores aquí indicados están sujetos a las tolerancias normales de manufactura y/o de normas.					

Apéndice D.1. Modelo de las pruebas en red subterránea Azogues.

PRUEBAS	PERÍODO	TIPO DE PRUEBA	REALIZADO		RESULTADO		OBSERVACIONES	
			SI	NO	CORRECTO	INCORRECTO		
Inspecciones visuales	Antes de la operación manual y las pruebas eléctricas	Que el equipo cumpla con los pliegos de condiciones, especificaciones y planos	X		X			
		Que el equipo está completamente y correctamente instalado de acuerdo a los documentos del contrato y las instrucciones del fabricante	X		X			
		Que exista suficiente espacio de trabajo alrededor del equipo para abrir completamente las puertas y paneles de acceso, y para acceder a todos los componentes que requieren mantenimiento	X		X			
		Que el equipo está libre de daños y defectos	X		X			
		Que no se han removido las seguridades de transporte y almacenamiento	X		X			
		Que el equipo está alineado	X		X		Problemas por num. de celdas	
		Que el equipo está lubricado	X		X			
		Que las rejillas de ventilación están abiertas y sin obstrucciones	X		X			
		Que las conexiones eléctricas hayan sido ajustadas	X		X			
		Que los voltajes, fases, y secuencias se hayan identificado	X		X			
		Que las terminaciones hayan sido identificadas	X		X			
		Que las etiquetas de los equipos se han instalado	X		X			
		Que los instrumentos han sido calibrados	X		X			
		Que el equipo esté listo para ser probado eléctricamente	X		X			
Operaciones manuales	Antes de las pruebas eléctricas	Que los componentes mecánicos funcionen sin problemas y libremente	X		X			
		Que los topes mecánicos, interruptores de límite, etc., estén debidamente ajustados	X		X			
		Bancos de ductos	Verificar la ausencia de obstáculos, dobleces, etc., que pudieran dañar los cables	X		X		Existencia de partículas de cemento
		Cables primarios de medio voltaje	En el cable instalado comprobar que los extremos estén intactos y no han sido dañados por ingreso de agua. Verificar la aplicación de cinta de plástico o de goma para ayudar a proteger contra el daño por inmersión o la lluvia	X		X		
			Continuidad	X		X		
			Comprobación de los radios mínimos de curvatura para todos los cables con blindaje metálico (doce veces el diámetro total del cable)	X		X		
			Una prueba de resistencia de aislamiento usando 5000 V de corriente continua en los cables sin terminaciones	X		X		
		Cables de 600 V	Una segunda prueba de resistencia de aislamiento usando 5000 V de corriente continua en los cables empalmados o terminados	X		X		
			Ensayo de 24 horas con el voltaje de servicio normal del sistema	X		X		
			Continuidad	X		X		
			Se realizarán pruebas de resistencia de aislamiento usando 1000 V de corriente continua en el número de muestras que la Empresa considere necesarias. La prueba se realizará entre cada par de conductores y de cada conductor a tierra. Cada ensayo se realizará durante 15 segundos o hasta que el valor de resistencia de aislamiento se estabilice. La resistencia de aislamiento entre los conductores y de cada conductor a tierra, será de 100 megaohms mínimo en un minuto o menos. Además, el valor de resistencia de aislamiento menor no diferirá del valor más alto en más de un 20 por ciento. Si todas las lecturas para un circuito determinado están por encima de los 1000 megaohms, el requerimiento del 20 por ciento puede ser omitido		X			X
		Cables de control	Ensayo de 24 horas con el voltaje de servicio normal del sistema	X		X		
			La prueba de continuidad se llevará a cabo en el cableado de control e instrumentación	X		X		
		Transformadores padmounted	Pruebas de rutina realizadas previa a la energización	X		X		

Apéndice D.2. Modelo de las pruebas en red subterránea Azogues.

Pruebas eléctricas de aceptación	Durante las pruebas eléctricas	Celdas SafePlus	Pruebas eléctricas de aceptación				Realizado mediante contrato # 49-AJ-2012, Protocolo de pruebas de EEA.
			1	2	3	4	
		Que antes de su expedición, todas las unidades hayan sido sometidas a los ensayos de rutina de acuerdo a IEC 62271-200. Las unidades son suministradas desde fábrica, preparadas para su instalación	X		X		
		Los componentes situados en el interior de la envolvente metálica que conforma el tanque, en ambiente de SF6, están libres de mantenimiento para el tiempo de vida asignado	X		X		
		Para las unidades modulares y barraje exterior se verificará el cumplimiento de lo establecido en los siguientes documentos de ABB: 1VDD005976 ES Safe-Ring / SafePlus Celdas Compactas y Modulares Aisladas en gas SF6 Instrucciones de Instalación, Maniobra y Mantenimiento, 1VDD006006 GB SF6 insulated compact switchgear Safe Plus External Busbar: Installation and operating instructions, Manual de instrucciones adicional NOPOWSP 6006 GB Embarrado externo	X		X		
		Se deberá examinar atentamente las celdas, comprobando que no exista ningún desperfecto producido por una inadecuada manipulación, durante el transporte e instalación	X		X		
		Se debe comprobar la existencia de la palanca de maniobra.	X		X		
		Comprobar la presión del gas SF6 (posicionada en la zona verde del manómetro).	X		X		
		Efectuar maniobras para la comprobación del buen funcionamiento de los mecanismos de mando.	X		X		
		Verificar la nivelación y fijación de las unidades de acuerdo con las dimensiones del conjunto, de acuerdo al número de módulos de éste.	X		X		
		Comprobar el estado de los pasatapas.	X		X		
		Se realizarán pruebas de continuidad.	X		X		
		<i>Adicional:</i> Se realizarán pruebas de resistencia de aislamiento usando 5000 V de corriente continua en los conjuntos modulares, en el número que la Empresa considere necesarias. Se tendrá especial cuidado en desconectar el relé de las celdas de interrupción.	X		X		
		Para los relés de protección PR512/P de las unidades de interrupción, se estará a lo dispuesto en los documentos: 1VCP000055 - Rev. D, en - Technical Catalogue - 2010.03 (PR512) (gs), ITADD-C 649172022 2010.02 PR512 – Manual operativo para unidades de protección de microprocesador	X		X		
		Ensayo de 24 horas con el voltaje de servicio normal del sistema.	X		X		
		Continuidad	X		X		
		<i>Adicional:</i> Se realizarán pruebas de resistencia de aislamiento de 1000 V de corriente directa en las barras principales y alimentadores, en el número que la Empresa considere necesarias		X		X	
		Ensayo de 24 horas con el voltaje de servicio normal del sistema	X		X		
		Una prueba de continuidad se llevará a cabo desde las barras de puesta a tierra hacia el sistema y entre los accesos del mismo	X		X		
		<i>Adicional:</i> Se realizarán el número de pruebas que la Empresa considere necesarias de medición de resistencia a tierra del sistema de tierra, que deberá efectuarse con todas las conexiones realizadas. La resistencia no será superior a 2 ohms para las cabinas		X		X	Consorcio PRT no realizó la malla de puesta a tierra en cabinas
		de Sistema iluminación	X		X		
		de Ensayo de 24 horas con el voltaje de servicio normal del sistema	X		X		
		de Sistemas de bombeo y ventilación	X		X		
		de Ensayo de 24 horas con el voltaje de servicio normal del sistema	X		X		
		Sistema alumbrado publico	X		X		
		de Se aplicará lo dispuesto en la regulación N° CONELEC 008/11	X		X		

EQUIPO	CANTIDAD
Celdas Safe Plus de seccionamiento	4
Celdas Safe Plus de interrupción	1
Transformador Pad mounted 300kVA	1
Tablero de distribución	1

Apéndice E.1. Informes de medición de resistencia de aislamiento – EEACA.

2. ANTECEDENTES

La red eléctrica de medio voltaje se considera conductor XLPE de 25kV, es por ello la necesidad de corroborar la calidad técnica del conductor para evitar pérdidas de energía eléctrica en el mismo. Por lo cual se realiza las pruebas respectivas de resistencia en el conductor XLPE.

3. OBJETIVO

- Determinar la resistencia de aislamiento del conductor XLPE 25kV, con equipo de medición.

4. CONSIDERACIONES DE PRUEBAS EN CONDUCTORES

El valor según la norma para pruebas de aislamiento de conductor se observa en la tabla 1, en la segunda columna se tiene de ingreso de voltaje y en la tercera columna la resistencia mínima requerida. Por lo tanto, se escoge el voltaje de ingreso 5000V (Voltaje Corriente Directa), con una resistencia mínima de aislamiento de 1000MΩ (Mega Ohmios) el tiempo de la prueba se toma de 60 segundos según ATSM D149.

TABLA 1. VALORES DE PRUEBA DE AISLAMIENTO.

Solicitud	Voltaje de prueba	Resistencia
Nuevos cables - Funda	1kV DC	100 MΩ
Nuevos cables - Aislamiento	10kV DC	1000 MΩ
Después de reparaciones - Funda	1kV DC	10 MΩ
Después de reparaciones - Aislamiento	5kV DC	1000MΩ

Apéndice E.2. Informes de medición de resistencia de aislamiento – EEACA.

5. RESULTADOS

5.1 SIN PUNTAS EN EL CONDUCTOR XLPE.

Se considera las pruebas del conductor al descubierto, es decir sin armar las puntas terminales como se presenta en la figura 1, el cable rojo del equipo se considera (positivo) y el cable azul se considera (negativo). Por lo cual el cable rojo se conecta al conductor de cobre y el cable azul se conecta a la pantalla de tierra se somete a la prueba con 5000V DC durante 60 segundos.



Figura 1. Pruebas de aislamiento del conductor XLPE (sin puntas).

TABLA 2. RESISTENCIA CONDUCTOR XLPE 25KVA FASE A (SIN PUNTAS).

Voltaje Ingreso DC	Tiempo (s)	Resistencia (TΩ)
5000	15	2.17
5000	30	2.68
5000	45	2.71
5000	60	2.70

TABLA 3. RESISTENCIA CONDUCTOR XLPE 25KVA FASE B (SIN PUNTAS).

Voltaje Ingreso DC	Tiempo (s)	Resistencia (TΩ)
5000	15	1.98
5000	30	3.03
5000	45	2.85
5000	60	1.52

Apéndice E.3. Informes de medición de resistencia de aislamiento – EEACA.

TABLA 4. RESISTENCIA CONDUCTOR XLPE 25KVA FASE C (SIN PUNTAS).

Voltaje Ingreso DC	Tiempo (s)	Resistencia (GΩ)
5000	15	738
5000	30	865
5000	45	919
5000	60	1034

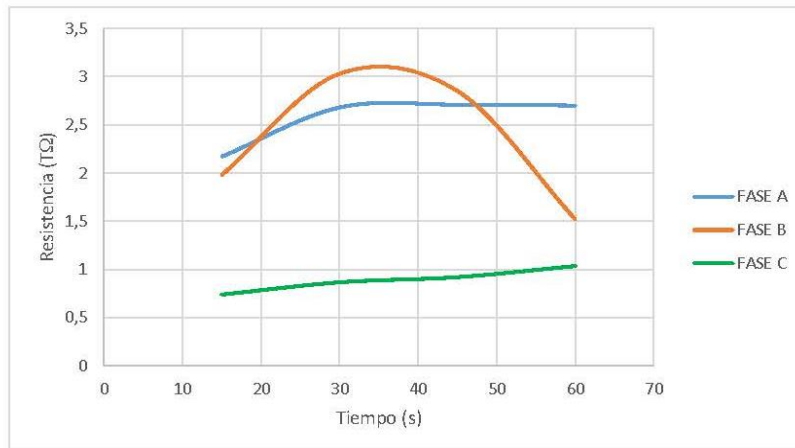


Figura 2. Tiempo frente a resistencia (sin puntas).

5.2 CON PUNTAS EN EL CONDUCTOR XLPE.

Se considera las pruebas del conductor armando las puntas terminales como se presenta en la figura 3.



Figura 3. Pruebas de aislamiento del conductor XLPE (con puntas).

Apéndice E.4. Informes de medición de resistencia de aislamiento – EEACA.

TABLA 5. RESISTENCIA CONDUCTOR XLPE 25KVA FASE A (CON PUNTAS).

Voltaje Ingreso DC	Tiempo (s)	Resistencia (GΩ)
5000	15	596
5000	30	795
5000	45	896
5000	60	898

TABLA 6. RESISTENCIA CONDUCTOR XLPE 25KVA FASE B (CON PUNTAS).

Voltaje Ingreso DC	Tiempo (s)	Resistencia (GΩ)
5000	15	998
5000	30	2495
5000	45	949
5000	60	1812

TABLA 7. RESISTENCIA CONDUCTOR XLPE 25KVA FASE C (CON PUNTAS).

Voltaje Ingreso DC	Tiempo (s)	Resistencia (GΩ)
5000	15	502
5000	30	543
5000	45	514
5000	60	560

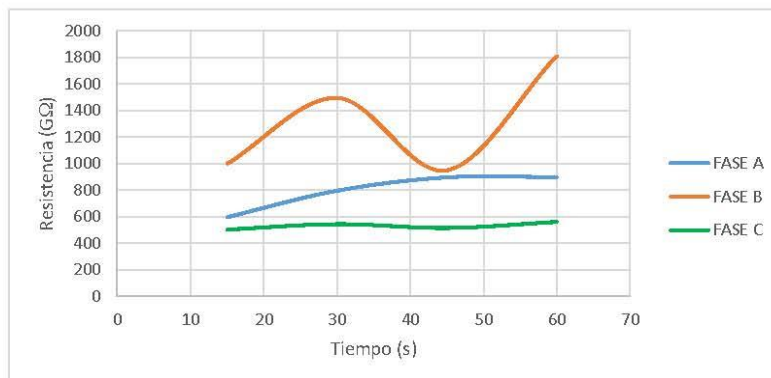


Figura 2. Tiempo frente a resistencia (con puntas).

Apéndice E.5. Informes de medición de resistencia de aislamiento – EEACA.



Apéndice E.6. Informes de medición de resistencia de aislamiento – EEACA.

INSTRUMENTO DE MEDICIÓN									
DESCRIPCIÓN	MARCA	CERT. CALIBR.		MODELO	N° SERIE			CAPACIDAD	
MEGOHMMETER	AEMC	SI	NO	6505	5050-5060-5070-6505			5000V - 10TΩ	
		X							
MEDICIONES EN CAMPO									
PRUEBA DESCRIPCIÓN	VOLTAJE NOMINAL [V]	RESISTIV. [Ω]	TIEMPO AMB. [C°]	HUMEDAD RELATIVA [%]	RESISTENCIA DE AISLAMIENTO [MΩ]			CUMPLE	NO CUMPLE
					1 min.[MΩ]	3 min.[MΩ]	5 min.[MΩ]		
FASE 1 - GND	5000 V.	_____	16.9	78.7	692 [GΩ]	828 [GΩ]	846 [GΩ]	ok	
FASE 2 - GND	5000 V.	_____	16.9	78.7	650 [GΩ]	802 [GΩ]	844 [GΩ]	ok	
FASE 3 - GND	5000 V.	_____	16.9	78.7	685 [GΩ]	843 [GΩ]	870 [GΩ]	ok	
FASE 1 - 2	5000 V.	_____	16.9	78.7	1.22 [TΩ]	1.62 [TΩ]	1.80 [TΩ]	ok	
FASE 2 - 3	5000 V.	_____	16.9	78.7	1.22 [TΩ]	1.50 [TΩ]	1.70 [TΩ]	ok	
FASE 3 - 1	5000 V.	_____	16.9	78.7	1.45 [TΩ]	1.71 [TΩ]	1.85 [TΩ]	ok	