



**BUAP**

**BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA**

Facultad de Ingeniería

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado

***Estrategia para el mantenimiento a la Red General de  
Distribución Subterránea en base a la predicción,  
utilizando descargas parciales.***

Propuesta de TESIS

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN INGENIERIA CON OPCION TERMINAL  
EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA**

Presenta:

Rene Pedraza Vallejo

Director del tema de tesis:

M.I. Victorino Turrubiates Guillen

Puebla, Pue. agosto 2021

## Índice

	Pag.
Introducción.....	6
Objetivos.....	7
Justificación.....	8
Índice de Graficas, Imágenes y Tablas.....	9
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO TEÓRICO.....	13
1.1. Propiedades de los dieléctricos.....	13
1.1.2. Propiedades de los dieléctricos.....	13
1.1.3. Clasificación de los materiales aislantes.....	14
1.2. El cable de energía de media tensión (5-35 kV).....	16
1.2.1. Elementos componentes del cable.....	16
1.2.1.1. El conductor.....	18
1.2.1.2. La pantalla semiconductora sobre el conductor (Pantalla Interna)..	19
1.2.1.3. Los aislamientos extruidos.....	19
1.2.1.4. La pantalla semiconductora sobre el aislamiento (Pantalla Externa).....	20
1.2.1.5. La pantalla metálica.....	21
1.2.1.6. La cubierta externa.....	22
1.2.2. Fallas típicas en los sistemas de cable de media tensión.....	23
1.2.3. Problemas locales o puntuales.....	23
1.2.4. Problemas globales o integrales.....	24
1.2.4.1. Arborecencias.....	24
1.2.4.1.2. Evolución de las arborecencias.....	26
1.3. Descargas Parciales.....	27
1.3.1. Causas de las Descargas Parciales (DP).....	29
1.3.2. Tipos de Descargas Parciales.....	30
1.3.2.1. Descargas Parciales externas.....	30
1.3.2.2. Descargas Parciales superficiales.....	32
1.3.2.3. Descargas Parciales internas.....	33

1.3.3. Consecuencias de las Descargas Parciales.....	34
1.3.4. Efectos de las Descargas Parciales.....	35
1.4. Pruebas en campo para sistemas de cables en media tensión.....	36
1.4.1. Prueba de CA de muy baja frecuencia (VLF).....	36
1.4.1.1. Parámetros de prueba de voltaje de resistencia de CA VLF.....	37
1.4.1.2. Formas de onda de CA VLF.....	37
1.4.1.3. Niveles de tensión para la prueba VLF.....	37
1.4.1.4. Tiempos de prueba.....	38
1.4.1.5. Método de prueba.....	39
1.4.1.6. ¿Qué sucede en el aislamiento del cable durante la prueba VLF de CA a 0.1 Hz?.....	39
1.4.2. Tangente Delta (TD).....	40
1.4.2.1. Principio de operación.....	40
1.4.2.2. Criterios de evaluación.....	41
1.4.2.2.1. Valor promedio de la Tangente Delta.....	43
1.4.2.2.2. Diferencial de la Tangente Delta.....	43
1.4.2.2.4. Estabilidad de la Tangente Delta.....	44
1.4.3. Prueba de Descargas Parciales.....	44
1.4.3.1 Cuando deben medirse las descargas parciales.....	45
1.4.3.2 Como se miden las descargas parciales.....	45
1.4.3.3 Interpretación de los datos de descargas parciales.....	46
1.4.3.4 Tipo y ubicación de los defectos.....	47
1.4.3.5 Fuentes típicas de descargas parciales en cable extruidos.....	48
1.4.3.6 Arboles eléctricos iniciados a partir de protuberancias, huecos o arboles de agua.....	49
1.4.3.7 Fuentes típicas de descargas parciales en cables impregnados de líquidos.....	50
1.4.3.8 Fuentes típicas de descargas parciales en accesorios.....	51
1.4.4 Detección de descargas parciales.....	62
1.4.4.1 Ubicación del empalme.....	54
1.4.4.2 Limitaciones de la prueba.....	54

1.4.5 Condiciones de prueba (niveles de voltaje y duración).....	55
--	----

## CAPÍTULO 2. PRESENTACIÓN DE PRUEBAS A CABLE DE MEDIA

TENSIÓN.....	57
2.1. Caso 1.....	57
2.1.1. Prueba de detección de Descargas Parciales por el método Coseno Rectangular, caso 1.....	57
2.1.2. Prueba de detección de Descargas Parciales por el método de DAC. Negativo, caso 1.....	61
2.1.3. Prueba VLF Seno, caso 1.....	65
2.1.4. Prueba Tangente Delta, caso 1.....	67
2.1.5. Comparación de resultado, caso 1.....	69
2.2. Caso 2.....	70
2.2.1. Prueba de detección de Descargas Parciales por el método DAC negativo, caso 2, cable XLPE.....	70
2.2.2. Prueba de detección de Descargas Parciales por el método DAC negativo, caso 2, cable PILC.....	75
2.2.3. Comparación de resultados, caso 2.....	80
2.3. Caso 3.....	82
2.3.1. Prueba de detección de Descargas Parciales por el método de DAC. Negativo, caso 3.....	82
2.3.2. Prueba de detección de Descargas Parciales por el método Coseno Rectangular, caso 3.....	85
2.3.3. Pruebas de resultados Caso 3.....	88

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE PRUEBAS.....

3.1. Análisis de Resultados.....	89
3.1.1. Análisis de Resultados, Caso 1.....	89
3.1.2. Análisis de Resultados, Caso 2.....	90
3.1.3. Análisis de Resultados, Caso 3.....	91

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES.....	93
4.1 Conclusiones.....	93
Referencias Bibliográficas.....	95

## Introducción

Las líneas aéreas de distribución han estado en uso durante muchos años, pero después de todo este tiempo todavía no existe un sistema que detecte una falla inesperada con exactitud. Un principal problema que aún hoy preocupa es el desgaste en el aislamiento. Cuando un aislante ya no funciona adecuadamente debido a daño estructural o contaminación en la superficie del aislante, se observan descargas y generalmente es un indicador temprano de una falla inminente del aislante. Si esto no se detecta oportunamente, la corriente de fuga con el tiempo genera daños que provocan una interrupción de la fuente de alimentación a toda su red.

Basándose en las mediciones realizadas con anterioridad en arreglos conductor aislante y conductor desnudo, se realizarán pruebas para detectar descargas parciales a mayor profundidad mediante equipo detector de descargas parciales en cables de potencia por los métodos de Coseno Rectangular, DAC negativo, VLF Seno y Tangente Delta, realizando una comparación de resultados para determinar el método más eficiente para la toma de decisiones en el mantenimiento predictivo y correctivo.

## **Objetivos.**

Analizar las pruebas realizadas a fallas presentadas en cables de potencia de la Red Subterránea de Distribución en media tensión, en un nivel de tensión de 23 kV.

Describir las características técnicas de los materiales aislantes, cables semiaislados, utilizados en las redes de Distribución.

Medir los niveles de Descargas Parciales generados en cada prueba en diferentes tipos de cables de potencia en las Redes Generales de Distribución Subterránea.

Interpretación a pruebas de Descargas Parciales realizada en cables de potencia nuevos, usados y reparados.

Determinar una correcta interpretación de resultados, de los datos presentados en la realización de pruebas a cables subterráneos de media tensión.

Proponer el método adecuado para el mantenimiento a las Redes Generales de Distribución Subterránea en base a la predicción, utilizando descargas parciales.

## **Justificación.**

Las fallas dentro de la Red Subterránea de Distribución, en media tensión, son muy comunes, estas pueden ser por diferentes problemas que a diario se presentan, al atender las fallas en la mayoría de los casos por la primicia de solucionarlas, se repara y se pone en servicio en el menor tiempo posible sin antes realizar una prueba para garantizar un mayor tiempo de servicio, antes de que se presente una nueva falla.

De acuerdo a las estadísticas en los últimos años, dentro de la DVMS, Zona Ermita, de la Comisión Federal de Electricidad, los circuitos con mayor aporte de TIU (Tiempo de Interrupción por cada mil Usuarios) son dos de los cuales dan servicio a la Central de Abastos.

Para lograr que este indicador (TIU), disminuya, se está implementando que para garantizar un mayor tiempo de servicio y una disminución en las interrupciones en la Red Subterránea de Distribución, la realización de pruebas de Descargas Parciales, Tangente Delta, Coseno Rectangular, VLF Seno, y una correcta interpretación de los datos que estas pruebas arrojan para tomar una decisión correcta en la puesta en servicio nuevamente.

Por lo anterior en este trabajo se presentan diferentes casos de fallas, el análisis de las pruebas realizadas y la decisión tomada para la puesta en servicio.

## Índice de Graficas, Imágenes y Tablas.

### Graficas

	Pag.
Grafica 2.1.: Resultado general de presencia de Descargas parciales en 4 diferentes puntos, caso 1, para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$ .....	58
Grafica 2.2: Descargas parciales en fase A, caso 1, para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$	59
Grafica 2.3: Descargas parciales en fase B, caso 1, para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$	59
Grafica 2.4: Descargas parciales en fase C, caso 1 para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$	60
Grafica 2.5: Resultado general de presencia de Descargas parciales en 4 diferentes puntos, caso 1, para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$ .....	62
Grafica 2.6: Descargas parciales en fase A, caso 1, para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$	63
Grafica 2.7: Descargas parciales en fase B, caso 1, para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$	63
Grafica 2.8: Descargas parciales en fase C, caso 1, para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$	64
Grafica 2.9: Resultado general de presencia de Descargas parciales en 10 diferentes puntos, caso 2 cable XLPE., para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$ .....	71
Grafica 2.10: Descargas Parciales en fase A, caso 2 cable XLPE., para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$ .....	72
Grafica 2.11: Descargas Parciales en fase B, caso 2 cable XLPE., para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$ .....	72
Gráfica 2.12: Descargas Parciales en fase C, caso 2 cable XLPE., para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$ .....	73
Grafica 2.13: Resultado general de presencia de Descargas parciales en 10 diferentes puntos, caso 2 cable PILC., para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$ .....	76
Grafica 2.14: Descargas Parciales en fase A, caso 2 cable PILC., para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$ .....	77
Grafica 2.15: Descargas Parciales en fase B, caso 2 cable PILC., para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$ .....	77

Gráfica 2.16: Descargas Parciales en fase C, caso 2 cable PILC., para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$ .....	78
Grafica 2.17: Resultado general de presencia de Descargas caso 3, para $0.0 U_0 < U < 2.3 U_0$ .....	83
Grafica 2.18: Descargas parciales en fase B, caso 3, para $0.0 U_0 < U < 2.3 U_0$ .....	84
Grafica 2.19: Resultado general de presencia de Descargas, caso 3, para $0.0 U_0 < U < 2.3 U_0$ .....	86
Grafica 2.20: Descargas parciales en fase B, caso 3, para $0.0 U_0 < U < 2.3 U_0$ .....	87
<b>Imágenes</b>	
Imagen 1.1: Elementos componentes de un cable de energía.....	18
Imagen 1.2: Propósitos electrostáticos.....	21
Imagen 1.3: Conducir corrientes de falla de fase a tierra.....	22
Imagen 1.4: Pantalla neutro.....	22
Imagen 1.5: Problemas locales o puntuales.....	23
Imagen 1.6: Arborecencias químicas.....	24
Imagen 1.7: Arborecencia Eléctricas.....	25
Imagen 1.8: Arborecencias de Agua.....	25
Imagen 1.9: Cable con diferentes tipos de arborecencia.....	26
Imagen 1.10: Representación de Descargas Parciales.....	28
Imagen 1.11: Representación elíptica.....	28
Imagen 1.12: Árbol formado por DP en polímeros.....	29
Imagen 1.13: Descarga Parcial externa.....	31
Imagen 1.14: Descarga Parcial superficial.....	33
Imagen 1.15: Descarga Parcial Interna.....	34
Imagen 1.16: Formas de onda de CA VLF.....	37
Imagen 1.17: Valor promedio de TD.....	43
Imagen 1.18: Diferencial de la TD.....	43
Imagen 1.19: Estabilidad de la TD.....	44
Imagen 2.1: Tabla de datos para prueba caso 2.....	57

Imagen 2.2: Tabla de datos para prueba caso 2.....	61
Imagen 2.3: Resultado de prueba VLF Seno, Fase A, caso 1.....	65
Imagen 2.4: Resultado de prueba VLF Seno, Fase B, caso 1.....	65
Imagen 2.5: Resultado de prueba VLF Seno, Fase C, caso 1.....	66
Imagen 2.6: Resultados de prueba Tangente Delta, Fase B, caso 1.....	67
Imagen 2.7: Resultado de prueba Tangente Delta, Fase C, caso 1.....	67
Imágenes 2.8: Pruebas en campo, caso 1.....	69
Imagen 2.9: Datos para prueba caso 2, cable XLPE.....	70
Imagen 2.10: Datos para prueba caso 2 cable PILC.....	75
Imagen 2.11: Pruebas en campo caso 2.....	80
Imagen 2.12: Pruebas en campo, caso 2.....	81
Imagen 2.13: Tabla de datos para prueba caso 3.....	82
Imagen 2.14: Tabla de datos para prueba caso 3.....	85
imágenes 2.15: Daño por mano de obra deficiente durante la instalación del cable, caso 3.....	88
Imagen 2.16: Cable dañado por mano de obra deficiente durante la instalación, caso 3.....	88
<b>Tablas</b>	
Tabla 1.1: Valores comerciales de tensión.....	17
Tabla 1.2: Los aislamientos extruidos.....	20
Tabla 1.3: Niveles de tensión para la prueba VLF.....	38
Tabla 1.4.: Cifras históricas de mérito para la evaluación de la condición de aislamientos basados en PE en edad de servicio.....	44
Tabla 2.1: Resultados generales de prueba Coseno Rectangular, caso 1, para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$ .....	58
Tabla 2.2: Comparativo de resultados, prueba Descargas Parciales, método Coseno Rectangular, caso 1, para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$ .....	60
Tabla 2.3: Resultados generales de prueba DAC negativo, caso 1, para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$ .....	62
Tabla 2.4: Comparativo de resultados, prueba Descargas Parciales, método DAC Negativo, para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$ .....	64

Tabla 2.5: Comparativo de resultados, prueba VLF Seno, fase A, B y C, caso 1.....	66
Tabla 2.6: Comparativo de resultados, prueba Tangente Delta, fase A, B y C, caso 1.....	68
Tabla 2.7: Resultados de pruebas, caso 1.....	69
Tabla 2.8: Resultados generales de prueba DAC negativo, caso 2 cable XLPE., para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$ .....	71
Tabla 2.9: Comparativo de resultados prueba DP, método DAC negativo, Caso 2 cable XLPE, para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$ .....	74
Tabla 2.10: Resultados generales de prueba DAC negativo, caso 2 cable PILC, para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$ .....	76
Tabla 2.11: Comparativo de resultados prueba DP, método DAC negativo, Caso 2 cable PILC, para $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$ .....	80
Tabla 2.12: Resultados de pruebas, caso 2.....	80
Tabla 2.13: Resultados generales de prueba Coseno Rectangular, caso 3, para $0.0 U_0 < U < 2.3 U_0$ .....	83
Tabla 2.14: Comparativo de resultados, prueba Descargas Parciales, método DAC Negativo caso 3, para $0.0 U_0 < U < 2.3 U_0$ .....	84
Tabla 2.15: Resultados generales de prueba Coseno Rectangular, caso 3, para $0.0 U_0 < U < 2.3 U_0$ .....	86
Tabla 2.16: Comparativo de resultados, prueba Descargas Parciales, método Coseno Rectangular, caso 3, para $0.0 U_0 < U < 2.3 U_0$ .....	87
Tabla 2.17: Resultados de pruebas, caso 2.....	88
Tabla 3.1. Resumen de los diferentes casos y pruebas realizadas.....	89

## **Capítulo 1. Planteamiento teórico.**

### **1.1. Aislamiento eléctrico.**

Un aislamiento eléctrico es un material cuyas cargas eléctricas internas no pueden moverse libremente con facilidad, causando una escasa magnitud de corriente bajo la influencia de un campo eléctrico, a diferencia de los materiales conductores y semiconductores, que conducen fácilmente una corriente eléctrica. (1), (13)

Un aislante eléctrico es un material con escasa capacidad de conducción de la electricidad, utilizado para separar conductores eléctricos evitando un cortocircuito. Un aislante eléctrico es un material con baja o nula conductividad eléctrica. Esto significa que las cargas eléctricas de sus átomos (electrones) no pueden desplazarse libremente, de modo que estos materiales ejercen una determinada resistencia al paso de la corriente a través de ellos. Un aislante es exactamente lo opuesto a un material conductor. (1), (13)

El aislamiento eléctrico es de suma importancia. Para un diseño adecuado, una confiable y segura operación de los sistemas de aislamiento, es muy importante tener el conocimiento de los fenómenos físicos y químicos para determinar las propiedades dieléctricas del material aislante, así como tener en cuenta que es muy importante un diagnóstico apropiado de las causas que provocan degradación y falla de algunos materiales, porque esto puede causar daños temporales o permanentes en el sistema. (7)

#### **1.1.2. Propiedades de los dieléctricos.**

Existen diferentes propiedades en los dieléctricos, las más importantes son las siguientes: (7)

- Conductividad eléctrica: Es la capacidad de un cuerpo de permitir el paso de la corriente eléctrica a través de sí. Se define como  $\sigma=J/E$ , donde J es la densidad de corriente ( $A/m^2$ ) y E es el campo eléctrico ( $V/m$ ). (7)
- Permitividad dieléctrica: Es determinada por la tendencia de un material a polarizar ante la aplicación de un campo eléctrico y de esa forma cancelar parcialmente el campo dentro del material. (7)
- Polarización: Es el campo vectorial que expresa la densidad de los momentos eléctricos dipolares permanentes o inducidos en un material dieléctrico. El vector de polarización P se define como el momento dipolar por unidad de volumen. La unidad de medida es  $C/m^2$ . (7)
- Rigidez dieléctrica. Es el valor límite de la intensidad del campo eléctrico en el cual un material pierde su propiedad aisladora y pasa a ser conductor. Se mide en  $V/m$ . (7)

### 1.1.3. Clasificación de los materiales aislantes.

- Gases: En estado normal la mayoría de los gases son buenos aisladores. Las líneas aéreas y los circuitos que se encuentran en la intemperie usan el aire como aislador, el cual es el medio aislante más antiguo que existe. Se ha empleado el SF6 como material aislante en los equipos eléctricos. Un aislador gaseoso ideal debe ser barato, química y térmicamente estable, no de ser tóxico, no corrosivo, no flamable bajo estrés eléctrico prolongado. Debe tener buena transferencia de calor y presentar baja condensación de temperatura incluso cuando es presurizado. (7)
- Líquidos: Un aislador líquido ideal debe tener valores altos de: rigidez dieléctrica, calor específico, conductividad térmica, viscosidad, densidad, etc. Además el líquido debe ser no corrosivo, no flamable, no tóxico y químicamente estable, poseer propiedades de absorción de gases. (7)

- Sólidos: Un dieléctrico sólido ideal debe tener algunas de las propiedades mencionadas para los gaseosos y líquidos, además, deben tener buenas propiedades mecánicas. Los aisladores sólidos hechos con materiales orgánicos e inorgánicos son ampliamente usados en componentes de potencia eléctrica. Los materiales inorgánicos más importantes son los cerámicos y los de cristal. Los materiales orgánicos más destacados son las resinas epóxicas termoendurecibles, o materiales termoplásticos como el polietileno (PE), polivinilo (PVC). Los materiales termoplásticos son usados principalmente para fabricar cables dieléctricos de potencia. Otros dieléctricos sólidos que son ampliamente usados son: papel Kraft, caucho natural, EPR, caucho de silicón y polipropileno. (7)
- Compuestos: En muchas aplicaciones de la ingeniería se usa más de una clase de material aislante mezclado con otro, dando como resultado un material aislante compuesto o un sistema de aislamiento híbrido. Un ejemplo de estos sistemas son las líneas de transmisión las cuales emplean aisladores sólidos-gas. En un compuesto sólido-gas, la interface representa usualmente el punto más débil y se debe diseñar cuidadosamente. Algunos ejemplos de aisladores compuestos sólido-líquido son el aceite impregnado en cintas de papel usado en cables de alto voltaje, transformadores, capacitores, etc. (7)

Existen muchas combinaciones de estos materiales. Depende de la aplicación, el aislamiento del equipo de potencia puede ser expuesto a condiciones meteorológicas (aislamientos externos) por ejemplo: el sol, los rayos uv, la lluvia, la contaminación, etc. O pueden ser limitados a las partes internas del mecanismo (aislamientos internos). En ambos casos el aislamiento es siempre expuesto a altas o bajas tensiones. El aislamiento externo es el mas afectado so se expone al aire atmosférico, pero puede ser diagnosticado y reemplazado fácilmente. El

comportamiento y las condiciones del aislamiento interno son más difíciles de detectar y algunas veces los signos del deterioro son notados demasiado tarde para evitar la destrucción completa del equipo afectado por el aislamiento. Varios factores afectan el aislamiento interno y externo, como son: (7)

- Contaminación (Aislamientos externos).
- Lluvia acida (Aislamientos externos).
- Envejecimiento (Aislamientos externos e internos).
- Tensiones mecánicas y eléctricas (Aislamientos externos e internos).
- Defectos de manufactura (Aislamientos externos e internos).
- Calidad del material aislador (Aislamientos externos e internos).

## 1.2. El cable de energía de media tensión (5-35 kV).

Un cable de potencia es un dispositivo eléctrico utilizado para transmitir energía eléctrica de un lugar a otro a una corriente y tensión determinadas. Por lo tanto, un cable aislado tiene como finalidad transportar energía, además de lograr que las pérdidas eléctricas que existan por causa de la transferencia de energía de un lugar a otro sean las mínimas posibles. Cuando un conductor eléctrico aislado se conecta a una fuente de energía eléctrica, se ordena, orienta y acelera el movimiento de los electrones como causa del efecto del campo eléctrico. (6)

Los cables de potencia se clasifican de varias formas, y en este caso es útil clasificarlos por la tensión a la que operan. (6)

NIVELES DE ENERGIA	RANGO	VALORES DE DISEÑO
BAJA TENSION	300 (V) - 1.0 (kV)	440 (V)
MEDIA TENSION	1.1 (kV) - 35 (kV)	5, 8, 15, 25 y 35 (kV)
ALTA TENSION	69 (kV) - 161 (kV)	69, 115, 138, 161 y 170 (kV)
EXTRA ALTA TENSION	230 (kV) - 500 (kV)	230, 345, 400 y 500 (kV)

Tabla 1.1: Valores comerciales de tensión

### 1.2.1. Elementos componentes del cable.

En un cable de potencia, existen tres elementos principales: (6)

- El conductor:

Cobre recocido, desnudo o recubierto de una capa metálica.

Aluminio, o aleación de aluminio.

- El aislamiento:

Papel impregnado en aceite

Polietileno vulcanizado (XLPE)

Etileno propileno (EPR)

- Las protecciones:

Contra daños de origen eléctrico

Capa semiconductor.

Pantallas.

Contra daños de origen mecánico.

Cubierta (interior y exterior)

Armadura

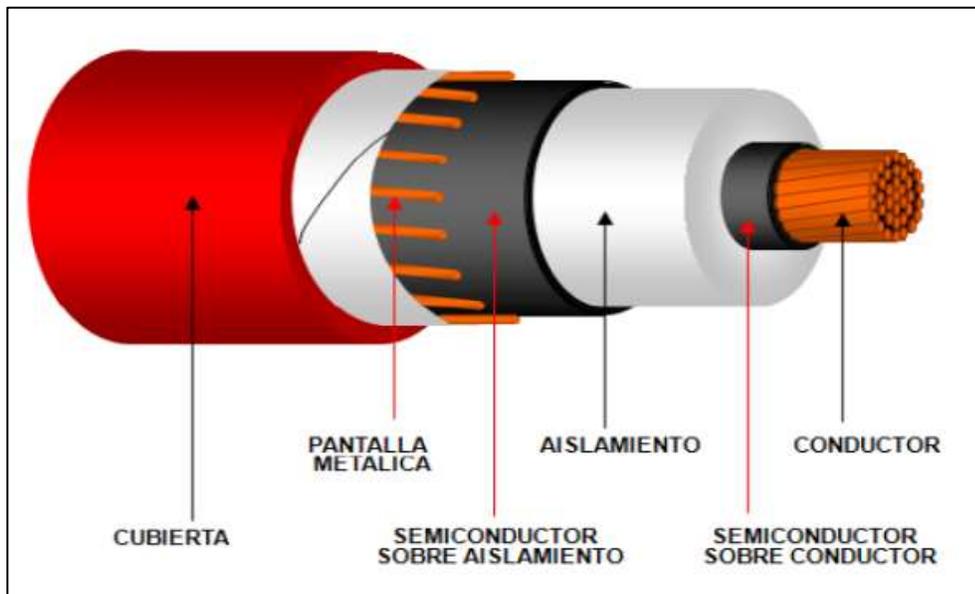


Imagen 1.1: Elementos componentes de un cable de energía.

### 1.2.1.1 El conductor

Un conductor es todo aquel material que permite el flujo de la corriente o de cargas eléctricas en movimiento sin mucha oposición. Es un elemento metálico que permite con facilidad el paso de corriente eléctrica, es decir, posee baja resistencia y alta conductividad. (6)

### **1.2.1.2 La pantalla semiconductor sobre el conductor (pantalla interna)**

Se coloca sobre el conductor, es la capa de material sintético y de baja resistividad que tiene como función promover la disminución simétrica y radial del esfuerzo del campo eléctrico sobre el aislamiento, haciendo uniforme el gradiente eléctrico en la superficie del conductor. (6)

Es decir, alisa el campo eléctrico más cercano al conductor haciéndolo uniforme, disminuyendo de esta manera el gradiente eléctrico y el riesgo de la formación de puntos de ionización en la parte del aislamiento en la que el campo es más intenso. (6)

### **1.2.1.3 Los aislamientos extruidos.**

Un material aislante es aquel que tiene fuertemente ligados los electrones de sus átomos a sus núcleos y por lo tanto no permite su fácil desplazamiento por lo que, ante la acción de una diferencia de potencial, tales electrones no tienen la libertad de moverse. El aislamiento en un cable de potencia es una capa de material sintético de alta resistividad y tiene como función confinar el campo eléctrico.

El espesor del aislamiento es importante que sea el apropiado para la tensión del conductor, ya que tiene la finalidad de que el campo eléctrico al que se somete al aislamiento sea menor a la rigidez dieléctrica del medio aislante. (6)

Los aislamientos extruidos			
Termoplásticos	Material rígido cuando se expone a temperatura ambiente, sin embargo, cuando se eleva a la temperatura de fusión se vuelve blando y moldeable.	Policloruro de vinilo (PVC)	Se usaba en cables de baja tensión, tenía una constante dieléctrica elevada y por lo tanto grandes pérdidas eléctricas, lo cual había limitado su uso en cables de tensiones más elevadas.
		Polietileno de alta densidad (HDPE)	Se consigue por la polimeración de gas etileno, material con muy buenas características aislantes, con una rigidez dieléctrica comparable a la del papel impregnado y una mayor conductividad térmica, lo cual facilita la disipación de calor.
Termofijos	Se comportan de manera distinta al ser expuestos a altas temperaturas, se queman reduciéndose a carbón, por lo tanto, no puede volver a fundirse y no se le puede dar una nueva forma.	Polietileno vulcanizado (XLPE)	También llamado polietileno de cadena cruzada o polietileno reticulado. Este material tiene una muy buena estabilidad térmica, lo que le permite soportar una temperatura de operación de hasta 90 °C y soportar sobrecargas o cortocircuitos como un material termoestable. Como desventaja, tiene una baja resistencia de ionización en presencia de humedad lo que se conoce como arborescencia.
		Etileno propileno (EPR)	Es termoestable, su resistencia a la humedad es mucho mejor, tiene una alta resistencia al efecto corona. Como desventajas tiene: Mayor factor de pérdidas en el dieléctrico. Al contar con mayor resistencia térmica obliga a disminuir la carga máxima permitida en servicio permanente con una diferencia de alrededor de un 5%. Menor resistencia de aislamiento.

Tabla 1.2: Los aislamientos extruidos (6)

#### 1.2.1.4. La pantalla semiconductor sobre el aislamiento (pantalla externa).

Los cables de energía, bajo el potencial aplicado, quedan sometidos a esfuerzos eléctricos radiales, tangenciales y longitudinales. Los esfuerzos radiales están siempre presentes en el aislamiento de los cables energizados. El aislamiento cumplirá su función en forma eficiente si el campo eléctrico se distribuye

uniformemente. Una distribución no uniforme conduce a un incremento de estos esfuerzos en porciones del cable, con el consecuente deterioro. (6)

Se aplica sobre el aislamiento con el fin de hacer que las líneas del campo eléctrico sean radiales haciendo trabajar en forma uniforme el aislamiento.

Debe ser lo más tersa y lisa posible para evitar la formación de burbujas en la interfase con el aislamiento. Se utiliza un material semiconductor para evitar que se produzca ionización a su vez producida por descargas eléctricas, las cuales son reducidas por dicho material semiconductor. (6)

#### **1.2.1.5. La pantalla metálica**

Esta pantalla está formada por hilos y cintas de cobre aplicadas en forma helicoidal sobre la semiconductora externa y su función es la de proteger la vida humana, pues sirve para realizar las conexiones de puesta a tierra, y para una instalación es recomendable aterrizar la pantalla en todos aquellos lugares en donde sea posible. Dicha pantalla puede estar construida de plomo, alambres de cobre y cintas de cobre. (6)

La pantalla metálica puede tener tres funciones:

Para propósitos electrostáticos. Para confinar el campo eléctrico al interior del aislamiento. Deben ser de metales no magnéticos y pueden consistir en cintas, alambres o cubiertas metálicas de plomo o aluminio. (13)

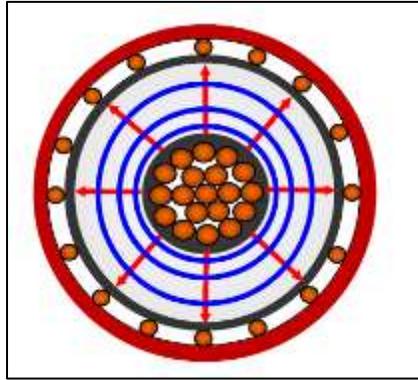


Imagen 1.2: Propósitos electrostáticos.

Para conducir corriente de falla de fase a tierra. En ésta se requiere que tenga una conductancia mayor para conducir corriente de falla. (13)

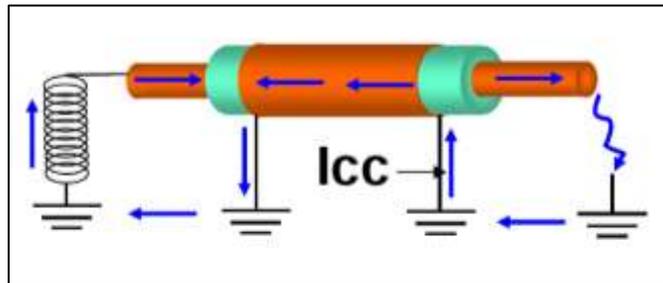


Imagen 1.3: Conducir corrientes de falla de fase a tierra.

Para ser utilizado como neutro en el caso de sistemas monofásicos de distribución residencial subterránea. (13)

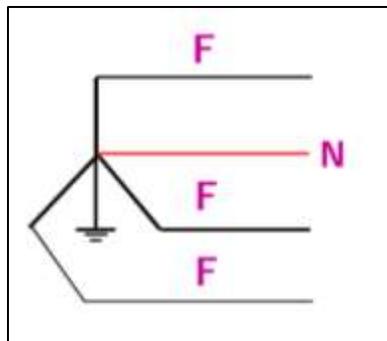


Imagen 1.4: Pantalla neutro.

### **1.2.1.6. La cubierta externa**

La cubierta externa proporciona protección contra los agentes mecánicos internos y agentes químicos externos. Existen cubiertas metálicas, termoplásticas, y elastoméricas. El forro debe de proteger mecánicamente al cable y es en éste en donde se graba la identificación del cable, así como del voltaje de operación, el calibre y algunos otros datos. Existen diversos materiales de la cubierta externa que se mencionan a continuación. (6)

### **1.2.2 Fallas típicas en los sistemas de cable en media tensión.**

Los tipos de fallas más comunes que se presentan en un cable son las siguientes:

- Daños mecánicos al cable o a la cubierta derivados de falta de cuidado en una excavación.
- Daños a la pantalla metálica por corrosión o por vibración.
- Ingreso de agua a los empalmes.
- Esfuerzo mecánico excesivo causado por temblores, sentamientos del suelo, ciclos térmicos, entre otros.
- Envejecimiento térmico del aislamiento.
- Mano de obra deficiente. (10)

### **1.2.3. Problemas locales o puntuales.**

Mano de obra deficiente durante la instalación del cable y/o materiales defectuosos.  
(10)

Empalme mal elaborado.

Terminal mal elaborada.

Fallas en cable por obra civil.



Imagen 1.5: Problemas locales o puntuales.

#### 1.2.4. Problemas globales o integrales.

Mecanismos de falla inherentes a la operación del cable.

##### 1.2.4.1. Arborescencias.

###### Químicas:

Se forman en ambientes con azufre que reacciona con el cobre del conductor y penetran en el aislamiento del cable.

Tienen forma de “brócoli”.

No se producen en conductores de aluminio. (8)



Imagen 1.6: Arborescencias químicas.

###### Eléctricas.

Se forman a partir de contaminantes, cavidades e irregularidades en la superficie de los semiconductores.

Requieren concentraciones de campo eléctrico mayor que las de agua para su formación.

Semejan árboles sin hojas y son canales huecos carbonizados.

Se pueden formar a partir de arborescencias de agua. (8)

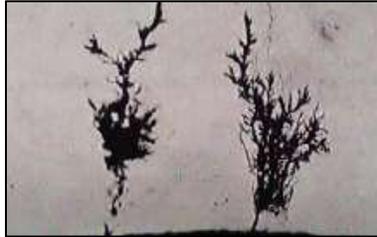


Imagen 1.7: Arborescencias Eléctricas.

### **De agua.**

Se forman a partir de contaminantes, cavidades e irregularidades en la superficie de los semiconductores.

Requieren la presencia de agua y concentraciones de campo eléctrico menor que las eléctricas para su formación.

Se cree que son “racimos” de microcavidades.

Se aprecian solo cuando son teñidos y su apariencia es de manchas. (8)



Imagen 1.8: Arborescencias de Agua.

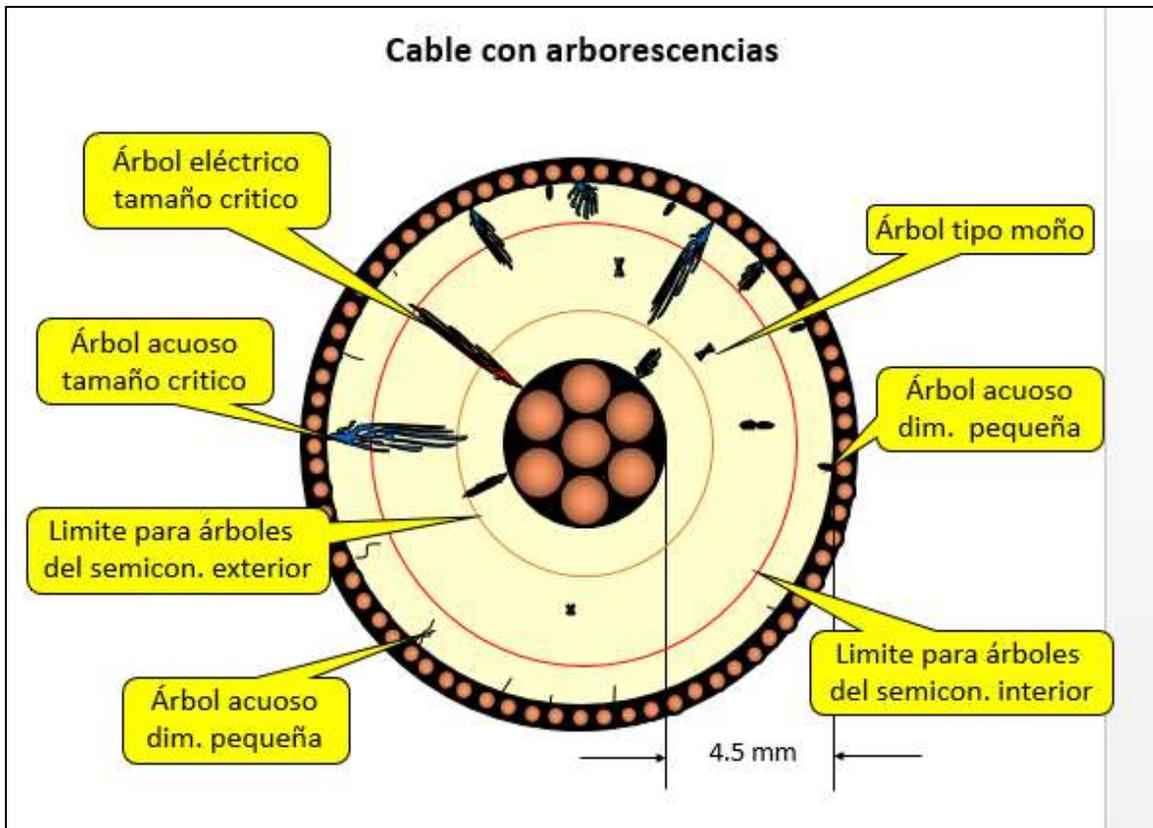


Imagen 1.9: Cable con diferentes tipos de arborescencia. (6)

#### 1.2.4.2. Evolución de las arborescencias.

Arborescencias de agua: patrón de electrooxidación similar a un árbol que puede ocurrir en mejoras de estrés como contaminantes iónicos, protuberancias o huecos en materiales poliméricos sometidos a estrés eléctrico y humedad. Dentro de la arborescencia de agua, el aislamiento se degrada debido a la modificación química en presencia de humedad. No hay evidencia de descarga parcial dentro de las ramas de las arborescencias de agua. Posteriormente, puede producirse una ruptura completa del aislamiento si una arborescencia de agua induce una arborescencia eléctrica y la arborescencia eléctrica crece en un canal de longitud suficiente para fallar el aislamiento o conduce a un escape térmico. El crecimiento de la arborescencia de agua en condiciones de servicio es un proceso muy lento,

que generalmente demora muchos años en penetrar por completo el aislamiento desde el interior o el exterior. (8)

### **1.3. Descargas parciales.**

Las descargas parciales se definen en la norma IEC 60270 como: "Una descarga parcial es un proceso de descarga que solo parcialmente puntea la distancia entre dos electrodos". Esta descarga puede ser una chispa o un arco y ser originada directamente por uno de los electrodos u ocurrir sin electrodos en el hueco de un dieléctrico. Dos notas hacen referencia a esta definición. (11)

1.- Las descargas parciales son en general una consecuencia de concentraciones de tensiones eléctricas locales en el aislamiento o sobre superficies de un aislamiento. En general, tales descargas aparecen como pulsos que tienen una duración de no menos de 1  $\mu$ s. (1)

2.- "Corona" es una forma de descarga parcial que ocurre en medios gaseosos alrededor de conductores que son diferentes de los sólidos o aislamientos líquidos. "Corona" no debe ser usado como un término general para todas las formas de descargas parciales. (1)

Las descargas parciales pueden producirse en los medios de aislamiento gaseosos, líquidos y sólidos de activos sometidos a grandes campos eléctricos. Se pueden deber a vacíos o cavidades, grietas o inclusiones dentro de un dieléctrico sólido, en interconexiones dentro de dieléctricos sólidos o líquidos, en burbujas dentro de dieléctricos líquidos o a lo largo de la línea de contacto entre distintos materiales de aislamiento. (11)

Las descargas parciales causan daños progresivos e irreversibles a los sistemas con aislamiento sólido y líquido. Con el tiempo, la actividad de descargas parciales se hace más intensa y peligrosa. El proceso de deterioro puede propagarse y

desarrollarse hasta que el aislamiento sea incapaz de soportar el estrés eléctrico y produzca una descarga. (11)

El proceso de descargas parciales es característicamente pulsante y se manifiesta como unos pulsos de corriente en un circuito externo; este proceso está catalogado como estocástico porque sus propiedades son descritas en función de variables aleatorias dependientes del tiempo (8).

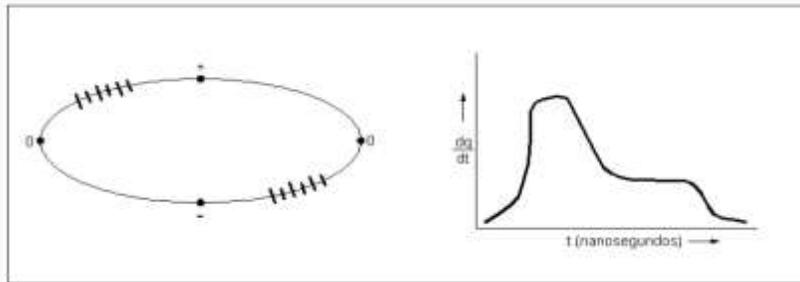


Imagen 1.10: Representación de Descargas Parciales.

En la imagen 1.10 se observa la típica representación de Descargas Parciales en diagrama elíptico junto con la firma pulsante del fenómeno.

Esta representación elíptica es la superposición del fenómeno pulsante de la descarga parcial sobre la onda sinusoidal de la tensión aplicada, como se puede observar en la imagen 1.11.

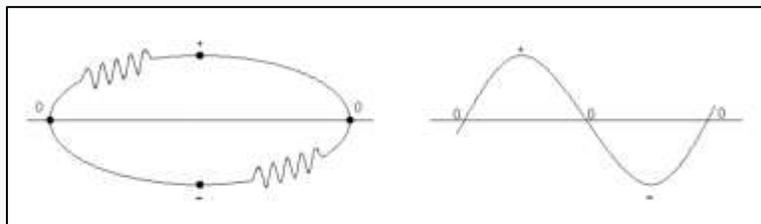


Imagen 1.11: Representación elíptica.

Como la actividad de DP se produce en aislantes poliméricos esta normalmente asociada a la formación de “árboles” que lo degradan. Estos “árboles” están

compuestos por micro-canales con material con baja densidad que puede ser rápidamente vaporizado. Un ejemplo de este fenómeno se observa a continuación.

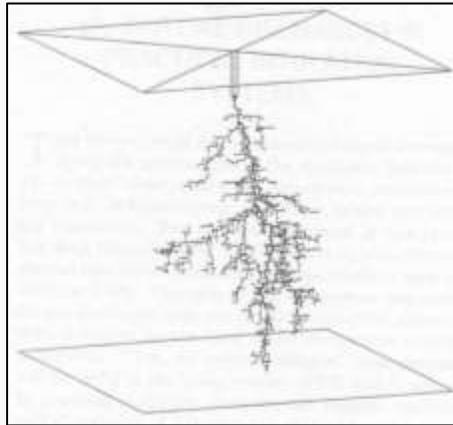


Imagen 1.12: Árbol formado por DP en polímeros.

### 1.1.1. Causas de la Descarga Parcial (DP).

Una descarga parcial, como su propio nombre indica, es un fenómeno de rotura eléctrica que está localizado en la región de un medio aislante, entre dos conductores que se encuentran a diferente potencial. Si el aislante es aire, se ioniza durante una descarga parcial y por lo tanto se convierte en conductor temporal. Debido al intercambio y recombinación del aire, la resistencia de aislamiento del aire vuelve a su estado inicial en su mayor parte. Sin embargo, si las descargas parciales se producen en materiales de aislamiento sólidos, pueden resultar dañados de forma irreparable. Una vez dañados, la mayoría de los materiales de aislamiento pierden su propiedad de aislamiento. El resultado es que las descargas parciales se hacen más frecuentes y peligrosas. (8)

Las descargas parciales, pueden dañar el aislamiento de los dispositivos que están sometidos a media y alta tensión. Esto puede provocar la destrucción total del dispositivo. Para evitar una rotura repentina y realizar reparaciones preventivas, pueden medirse y evaluarse las descargas parciales. Los sistemas de medición de

descargas parciales permiten evaluar rápidamente el estado del equipo afectado esto se puede realizar con tensión o sin tensión. (8)

Ocasionalmente los aislamientos sólidos o líquidos contienen huecos o cavidades dentro de ellos o en la frontera entre el dieléctrico, y al aplicar una tensión se genera una diferencia de potencial en las cavidades internas del material. (8)

Cuando hablamos de huecos o cavidades nos referimos a alguno de los siguientes fenómenos.

- Interfaces de aislamiento.
- Burbujas de aceite.
- Generación de gas en aceite.
- Fracturas internas en aislamiento.
- Impregnación de defectos de aislamiento sólido.
- Desalineamiento entre dos superficies.

### **1.3.2. Tipos de descargas parciales.**

#### **1.3.2.1. Descargas parciales externas.**

Ocurren normalmente por el proceso de ionización del aire contenido entre los electrodos y cuando el fenómeno comienza a ser visible se llama efecto corona. Estas descargas se producen en zonas metálicas afiladas sometidas a tensión, principalmente, en los conductores de las líneas de alta tensión y se manifiesta en forma de halo luminoso a su alrededor. Puesto que los conductores suelen ser de sección circular, el halo adopta una forma de corona, de ahí el nombre del fenómeno. También, pueden darse en los equipos eléctricos en aire, o dieléctricos líquidos como aceite, sometidos a un fuerte campo eléctrico. (1), (8), (14)

La descarga Corona ocurre en medios gaseosos alrededor de conductores. Puede ser formada en la región de un campo electrostático alto causado por algún punto de una componente energizada o una estructura en un sistema gaseoso. Dentro de esta región parcial de ionización, si la distancia se incrementa, el campo eléctrico se disminuye notablemente restringiendo la formación completa de la falla. Por otro lado, esto es normalmente visto como una extensión virtual del conductor adyacente con respecto a tierra como lo modifica el campo eléctrico. Esto incrementa la capacitancia del conductor y por consiguiente la caída de tensión. Este efecto causa una diferencia de potencial entre la fuente y el conductor, como resultado de esto, la corriente fluye de la fuente al conductor. Esta corriente existe solo durante el principio del efecto Corona, por ejemplo, un esporádico y aleatorio flujo de corriente. Debido al incremento de tensión, en una abertura con electrodos largos aparecen y desaparecen canales de luz en el transcurso de pocos microsegundos, este tipo de corona es conocido como efecto corona. La descarga completa ocurre cuando un efecto corona circula en la abertura completa y varios factores como la humedad, presión atmosférica llevan a una rápida o lenta avería. (1), (14)

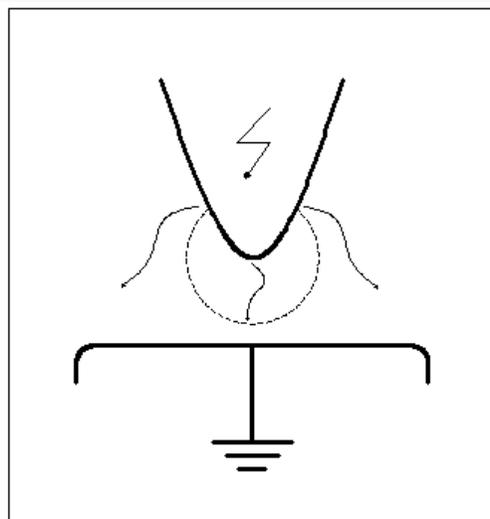


Imagen 1.13: Descarga Parcial externa.

### **1.3.2.2. Descargas parciales superficiales.**

Las descargas parciales superficiales se producen en la superficie de contacto de dos materiales aislantes diferentes. (1)

Son descargas que aparecen entre dos dieléctricos, habitualmente entre aislante y aire y son debidas a las componentes tangenciales de campo eléctrico de gran intensidad. La contaminación o humedad, por ejemplo, en cadenas de aisladores, puede acelerar el proceso que provoca este tipo de descargas. Este tipo de descarga, también puede aparecer en las uniones de tornillos, entre los pasos de tuercas, y otros elementos metálicos sometidos a tensión. (1)

Las descargas parciales no se presentan únicamente en el interior de un volumen de aislamiento sólido o líquido, éstas también se presentan sobre las superficies del aislamiento. Típicamente, las interfaces entre aislamiento sólido y líquido pueden originar una actividad de descargas parciales superficiales. La diferencia en permitividades ocasiona el aumento del campo en cualquiera de los materiales que forman la interfaz, y esto puede ocasionar una ruptura. (1)

Las descargas parciales superficiales pueden ser el resultado de una mala distribución de campo eléctrico o por una corriente de fuga que fluye a través de una capa conductora debido a contaminación o humedad, en la superficie del aislamiento. (1)

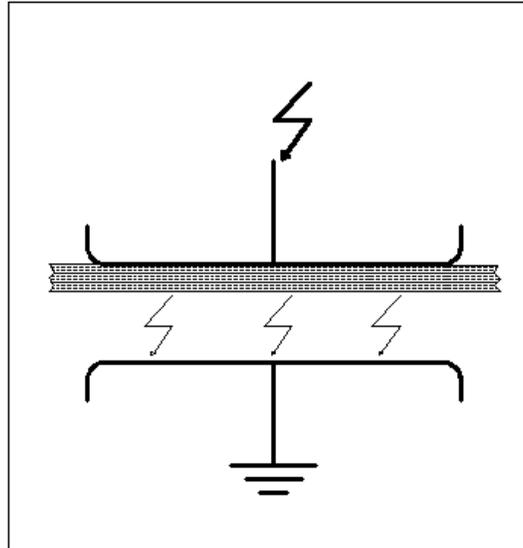


Imagen 1.14: Descarga Parcial superficial.

### 1.3.2.3. Descargas parciales internas.

Es un tipo de descarga que se produce en el interior del material o líquido aislante y está asociada a pequeñas cavidades huecas o inclusiones, a menudo microscópicas en un principio, existentes en el interior del aislador sólido o líquido.

(1)

Las descargas parciales internas se deben a estas cavidades huecas o inclusiones de materiales extraños que generalmente tienen una rigidez dieléctrica baja comparada con la rigidez dieléctrica de los materiales aislantes. Esto ocasiona que el material extraño presente una ruptura dieléctrica a una intensidad de campo eléctrico menor que la de los aislamientos y así se presenta el fenómeno de descargas parciales. Las pequeñas cavidades huecas o inclusiones que pueden ocasionar descargas parciales son: (1)

- Burbujas de gas.
- Cavidades de aceite.
- Partículas extrañas.

- Interfaces aislantes.
- Protuberancias metálicas.

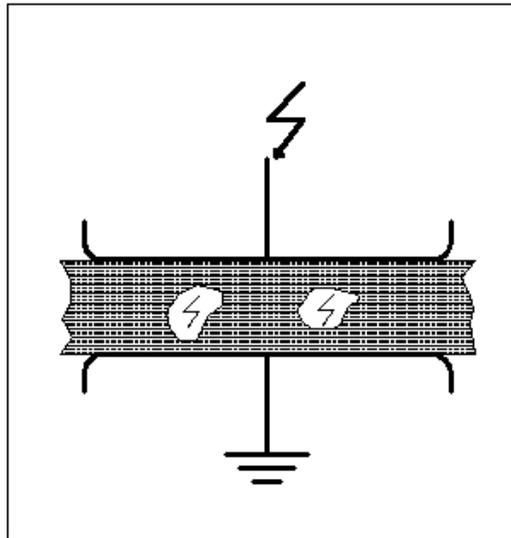


Imagen 1.15: Descarga Parcial Interna.

### 1.3.3. Consecuencias de las descargas parciales.

Las descargas parciales tienen efectos perjudiciales sobre el medio en que se producen. En medio sólido o líquido producen una degradación lenta pero continuada, que termina por la ruptura eléctrica del material aislante. En medio gaseoso, como el aire, las descargas parciales producen el conocido efecto corona que se describe a continuación: El efecto corona produce luz, ruido y ozono. Estas consecuencias se pueden apreciar directamente por los sentidos humanos (vista, oído y olfato). Sin embargo, existen otras consecuencias que no son detectables a simple vista como: - Generación de radiaciones ultravioletas. - Oxígeno en forma de ozono con alto poder oxidante. - Generación de calor. (1)

#### **1.3.4. Efectos de las descargas parciales.**

Las descargas parciales ocasionan:

- Degradación interna.
- Degradación superficial (tracking).
- Calentamiento en las áreas en donde se presentan las descargas.
- Erosión mecánica de las superficies del aislamiento por bombardeo iónico.

(1)

## **1.4. Pruebas en campo para sistemas de cables en media tensión.**

### **1.4.1. Prueba de CA de muy baja frecuencia (VLF)**

Los métodos de prueba de VLF utilizan señales de CA a frecuencias inferiores a 1 Hz. La frecuencia de prueba de VLF más comúnmente utilizada y comercialmente disponible es 0.1 Hz.

El objetivo de la prueba es detectar daños en la instalación y mostrar cualquier defecto grave o error en la instalación de otros componentes del sistema.

Determinar y, para algunas pruebas, ubicar regiones degradadas que pueden causar fallas en los cables y accesorios.

Los métodos de prueba de CA de VLF utilizan señales de CA en el rango de frecuencia de 0.01 Hz a 1 Hz. En las pruebas de resistencia, el objeto de prueba debe sobrevivir a un voltaje específico aplicado a través del aislamiento durante un período de tiempo específico sin descomponer el aislamiento. Debe tenerse en cuenta que los valores de las mediciones de cantidad de diagnóstico obtenidas durante las pruebas de voltaje de CA VLF pueden no correlacionarse con los valores obtenidos en otras frecuencias, por ejemplo, la tangente delta es mayor a 0.1 Hz que a la frecuencia de potencia y la descarga parcial (PD) puede diferir en términos de magnitud y voltaje inicial. (9)

Existen riesgos asociados con las pruebas y el diagnóstico de alto voltaje. Las pruebas de diagnóstico pueden ser no destructivas si se realizan a voltajes iguales o inferiores al voltaje de funcionamiento normal. Sin embargo, existe un compromiso entre recopilar información adicional sobre el cable bajo prueba y pasar a niveles de

voltaje elevados, con el mayor riesgo asociado de que el cable falle a medida que aumenta el voltaje. (9)

El propósito de una prueba de resistencia es verificar la integridad del cable bajo prueba. Si el cable de prueba tiene un defecto lo suficientemente grave, en el voltaje de prueba, se iniciará un árbol eléctrico y crecerá en el aislamiento. El inicio de un árbol eléctrico y el tiempo de crecimiento del canal son funciones de varios factores, incluido el voltaje de prueba, la frecuencia y amplitud de la fuente, y la geometría del defecto. (9)

#### 1.4.1.1. Parámetros de prueba de voltaje de resistencia de CA VLF.

#### 1.4.1.2. Formas de onda de CA VLF.

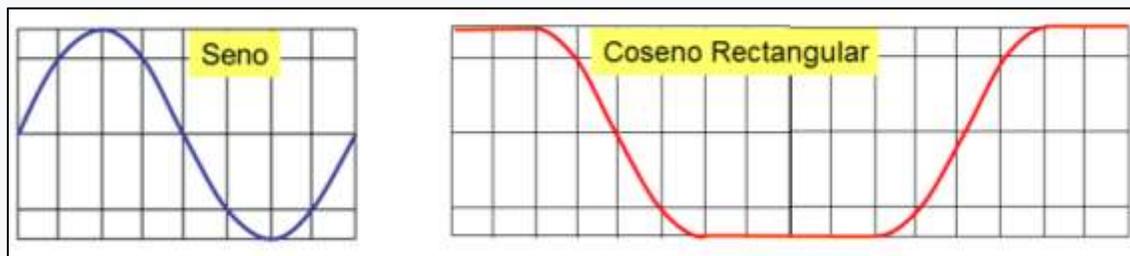


Imagen 1.16: Formas de onda de CA VLF.

#### 1.4.1.3. Niveles de tensión para la prueba VLF

La tensión de prueba recomendado para la prueba de aceptación con VLF suele ser  $3U_0$  y  $2.5U_0$  para pruebas de mantenimiento, donde  $U_0$  es la tensión rms fase-neutro. (10)

<b>VLF Sinusoidal</b>				
Cable Rating ( phase to phase) [kV]	Acceptance (kV, phase to ground)		Maintenance (kV, phase to ground)	
	(kV rms)	(kV peak)	(kV rms)	(kV peak)
15	21	30	16	22
25	32	45	24	34
35	44	62	33	47
<b>VLF Cosine rectangular</b>				
Cable Rating (phase to phase) [kV]	Acceptance (kV, phase to ground)		Maintenance (kV, phase to ground)	
	(kV rms)	(kV peak)	(kV rms)	(kV peak)
15	30	30	22	22
25	45	45	34	34
35	62	62	47	37

Tabla 1.3: Niveles de tensión para la prueba VLF  
Extracto de Tabla 3, IEEE 400.2 (La Tabla 3 abarca de 5-69 kV)

#### 1.4.1.4. Tiempos de prueba.

El tiempo de prueba mínimo recomendado para una prueba de resistencia simple en circuitos de cable envejecidos es de 30 min a 0,1 Hz. Si un circuito se considera importante, por ejemplo, circuitos de alimentación, se debe considerar la posibilidad de extender el tiempo de prueba a 60 min a 0.1 Hz. (9)

Se puede considerar un tiempo de prueba dentro del rango de 15 a 30 minutos si la característica monitoreada permanece estable durante al menos 15 minutos y no ocurre ninguna falla. Cabe señalar que el tiempo de prueba recomendado para una prueba de resistencia es de 30 min. (9)

Si el circuito falla durante la prueba, debe repararse o reemplazarse y luego volver a probarse mediante una prueba completa de 30 minutos, preferiblemente una prueba de resistencia supervisada. Se recomienda volver a probar cada sección antes de la reparación para obtener una evaluación del cable. También se recomienda volver a probar después de la reparación para evaluar la mano de obra de la reparación. (9)

#### **1.4.1.5. Método de prueba.**

El cable o sistema de cables que se va a probar se conecta al conjunto de prueba de voltaje de CA VLF y el voltaje de prueba de coseno-rectangular se eleva a un valor hasta el especificado en la Tabla 1.3. Durante el ciclo de prueba, la corriente de fuga se puede monitorear y registrar si el equipo necesario está disponible. La corriente se puede convertir a tangente delta utilizando una técnica de aproximación. Cuando el cable o sistema de cables pasa la prueba de voltaje VLF, el voltaje de prueba se regula a cero y el cable y el conjunto de prueba se descargan y se conectan a tierra. El cable o sistema de cables se pueden poner nuevamente en servicio. Si un cable o sistema de cable falla, el voltaje de la prueba colapsa. La falla del cable puede ubicarse con el equipo estándar de localización de fallas del cable. Después de que la falla ha sido localizada y reparada, el circuito debe volver a probarse. (9)

#### **1.4.1.6. ¿Qué sucede en el aislamiento del cable durante la prueba VLF de CA a 0.1Hz ?**

- En cables con aislamiento XLPE envejecidos en servicio, las arborescencias acuosas de dimensiones críticas se convertirán en arborescencias eléctricas lo cual causara una falla durante la prueba.
- En los empalmes y terminales las capas de materiales dieléctricos y semiconductores crearan divisores de voltajes capacitivos los cuales en el caso de huecos o bolsas de aire entre estas capas iniciaran actividad de

descargas parciales. Si la descarga parcial es lo suficientemente grave el accesorio fallara durante la prueba. (9)

- La prueba VLF no es destructiva en el sentido de que no causa daño adicional al cable, si una falla se da durante la prueba VLF significa que el sistema de cable tenía un punto débil que tarde que temprano se convertiría en falla durante el servicio. (9)

#### **1.4.2. Tangente Delta (TD).**

Es un método de diagnóstico global mediante el cual se evalúa las pérdidas dieléctricas en el aislamiento del cable. Los cables durante su vida en servicio están sujetos a estrés o esfuerzo térmicos, eléctricos, mecánicos y medio ambientales. Estos esfuerzos cambian las propiedades morfológicas del aislamiento, envejeciendo o degradando el material aislante, resultando en un decremento de la fuerza de ruptura del aislamiento, lo que conducirá eventualmente a una falla. (9)

Existe una correlación entre el incremento de la tangente delta a 0.1 Hz y un decremento en el valor del voltaje de ruptura del aislamiento a frecuencia de operación. (9)

El objetivo de la Tangente Delta es detectar la presencia de arborescencias acuosas en cables poliméricos. (9)

##### **1.4.2.1. Principio de operación.**

Idealmente un cable con aislamiento “perfecto” tendrá propiedades muy similares a las de un capacitor perfecto. Al igual que un capacitor se puede considerar al cable como dos placas conductoras separadas por un aislamiento. (9)

Se mide la tangente delta (TD) a 0.5 U<sub>0</sub>, U<sub>0</sub> y 1.5 U<sub>0</sub>, y se calcula la tangente diferencial delta DTD = TD (1.5 U<sub>0</sub>) - TD (U<sub>0</sub>). Además, se puede medir la variación

de la tangente delta con el tiempo a un voltaje particular (TDTS), El voltaje debe establecerse en  $0.5 U_0$  y elevarse a  $1.5 U_0$  en pasos de  $0.5 U_0$ . Cada paso debe incluir al menos seis mediciones de TD individuales a intervalos de 10 segundos entre cada medición a 0.1 Hz. Los intervalos serán correspondientemente más largos a frecuencias más bajas. Se debe calcular el valor de TD promedio y la estabilidad de cada medición de TD o DTD en cada paso. Alternativamente, los valores de estabilidad se pueden calcular a partir de mediciones de tangente delta tomadas en cada nivel de voltaje y al final del período de resistencia de 30 minutos. (9)

#### **1.4.2.2. Criterios de evaluación.**

Los valores medidos de VLF-TD, VLF-DTD y la estabilidad temporal (VLF-TDTS) están influenciados principalmente por la condición (edad, contaminación y entrada de humedad) de los diversos componentes del sistema de cable (accesorios, aislamiento del cable y blindaje metálico). (9)

Si se detecta un valor alto de VLF-TD, VLF-DTD y / o VLF-TDTS, el usuario tiene las siguientes opciones: (9)

- El usuario puede comparar resultados entre diferentes fases del mismo segmento.
- El usuario puede dividir los circuitos en subsecciones y volver a probarlos, realizar un análisis visual de los componentes del circuito donde estén accesibles y reemplazar las partes sospechosas, o reemplazar los accesorios, especialmente si parecen ser viejos, y volver a medir.
- El usuario puede realizar pruebas adicionales en forma de resistencia monitoreada, resistencia no monitoreada o prueba de descarga parcial si desea identificar un problema localizado.

- El usuario puede separar la respuesta de las terminaciones y otros componentes si están conectados de cables más empalmes, si es práctico, agregando circuitos de protección en las terminaciones.

Las mediciones de tangente delta proporcionan una evaluación global de la pérdida dieléctrica. Por lo tanto, una sola región de alta pérdida, como una región de gran acumulación de agua, accesorio degradado, área de alta humedad o aislamiento de cable diferente, puede hacer que el valor medido aumente, aunque la pérdida de volumen de la mayoría del sistema sea menor. (9)

Los valores absolutos de VLF-TD, VLF-DTD y estabilidad temporal (VLF-TDTS) se utilizan como cifras de comparación con datos históricos, para calificar la condición del aislamiento del cable como:

- No se requiere acción
- Se recomienda realizar más estudios, o
- Acción requerida

La evaluación de la condición de no requerir acción significa que, aunque el sistema de cable puede volver a ponerse en servicio, el sistema de cable puede volver a probarse en una fecha posterior para observar la tendencia del delta tangente. (9)

La evaluación de la condición de acción requerida significa que el sistema de cable tiene un conjunto inusualmente alto de características delta tangente que pueden ser indicativas de un mal estado de aislamiento y deben considerarse para reemplazo o reparación inmediatamente después de la prueba o en un futuro cercano. Estos resultados también se pueden usar para activar más pruebas. (9)

La evaluación de la condición recomendada por el estudio adicional significa que se necesita información adicional para realizar una evaluación; la información adicional

podría provenir del historial de fallas del circuito anterior o de una evaluación adicional de una prueba de diagnóstico adicional. (9)

Si hay un aumento significativo en la tangente delta durante la prueba con un aumento de voltaje de  $0.5 U_0$  a  $U_0$ , puede que no sea necesario aumentar el voltaje para probar a  $1.5 U_0$ , ya que el aumento significativo es una indicación de que el sistema de cable está muy degradado y, por lo tanto, existe el peligro de iniciar árboles eléctricos en el aislamiento severamente dañado. En este caso, la condición del sistema de cable se evalúa como acción requerida. (9)

#### 1.4.2.2.1. Valor promedio de la Tangente Delta

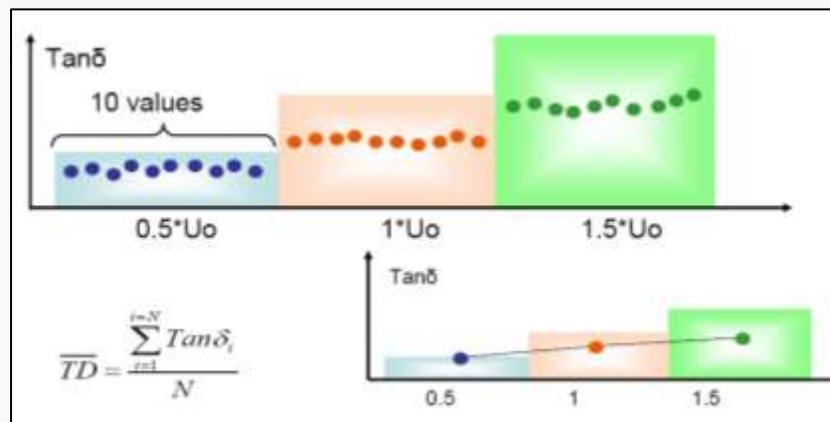


Imagen 1.17: Valor promedio de TD. (10)

#### 1.4.2.2.2. Diferencial de la Tangente Delta ( $\Delta \tan\delta$ ).

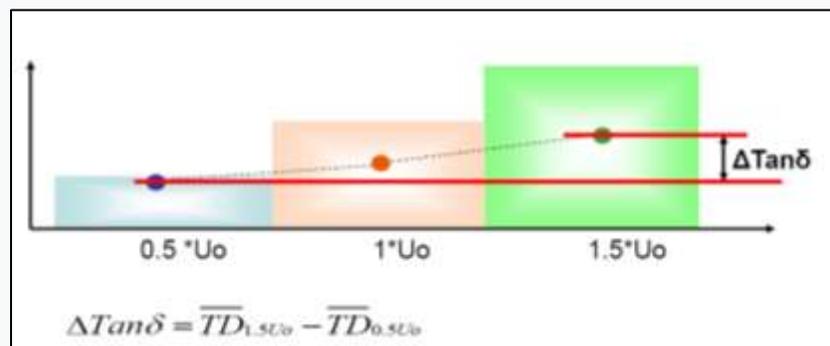


Imagen 1.18: Diferencial de la TD. (10)

### 1.4.2.2.3. Estabilidad de la tangente delta (Desviación Estándar).

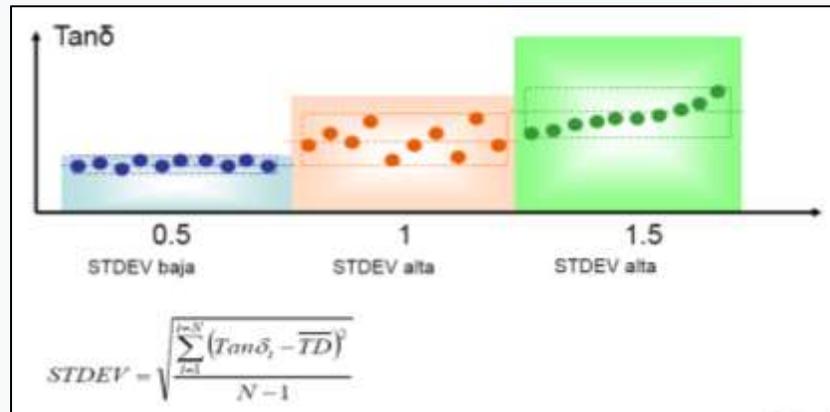


Imagen 1.19: Estabilidad de la TD. (10)

Condición de Evaluación	Estabilidad de tiempo de VLF-TD (VLF-TDTS) medida por desviación estándar en U0, [10 <sup>-3</sup> ]		Diferencial VLF-TD (VLF-DTD) (diferencia en la media de VLF-TD) entre 0,5 U0 y 1,5 U0, [10 <sup>-3</sup> ]		Media VLF-TD en U0, [10 <sup>-3</sup> ]
No se requiere acción	< 0.1	y	< 5	y	< 4
Se recomienda más estudio	0.1 a 0.5	o	5 a 80	o	4 a 50
Acción requerida	> 0.5	o	> 80	o	> 50

Tabla 1.4.: Cifras históricas de mérito para la evaluación de la condición de aislamientos basados en PE en edad de servicio.

“Tabla 4 - Cifras históricas de mérito para la evaluación del estado de los aislamientos basados en PE envejecidos (por ejemplo, PE, XLPE y TRXLPE) usando 0.1 Hz. Tomada de IEEE 400.2 2013.p.19”

### 1.4.3. Prueba de Descargas Parciales.

La medición de descargas parciales es un método confiable y no intrusivo que puede utilizarse en cualquier momento para diagnosticar el estado del aislamiento. En comparación con otros métodos de diagnóstico dieléctrico, la medición de

descargas parciales ofrece una información muy sensible para ayudar a detectar eficazmente puntos débiles localizados en el sistema de aislamiento.

Debido a que la actividad de descargas parciales está a menudo presente antes de producirse una falla del aislamiento, la detección de descargas parciales es esencial para garantizar el funcionamiento confiable a largo plazo del equipo eléctrico. (11)

Las mediciones de descargas parciales se realizan para comprobar el estado del aislamiento, detectar desde los defectos más pequeños hasta los críticos, demostrar la necesidad de un oportuno mantenimiento y reparación, evaluar los riesgos y la necesidad de un monitoreo continuo de descargas parciales. (11)

#### **1.4.3.1 Cuando deben medirse las descargas parciales.**

- Inicialmente para pruebas rutinarias y de aceptación en fábrica para identificar problemas de calidad de producción. (11)
- Antes de la energización como comprobación final de control de calidad. Debido a que una manipulación inadecuada durante el transporte y la instalación puede dar lugar a daños mecánicos internos. (11)
- Una vez en funcionamiento, deben tomarse decisiones estratégicas sobre el mantenimiento. La medición y el análisis periódicos proporcionan los datos necesarios para desarrollar un plan de pruebas y se minimicen los cortes y costes de mantenimiento innecesario. (11)

#### **1.4.3.2 Como se miden las descargas parciales.**

Para mediciones trifásicas, las mediciones de descargas parciales pueden realizarse energizando cada fase sucesivamente. Pueden realizarse mediciones

monofásicas con las otras fases puestas a tierra o mediciones trifásicas para identificar la actividad fase a fase. Los pulsos de descargas parciales tienen una duración corta y tiempos de subida en el rango de los nanosegundos. Los criterios más importantes para evaluar las descargas parciales son: (11)

- Nivel de carga expresado en picocoulombs (pC) o nanocoulombs (nC).
- Tensión de inicio y extinción de DP
- Tasa de repetición de pulsos de DP

La intensidad de descargas parciales se representa a menudo en relación al ángulo de fase de la tensión aplicada en un diagrama de descargas parciales. En entornos con altos niveles de interferencia, también pueden utilizarse técnicas modernas de supresión de ruido para separar las descargas parciales del ruido. (11)

El método se basa en la aplicación de una onda sinusoidal pura de 0.1 Hz al sistema de cable. El voltaje aplicado de hasta dos veces el voltaje de línea a tierra del sistema rms puede generar descargas parciales en los sitios de defectos de aislamiento. Se puede usar un método de onda viajera para medir la magnitud de descargas parciales, localizar y registrar las descargas parciales de las diversas ubicaciones de defectos en el cable, los empalmes o las terminaciones. (11)

#### **1.4.3.3. Interpretación de los datos de descargas parciales**

Las descargas parciales son consecuencia de una avería local, ya sea como resultado de (a) una mejora del campo eléctrico dentro o sobre la superficie del aislamiento, o (b) una región de campo de baja ruptura. Las DP aparecen como eventos individuales de muy corta duración; siempre van acompañadas de

emisiones de luz, sonido y calor, así como pulsos electromagnéticos; y a menudo resultan en reacciones químicas. (12)

Los parámetros de DP que generalmente se miden durante las pruebas en los sistemas de cables instalados son los siguientes: (12)

- Tensión de inicio PD, PDIV (pruebas fuera de línea).
- Tensión de extinción PD, PDEV (pruebas fuera de línea).
- Ubicación del PD.
- PD magnitud (q).
- Tasa de repetición de PD (n).

Las características de los parámetros de DP dependen de:

- Tipo y ubicación de los defectos, es decir, fuentes de DP, en el sistema de aislamiento.
- Material aislante.
- Condiciones de funcionamiento como voltaje aplicado, carga y tiempo.
- Condiciones de funcionamiento como voltaje aplicado, carga y tiempo.

#### **1.4.3.4. Tipo y ubicación de los defectos**

El tipo y la ubicación de los defectos afectan la interpretación de los datos de DP. Es bien sabido que los defectos en los sistemas de cables pueden resultar en fallas prematuras, por lo que es importante poder localizar los defectos y determinar el tipo de defecto. Los defectos pueden introducirse inadvertidamente en los cables o accesorios durante la fabricación, el almacenamiento, la manipulación, el transporte y la instalación, o pueden desarrollarse a medida que el sistema de cables envejece en servicio mientras se expone a tensiones eléctricas, mecánicas, térmicas y ambientales. Algunos defectos no producen descargas parciales. Normalmente, los

defectos causarán DP solo si la tensión eléctrica local en el defecto supera la tensión inicial. (12)

#### **1.4.3.5. Fuentes típicas de descargas parciales en cables extruidos**

Los defectos típicos en los sistemas de cables extruidos que pueden ser fuentes de DP son los siguientes: (12)

- Cavidades dentro del aislamiento o en las interfaces entre el aislamiento y las pantallas semiconductoras. Esto incluye cortes de cuchillo, hendiduras o grietas en el escudo de aislamiento.
- Cavidades de interfaz en interfaces de cables y accesorios.
- Pantalla de aislamiento de alta resistencia o neutro roto.

Árboles eléctricos iniciados a partir de protuberancias, huecos o árboles acuáticos. Por lo general, se utilizan varias características de la DP para evaluar la gravedad de una fuente de DP. Estas características incluyen, entre otras, mediciones detalladas de sus propiedades estadísticas (magnitud de descarga, tasa de repetición, fase, etc.) y voltajes de inicio y extinción. (12)

Tanto la magnitud de la DP como la tasa de repetición aumentan con el área de superficie de la cavidad. Pueden ocurrir múltiples descargas dentro de la misma cavidad si el área de la superficie es grande; Sin embargo, con el tiempo, a medida que aumenta la conductividad de las superficies de la cavidad, las múltiples descargas pueden fusionarse en un número menor de pulsos de mayor magnitud. La magnitud de la DP también aumentará con la profundidad de la cavidad. Por lo tanto, cualquier expansión y contracción térmica con la carga del cable que afecte las dimensiones de la cavidad afectará las características de DP. (12)

A medida que aumenta el grosor del aislamiento para cables con clasificaciones de voltaje más grandes, la magnitud de la descarga en una cavidad de la misma profundidad disminuirá en el PDIV (Tensión Inicial de Descarga Parcial) para un cable en particular. Por ejemplo, una cavidad esférica de 0,5 mm en el blindaje del conductor en un cable de 15 kV tendrá una magnitud de aproximadamente 10 pC, pero aproximadamente 5 pC en un cable de 35 kV. Las magnitudes típicas en los huecos en los sistemas de aislamiento extruidos son inferiores a 100 pC para voltajes de prueba de hasta el doble del voltaje operativo. (12)

#### **1.4.3.6. Árboles eléctricos iniciados a partir de protuberancias, huecos o árboles de agua**

Las protuberancias o contaminantes dentro del aislamiento o en la interfaz aislamiento/semiconductor producen aumentos locales en la tensión eléctrica. Si la tensión se vuelve lo suficientemente grande, se puede iniciar un árbol eléctrico. En el sitio de un árbol eléctrico, el aislamiento se daña irreversiblemente, puede haber una descarga parcial y la ruptura completa del aislamiento es solo una cuestión de tiempo para el aislamiento no laminado. En general, los árboles eléctricos son más difíciles de iniciar que de crecer, de modo que un árbol eléctrico, una vez iniciado, tiende a crecer hasta fallar por descarga parcial cada vez que se excede el voltaje de inicio de DP. Las magnitudes de DP de un árbol eléctrico dependen principalmente de la longitud del árbol en la dirección del campo eléctrico y la magnitud del campo eléctrico aplicado. En algunos árboles eléctricos, las magnitudes de DP aumentan gradualmente con la longitud creciente de los canales del árbol. Estas magnitudes de descarga son mayores que las que se encuentran en las cavidades esféricas. En otros árboles eléctricos, las magnitudes se mantienen relativamente constantes, pero la tasa de repetición cambia a medida que el árbol crece. (12)

Las cavidades generalmente generan árboles eléctricos antes de la falla. Un árbol eléctrico, una vez iniciado, a menudo crece rápidamente si persisten las descargas

parciales, lo que lleva a una falla en un tiempo relativamente corto que varía de minutos a algunas semanas, dependiendo del material de aislamiento y las condiciones de operación. Una detección positiva de un árbol eléctrico debería requerir un reemplazo o reparación inmediata. (12)

Aunque las descargas parciales no ocurren durante la iniciación y el crecimiento de los árboles de agua, las descargas parciales ocurren cuando un árbol de agua conduce a un árbol eléctrico. La probabilidad de que un árbol de agua conduzca a un árbol eléctrico durante una prueba de DP de campo aumenta con la magnitud del voltaje de prueba y la duración de la prueba. Cualquier descarga parcial en un árbol acuático implica la existencia de uno o más árboles eléctricos en ese árbol acuático. Un árbol eléctrico iniciado a partir de un árbol de agua puede deberse a una sobretensión como un rayo, una sobretensión de conmutación o una prueba de campo. Alternativamente, a voltaje de funcionamiento, las propiedades del aislamiento que rodea el árbol de agua pueden ser tales que conduzcan a la iniciación de un árbol eléctrico. Es posible que no se produzca una falla inmediata del circuito del cable, pero la falla puede ocurrir varias horas a varios meses después del inicio del árbol eléctrico. (12)

#### **1.4.3.7. Fuentes típicas de descargas parciales en cables impregnados de líquido**

Los cables impregnados con líquido [recubiertos de plomo con aislamiento de papel (PILC)] son más resistentes a la DP que los cables XLPE. Las fuentes típicas de DP son las siguientes: (12)

- Huecos a tope con deficiencia de líquido, áreas blandas del aislamiento y huecos o cavidades debido a la impregnación.
- Papel seco, quebradizo y agrietado.
- Cera del fluido (la formación de cera debido a la degradación dificulta el flujo del fluido que puede conducir a la formación de huecos).

- Lugares de huellas carbonizadas (por ejemplo, arbolado).
- Agua en el aislamiento.
- Fugas de fluido en las juntas o por agujeros en la vaina.

Las cavidades en el aislamiento impregnado con fluido (laminado) se pueden formar por expansión de la funda de plomo durante la carga repetida, aumentando así el volumen del cable, encerando el fluido debido al envejecimiento, agujeros en la funda que permiten la salida del fluido, o fuga de fluido en las juntas. La DP en burbujas llenas de gas generará gases adicionales que cambiarán la forma de la burbuja, lo que a su vez afectará las características de la DP. Por lo tanto, no es inusual que la DP en el aislamiento laminado se mueva de un lugar a otro debido al comportamiento transitorio de las burbujas de gas. Las descargas repetidas en un lugar provocarán la carbonización del papel y el inicio del rastreo. El seguimiento puede seguir las interfaces entre las capas de papel, cruzar los espacios a tope y, por lo tanto, extenderse axialmente a lo largo del cable. (12)

#### **1.4.3.8. Fuentes típicas de descargas parciales en accesorios**

Las condiciones menos que ideales durante la instalación pueden llevar a la inclusión de defectos de accesorios en el campo. Los defectos típicos que pueden provocar DP son los siguientes: (12)

- Vacíos en productos moldeados debido a una contracción inadecuada de los componentes accesorios o capas mal contraídas en productos termorretráctiles y contraíbles en frío.
- Interfaces sueltas de la junta de aislamiento (seguimiento), especialmente en ausencia o migración de grasa de silicona, y en las hendiduras realizadas en el aislamiento durante la instalación de la junta.
- Juntas ensambladas incorrectamente, por ejemplo, desalineación, posicionamiento inadecuado, rayones de instalación, contaminación y huecos.

- La contaminación como humedad, óxido metálico, etc. también puede filtrarse en las interfaces.
- Terminaciones mal instaladas (posicionamiento incorrecto de los dispositivos de alivio de tensión), seguimiento de la superficie, cortes en el aislamiento en el borde del blindaje semiconductor del cable.
- Cortes de cuchillo o magulladuras producidos por herramientas de empalme, especialmente en los bordes de los recortes de blindaje semiconductor, y huecos en el aislamiento, principalmente a lo largo de las líneas de tejido o en las interfaces.
- No se hace contacto entre el conector y el semiconductor o si el cable neutro no está conectado correctamente al semiconductor exterior del cuerpo del empalme.
- Herramientas del conector de terminales y superficies contaminadas. (12)

#### **1.4.4. Detección de descargas parciales**

Los pulsos de DP son muy cortos, típicamente de 1 ns a 5 ns de ancho, y pueden tener componentes de frecuencia significativos de hasta 1 GHz en su fuente. Hay dos enfoques generales disponibles para detectar pulsos de DP en cables instalados, lo que se conoce como detección fuera de línea y en. Las pruebas fuera de línea se llevan a cabo normalmente utilizando una fuente de voltaje separada después de que el cable se haya retirado de servicio. Las pruebas en línea (en servicio) se llevan a cabo durante el funcionamiento normal del sistema del cable. (12)

Algunas ventajas de las pruebas de DP fuera de línea son las siguientes:

- PDIV (tensión inicial de descarga parcial) y PDEV (tensión de extinción de descarga parcial) se pueden medir si se utiliza una fuente de voltaje variable.
- Las características PD se pueden obtener a diferentes voltajes, lo que puede ayudar en la identificación de ciertos tipos de defectos. (12).

Algunas ventajas de las pruebas de DP en línea son las siguientes:

- Las características de DP pueden obtenerse bajo diferentes condiciones de carga, lo que puede ayudar en la identificación de ciertos tipos de defectos.
- Las pruebas se pueden realizar sin tener que interrumpir el servicio. (12)

Dos factores importantes en las pruebas de DP son la sensibilidad de detección y la evaluación de la condición a partir de la interpretación de los datos. Los métodos de prueba de DP varían significativamente en su sensibilidad de detección, y los proveedores de pruebas de DP utilizan diferentes criterios para evaluar la condición de aislamiento planteada por la fuente de la DP detectada. (12)

Los usuarios de cable a menudo confían en consideraciones económicas cuando seleccionan un método de prueba. Se recomiendan las siguientes consideraciones para ayudar a los usuarios de cables a sopesar las ventajas y desventajas de los métodos de prueba disponibles: (12)

Se debe dar alta prioridad a la sensibilidad de detección. Una baja sensibilidad puede resultar en que se detecten menos problemas.

Los métodos de prueba deben ser capaces de proporcionar reconocimiento de patrones para identificar los tipos de DP.

Las condiciones de funcionamiento de los cables, por ejemplo, el nivel de protección contra sobretensiones y el historial de carga, así como la carga planificada en el futuro, deben tenerse en cuenta al evaluar el riesgo asociado con la DP detectada. El método de prueba no debe inducir ni agravar la degradación del sistema. (12)

#### **1.4.4.1. Ubicación del empalme**

Antes de realizar la prueba de DP de alto voltaje, es necesario identificar y ubicar los empalmes del cable para diferenciar entre las señales de DP que emanan de un cable y las señales de DP de un empalme. Esto es necesario debido a las diferencias en los materiales aislantes de cables y empalmes y, por lo tanto, su resistencia relativa a la degradación por DP. (12)

Se envía un pulso de bajo voltaje desde el extremo cercano de un cable y se registran todas sus reflexiones. Un desajuste entre las impedancias características del cable y los empalmes provoca estos reflejos. Un desajuste de impedancia también puede deberse a cambios de impedancia causados por extensas deformaciones físicas, neutros corroídos o gran absorción de humedad. El principio de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR) se utiliza para localizar los sitios de cambios abruptos de impedancia. En las pruebas en línea, se emplea la misma técnica con la excepción de que el pulso de bajo voltaje se inyecta en el cable energizado a través de un transformador de corriente. (12)

#### **1.4.4.2. Limitaciones de la prueba**

Las limitaciones de las pruebas de DP pueden deberse a lo siguiente:

Falta de detección o sensibilidad de ubicación (por ejemplo, los blindajes de aislamiento con cinta en cables antiguos pueden atenuar en gran medida los pulsos de DP). Conductor neutro defectuoso (cables / cintas excesivamente corroídas, agrietados, etc.). Imposibilidad de energizar una gran longitud de cable para pruebas fuera de línea. Imposibilidad de ubicar correctamente la fuente de DP en una sección de cable enterrada larga para realizar pruebas en el dominio de la frecuencia. Presencia de fuentes externas dominantes de descarga parcial que puedan acoplarse al sistema de medición. Operadores de prueba mal capacitados. Cable inaccesible o sus componentes. (12)

#### **1.4.5. Condiciones de prueba (niveles de voltaje y duración)**

Las pruebas en línea utilizan el voltaje del sistema. La duración de la prueba debe ser hasta que se recopilen datos suficientes, hasta un máximo de 15 min. (12)

Las pruebas fuera de línea se pueden realizar utilizando diferentes fuentes de voltaje. Existe una sólida justificación técnica de probar hasta 1,5 Vo a 2 Vo para garantizar que el PDEV del sistema de cable sea mayor que 1 Vo. (12)

Existe un mayor riesgo de que se produzcan daños en los defectos de los sistemas de cables viejos que son inofensivos a la tensión de funcionamiento si la prueba se realiza a tensiones superiores a 2 Vo. También existe un mayor riesgo de fallas durante la prueba de DP. Sin embargo, algunas empresas de servicios públicos solicitarán pruebas hasta un máximo de 3 Vo en cables nuevos, ya sea en el carrete o recién instalados, para asegurarse de que no hubo daños durante el transporte o la instalación. Además, algunas utilidades probarán hasta 3 Vo a pesar de que existe una probabilidad significativamente mayor de falla durante la prueba de lo siguiente: (12)

- Los circuitos de cables con defectos genéricos que pueden causar altas tasas de falla, por ejemplo, algunos cables curados con silano pueden causar una corrosión severa de los conductores de aluminio.
- Circuitos de cables que se están considerando para la inyección de silicona, el motivo es que todos los cables con árboles eléctricos fallarán a voltajes de prueba más altos. Los voltajes de prueba más altos también podrían iniciar nuevos árboles eléctricos.
- Circuitos de cables que pueden tener accesorios y/o cables sospechosos para garantizar el funcionamiento durante períodos de alta carga, por ejemplo, durante los meses de verano en algunas áreas urbanas.

El voltaje en las pruebas de frecuencia industrial puede aplicarse hasta un máximo de 15 minutos para garantizar que los electrones estén disponibles en las cavidades para iniciar la DP. Sin embargo, una vez que se detectan las DP, la tensión debe aplicarse durante el tiempo suficiente para recopilar datos suficientes hasta un máximo de 15s. Algunas organizaciones de pruebas de DP disminuirán el voltaje muy poco después del inicio de la DP constante cuando prueben circuitos de cables dieléctricos extruidos. (12)

En resumen, no es posible estandarizar un protocolo de prueba específico en el momento actual para pruebas en línea o fuera de línea. Esto puede ser posible a medida que se recopilen más datos. Para pruebas fuera de línea, se puede variar la amplitud de la tensión de prueba. Para sistemas muy antiguos, se sugiere una tensión de prueba máxima de 2 Vo. A medida que mejora la condición anticipada del cable, la tensión de prueba puede aumentarse hasta 2,5 Vo. Los cables nuevos, ya sea en el carrete o recién instalados, pueden probarse hasta un máximo de 3 Vo con la concurrencia del propietario y el fabricante del cable. La duración de la prueba debe ser lo suficientemente larga para permitir la disponibilidad de electrones para iniciar la DP, pero una vez que se detectan las DP, el voltaje debe aplicarse el tiempo suficiente para recopilar suficientes datos de DP. (12)

## Capítulo 2. Presentación de pruebas a cable de media tensión

### 2.1. Caso 1.

Falla presentada en vía 23C 3209-19, del circuito MAG-53070 entre las subestaciones 14 y 15. Cable XLPE con una longitud de 520 m. La cual para fines de análisis de pruebas le llamaremos caso 1.

#### 2.1.1. Prueba de detección de Descargas Parciales por el método Coseno Rectangular, caso 1.

Se realiza prueba con un voltaje de 13.2 kV, con rangos de  $U_0=0.7$ ,  $U_0=1.0$ ,  $U_0=1.4$ ,  $U_0=2.0$ , para este caso se analizará la prueba  $U_0=1.0$ .

Cable		Ubicación	
Número	VIA 32C 3209-19 MAG 53070 SE 15	ANDEN ON FRUTAS Y LEGUMBRES CENTRAL DE	
Tipo	Tres conductores de un hilo	Fecha de instalación	
$U_0$ [kV rms]	13,2	Longitud	
Última modificación	15/4/20 17:58	520 m	
Comentario PRUEBA PREVIA A NORMALIZACION			

SE 15		SE 14	
Fabricante		Fabricante	
Aislamiento	Aire	Aislamiento	Aire
Terminación	Desconocido	Terminación	Desconocido

**Plan del cable**

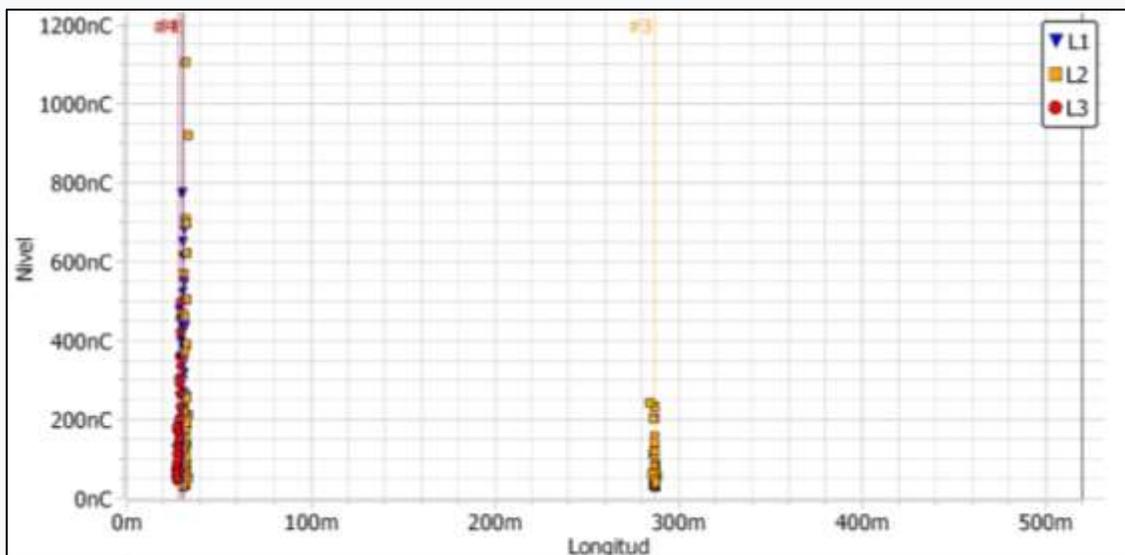
**Segmentos**

Iniciar	Tipo	3 fases	
		Aislamiento	Descripción
0 m	Terminación	Desconocido	
1	Sección de cable 520 m	XLPE	XLPE Cable
520 m	Terminación	Desconocido	

Imagen 2.1: Tabla de datos para prueba caso 2, Coseno Rectangular

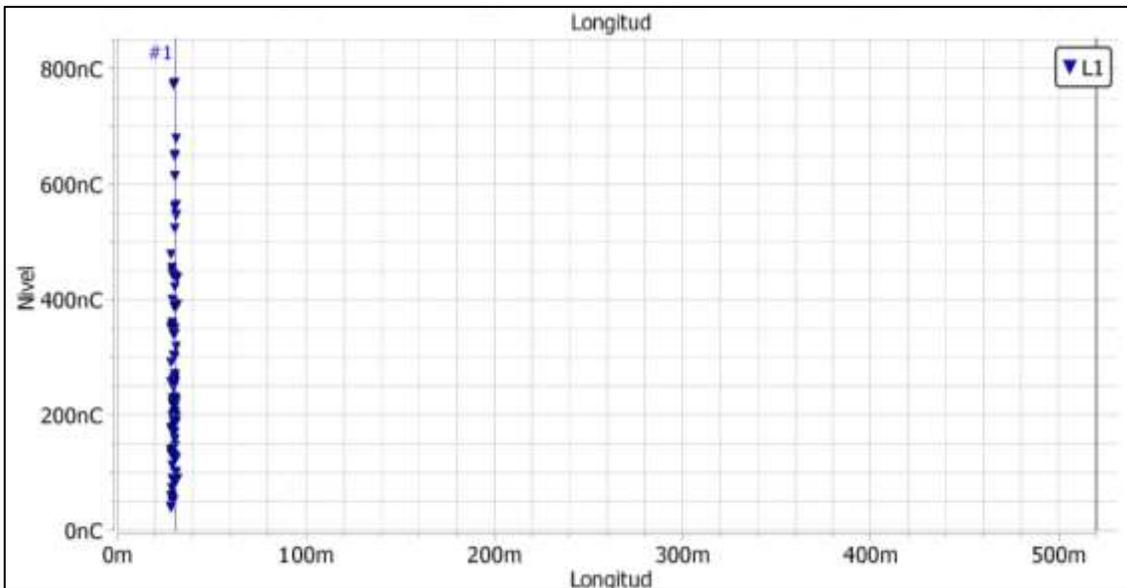
	L1	L2	L3
Ruido de fondo [pC]	2838	2425	2479
PDIV [kV rms]	9,2	9,2	13,2
PDEV [kV rms]	-	-	-
DP max [pC] (PDIV)	14088	343687	104878
DP max [pC] (Uo)	532462	797498	328683
PD Level [pC] (Uo)	387056	277571	30363
DP max [pC] (1.7*Uo)	-	586565	-
PD Level [pC] (1.7*Uo)	-	377229	-
DP max [pC] (2*Uo)	-	-	-
PD Level [pC] (2*Uo)	-	-	-
Frecuencia [Hz]	393	393	394
Modo de funcionamiento	Slope	Slope	Slope

Tabla 2.1: Resultados generales de prueba Coseno Rectangular, caso 1, para  $0.0 U_o < U < 1.0 U_o$ .



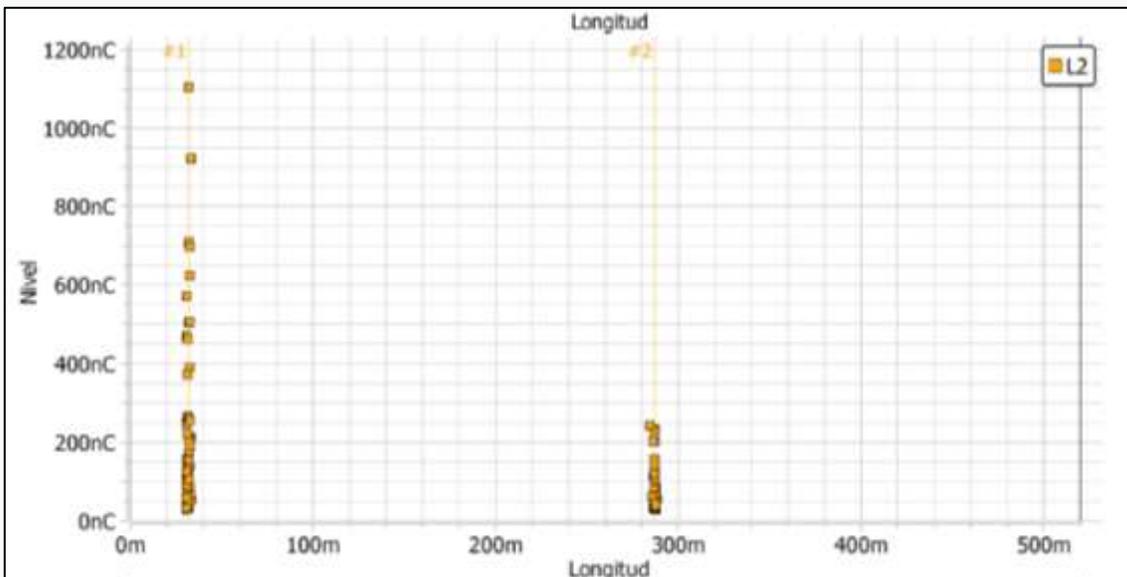
Gráfica 2.1: Resultado general de presencia de Descargas parciales en 4 diferentes puntos, caso 1, para  $0.0 U_o < U < 1.0 U_o$ .

En la gráfica 2.1. Podemos ver de forma general la presencia de descargas parciales en las 3 diferentes fases, en 4 posiciones importantes a unas distancias de 31 m. en la fase 1, 32 m. y 287 m. en la fase 2 y a 28 m. en la fase 3.



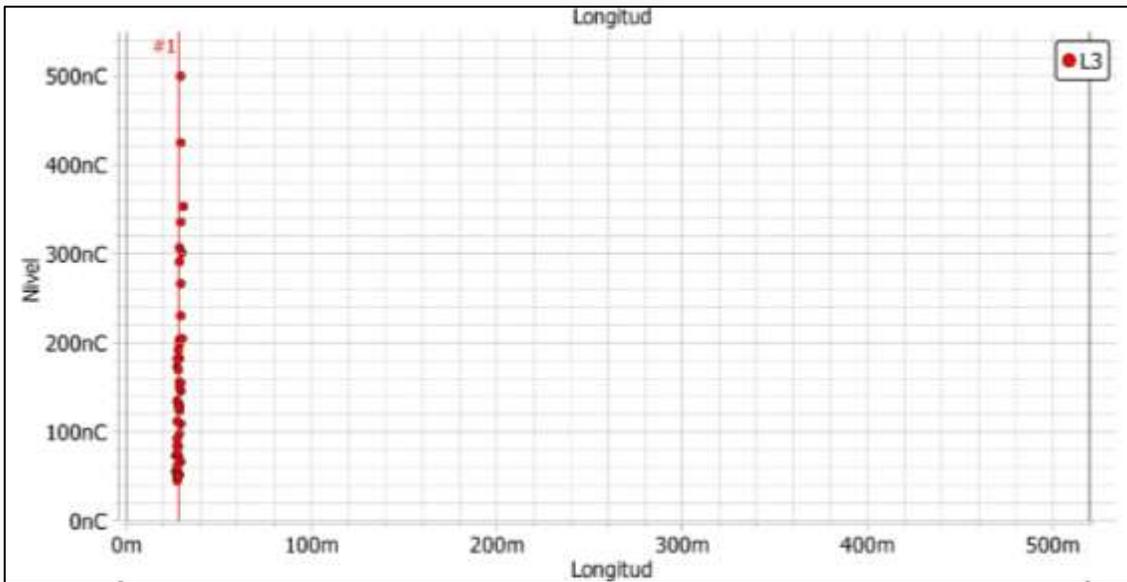
Gráfica 2.2: Descargas parciales en fase A, caso 1, para  $0.0 U_o < U < 1.0 U_o$ .

En la gráfica 2.2. Se puede ver presencia de descargas parciales en la fase A, a una distancia de 31 m. con un nivel de entre 40 y 780 nC.



Gráfica 2.3: Descargas parciales en fase B, caso 1, para  $0.0 U_o < U < 1.0 U_o$ .

En la Gráfica 2.3. Se puede ver presencia de descargas parciales en fase B, a una distancia de 32 m. con un nivel de entre 40 y 1100 nC. Y a una distancia de 287 m. con un nivel de entre 40 y 250 nC, las cuales a esta distancia no son relevantes.



Gráfica 2.4: Descargas parciales en fase C, caso 1 para  $0.0 U_o < U < 1.0 U_o$ .

En la gráfica 2.4. Se puede ver presencia de Descargas Parciales en la fase C, a una distancia de 28 m. con un nivel de entre 40 y 500 nC.

PRUEBA COSENO RECTANGULAR		
	DISTANCIA (m)	DP (Nc)
FASE A	31	780
FASE B	32	1100
	287	250
FASE C	28	500

Tabla 2.2: Comparativo de resultados, prueba Descargas Parciales, método Coseno Rectangular, caso 1, para  $0.0 U_o < U < 1.0 U_o$ .

## 2.1.2. Prueba de detección de Descargas Parciales por el método de DAC. Negativo, caso 1.

Se realiza prueba con un voltaje de 13.2 kV, con rangos de  $U_0=0.7$ ,  $U_0=1.0$ ,  $U_0=1.4$ ,  $U_0=2.0$ , para este caso se analizará la prueba  $U_0=1.0$ .

### Cable

<p><b>Número</b> VIA 32C 3209-19 MAG 53070 SE 15</p> <p><b>Tipo</b> Tres conductores de un hilo</p> <p><b><math>U_0</math> [kV rms]</b> 13,2</p> <p><b>Última modificación</b> 15/4/20 17:58</p> <p><b>Comentario</b> PRUEBA PREVIA A NORMALIZACION</p>	<p><b>Ubicación</b> ANDEN ON FRUTAS Y LEGUMBRES CENTRAL DE</p> <p><b>Fecha de instalación</b></p> <p><b>Longitud</b> 520 m</p>
---	--

**SE 15**



**Fabricante**

**Aislamiento**  
Aire

**Terminación**  
Desconocido

**SE 14**



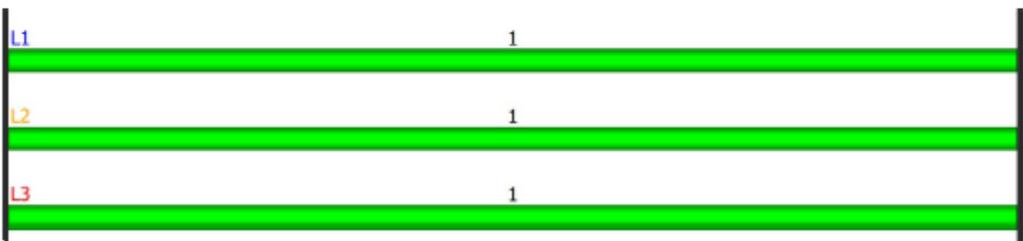
**Fabricante**

**Aislamiento**  
Aire

**Terminación**  
Desconocido

### Plan del cable

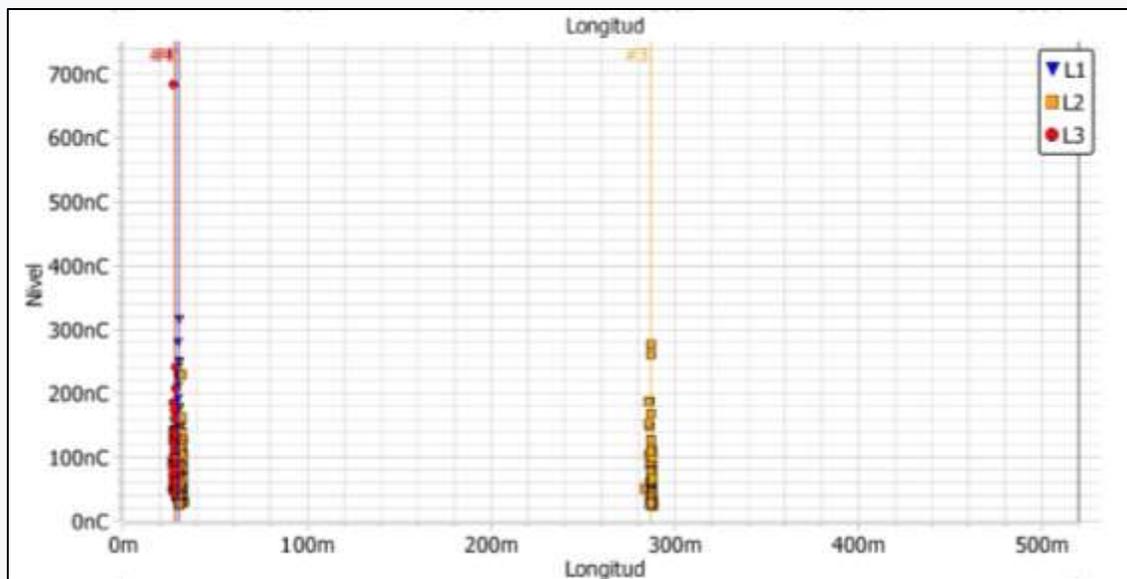
### Segmentos

Iniciar	Tipo	3 fases	
		Aislamiento	Descripción
0 m	Terminación	Desconocido	
1	Sección de cable 520 m	XLPE	XLPE Cable
520 m	Terminación	Desconocido	

Imagen 2.2: Tabla de datos para prueba caso 2, DAC Negativo

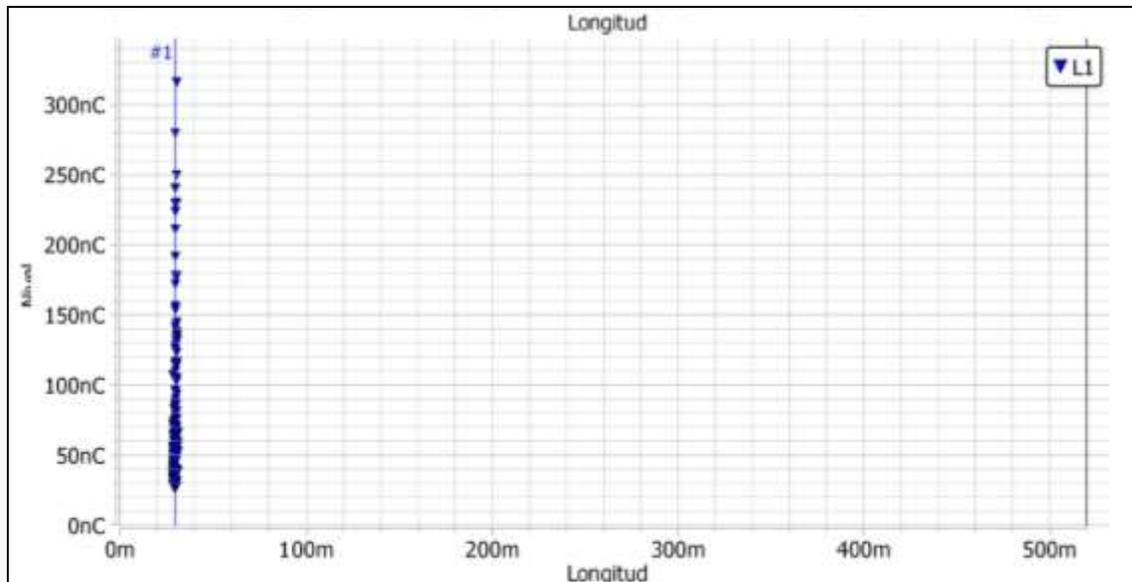
	L1	L2	L3
Ruido de fondo [pC]	6414	5321	5981
PDIV [kV rms]	13,2	9,2	13,2
PDEV [kV rms]	-	-	-
DP max [pC] (PDIV)	301362	526673	721259
DP max [pC] (Uo)	301362	1153791	721259
PD Level [pC] (Uo)	288778	1006514	225821
DP max [pC] (1.7*Uo)	342671	856999	443221
PD Level [pC] (1.7*Uo)	342671	793708	427631
DP max [pC] (2*Uo)	-	-	-
PD Level [pC] (2*Uo)	-	-	-
Frecuencia [Hz]	387	388	388
Modo de funcionamiento	DAC-	DAC-	DAC-

Tabla 2.3: Resultados generales de prueba DAC negativo, caso 1, para  $0.0 U_o < U < 1.0 U_o$ .



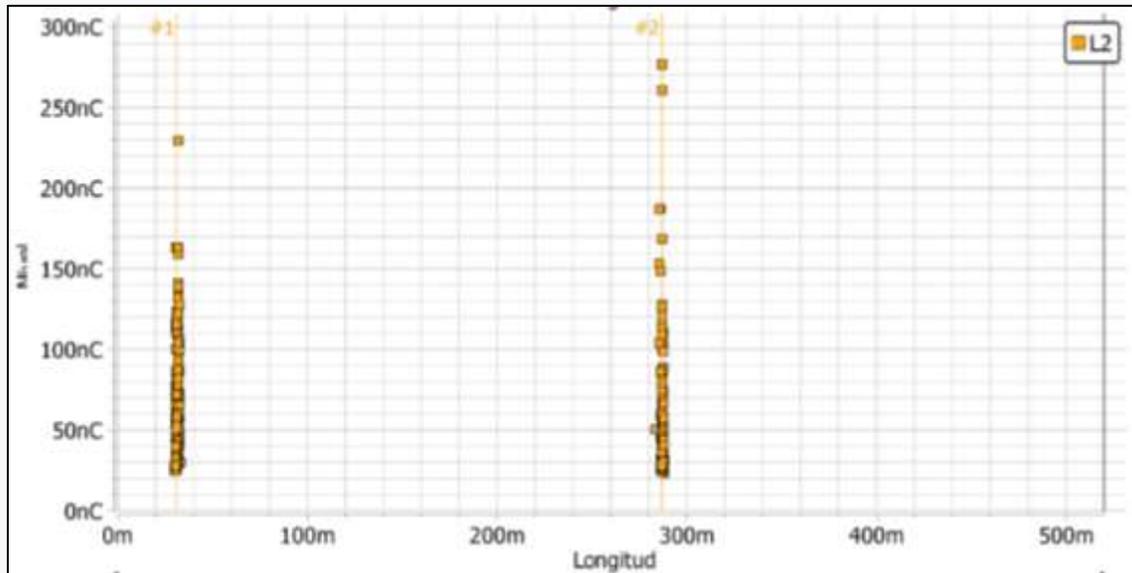
Gráfica 2.5: Resultado general de presencia de Descargas parciales en 4 diferentes puntos, caso 1, para  $0.0 U_o < U < 1.0 U_o$ .

En la gráfica 2.5. Podemos ver de forma general la presencia de descargas parciales en las 3 diferentes fases, en 4 posiciones importantes a unas distancias de 30 m. en la fase 1, 31 m. y 287 m. en la fase 2 y a 28 m. en la fase 3.



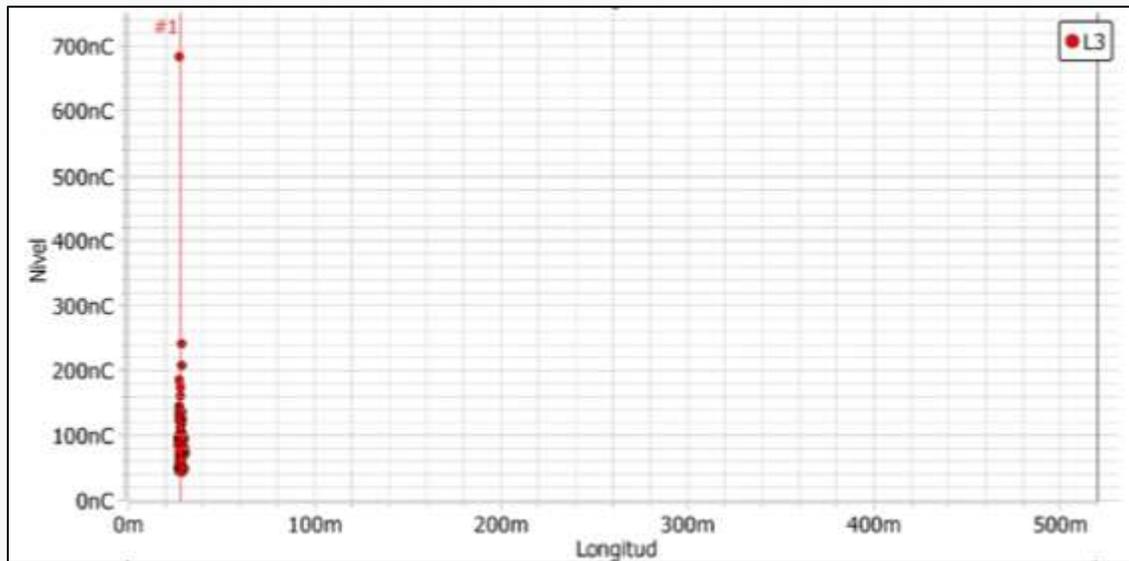
Gráfica 2.6: Descargas parciales en fase A, caso 1, para  $0.0 U_o < U < 1.0 U_o$ .

En la gráfica 2.6. Se puede ver presencia de descargas parciales en la fase A, a una distancia de 30 m. con un nivel de entre 30 y 320 nC.



Gráfica 2.7: Descargas parciales en fase B, caso 1, para  $0.0 U_o < U < 1.0 U_o$ .

En la Gráfica 2.7. Se puede ver presencia de descargas parciales en fase B, a una distancia de 31 m. con un nivel de entre 25 y 230 nC. Y a una distancia de 287 m. con un nivel de entre 25 y 280 nC.



Gráfica 2.8: Descargas parciales en fase C, caso 1, para  $0.0 U_o < U < 1.0 U_o$ .

En la gráfica 2.8. Se puede ver presencia de Descargas Parciales en la fase C, a una distancia de 28 m. con un nivel de entre 40 y 680 nC.

PRUEBA DAC NEGATIVO		
	DISTANCIA (m)	DP (Nc)
FASE A	30	320
FASE B	31	230
	287	280
FASE C	28	680

Tabla 2.4: Comparativo de resultados, prueba Descargas Parciales, método DAC Negativo, para  $0.0 U_o < U < 1.0 U_o$ .



En la imagen 2.4., se muestran los resultados de la prueba VLF Seno en la fase B, la cual se realizó a un voltaje de 33 kV, una frecuencia de 0.1 Hz, durante un tiempo programado de 5 minutos. Prueba positiva.



Imagen 2.5: Resultado de prueba VLF Seno, Fase C, caso 1.

En la imagen 2.5., se muestran los resultados de la prueba VLF Seno en la fase C, la cual se realizó a un voltaje de 33 kV, una frecuencia de 0.1 Hz, durante un tiempo programado de 5 minutos. Prueba positiva.

PRUEBA VLF SENO		
	kV	Positiva/Negativa
FASE A	33	Negativa
FASE B	33	Positiva
FASE C	33	Positiva

Tabla 2.5: Comparativo de resultados, prueba VLF Seno, fase A, B y C, caso 1.

## 2.1.4. Prueba Tangente Delta, caso 1.

Mode: VLF tanDelta		Start of test: 12:56:26 PM
Date of test: 04/22/2020		
Phase	L2	
Voltage Uo	13.2 kV	
Frequency	0.1 Hz	
Capacitance	114 nF	
StdDev TD (Uo)	0.00 E-3	
Delta TD	0.4 E-3	
Avg. TD (0.50Uo)	1.0 E-3	
Avg. TD (1.00Uo)	1.0 E-3	
Avg. TD (1.50Uo)	1.4 E-3	
Evaluation criterion: IEEE 400.2 (1.5U0)		Insulation type: PE/XLPE
Result (L2): no action required		
Signature: _____		

Activar Windows  
Ve a Configuración para activar Windows

Imagen 2.6: Resultados de prueba Tangente Delta, Fase B, caso 1.

Mode: VLF tanDelta		Start of test: 01:09:56 PM
Date of test: 04/22/2020		
Phase	L3	
Voltage Uo	13.2 kV	
Frequency	0.1 Hz	
Capacitance	115 nF	
StdDev TD (Uo)	1.08 E-3	
Delta TD	49.6 E-3	
Avg. TD (0.50Uo)	102.5 E-3	
Avg. TD (1.00Uo)	122.5 E-3	
Avg. TD (1.50Uo)	152.1 E-3	
Evaluation criterion: IEEE 400.2 (1.5U0)		Insulation type: PE/XLPE
Result (L3): action required		
Signature: _____		

Activar Windows  
Ve a Configuración para activar Windows

Imagen 2.7: Resultado de prueba Tangente Delta, Fase C, caso 1.

PRUEBA TAN DELTA		
	TD	Condición del cable
FASE A	1.5839	<b>Envejecido</b>
FASE B	0.0014	Aceptable
FASE C	0.152	Medio

Tabla 2.6: Comparativo de resultados, prueba TAN DELTA, fase A, B y C, caso 1.

### 2.1.5. Comparación de resultados, caso 1.

FASE	PRUEBAS DESPUES DE FALLA				PRUEBAS ANTES DE LA PUESTA EN SERVICIO			
	DAC NEG		COS REC		TAN DELTA		VLF SEN	
	DISTANCIA (m)	DP (nC)	DISTANCIA (m)	DP (nC)	TD	Condicion del cable	kV	Positiva/Negativa
A	30	320	31	770	1.5839	Envejecido	33	Negativa
B	31	230	32	1100	0.0014	Aceptable	33	Positiva
	287	280	287	250				
C	28	680	28	500	0.152	Medio	33	Positiva

Tabla 2.7: Resultados de pruebas, caso 1.



Imágenes 2.8: Pruebas en campo, caso 1.

### 2.2. Caso 2.

Falla presentada en vía 23C-3656-0, del circuito CRU-53040 entre la Transición de salida al RAC de Luis Méndez, con una sección de cable combinado XLPE y PILC de 2650 m, la cual para fines de análisis de pruebas le llamaremos caso 2.

### 2.2.1. Prueba de detección de Descargas Parciales por el método DAC negativo, caso 2, cable XLPE.

Se realiza prueba con un voltaje de 13.2 kV, con rangos de  $U_0=0.7$ ,  $U_0=1.0$ ,  $U_0=1.4$ ,  $U_0=2.0$ , para este caso se analizará la prueba  $U_0=1.0$ .

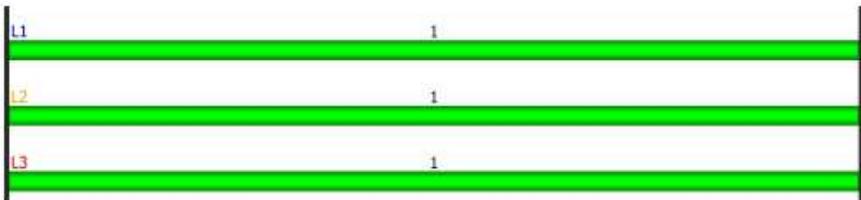
**Cable**

<p><b>Número</b> TRANSICION S.E SANTA CRUZ CRU-53040</p> <p><b>Tipo</b> Tres conductores de un hilo</p> <p><b><math>U_0</math> [kV rms]</b> 13,2</p> <p><b>Última modificación</b> 6/4/20 18:41</p> <p><b>Comentario</b> SE REALIZARAN PRUEBAS DE TANSICION DE LA SUBESTACION A RACK EN A.V LUIS MENDE Y A.V G</p>	<p><b>Ubicación</b> AV. TELECOMUNICACIONES S.E SANTA CRUZ</p> <p><b>Fecha de instalación</b></p> <p><b>Longitud</b> 2650 m</p>
--	--

<b>TRANSICION CRU-53040</b>	<b>RACK</b>
	
<p><b>Fabricante</b></p> <p><b>Aislamiento</b> Aire</p> <p><b>Terminación</b> Encogido frío</p>	<p><b>Fabricante</b></p> <p><b>Aislamiento</b> Aceite</p> <p><b>Terminación</b> Deslizante</p>

**Plan del cable**



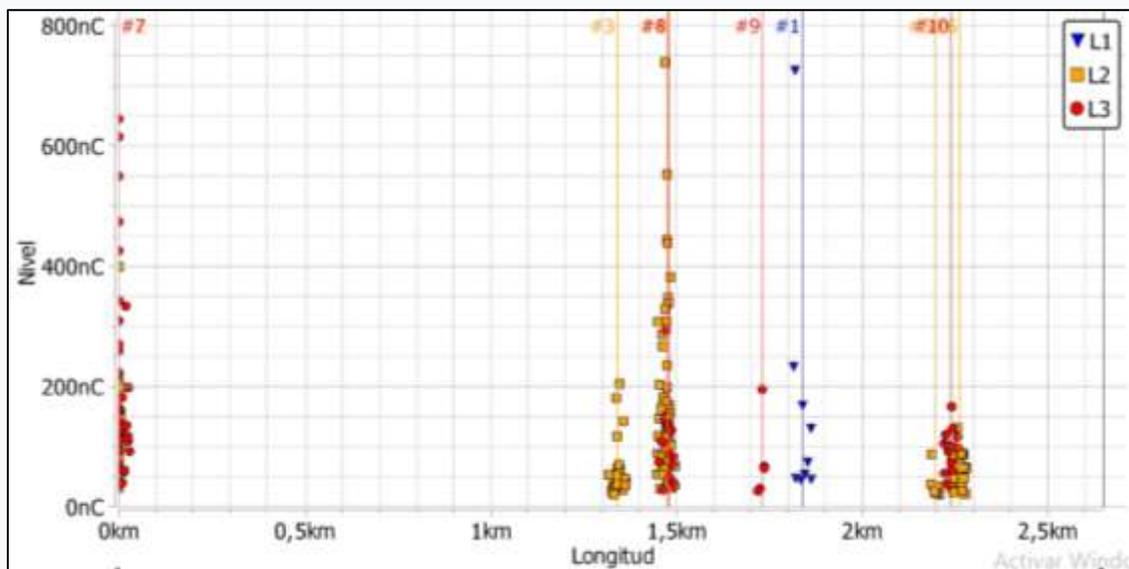
**Segmentos**

Iniciar	Tipo	3 fases Aislamiento	Descripción
0 m	Terminación	Encogido frío	
1	Sección de cable 2650 mXLPE		XLPE Cable
2650 m	Terminación	Deslizante	

Imagen 2.9: Datos para prueba caso 2, cable XLPE.

	L1	L2	L3
Ruido de fondo [pC]	13577	6813	3639
PDIV [kV rms]	9,2	9,2	9,2
PDEV [kV rms]	-	-	-
DP max [pC] (PDIV)	176203	75693	134915
DP max [pC] (Uo)	1831931	914717	678455
PD Level [pC] (Uo)	1781417	621784	450579
DP max [pC] (1.7*Uo)	1558539	1052246	953246
PD Level [pC] (1.7*Uo)	1344953	982900	862296
DP max [pC] (2*Uo)	-	-	-
PD Level [pC] (2*Uo)	-	-	-
Frecuencia [Hz]	181	183	183
Modo de funcionamiento	DAC-	DAC-	DAC-

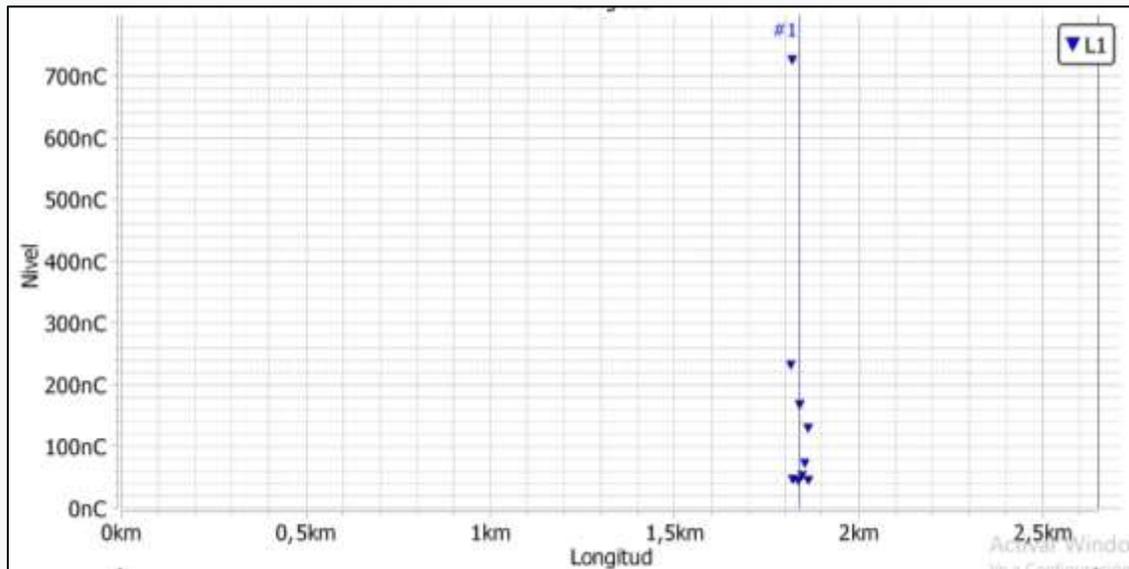
Tabla 2.8: Resultados generales de prueba DAC negativo, caso 2 cable XLPE., para  $0.0 U_o < U < 1.0 U_o$ .



Grafica 2.9: Resultado general de presencia de Descargas parciales en 10 diferentes puntos, caso 2 cable XLPE., para  $0.0 U_o < U < 1.0 U_o$ .

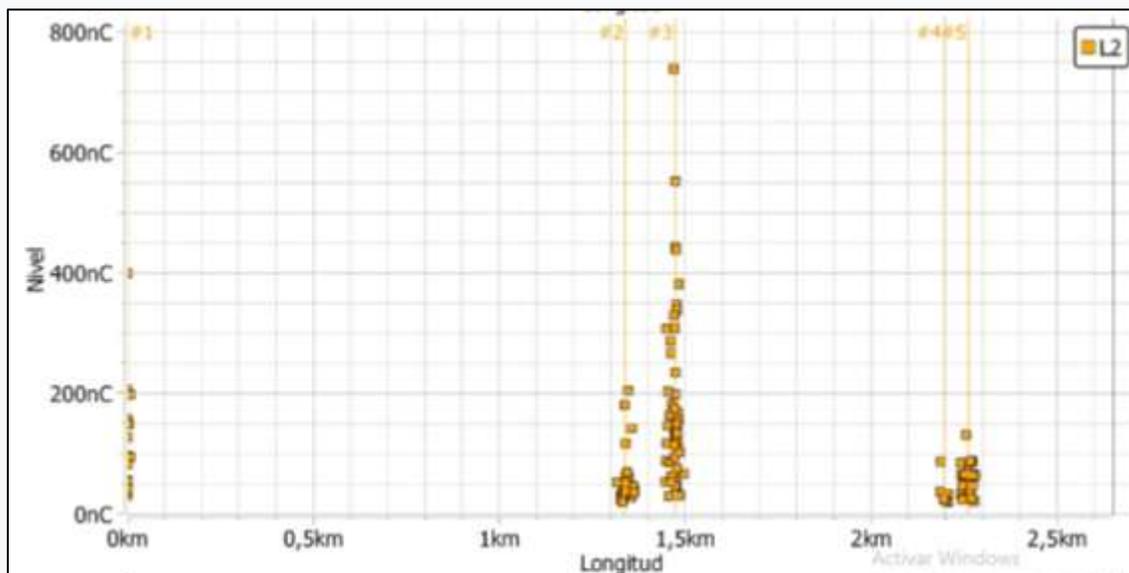
En la gráfica 2.9., se puede ver de forma general la presencia de descargas parciales en las 3 diferentes fases, en 10 posiciones importantes de la siguiente

manera. Fase A a 1839 m. Fase B a 0 m, 1340 m, 1473 m, 2196 m y 2262 m. Fase C a 0 m, 1478 m, 1730 m y 2240m.



Gráfica 2.10: Descargas Parciales en fase A, caso 2 cable XLPE., para  $0.0 U_o < U < 1.0 U_o$ .

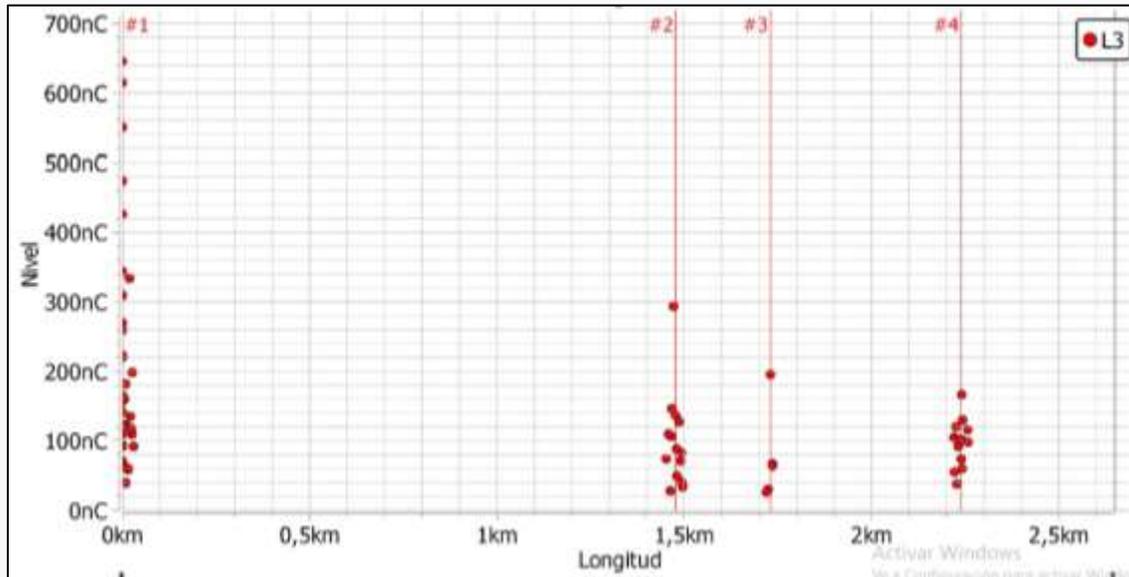
En la gráfica 2.10., se puede ver presencia de Descargas Parciales en la fase A, a una distancia de 1839 m, con un nivel de entre 40 y 720 nC.



Gráfica 2.11: Descargas Parciales en fase B, caso 2 cable XLPE., para  $0.0 U_o < U < 1.0 U_o$ .

En la gráfica 2.11, se puede ver presencia de Descargas Parciales en la fase B,

a unas distancias de 0 m a un nivel de entre 30 y 400 nC, 1340 m con un nivel de entre 30 y 200 nC, 1473 m con un nivel de entre 40 y 750 nC, 2196 m con un nivel de entre 30 y 90 nC, y 2262 m con un nivel de entre 30 y 140 nC.



Gráfica 2.12: Descargas Parciales en fase C, caso 2 cable XLPE., para  $0.0 U_o < U < 1.0 U_o$ .

En la gráfica 2.12., se puede ver presencia de DP en la fase C, a unas distancias de 0 m con un nivel de entre 40 y 640 nC, 1478 m con un nivel de entre 20 y 300 nC, 1730 m con un nivel de entre 20 y 200 nC, 2240 m con un nivel de entre 40 y 160 nC.

PRUEBA DAC NEGATIVO CASO 2 CABLE XLPE		
	DISTANCIA (m)	DP (nC)
FASE A	1839	720
FASE B	0	400
	1340	200
	1473	750
	2196	90
	2262	140
FASE C	0	640
	1478	300
	1730	200
	2240	160

Tabla 2.9: Comparativo de resultados prueba DP, método DAC negativo, Caso 2 cable XLPE, para  $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$ .

**2.2.2. Prueba de detección de Descargas Parciales por el método DAC negativo, caso 2, cable PILC.**

Se realiza prueba con un voltaje de 13.2 kV, con rangos de  $U_0=0.7$ ,  $U_0=1.0$ ,  $U_0=1.4$ ,  $U_0=2.0$ , para este caso se analizará la prueba  $U_0=1.0$ .

**Cable**

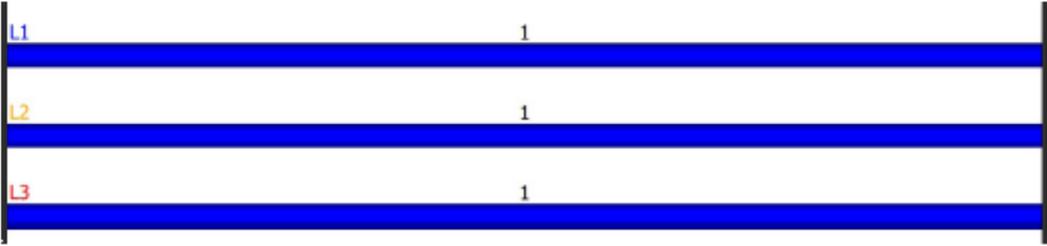
<b>Número</b> TRANSICION S.E SANTA CRUZ CRU-53040 PRUEBA	<b>Ubicación</b> AV. TELECOMUNICACIONES
<b>Tipo</b> Tres conductores de un hilo	<b>Fecha de instalación</b>
<b><math>U_0</math> [kV rms]</b> 13,2	<b>Longitud</b> 2650 m
<b>Última modificación</b> 6/4/20 19:55	
<b>Comentario</b> SEGUNDA PRUEBA DE TRANSICION CRU-53040 A RACK	

<b>TRANSICION CRU-53040</b>	<b>RACK</b>
	
<p><b>Fabricante</b></p> <p><b>Aislamiento</b> Aire</p> <p><b>Terminación</b> Encogido frio</p>	<p><b>Fabricante</b></p> <p><b>Aislamiento</b> Aire</p> <p><b>Terminación</b> Deslizante</p>

**Plan del cable**

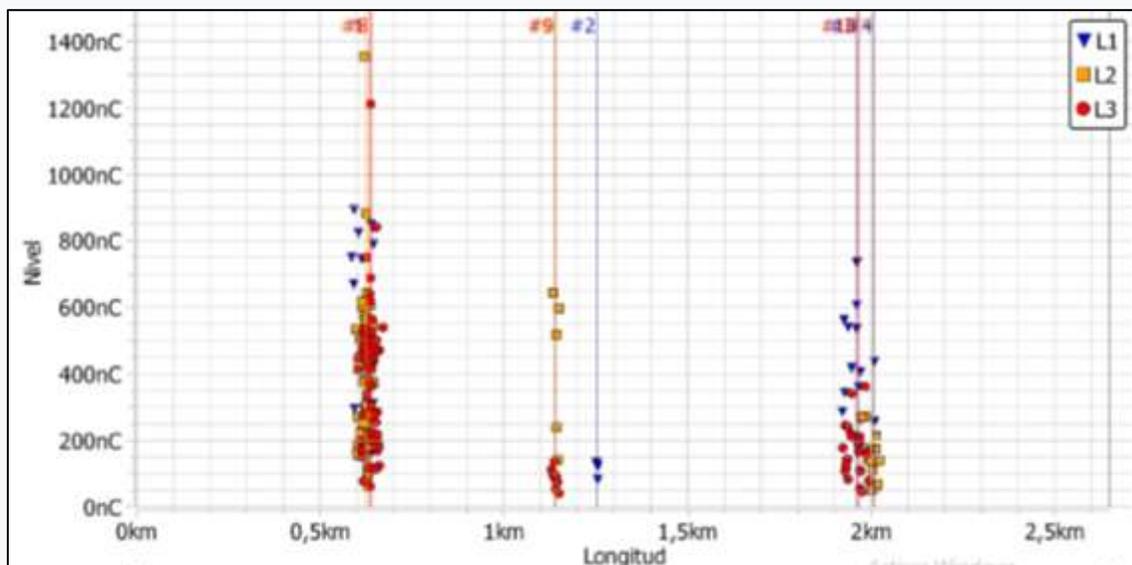
**Segmentos**

Iniciar	Tipo	Aislamiento	Descripción
0 m	Terminación	Encogido frio	
1	Sección de cable 2650 m	Cable de aceite papel	PILC Cable
2650 m	Terminación	Deslizante	

Imagen 2.10: Datos para prueba caso 2 cable PILC.

	L1	L2	L3
Ruido de fondo [pC]	-	8421	6289
PDIV [kV rms]	13,2	13,2	13,2
PDEV [kV rms]	-	-	-
DP max [pC] (PDIV)	954145	577425	639260
DP max [pC] (Uo)	1527404	672917	749100
PD Level [pC] (Uo)	1050928	633336	687320
DP max [pC] (1.7*Uo)	2568772	1410384	1571828
PD Level [pC] (1.7*Uo)	1760419	1309881	1185492
DP max [pC] (2*Uo)	-	-	-
PD Level [pC] (2*Uo)	-	-	-
Frecuencia [Hz]	181	183	183
Modo de funcionamiento	DAC-	DAC-	DAC-

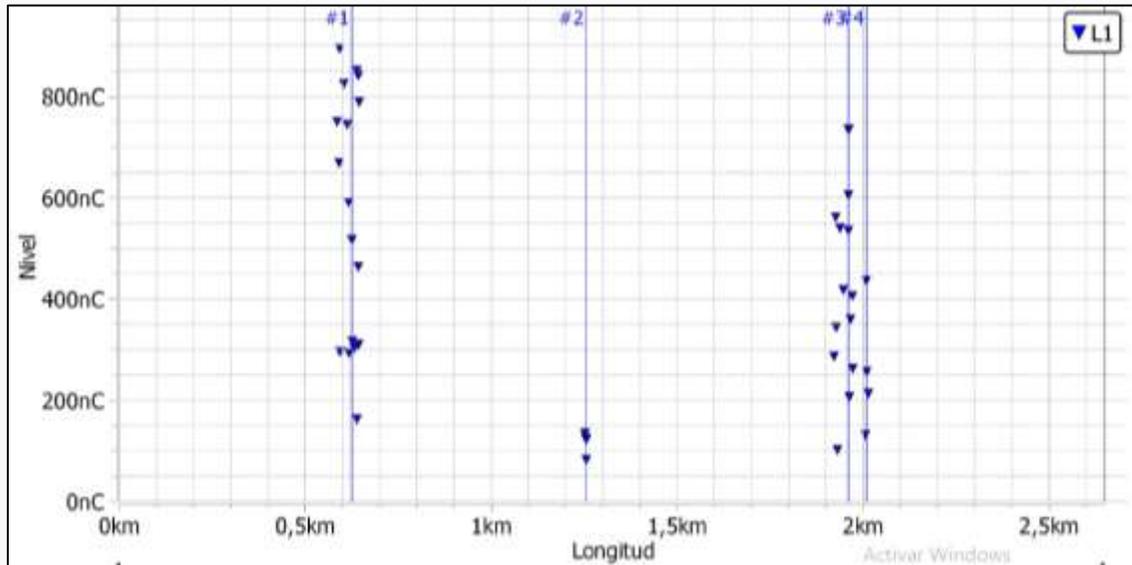
Tabla 2.10: Resultados generales de prueba DAC negativo, caso 2 cable PILC, para  $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$ .



Gráfica 2.13: Resultado general de presencia de Descargas parciales en 10 diferentes puntos, caso 2 cable PILC., para  $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$ .

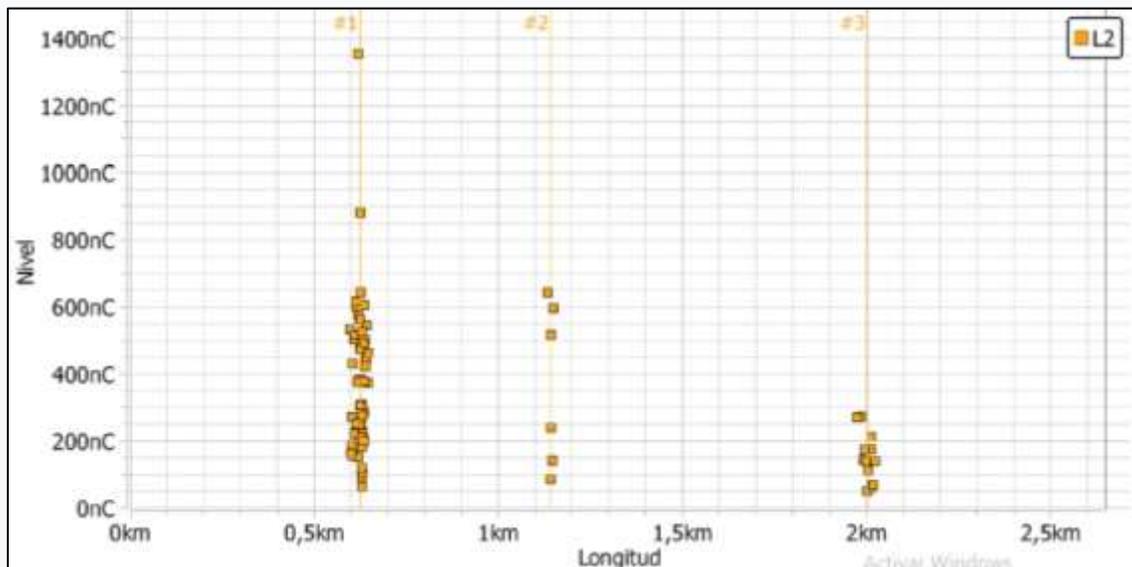
En la gráfica 2.13., se puede ver de forma general la presencia de descargas parciales en las 3 diferentes fases, en 10 posiciones importantes de la siguiente

manera. Fase A a 625 m, 1255 m, 1961 m y 2009 m. Fase B a 625 m, 1143 m, 2003 m. Fase C a 637 m, 1139 m, 1966 m.



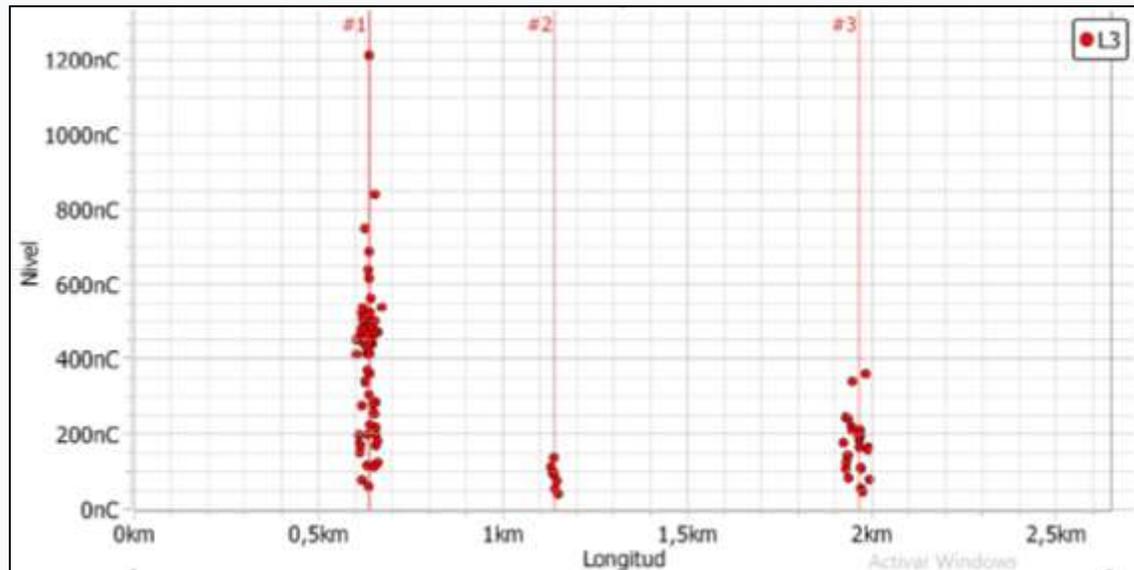
Grafica 2.14: Descargas Parciales en fase A, caso 2 cable PILC., para  $0.0 U_o < U < 1.0 U_o$ .

En la gráfica 2.14., se puede ver presencia de Descargas Parciales en la fase A, a unas distancias de 625 m, con un nivel de entre 150 y 890 nC, 1255 m, con un nivel de entre 80 y 130 nC, 1961 m, con un nivel de entre 100 y 630 nC y 2009 m, con un nivel de entre 130 y 430 nC.



Grafica 2.15: Descargas Parciales en fase B, caso 2 cable PILC., para  $0.0 U_o < U < 1.0 U_o$ .

En la gráfica 2.15., se puede ver presencia de Descargas Parciales en la fase B, a unas distancias de 625 m con un nivel de entre 50 a 1350 nC, 1143 m con un nivel de entre 70 y 630 nC y 2003 m con un nivel de entre 40 y 250 nC.



Gráfica 2.16: Descargas Parciales en fase C, caso 2 cable PILC., para  $0.0 U_o < U < 1.0 U_o$ .

En la gráfica 2.16, se puede ver presencia de DP en la fase C, a unas distancias de 637 m con un nivel de 50 a 1200 nC, 1139 m con un nivel de 40 a 130 nC y 1966 m con un nivel de 40 a 350 nC.

PRUEBA DAC NEGATIVO CASO 2 CABLE PILC		
	DISTANCIA (m)	DP (nC)
FASE A	625	890
	1255	130
	1961	630
	2009	430
FASE B	625	1350
	1143	630
	2003	250
FASE C	637	1200
	1139	130
	1966	350

Tabla 2.11: Comparativo de resultados prueba DP, método DAC negativo, Caso 2 cable PILC, para  $0.0 U_0 < U < 1.0 U_0$ .

### 2.2.3. Comparación de resultados caso 2.

	PRUEBA DAC NEGATIVO CASO 2 CABLE XLPE		PRUEBA DAC NEGATIVO CASO 2 CABLE PILC	
	DISTANCIA (m)	DP (Nc)	DISTANCIA (m)	DP (nC)
FASE A	1839	720	625	890
			1255	130
			1961	630
			2009	430
FASE B	0	400	625	1350
	1340	200	1143	630
	1473	750	2003	250
	2196	90		
	2262	140		
FASE C	0	640	637	1200
	1478	300	1139	130
	1730	200	1966	350
	2240	160		

Tabla 2.12: Resultados de pruebas, caso 2.



Imagen 2.11: Pruebas en campo caso 2.



Imagen 2.12: Pruebas en campo, caso 2.

### 2.3. Caso 3.

Trayectoria nueva del circuito MAG-530C0 de la S.E. Magdalena a Transición de Salida. Cable XLPE con una longitud de 450 m. La cual para fines de análisis de pruebas le llamaremos caso 3.

#### 2.3.1. Prueba de detección de Descargas Parciales por el método de DAC. Negativo, caso 3.

Se realiza prueba con un voltaje de 13.2 kV, con rangos de  $U_0=1.0$ ,  $U_0=2.3$ , para este caso se analizará la prueba  $U_0=2.3$ .

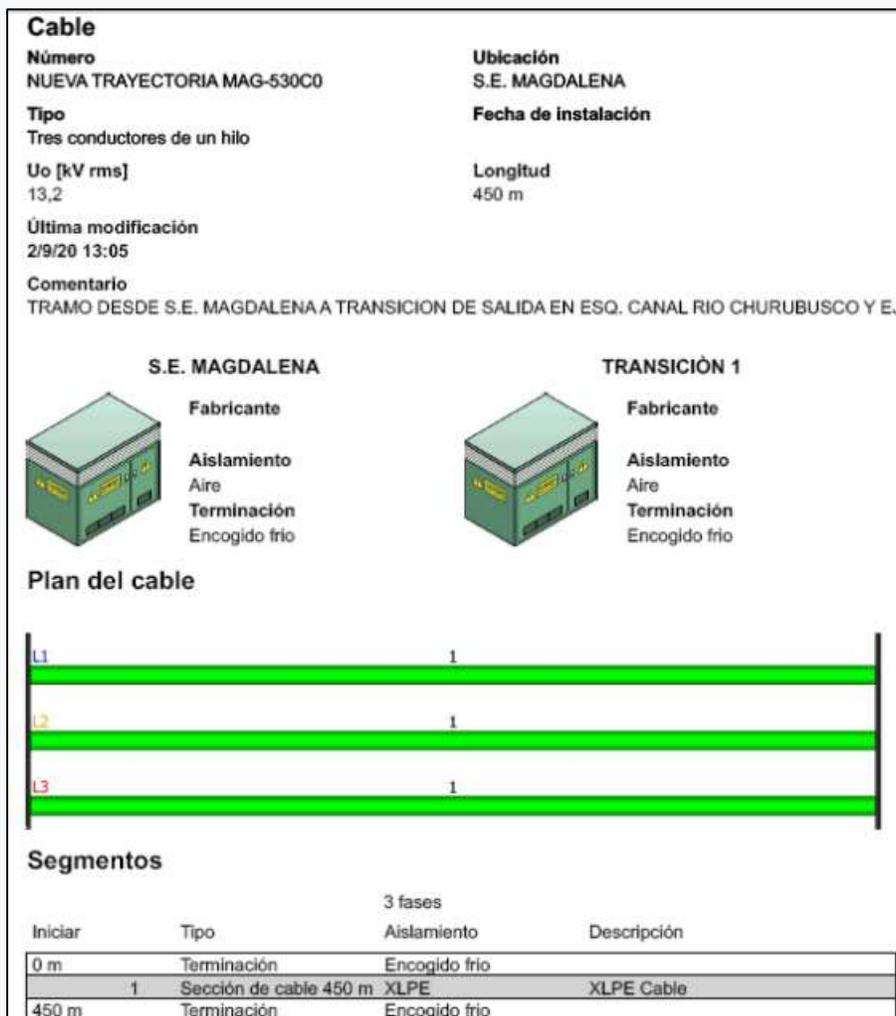
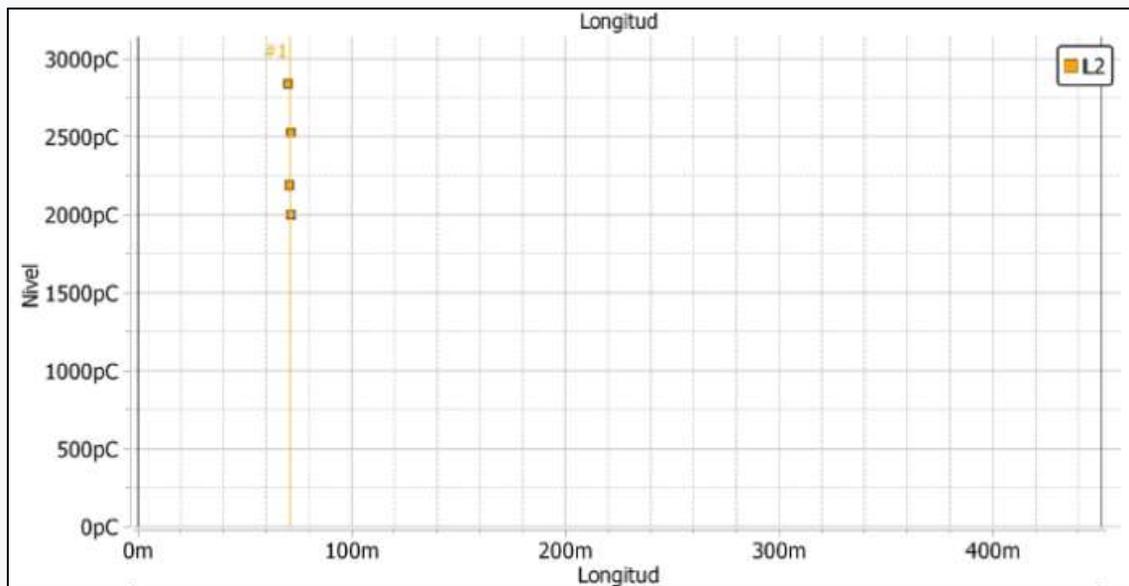


Imagen 2.13: Tabla de datos para prueba caso 3.

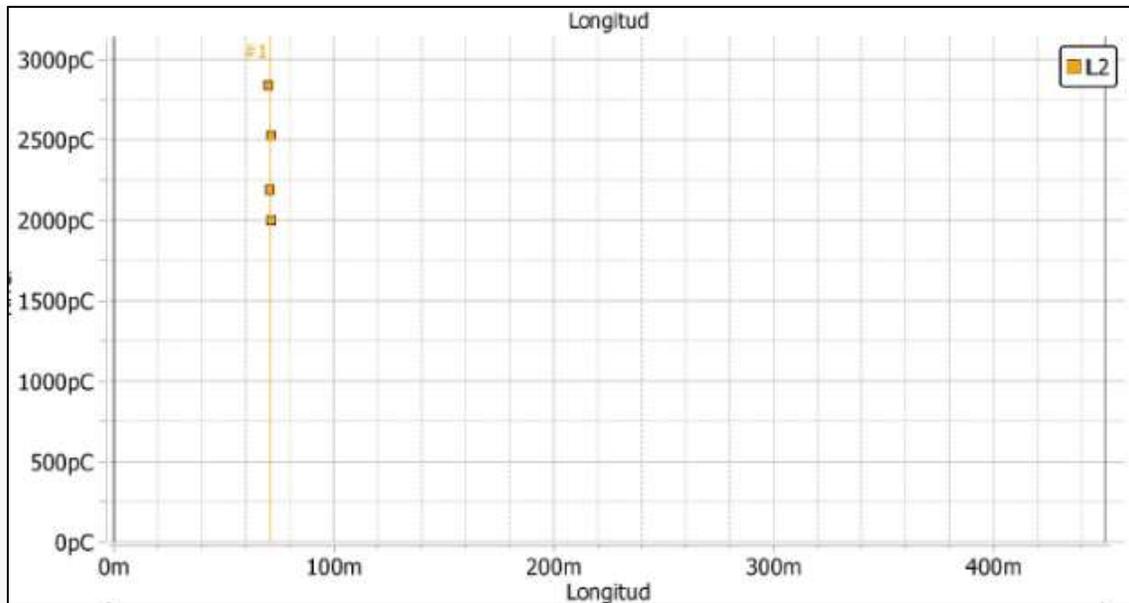
	L1	L2	L3
<b>Ruido de fondo [pC]</b>	804	908	928
<b>PDIV [kV rms]</b>	-	26,4	-
<b>PDEV [kV rms]</b>	-	-	-
<b>DP max [pC] (PDIV)</b>	-	15866	-
<b>DP max [pC] (Uo)</b>	1637	3211	4452
<b>PD Level [pC] (Uo)</b>	1433	2654	3895
<b>DP max [pC] (1.7*Uo)</b>	13515	28676	18720
<b>PD Level [pC] (1.7*Uo)</b>	13154	24215	12437
<b>DP max [pC] (2*Uo)</b>	19211	36486	34912
<b>PD Level [pC] (2*Uo)</b>	18278	21516	16239
<b>Frecuencia [Hz]</b>	376	367	365
<b>Modo de funcionamiento</b>	DAC-	DAC-	DAC-

Tabla 2.13: Resultados generales de prueba Coseno Rectangular, caso 3, para  $0.0 U_o < U < 2.3 U_o$ .



Gráfica 2.17: Resultado general de presencia de Descargas caso 3, para  $0.0 U_o < U < 2.3 U_o$ .

En la gráfica 2.17., podemos ver de forma general la presencia de descargas parciales solo en la fase B, a una distancia de 71 m.



Grafica 2.18: Descargas parciales en fase B, caso 3, para  $0.0 U_o < U < 2.3 U_o$ .

En la Grafica 2.18., se puede ver presencia de descargas parciales en la fase B, a una distancia de 71 m. con un nivel de entre 2000 y 2800 pC.

PRUEBA DAC NEGATIVO CASO 3		
FASE	DISTANCIA (m)	DP (pC)
A	0	0
B	71	2800
C	0	0

Tabla 2.14: Comparativo de resultados, prueba Descargas Parciales, método DAC Negativo, caso 3, para  $0.0 U_o < U < 2.3 U_o$ .

### 2.3.2. Prueba de detección de Descargas Parciales por el método Coseno Rectangular, caso 3.

Se realiza prueba con un voltaje de 13.2 kV, con rangos de  $U_0=1.0$ ,  $U_0=2.3$ , para este caso se analizará la prueba  $U_0=2.3$ .

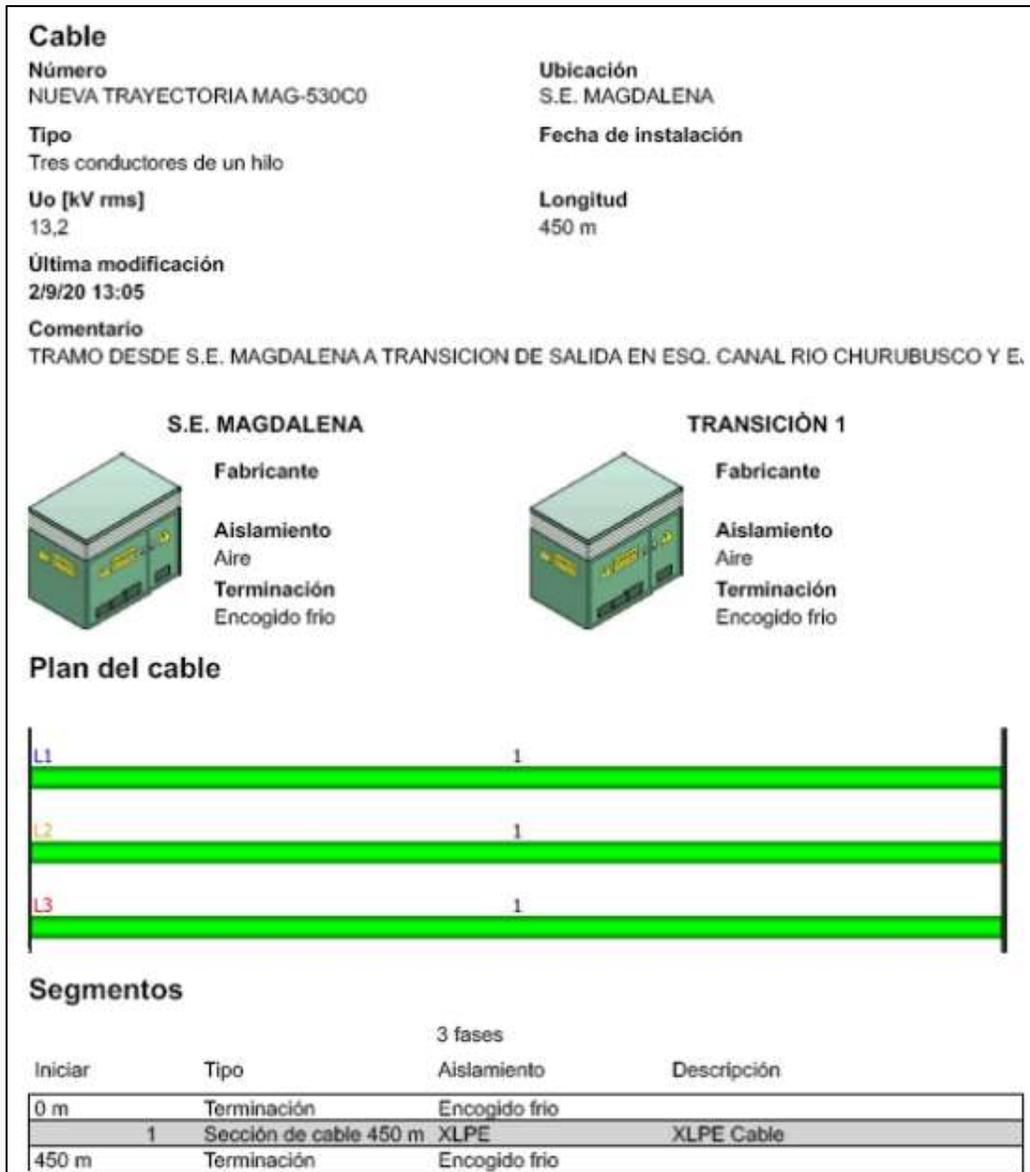
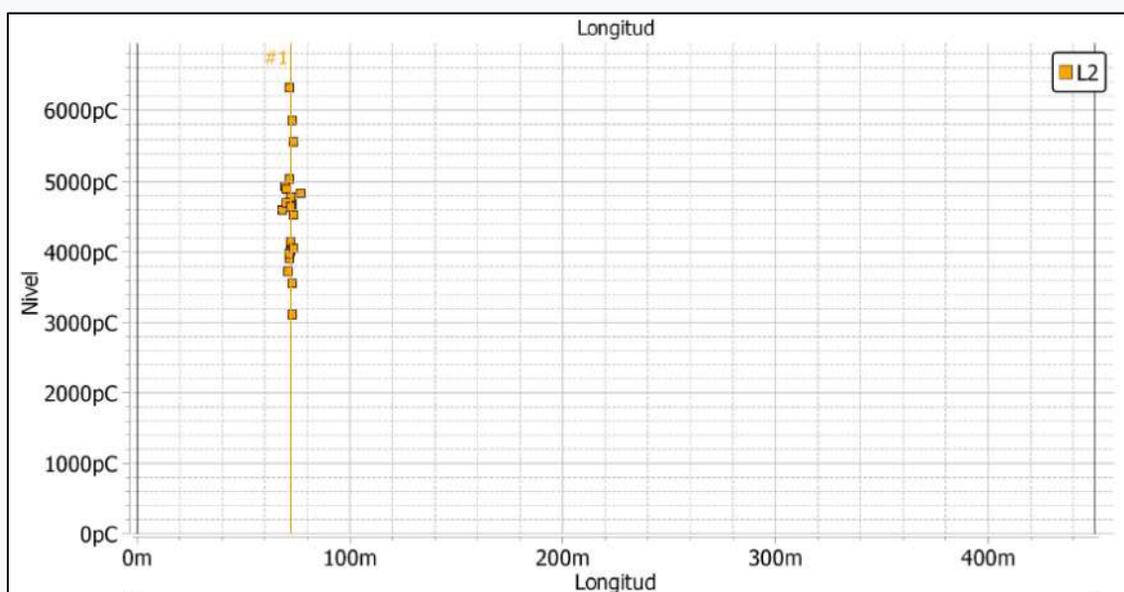


Imagen 2.14: Tabla de datos para prueba caso 3.

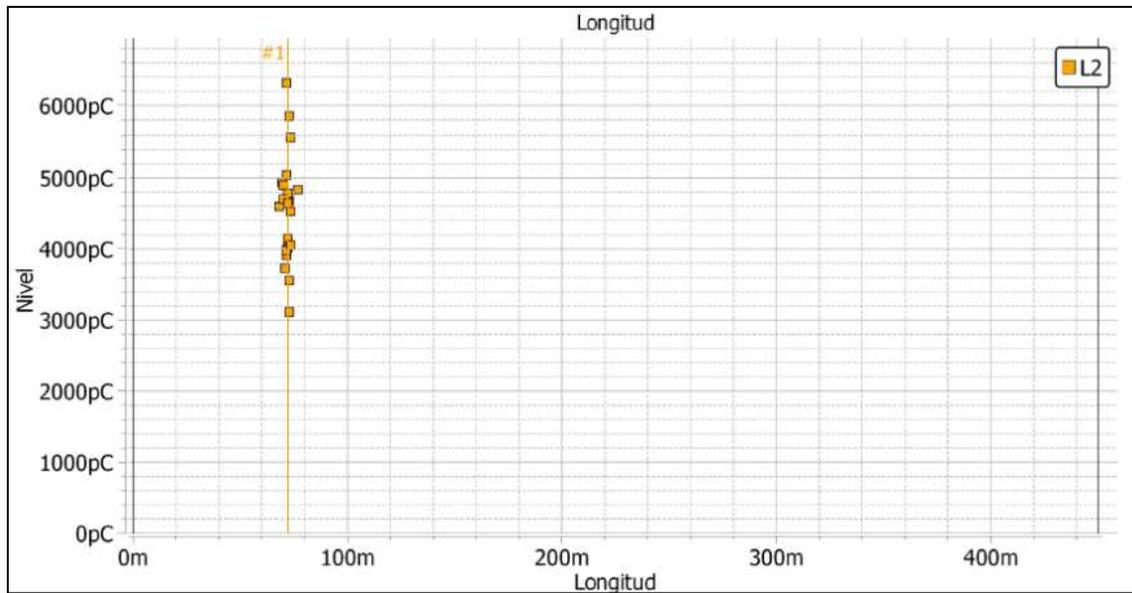
	L1	L2	L3
Ruido de fondo [pC]	-	1035	-
PDIV [kV rms]	-	-	-
PDEV [kV rms]	-	-	-
DP max [pC] (PDIV)	-	-	-
DP max [pC] (Uo)	-	-	-
PD Level [pC] (Uo)	-	-	-
DP max [pC] (1.7*Uo)	-	30490	-
PD Level [pC] (1.7*Uo)	-	20352	-
DP max [pC] (2*Uo)	-	32461	-
PD Level [pC] (2*Uo)	-	22668	-
Frecuencia [Hz]	-	372	-
Modo de funcionamiento	-	Slope	-

Tabla 2.15: Resultados generales de prueba Coseno Rectangular, caso 3, para  $0.0 U_o < U < 2.3 U_o$ .



Gráfica 2.19: Resultado general de presencia de Descargas, caso 3, para  $0.0 U_o < U < 2.3 U_o$ .

En la gráfica 2.19., podemos ver de forma general la presencia de descargas parciales solo en la fase B, a una distancia de 72 m.



Grafica 2.20: Descargas parciales en fase B, caso 3, para  $0.0 U_0 < U < 2.3 U_0$ .

En la Grafica 2.20., se puede ver presencia de descargas parciales en la fase B, a una distancia de 72 m. con un nivel de entre 3100 y 6300 pC.

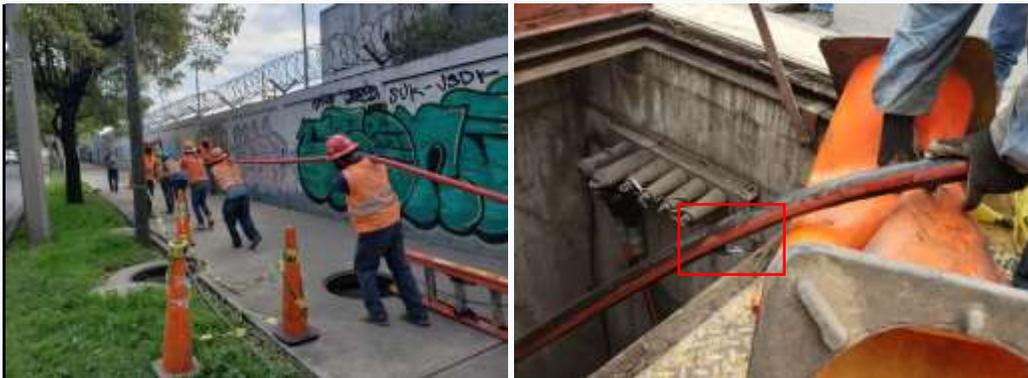
PRUEBA COSENO RECTANGULAR CASO 3		
FASE	DISTANCIA (m)	DP (pC)
A	0	0
B	72	6300
C	0	0

Tabla 2.16: Comparativo de resultados, prueba Descargas Parciales, método Coseno Rectangular, caso 3, para  $0.0 U_0 < U < 2.3 U_0$ .

### 2.3.3. Comparación de resultados caso 3.

CASO 3				
FASE	PRUEBA DAC NEGATIVO		PRUEBA COSENO RECTANGULAR	
	DISTANCIA (m)	DP (pC)	DISTANCIA (m)	DP (pC)
A	0	0	0	0
B	71	2800	72	6300
C	0	0	0	0

Tabla 2.17: Resultados de pruebas, caso 3.



Imágenes 2.15: Daño por mano de obra deficiente durante la instalación del cable, caso 3.



Imagen 2.16: Cable dañado por mano de obra deficiente durante la instalación, caso 3.

## Capítulo 3. Análisis de pruebas.

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas en cada uno de los tres diferentes casos, para tener un mejor panorama en la toma de decisiones ante la presencia de descargas parciales.

### 3.1. Análisis de resultados.

En el presente trabajo se realizaron pruebas a cables subterráneos en tres casos, en la tabla 3.1 se muestra un resumen de los diferentes casos y las pruebas realizadas.

Caso	Problemática	Pruebas realizada.
1	Falla en cable XLPE entre dos subestaciones con una longitud de 530 metros.	Detección de Descargas Parciales por el método Coseno Rectangular. Detección de Descargas Parciales por el método DAC Negativo. VLF Seno. Tangente Delta.
2	Falla en cable combinado XLPE y PILC con una longitud de 2650 metros.	Detección de Descargas Parciales por método DAC Negativo, a cable XLPE. Detección de Descargas Parciales por el método DAC Negativo, a cable PILC.
3	Falla en trayectoria nueva entre Subestación Eléctrica y Transición de salida de circuito, con una longitud de 450 metros, cable XLPE.	Detección de Descargas Parciales por el método DAC Negativo. Detección de Descargas Parciales por el método Coseno Rectangular.

Tabla 3.1: Resumen de los diferentes caso y pruebas realizadas.

#### 3.1.1. Análisis de resultados, Caso 1.

En el caso uno se analizó una falla con cable XLPE entre dos subestaciones con una longitud de 520 m, en este caso al cable se le realizaron las siguientes pruebas:

- Detección de descargas parciales por el método Coseno Rectangular.
- Detección de descargas parciales por el método DAC Negativo.
- VLF Seno.

- Tangente Delta.

En la tabla 2.7 se muestra un comparativo de los resultados obtenidos de las cuatro diferentes pruebas realizadas. Inicialmente se realizaron dos pruebas a las tres fases, DAC Negativo y Coseno Rectangular, en el caso del método DAC Negativo en la Fase C se presentaron descargas parciales con una medición de 680 nC a una distancia de 28 metros, con el método Coseno Rectangular se presentaron descargas parciales en la Fase B con una medición de 1100 nC a una distancia de 32 metros. Con estos resultados se tomó la decisión de sustituir tanto la Fase B como la Fase C en el tramo entre las dos subestaciones. Previo a la puesta en servicio se realizaron pruebas de Tangente Delta y VLF Seno. En el caso de Tangente Delta en la fase A se obtuvo un valor de 1.5839 siendo este un valor que muestra un nivel alto de envejecimiento en el cable, en el caso de la prueba VLF Seno a un valor de 33 KV en la fase A fue negativa.

En este caso de acuerdo a los resultados obtenidos se tomó la decisión de que para que el tramo dañado se pusiera nuevamente en servicio es necesario reemplazar no solo las fases B y C, sino también la fase A, ya que, de acuerdo a los resultados de las segundas pruebas, la fase A resulto con daño por envejecimiento, también es necesario antes de la puesta en servicio realizar las pruebas correspondientes para asegurar un mejor funcionamiento de las tres fases del circuito en el tramo fallado.

### **3.1.2. Análisis de resultados, Caso 2.**

En el caso 2 se analizó una falla en un cable combinado XLPE y PILC con una longitud de 2,650 metros, en este caso se realizaron las siguientes pruebas:

- Detección de Descargas Parciales por método DAC Negativo, a cable XLPE.
- Detección de Descargas Parciales por el método DAC Negativo, a cable PILC.

En la tabla 2.12, se muestra un comparativo de los resultados obtenidos de las dos diferentes pruebas realizadas al cable combinado XLPE y PILC. En la prueba de Detección de Descargas Parciales por el método DAC Negativo a cable XLPE se obtuvieron presencia de descargas parciales en la fase A con un valor de 720 nC a una distancia de 1839 metros, en la fase B se obtuvieron presencia de descargas parciales con un valor de 750 nC a una distancia de 1473 metros, en la fase C se obtuvieron presencia de descargas parciales con un valor de 640 nC en el inicio del tramo probado.

En la prueba de Detección de Descargas Parciales por el método DAC Negativo a cable PILC se obtuvieron presencia de descargas parciales en la fase A con un valor de 890 nC a una distancia de 625 metros, en la fase B se obtuvieron presencia de descargas parciales con un valor de 1350 nC a una distancia de 625 metros, en la fase C se obtuvieron presencia de descargas parciales con un valor de 1200 nC a una distancia de 637 metros.

En este caso de acuerdo a los resultados obtenidos, la prueba de Detección de Descargas Parciales por el método DAC negativo a cable PILC fue la que arrojo mejores resultados y con estos se encontró daño en empalmes realizados a una distancia de entre 625 y 637 metros en las tres fases.

### **3.1.3. Análisis de resultados, Caso 3.**

En el caso 3 se analizó una falla en una trayectoria nueva entre la Subestación Eléctrica y la transición de salida del circuito, a una longitud de 450 metros y un cable XLPE, se realizaron las siguientes pruebas.

- Detección de Descargas Parciales por el método DAC Negativo.
- Detección de Descargas Parciales por el método Coseno Rectangular.

En la tabla 2.17, se muestran un comparativo de los resultados obtenidos de las dos diferentes pruebas realizadas al cable XLPE. En la prueba de Detección de Descargas Parciales por el método DAC Negativo, se obtuvieron presencia de descargas parciales en la fase B con un valor de 2800 pC a una distancia de 71 metros, en la prueba de Detección de Descargas Parciales por el método Coseno Rectangular, se obtuvieron presencia de descargas parciales en la fase B con un valor de 6300 nC a una distancia de 72 metros.

En este caso se trató de un tramo con cable XLPE nuevo, el daño se provocó durante la instalación del cable por mano de obra deficiente.

## **Capítulo 4. Conclusiones.**

### **4.1 Conclusiones.**

En el presente trabajo se realizaron pruebas a cables de potencia en la Red General de Distribución Subterránea de Media Tensión (23 KV), en tres diferentes casos: Falla en cable usado XLPE entre dos subestaciones, Falla en cable usado combinado XLPE-PILC y Falla en cable nuevo en trayectoria entre Subestación Eléctrica y Transición de salida de circuito; mediante pruebas de Detección de descargas parciales por los métodos: Coseno Rectangular, DAC Negativo, VLF Seno y Tangente Delta.

De acuerdo a las pruebas obtenidas es importante el buen y adecuado uso de los cables de potencia en las Redes Subterráneas ya que de esto depende el buen funcionamiento de estos. Tanto en la instalación como en las diferentes reparaciones que se realicen se deben hacer de acuerdo a lo establecido por las normas existentes y las recomendaciones de los fabricantes, como se puede ver en los resultados del caso 3, en el cual se trató de un cable de potencia XLPE nuevo, pero debido a la mala instalación se provocó una falla al dañar el cable al momento de ser instalado.

Con la correcta interpretación de las pruebas es posible la toma de decisiones adecuadas, como podemos ver en los resultados del caso 1, en la tabla 2.7 en la prueba después de la falla mediante el método DAC Negativo se obtiene descargas parciales de 680 nC en la fase C, mientras que mediante el método de Coseno Rectangular se tiene presencia de descargas parciales de 1100 nC en la fase C. En las pruebas antes de la puesta en servicio una vez realizadas las reparaciones, se realizan pruebas de Tangente Delta y VLF Seno, dando como resultado un cable envejecido y valor negativo en la fase C, lo que lleva a concluir que es de suma importancia la realización de pruebas antes de la puesta en servicio para garantizar el buen funcionamiento del Red General de Distribución Subterránea.

En el caso 2 se trató de una combinación de cable XLPE y Cable PILC, de acuerdo a los resultados obtenidos, los cuales lo podemos ver en la tabla 2.12, se muestran daños a diferentes distancias y en las tres fases lo que nos lleva a concluir que se trata de un cable muy deteriorado y por lo tanto es necesaria su sustitución y también se puede ver que la combinación de conductores no es adecuada.

La interpretación de pruebas es importante para poder decidir si un cable después de haber sido usado durante un tiempo considerable es adecuado para su nueva puesta en servicio, así como para determinar que las reparaciones que en su caso se realizaron fueron correctas para una nueva puesta en servicio. Las pruebas antes de la puesta en servicio nos arrojan resultados de los cuales es posible apoyarse para descartar defectos de fabricación y una correcta instalación del cable.

Los tres casos que en este trabajo se analizaron son los más comunes que se presentan dentro de las Red General de Distribución Subterránea, lo que lleva a proponer:

Realizar pruebas de detección de Descargas Parciales mediante los métodos Coseno Rectangular y DAC Negativo y para confirmar los resultados, realizar pruebas mediante los métodos de Coseno Rectangular y DAC Negativo, antes de la puesta en servicio y después de haber realizado reparaciones, tanto para cables nuevo como para cables reparados.

Las reparaciones se deban realizar de acuerdo a lo establecido en los diferentes estándares existentes y a las recomendaciones del fabricante para evitar daños en el cable que pueden llevar a futuras fallas.

## Referencias bibliográficas.

- (1) José Ismael C. G., Héctor Jair I. C., Jonathan Alexis J. T. (2014). Medición de descargas parciales en arreglos Aislador-Cable semiaislado (Tesis para Título de Ingeniero Electricista). Instituto Politécnico Nacional. CDMX.
- (2) Aisladores en líneas Eléctricas: materiales, tipos y características principales. Structuralia. Abril 2018.
- (3) Ana Luisa Cervantes Rojas. Descargas Parciales. CiteEnergía, Papel Técnico 12-2016.
- (4) Ricardo Albarracín Sánchez (2014). Medida de descargas parciales en radiofrecuencia (Tesis Doctoral). Universidad Carlos III de Madrid. Leganés, Madrid.
- (5) Especificación Técnica. Conductores Desnudos de Aluminio para Líneas Eléctricas Aéreas. 2011.
- (6) Manual para la instalación de cables de energía de media tensión. Capítulo 2. El Cable de Energía de Media Tensión (5-35 KV).
- (7) Diana Torres Peñaloza (2010). Sistema de localización de descargas parciales en línea. (Tesis para obtener grado de Maestría en Tecnología Avanzada). Instituto Tecnológico Nacional, UPITA.
- (8) Descargas Parciales. Cite energía. Papel Técnico. 2016.
- (9) IEEE Std 400.2™-2013. Guía IEEE para pruebas de campo de sistemas de cable de alimentación blindados que utilizan muy baja frecuencia (VLF) (menos de 1 Hz)
- (10) Curso “Mantenimiento Preventivo y Predictivo en Sistemas de Cables en Media Tensión” (Megger). 2018.
- (11) Por qué tiene sentido realizar pruebas de descargas parciales. OMICRON 2018.
- (12) IEEE Std 400.3™-2006. Guía IEEE para pruebas de descarga parcial de sistemas de cable de alimentación blindados en un entorno de campo.
- (13) Características de Cables de Energía de Media y Alta Tensión. Grupo Condumex. 2005.

- (14) Fernando Figueroa Godoy (2012). Estudio de atributos estadísticos para evaluación de aislamientos eléctricos. (Tesis para grado académico de Maestro en Ciencias y Tecnología). CIATEC Leon Guanajuato, México.