



Universidad Nacional de Mar del Plata
FACULTAD DE INGENIERIA
Departamento Ingeniería Eléctrica

Proyecto Trabajo Final de Grado
Mes Octubre - Año 2024

Análisis y detección de fallas en cables subterráneos de baja tensión

Autor

Alumno: **Marcos Gustavo Bignami** - Legajo: 14.404

Carrera: Ingeniería Eléctrica

DNI: 39.873.499

Mail: bignamimarcos@gmail.com

Directores:

Director: Ing. di Mauro Guillermo

Co-Director: Ing. Joaquín Sanchez

Evaluadores:

- Ing. Cereijo Omar
- Dr. Ing. Jorge Strack

Fecha Defensa:
Mar del Plata, 25/10/2024



RINFI es desarrollado por la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).



FACULTAD DE
INGENIERIA
Departamento Ingeniería

Proyecto Trabajo Final

Mes Agosto. Año 2024

Análisis y detección de fallas en cables subterráneos de baja tensión

Autor

Alumno: Marcos Gustavo Bignami

Carrera: Ingeniería Eléctrica

Tutor: Ing. Guillermo di Mauro

Co-Tutor: Joaquín Sánchez

Evaluadores:

- ***Ing. Cereijo Omar***
- ***Dr. Ing. Jorge Strack***



AGRADECIMIENTOS

Dedicado a mi gran amigo Rodrigo Izquierdo, con quien compartí muchos momentos únicos durante el desarrollo de nuestros estudios. Con el que avance, aprendí, disfruté y a lo largo de la carrera. Que en paz descanse.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas y entidades que han contribuido de alguna manera a la realización de esta tesis. Sin su apoyo y colaboración, este trabajo no hubiera sido posible.

A mis directores de tesis, Joaquín Sánchez y Guillermo Di Mauro, por su orientación, paciencia y valiosas sugerencias durante todo el proceso de investigación. En este apartado quiero agradecer también a Alan Martuccio, quien fue parte de este proceso como un tutor más, mis más sinceras gratitudes. La experiencia y conocimiento de los tres han sido fundamentales para el desarrollo y éxito de este trabajo.

A mi pareja que fue un pilar importante durante mis estudios y para la finalización de este trabajo. Sin su apoyo incondicional no hubiera logrado llegar a esta instancia. Este logro es tan mío como suyo. También quiero agradecer a mis padres, quienes se esforzaron toda su vida para poder brindarme un futuro a pesar de las adversidades. Me enseñaron que se debe luchar por todo lo que uno sueña.

Agradezco a mis abuelos, que me cuidaron y me guiaron a través de mis años de estudio. Gracias a ellos conocí el mundo de la electricidad. A mi hermana que es mi motor, la cual llegó para cambiarme la vida. A toda mi familia, que me apoyó y nunca reclamó las veces que tuve que priorizar mis estudios.

Quiero agradecerme y felicitarme por llegar a este momento. Por haber logrado este sueño que tanto anhelaba.

Finalmente, a todas aquellas personas que, de una u otra manera, han aportado a mi formación profesional y personal. A todos ustedes, muchas gracias.



CONTENIDO

RESUMEN	7
INTRODUCCION	9
OBJETIVO	11
CAPITULO 1: CABLES SUBTERRANEOS	13
1.1 INTRODUCCION	13
1.2 HISTORIA DE LOS INICIOS DE LOS CABLES SUBTERRÁNEOS.....	13
1.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS CABLES SUBTERRÁNEOS DE BAJA TENSIÓN	14
1.3.1 CONDUCTOR.....	16
1.3.2 AISLAMIENTO	18
1.3.3 EMPALMES	19
1.3.4 FALLAS EN CABLES SUBTERRÁNEOS	22
1.4 RED ELÉCTRICA SUBTERRÁNEA DE MAR DEL PLATA	25
CAPITULO 2: MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN CABLES SUBTERRÁNEOS	29
2.1 INTRODUCCIÓN	29
2.2 HISTORIA DE LOS MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN DE CABLES SUBTERRÁNEOS	29
2.3 ETAPAS DE LA LOCALIZACIÓN DE FALLAS	30
2.3.1 PRELOCALIZACIÓN	31
2.3.2 PUNTUALIZACIÓN	31
2.3.3 SEGUIMIENTO DE TRAZAS.....	32
2.3.4 IDENTIFICACIÓN DE CABLES	32
2.3.5 PRUEBA DE AISLACIÓN.....	32
2.4 SECCIONALIZACIÓN	36
2.5 RESISTENCIA PROPORCIONAL	37
2.6 REFLECTÓMETRO DE DOMINIO DE TIEMPO (TDR).....	38
2.6.1 REFLECTÓMETRO CONVENCIONAL MODELO 1401e - INDUCOR	41
2.6.2 REFLECTÓMETRO CONVENCIONAL MODELO RC-200 - DAVNAR	42
2.7 QUEMADO DE FALLA	43
2.8 REFLECTOMETRÍA DE ALTA TENSIÓN	44
2.8.1 GENERADOR DE IMPULSOS.....	46



2.8.2	REFLECTOMETRIA DURANTE EL CEBADO DEL ARCO	48
2.9	DETECCIÓN ACÚSTICA	50
2.10	ONDA DE CHOQUE Y DETECCIÓN ACÚSTICA – CENTRIX SEBAKMT	51
2.11	INYECCIÓN DE AUDIO FRECUENCIA – CENTRIX SEBAKMT	51
2.12	DESACOPLAMIENTO DE VOLTAJE (DECAY) – TELEFLEX SX-1 MEGGER	51
2.13	DESACOPLAMIENTO DE CORRIENTE (ICE) – TELEFLEX SX-1 MEGGER	52
2.14	MÉTODO DE CAÍDA DE TENSIÓN	53
2.15	MÉTODO DE TENSIÓN DE PASO	54
CAPITULO 3: SIMULACIÓN DE FALLAS EN PROGRAMA PSCAD		57
3.1	INTRODUCCIÓN	57
3.2	ENTORNO DE TRABAJO PSCAD.....	57
3.3	FALLA MONOFÁSICA CIRCUITO ABIERTO.....	71
3.4	FALLA MONOFÁSICA A TIERRA.....	75
3.5	PEQUEÑAS CORRIENTES DE FUGA A TIERRA.....	77
3.6	FALLA TRIFÁSICA.....	79
3.6.1	PULSO APLICADO EN FASE A	79
3.6.2	PULSO APLICADO EN FASE B	83
3.6.3	PULSO APLICADO EN FASE C	87
3.7	FALLA BIFÁSICA.....	90
3.7.1	PULSO APLICADO EN FASE A	90
3.7.2	PULSO APLICADO EN FASE B	94
3.7.3	PULSO APLICADO EN FASE C	98
3.8	FALLA BIFÁSICA A TIERRA.....	101
3.8.1	PULSO APLICADO EN FASE A	102
3.8.2	PULSO APLICADO EN FASE B	105
3.8.3	PULSO APLICADO EN FASE C	108
CAPITULO 4: MEDICIONES DE CAMPO		113
4.1	INTRODUCCIÓN	113
4.2	CASO N°1.....	113
4.3	CASO N°2.....	117
CAPITULO 5: ENSAYOS EN LABORATORIO		121
5.1	INTRODUCCIÓN	121
5.2	DESARROLLO	121



5.2.1	ENSAYO DE TRAMO DE CABLE SANO	126
5.2.2	ENSAYO DE TRAMO DE CABLE CON FALLA A LOS 50 METROS	127
5.2.3	ENSAYO DE TRAMO DE CABLE CON DERIVADOR COMO EMPALME	128
5.2.4	ENSAYO DE TRAMO DE CABLE CON DERIVACIÓN A LOS 50 METROS.....	129
CAPITULO 6: EVALUACIÓN DE IMPACTO ECONÓMICO		133
6.1	INTRODUCCIÓN	133
6.2	COSTOS DE LOS SISTEMAS DE CABLES SUBTERRÁNEOS	133
6.3	ANÁLISIS DE COSTOS	133
CAPITULO 7: EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL		137
7.1	INTRODUCCIÓN	137
7.2	DESARROLLO	137
CAPITULO 8: CONCLUSIONES		139
BIBLIOGRAFIA.....		141



UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA



FACULTAD DE
INGENIERIA
Departamento Ingeniería



RESUMEN

La presente tesis se centra en la detección y localización de fallas en cables subterráneos de baja tensión, utilizando métodos avanzados de medición y análisis. Se le dará mayor énfasis al estudio de métodos más comunes utilizados en la Ciudad de Mar del Plata. Se abordan los componentes principales y las fallas más comunes de los cables subterráneos de baja tensión.

El estudio se lleva a cabo a través de una combinación de experimentos de laboratorio y simulaciones en el programa PSCAD. Se utilizan diversas herramientas de medición y análisis para evaluar la precisión y fiabilidad de cada técnica de detección de fallas. Las mediciones de laboratorio validan las simulaciones en PSCAD y contrastan sus resultados con los obtenidos en las mediciones de campo.



UNIVERSIDAD NACIONAL DE MAR DEL PLATA



FACULTAD DE
INGENIERIA
Departamento Ingeniería



INTRODUCCION

La creciente demanda de energía eléctrica incrementa la importancia y las prioridades de servicio ininterrumpido al consumidor. El Marco Regulatorio Eléctrico Nacional (Ley 24.065/92) y Provincial (Ley 11.769/96) imponen condiciones de “Calidad del Servicio Técnico Prestado” a las concesionarias de las redes de distribución. Este concepto de calidad se evalúa en base a la Frecuencia Media de Interrupción por kVA instalado (índice FMIK) y a la Duración Media de Interrupción por kVA instalado (índice DMIK). La misma normativa establece los valores máximos admitidos para cada indicador y las sanciones correspondientes cuando estos sean excedidos.

En el marco de esta normativa, la eficaz y rápida localización y reparación de las fallas en la red eléctrica está relacionada con el índice DMIK, que para las empresas distribuidoras se torna indispensable a los efectos de lograr la continuidad del servicio y evitar multas previstas por la normativa. Así, las fallas en las redes de distribución deben ser rápidamente detectadas, localizadas y reparadas.

En la actualidad, una cantidad significativa de sistemas de distribución de energía eléctrica a nivel mundial dependen de cables subterráneos para su operación. Este enfoque se justifica por la notable resistencia de los cables subterráneos a las fallas inducidas por diversos efectos ambientales, como la interferencia de árboles, descargas atmosféricas, contaminación, entre otros. A su vez, se reduce considerablemente el riesgo de contacto con líneas energizadas, disminuyendo la probabilidad de accidentes tanto para personal de mantenimiento como para la población. Además al estar los cables enterrados, son menos vulnerables a daños intencionados, vandalismo, se encuentran más protegidos frente a desastres naturales, garantizando una mejor continuidad del servicio. Por último cabe destacar que la disminución en el uso de líneas aéreas y postes contribuye a mejorar la estética y la visibilidad urbana.

Sin embargo, la operación de cables subterráneos no está exenta de desafíos. Un problema de particular importancia en la operación de cables subterráneos es la localización oportuna y exacta de fallas, buscando reducir el tiempo fuera de operación del cable, el tiempo de trabajo de reparación y el área de excavación para realizar los trabajos correspondientes. Esta tarea cobra una importancia aún mayor en entornos urbanos, donde la presencia de redes subterráneas plantea riesgos adicionales para la seguridad.

En respuesta a esta necesidad, los avances en las técnicas de simulación digital durante las últimas décadas han abierto nuevas posibilidades. La aplicación de programas computacionales de simulación de eventos transitorios se ha convertido en un complemento invaluable a las pruebas de laboratorio. Estos programas permiten la evaluación y comparación de algoritmos de localización de fallas, e incluso la exploración de nuevos enfoques.



FACULTAD DE
INGENIERIA
Departamento Ingeniería



OBJETIVO

Bajo estos antecedentes, para el presente Trabajo Final de Carrera se propone analizar diferentes métodos de detección, ubicación y de tipos de fallas en cables subterráneos en redes de distribución de baja tensión. Considerándose baja tensión a los circuitos cuya tensión no excede los 600 [V] entre partes activas y tierra o en caso de que se tenga un punto neutro conectado a tierra, la tensión entre cualquiera de los conductores activos, resulta inferior a los 1000 [V]. [1]

Los objetivos del presente trabajo final de grado son realizar un análisis sobre simulaciones de fallas en cables subterráneos de baja tensión en el software PSCad a partir del método de reflectometría tradicional (TDR), realizar mediciones en campo sobre casos de fallas reales de aplicación, realizar mediciones de fallas en el laboratorio de mediciones eléctricas de la Facultad de Ingeniería de Mar del Plata de un cable coaxil RG6.

Se realizará un análisis comparativo de las simulaciones, las mediciones de campo y las mediciones en el laboratorio. Este análisis permitirá evaluar y contrastar los resultados obtenidos en cada uno de estos contextos, proporcionando una visión integral de las variaciones y similitudes entre los datos simulados, los datos recogidos directamente en el entorno natural y aquellos obtenidos en condiciones controladas de laboratorio. Con ello, se pretende identificar las ventajas y limitaciones de cada método, así como su grado de precisión y fiabilidad en la obtención de datos relevantes para el estudio.

Como el hecho de reparación la falla de un cable del tipo subterráneo implica el uso de recursos económicos e irrupción en terreno, se complementará el presente estudio con una evaluación de la mejora en el impacto económico y ambiental que produce la correcta ubicación de fallas de este tipo.



FACULTAD DE
INGENIERIA
Departamento Ingeniería



CAPITULO 1: CABLES SUBTERRANEOS

1.1 INTRODUCCION

Los cables subterráneos de baja tensión representan una parte fundamental en la infraestructura eléctrica moderna, desempeñando un papel crucial en la distribución confiable y segura de energía eléctrica a los consumidores finales.

A medida que las ciudades crecen y se desarrollan, la demanda de energía eléctrica aumenta significativamente, lo que hace que los cables subterráneos de baja tensión sean una opción cada vez más atractiva debido a su capacidad para proporcionar una distribución eléctrica eficiente y minimizar los impactos visuales en el entorno urbano.

Comprender las características técnicas y operativas de estos cables es fundamental para diseñar sistemas de distribución eléctrica eficiente y confiable. En este sentido, este capítulo busca proporcionar una visión general detallada de los aspectos claves relacionados con los cables subterráneos de baja tensión, destacando su importancia en la infraestructura eléctrica moderna y su papel en la garantía de un suministro eléctrico seguro y continuo para las comunidades.

En este contexto, se abordan los principios esenciales relacionados con los cables eléctricos de potencia, examinando las características que abarcan desde la configuración del conductor, que incluye aspectos como su formación, sección geométrica, resistencia y sección nominal, hasta los materiales utilizados en sus aislamientos y cubiertas. En este caso se enfatizará en las aislaciones compuestas por policloruro de vinilo (PVC), caucho etileno-propileno (EPR), paper insulated, lead covered (PILC) y el polietileno reticulado (XLPE) ya que son las aislaciones más comunes de encontrar en los cables subterráneos de la ciudad de Mar del Plata y alrededores.

1.2 HISTORIA DE LOS INICIOS DE LOS CABLES SUBTERRÁNEOS

El desarrollo inicial de la distribución subterránea de energía eléctrica está estrechamente ligado a los primeros avances en el telégrafo, que requerían cables subterráneos para su funcionamiento. Aunque los intentos tempranos de construcción subterránea en los Estados Unidos resultaron infructuosos, Thomas A. Edison fue pionero en la implementación de sistemas subterráneos de distribución en áreas urbanas densamente pobladas, utilizando cables rígidos aislados con yute y compuesto bituminoso. Sin embargo, los altos costos asociados con los sistemas subterráneos limitaron su adopción a desarrollos habitacionales exclusivos hasta que la economía próspera de Estados Unidos y las preocupaciones ambientales promovieron su necesidad en nuevas urbanizaciones residenciales. En 1884 se promulgó una ley que obligaba a retirar todos los cables aéreos



de las calles de la ciudad de Nueva York fomentando el desafío de crear un tipo de cable capaz de superar altos voltajes. Sin embargo, pasó algún tiempo antes de que los cables aéreos de alto voltaje desaparecieran. [2]

Antes de la Segunda Guerra Mundial, el hule natural era comúnmente utilizado en cables como aislamiento y cubierta exterior, mientras que los plásticos estaban en sus etapas iniciales de desarrollo. En la década de 1930, se introdujo el policloruro de vinilo (PVC) como el primer termoplástico utilizado para el aislamiento de baja tensión, con diferentes compuestos adaptados a diversas condiciones operativas. Además, se empleaba algodón y papel como aislantes en conductores eléctricos.

El desarrollo de hules sintéticos, como el policloropreno (neopreno), durante la Segunda Guerra Mundial fue impulsado por la escasez de hule natural, lo que llevó a la creación de nuevos materiales para aislamiento de baja tensión. Los avances en la industria de aislamientos eléctricos resultaron en una variedad de opciones mejoradas, incluyendo elastómeros y termoplásticos, como el caucho butílico, el polietileno y el etileno propileno. El papel impregnado en aceite se destacó como un aislamiento confiable, con propiedades dieléctricas superiores. Su proceso de fabricación implicaba aplicar capas de papel helicoidalmente alrededor del conductor, secarlo al vacío y luego impregnarlo con aceite dieléctrico de alta calidad. La cubierta de plomo protegía el aislamiento contra agentes externos, aunque su perforación podía comprometer la integridad del cable.

Sin embargo, los cables con aislamiento de papel impregnado tenían desafíos, como la posibilidad de formación de cavidades de aire debido a cambios de temperatura y la migración de aceite, lo que podía resultar en una disminución de la rigidez dieléctrica. Las uniones y terminales en estos cables requerían una atención especializada debido a su complejidad y vulnerabilidad. [3]

1.3 CARACTERÍSTICAS DE LOS CABLES SUBTERRÁNEOS DE BAJA TENSIÓN

Un cable subterráneo es un conductor eléctrico diseñado en sus inicios, para ser instalado bajo tierra, generalmente en zanjas o conductos especialmente diseñados para este propósito. Sin embargo, en la actualidad su aplicación no solo se limita a instalaciones subterráneas, por ejemplo también se instalan sobre bandejas o en canalizaciones. Estos cables están compuestos por uno o varios conductores aislados eléctricamente y recubiertos por un material protector, que puede ser polietileno, PVC u otros materiales dieléctricos resistentes a la humedad y al ambiente subterráneo.

Los cables subterráneos están diseñados para soportar una variedad de condiciones, incluyendo cambios de temperatura, presiones mecánicas y posibles interferencias eléctricas externas. Además, su instalación requiere un cuidadoso diseño y planificación para garantizar la seguridad y eficiencia del sistema eléctrico en su conjunto. Al estar instalados bajo el suelo, deben cumplir con las siguientes exigencias:

- Resistencia mecánica contra daños accidentales por golpes de palas, picos, etc.
- Protección contra daños mecánicos durante su colocación.
- Rigidez dieléctrica adecuada.
- Resistencia a la acción de los agentes químicos del subsuelo
- Protección de su armadura metálica, si es la que tienen y de su pantalla metálica o blindaje contra las corrientes vagabundas, que dan origen a corrosión. [1]

Como se observa en la Figura 1.3.1, los cables aislados en PVC, en su mayoría, están compuestos por:

- Conductores que puede ser compuesto por cuerdas flexibles formadas por varios alambres finos trenzados para brindar una mayor flexibilidad (Clase 4 según IRAM NM-280). O puede estar formados por un menor número de cuerdas de alambres, lo que les confiere menos flexibilidad pero mayor resistencia mecánica y estabilidad estructural (Clase 2 según IRAM NM-280).
- Aislante para cada conductor (si es que son cables multipolares) que protegen al conductor de estar en contacto con otros conductores, terrenos, objetos, etc. Se diseña de forma tal que pueda prevenir la propagación del fuego en caso de incendio sobre el conductor y lo que lo rodea. El PVC tiene propiedades que frente un incendio, le permiten auto extinguirse y no contribuir al fuego.
- Aislante entre cada conductor aislado que permite mantener una distancia entre cada conductor aislado, evitar el ingreso de polvo, partículas y agua por dentro del cable asegurando la integridad del cable. Este aislante debe ser no higroscópico para evitar la absorción del agua.
- Aislante exterior que recubre a todo lo anteriormente mencionado, desempeña un papel crucial en la protección del cable y la garantía de su desempeño a largo plazo. Se encarga de proteger al cable frente a peligros mecánicos como impactos, degradación ambiental, etc.

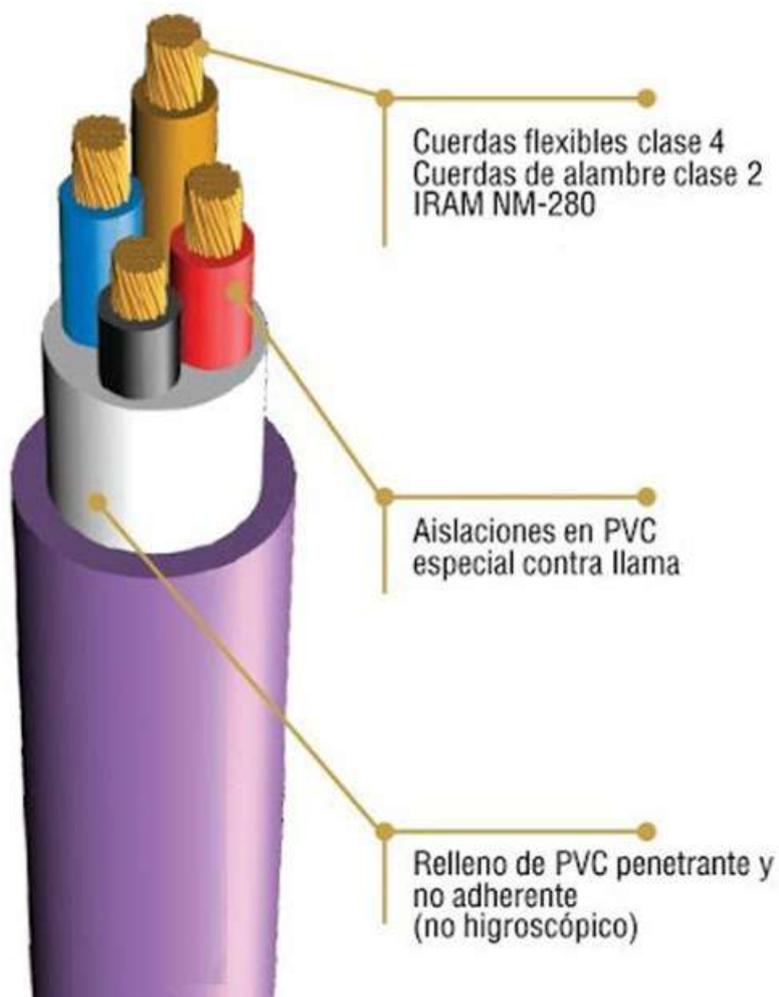


Figura 1.3.1- Ejemplo de esquema de cable subterráneo aislado en PVC y sus componentes

1.3.1 CONDUCTOR

Se denomina conductor a todo material que permite el paso continuo de una corriente eléctrica, cuando está sometido a una diferencia de potencial eléctrico. Para una diferencia de potencial, cuanto mayor sea la densidad de corriente de un material, mejores propiedades de conducción eléctrica tendrá. Esto puede verse reflejado a la hora de analizar las densidades eléctricas del cobre y del aluminio. Como se mencionará más adelante, el cobre es capaz de transportar mayor densidad de corriente para las mismas condiciones eléctricas que el aluminio, por ende el cobre posee mejores propiedades eléctricas que el aluminio. Para una diferencia de potencial, cuanto mayor sea la densidad de corriente, mejores propiedades de conducción eléctrica tendrá el material.

Los valores de conductividad están relacionados con el movimiento de electrones sobre el material. La conductividad esta inversamente relacionada con la temperatura. Un

incremento de la temperatura produce una disminución de la conductividad. Esto se debe a una menor movilidad del electrón a medida que aumenta la agitación térmica de la estructura cristalina del metal con el aumento de la temperatura. Las vibraciones térmicas generan irregularidades que disminuyen la movilidad de los electrones.

Los elementos conductores usualmente más utilizados en cables subterráneos son:

- Cobre: El cobre es un metal rojo, dúctil y maleable. Posee una densidad de $8,93 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$ y una temperatura de fusión de $1083 [^{\circ}C]$. La conductividad eléctrica de las aleaciones de cobre es sobresaliente y puede mejorarse aún más mediante procesos de refinamiento, lo que las convierte en materiales excelentes para la fabricación de cables eléctricos. [4]

El agua pura no ataca al cobre a ninguna temperatura. Los agentes atmosféricos forman en su superficie una película verdosa constituida por sulfato de cobre, lo que reduce el proceso de la oxidación a 1μ por año, aproximadamente. Al calentar el cobre, se forma, a los $120 [^{\circ}C]$, una película rojiza de óxido cúprico (Cu_2O) que más tarde se convierte en negruzca al formarse óxido cuproso (CuO); a partir de los $500 [^{\circ}C]$, el cobre se oxida rápidamente en toda su masa. [5]

- Aluminio: El aluminio es el metal más abundante en la corteza terrestre. Es un metal blanco brillante, tiene pequeña resistencia mecánica, densidad baja ($2,7 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$) y gran ductilidad y maleabilidad, que permite forjarlo, trefilarlo en hilos muy finos y laminado en láminas de espesores hasta $0,4$ [micras]; a la temperatura de $500 [^{\circ}C]$ se vuelve frágil y se puede pulverizar fácilmente. La propiedad química más notable del aluminio es su alta afinidad por el oxígeno del aire, lo que resulta en una capa superficial de óxido de aluminio. Esta capa, muy delgada pero resistente, protege al aluminio del deterioro causado por la intemperie, actuando como una barrera impermeable. Gracias a esta película protectora, el aluminio puede resistir la exposición al vapor de agua, al ácido nítrico concentrado y a los gases y humos industriales. Sin embargo, es susceptible al ataque por ácido sulfúrico, ácido clorhídrico, ácido nítrico diluido y soluciones salinas. [5]

Al comparar estos elementos conductores, se debe reconocer que un 1 [kg] de cobre es eléctricamente equivalente a $0,5$ [kg] de aluminio. El cobre presenta una conductividad un 61 [%] mayor que la conductividad del aluminio, lo que significa que con el mismo diámetro de cable, el cobre transporte una mayor cantidad de corriente eléctrica. Por otra parte, el precio del cobre en el mercado es, aproximadamente, el doble que el del aluminio. Si a esto se añade que, por causa del menor peso específico del aluminio, los elementos auxiliares de las instalaciones, tales como apoyos, aisladores, herrajes, etc., resultan más económicos para el aluminio, se comprenderá fácilmente que el aluminio haya sustituido en gran parte al cobre para muchas aplicaciones eléctricas, sobre todo para la fabricación de conductores destinados a las líneas aéreas. [5]



1.3.2 AISLAMIENTO

Se denomina aislante eléctrico o material dieléctrico a los materiales que poseen bajos valores de conductividad eléctrica. La corriente que pasa a través de ellos puede ser despreciada (corriente de fuga), a partir de la intensidad de dicha corriente se determina la clase de aislante. Si bien estos materiales no conducen corriente eléctrica, puede existir en su interior un campo eléctrico no nulo. A la hora de utilizar un material como aislante en cables subterráneos, lo que se busca es que pueda aislar eléctricamente los conductores entre sí y entre la tierra o cualquier superficie u objeto que pueda estar en contacto con ellos. [5]

Se puede realizar una clasificación de cables a partir de las características principales de su tipo de aislación. Los principales tipos de aislación de los cables son:

- **Papel Impregnado:** El aislamiento consiste en tiras de papel colocadas en forma helicoidal sobre el conductor metálico. Se colocan sucesivamente capas hasta obtener el espesor de aislamiento adecuado para la tensión a la que va a operar el cable. Luego se lo somete a un secado de alto vacío donde se le extrae la humedad para después pasar al proceso de impregnación en aceite de altas propiedades dieléctricas. Finalmente se aplica sobre el cable una cubierta protectora de plomo por medio de un proceso de extrusión. La construcción puede ser más elaborada a partir de cintas semiconductoras, pantallas metálicas, material termoplástico, armadura de acero, etc. La cubierta protectora de plomo sirve para proteger el aislamiento contra los agentes mecánicos, químicos, intemperie y humedad. Si la cubierta protectora se perfora, se produce el ingreso de humedad en el aislamiento dando como resultado una falla.

El cable durante los períodos de baja carga, disminuye su temperatura. El compuesto se contrae mientras que la cubierta de plomo no lo hace, producto de su inelasticidad. Entonces se producen cavidades llenas de aire y bajo la acción del campo eléctrico, se produce el efecto corona.

La construcción de cables de papel impregnado puede ser más elaborada a partir de cintas semiconductoras, pantallas metálicas, material termoplástico, armadura de acero, etc. [3]

En la actualidad, el papel impregnado se utiliza para aplicaciones de media y alta tensión, es una tecnología que quedó en desuso en baja tensión. Sin embargo, en la ciudad de Mar del Plata, la mayor parte de los cables de baja tensión subterráneos que se encuentran en la zona céntrica, poseen este tipo de aislación.

- **Policloruro Vinílico, (PVC):** Los compuestos aislantes basados en policloruro de vinilo (PVC) se empezaron a desarrollar en la década de 1930, inicialmente con aplicaciones para conductores de baja tensión a 60 [°C], pero posteriormente mejoraron para operar a 90 [°C] y 105 [°C] y para tensiones de 600 [V]. Debido al cloro en sus moléculas, los compuestos de PVC son inherentemente no propagadores de llama, y formulaciones especiales pueden hacerlos resistentes al fuego, de baja emisión de humos y con bajo contenido de gas ácido. Aunque los compuestos de PVC tienen buenas propiedades mecánicas, sus

cualidades eléctricas no son excepcionales, aunque ofrecen resistencia a altas temperaturas sin fundirse o escurrirse. Por otro lado, los aislamientos de polietileno reticulado para altas tensiones son mecánicamente sólidos, resistentes al envejecimiento y tienen excelentes propiedades eléctricas, además de ser altamente resistentes al ozono, la humedad y productos químicos.

El polietileno vulcanizado, con temperaturas de operación de hasta 130 [°C] en condiciones normales y 250 [°C] en cortocircuito, se utiliza en cables de alta tensión hasta 525 [kV]. Sin embargo, su aplicación se limita a tensiones menores de 600 [V] en ciertos entornos debido a su alta constante dieléctrica y factor de potencia.

El PVC se usa en la fabricación de alambres y cables de diversos tipos debido a sus propiedades mecánicas y resistencia a la llama, y también se emplea como cubierta exterior para cables con otros aislamientos, como polietileno y etileno propileno. Para mejorar la resistencia a la humedad y productos químicos, se puede reforzar el aislamiento de PVC con una capa delgada de nylon. [3]

- Polietileno reticulado, (XLPE): Se produce mediante la combinación de polietileno termoplástico y un peróxido orgánico bajo ciertas condiciones de presión y temperatura. El resultado es un aislamiento de color natural o café claro, dependiendo del antioxidante utilizado. Este material puede ser empleado puro o mezclado con negro de humo o cargas minerales para mejorar sus propiedades físicas, aunque esto puede afectar sus cualidades eléctricas. Por lo tanto, esta combinación se utiliza solo para aislamientos de cables de hasta 5,000 [V], sin cubierta exterior. Después de la extrusión, el cable aislado con polietileno vulcanizable se somete a un proceso de vulcanización con gas o vapor a alta presión y temperatura, convirtiéndolo de termoplástico a termoestable, lo que significa que el aislamiento ya no se funde o escurre a altas temperaturas. Los aislamientos de polietileno reticulado para altas tensiones tienen excelentes propiedades mecánicas, resistencia a la compresión y deformación térmica, y una excepcional resistencia al envejecimiento por altas y bajas temperaturas. Sus cualidades eléctricas, como rigidez dieléctrica, factor de potencia, constantes dieléctricas y de aislamiento, así como su estabilidad eléctrica en agua, son sobresalientes. Además, es altamente resistente al ozono, la humedad y productos químicos.

El polietileno vulcanizado es un aislamiento adecuado para temperaturas de hasta 90 [°C] en operación normal, 130 [°C] en emergencias y 250 [°C] en condiciones de cortocircuito, y se ha utilizado en cables de energía para tensiones de 69, 115, 230 y 525 [kV]. [3]

1.3.3 EMPALMES

Como se verá en capítulos posteriores, los empalmes son un elemento importante de los cables subterráneos a la hora de analizar fallas. El empalme se basa en la integración física y eléctrica de los distintos componentes de los cables, como es el caso de los conductores eléctricos, materiales aislantes, blindajes y cubiertas exteriores. Durante la reconstrucción, se pueden reemplazar componentes individuales para restaurar la funcionalidad y la

integridad del cable después de daños o desmontajes. La cubierta o carcasa exterior proporciona protección mecánica contra daños físicos y agentes ambientales adversos, garantizando así la seguridad y el rendimiento del cable en aplicaciones de transmisión y distribución de energía eléctrica.

La vida útil de un empalme depende de factores tales como la calidad de los materiales empleados, el diseño, el tipo de empalme, las condiciones en las que se realiza, la mano obra que realiza la instalación, etc. [6]

A partir del tipo, materiales utilizados y la forma en que aplican, se pueden clasificar los empalmes. Los empalmes que más interesan para este tipo de estudios son:

- Pre moldeado: Los componentes son moldeados por el fabricante, se empalman sobre los cables a empalmar en el lugar de trabajo. Los componentes del empalme están realizados con materiales elastoméricos. Teniendo en cuenta las características reales de los cables a empalmar se escoge el empalme moldeado de fábrica. En la Figura 1.3.3.1, se observa el esquema de un empalme general pre moldeado.

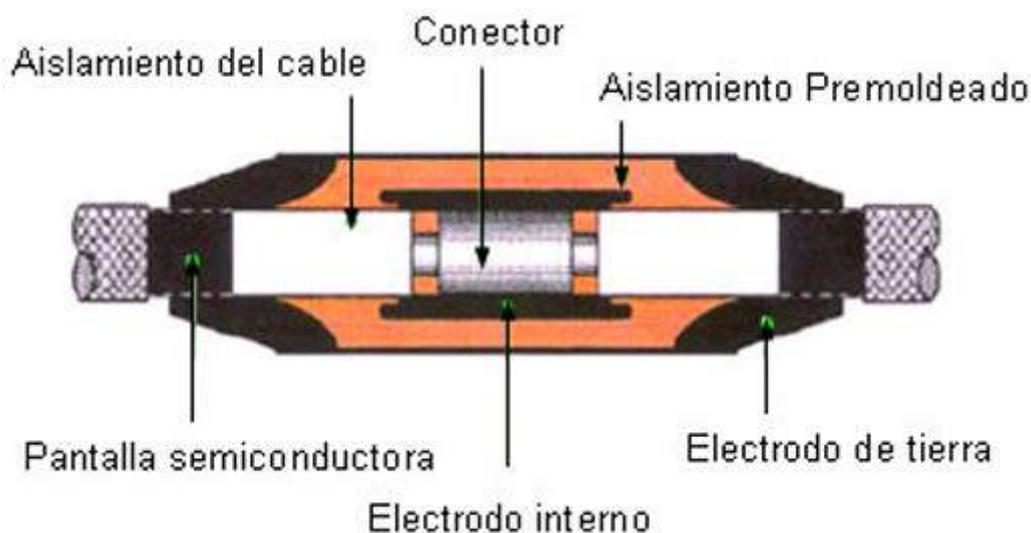


Figura 1.3.3.1 Esquema de un empalme general pre moldeado [7]

- Empalme de resina: Para su armado se utiliza un molde dentro del cual se vierte una mezcla de resina. Este tipo de empalme se caracteriza por resistir altos niveles de estrés. Se utilizan en casos de alta tensión mecánica, temperaturas cambiantes y se pueden utilizar tanto en aplicaciones subterráneas como subacuáticas. El proceso de instalación se encuentra en la Figura 1.3.3.2:

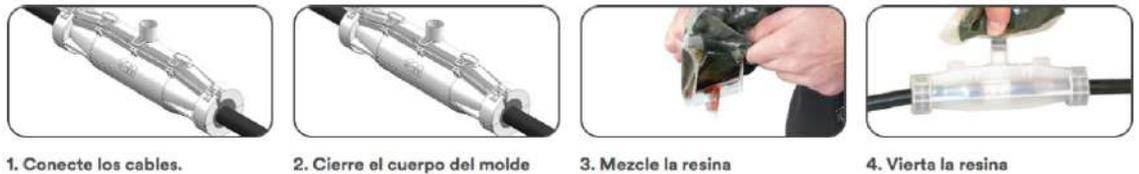


Figura 1.3.3.2 Procedimiento de instalación de empalme de resina [8]

- Empalme termo contraíble: Su nombre proviene del tipo de aislación que se aplica al empalme, ya que el manguito de conexión eléctrica es el mismo independiente del tipo de empalme. La aislación se realiza con tubos termo contraíbles que se comprimen al aplicarles calor. Están recubiertos internamente con adhesivo termoplástico que fluye ante la aplicación de calor. Una vez enfriado el aislante, brinda una protección mecánica y el adhesivo protege al empalme del polvo y el agua. En la Figura 1.3.3.3 se observan los tubos termo contraíbles utilizados en este tipo de empalmes.



Figura 1.3.3.3 Tubos termo contraíbles utilizados en los empalmes termo contraíbles

Uno de los beneficios de este tipo de empalmes, es su fácil instalación. Sin embargo, se debe tener en cuenta que posee desventajas en comparación a otro tipo de empalmes, como es el caso de que existen situaciones en las que son peligrosas aplicar calor al cable debido a su ubicación, disposición, etc. Además, una incorrecta aplicación de calor, puede generar que se causen daños en la aislación. Es por ello que, en caso de realizarse este tipo de empalmes, se requiere mano de obra calificada y con experiencia comprobable.

Los empalmes también se clasifican según la función a realizar, en este trabajo se estudiarán especialmente los empalmes rectos y de derivación.



1.3.4 FALLAS EN CABLES SUBTERRÁNEOS

Se denomina falla en un cable subterráneo a cualquier tipo de anomalía o discontinuidad en la integridad estructural, eléctrica o funcional del cable que interrumpe su capacidad para transportar la corriente eléctrica de manera adecuada. Estas fallas pueden manifestarse de diversas formas y pueden ser causadas por una variedad de factores, tanto internos como externos. Las causas más usuales son las siguientes:

- **Vandalismo:** El motivo más común a la hora de hablar de vandalismo es el robo de cables en busca de una recompensa económica. Una vez hurtado el cable, se sustrae su cobre para su venta. Sin embargo, no es la única causa de vandalismo, también una causa de vandalismo son los incendios provocados que degradan el aislamiento del cable y generan un cortocircuito.
- **Daños por terceros:** Generalmente se debe a daños producidos en obras civiles, como es el caso de perforaciones o excavaciones sin tener información de la traza de los conductores, ya sea por una negligencia del perforador al no pedir informe de interferencias o de los proveedores por brindar un erróneo informe de interferencias. También es el caso de las situaciones de alteración de orden público que no tienen como objetivo principal dañar la red eléctrica como por ejemplo accidentes de tránsito.
- **Degradación del material:** Cuando por diversas causas, el material que compone el cable subterráneo se encuentra deteriorado y este deterioro es el que genera la falla. Esta avería en el cable puede ser brusca o lenta, generalmente se debe a problemas como daños mecánicos, instalación incorrecta, materiales defectuosos o de mala calidad, envejecimiento de empalmes o por el envejecimiento del mismo cable. [9]

Para realizar un estudio del comportamiento del cable en falla, analizaremos un circuito eléctrico equivalente en el que un cable subterráneo de baja tensión posee una resistencia de nominal R_a y una tensión de ensayo VE , se puede representar en el siguiente modelo equivalente de la Figura 1.3.4.1:

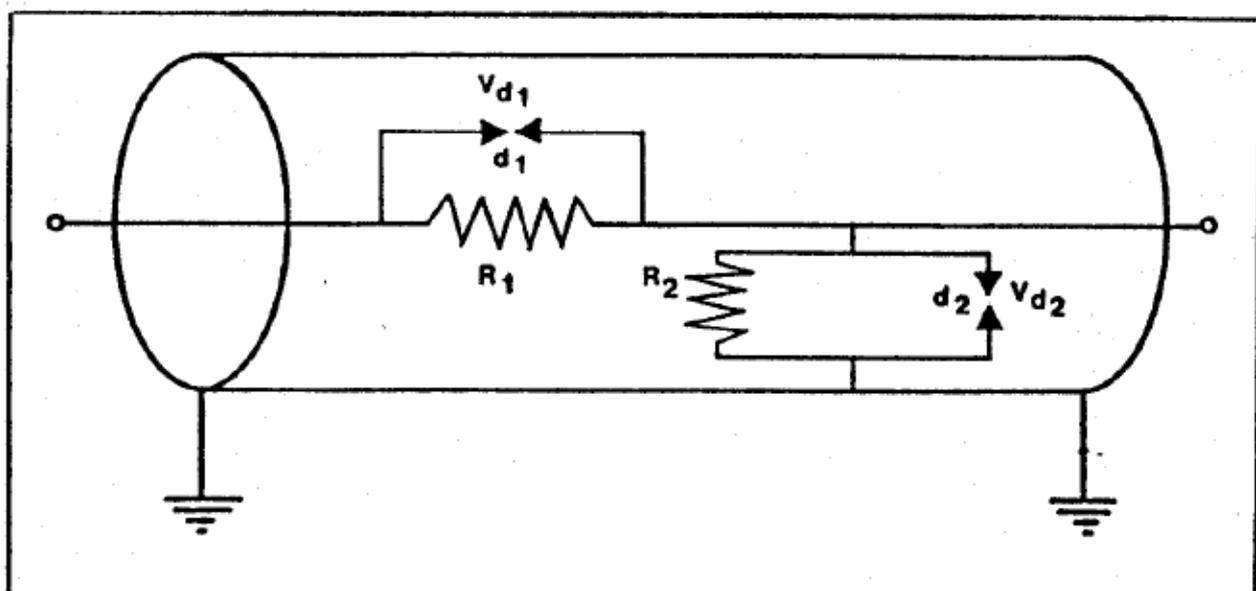


Figura 1.3.4.1 Modelo equivalente de falla en cable subterráneo de baja tensión [10]

En el modelo equivalente, d_1 y d_2 son explosores, d_2 se produce entre el conductor ensayado y otro conductor en un cable multipolar o entre el mismo cable y la armadura. V_d hacen referencia a las tensiones de descarga y las resistencias se refieren a la resistencia de continuidad y de aislación a tierra respectivamente. [11]

Las fallas en cables subterráneos se pueden diferenciar en los siguientes tipos:

- Baja resistencia: Se produce cuando el aislamiento del cable se encuentra dañado. El cable presenta continuidad entre sus extremos. En ese caso la resistencia de falla es mucho menor que la resistencia de aislamiento. La corriente va a recorrer la menor resistencia por ende se produce una corriente de fuga. Si la aislación del cable estuviera en perfectas condiciones, la resistencia de falla tendría idealmente un valor de infinito y no existiría corriente de fuga por ella. En la Figura 1.3.4.2 se encuentra el modelo equivalente para una falla de baja resistencia.

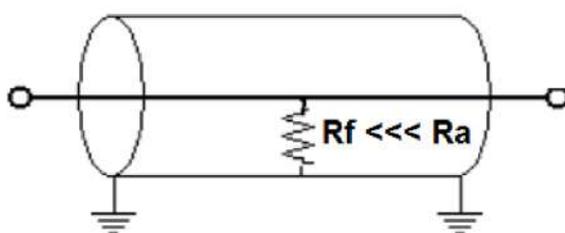


Figura 1.3.4.2 Modelo equivalente para una falla de baja resistencia [12]

- Alta resistencia: Se posee continuidad entre los extremos del conductor. La

resistencia de falla es relativamente alta pero es menor que la resistencia de aislación. Entonces la corriente de cortocircuito está limitada debido a la resistencia, generando daños menores en el cable. En la Figura 1.3.4.3 se encuentra el modelo equivalente para una falla de alta resistencia.

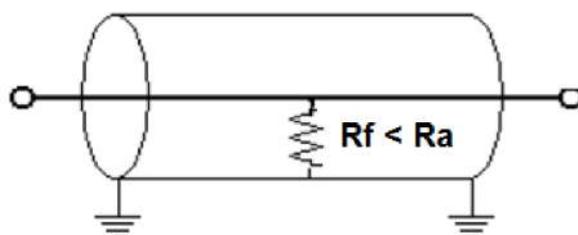


Figura 1.3.4.3 Modelo equivalente para una falla de alta resistencia [12]

- Intermittente: El cable presenta continuidad en sus extremos. Surgen dependiendo de la carga soportada por el cable. Durante la falla intermitente, la resistencia de falla es aproximadamente igual a la resistencia de aislación. Este tipo de fallas tiene características similares a las de una falla de alta resistencia. Su diferencia radica en que en tiempos menores que los exigidos por la norma IRAM 2289, se producen descargas en la zona de falla que hacen que aumente bruscamente la corriente de pérdidas medida y caiga la tensión de ensayo a un valor próximo a 0. En la Figura 1.3.4.4 se observa el modelo equivalente para una falla intermitente. Luego de la primera descarga puede pasar que:
 - El cable vuelva a las condiciones iniciales y se produzcan otras descargas muy espaciadas en el tiempo.
 - Luego de la primera descarga, se ve afectado el tiempo y se produzca un aumento brusco de la corriente de pérdidas cada vez que la tensión llega al valor de cebado. [12]

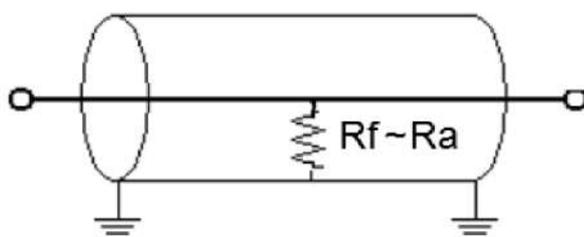


Figura 1.3.4.4 Modelo equivalente para una falla intermitente [12]

- Cable cortado: No hay continuidad entre los extremos del conductor. La resistencia de continuidad es aproximadamente igual a la resistencia de aislación. La resistencia de falla a tierra es mayor que la resistencia de aislación. Este caso puede observarse en la Figura 1.3.4.5.

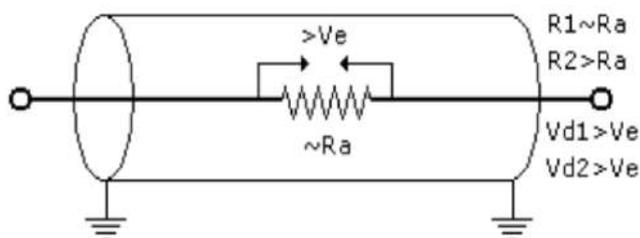


Figura 1.3.4.5 Modelo equivalente para una falla por cable cortado [12]

Si bien las fallas pueden diferenciarse en los cuatro casos anteriormente mencionados, se debe destacar que los casos de fallas reales son combinaciones de estos. Los casos reales son producto de la variación de los componentes del circuito equivalente de forma aleatoria.

1.4 RED ELÉCTRICA SUBTERRÁNEA DE MAR DEL PLATA

Dependiendo el país en el que se sitúe, existen diferencias en la elección de tendido aéreo o subterráneo para las distintas zonas. Por ejemplo, en las ciudades europeas de grandes densidades poblacionales, los cables de distribución han sido instalados de manera subterránea desde hace más de un siglo y se ha evitado instalar postes, conductores aéreos y transformadores sobre bases elevadas. En cambio en sectores como Estados Unidos, en las zonas suburbanas se distribuye de forma aérea limitando el tendido subterráneo a la zona céntrica de las grandes ciudades. Esto se traduce a que los europeos poseen un gran desarrollo subterráneo en baja tensión, su instalación subterránea de media tensión se limita solamente al tendido de baja tensión y a los centros de transformación trifásicos de potencias considerables. Mientras que en los Estados Unidos se posee un gran desarrollo de la media tensión, un tendido de baja tensión reducido al mínimo, un gran uso de transformadores pequeños, monofásicos, con lo cual la mayoría de los cables subterráneos son unipolares.

En los últimos años ha surgido y se encuentra en constante crecimiento la idea de protección ambiental y contaminación visual. Esta idea pasó a ser uno de los aspectos centrales en la toma de decisiones de inversión de nuevas instalaciones junto a consideraciones técnicas y económicas. Cada vez es más frecuente que se escoja realizar una línea subterránea independientemente de que el tendido aéreo sea la solución técnica y económica más adecuada. [13]

La ciudad de Mar del Plata, en Argentina, ha crecido constantemente su red eléctrica subterránea. La empresa de electricidad ha tendido mil metros de línea subterránea de media tensión en el tramo que va desde el centro de la ciudad hasta la costa, mejorando la estética urbana y reduciendo la contaminación visual causada por los cables aéreos.

La instalación de líneas eléctricas subterráneas de media tensión en Mar del Plata se realizó

mediante conductos empotrados por separado en el suelo a una profundidad de al menos 50 [cm], sobre una base de hormigón y cubierta con arena y pavimento o tierra. Esto minimiza el impacto de la vibración causada por los camiones y garantiza la seguridad de los cables.

La red de baja tensión en el centro de la ciudad de Mar del Plata es 100% subterránea (Figura 1.4.1). En el resto de la ciudad existen muchos casos de bajadas mixtas. Se denomina bajada mixta a las acometidas que toman energía de la red aérea y bajan de forma subterránea hasta el usuario. Se utilizan bajadas mixtas en los casos que el cliente demanda un consumo de potencia elevado para ingresar a la caja de toma de forma aérea. A continuación se agregan las Figuras 1.4.1 y 1.4.2 de la red subterránea del centro de la ciudad de Mar del Plata.



Figura 1.4.1 Red subterránea de baja tensión del centro de la ciudad de Mar del Plata

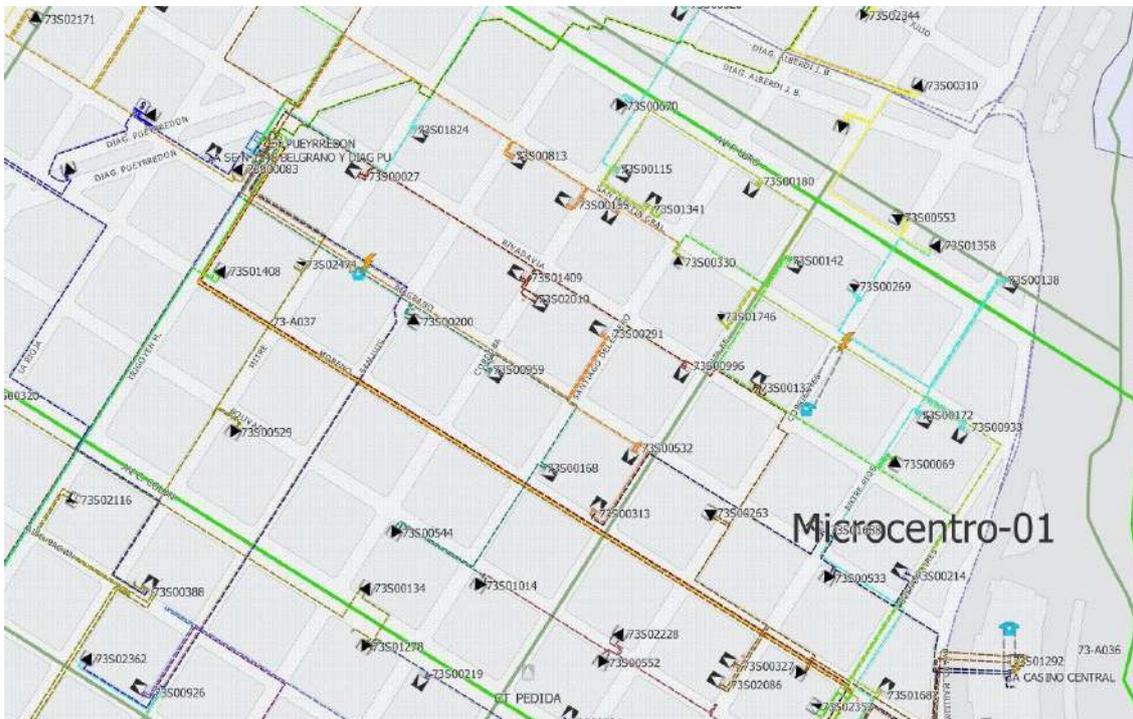


Figura 1.4.2 Red subterránea de media tensión de la ciudad de Mar del Plata

A continuación en la Tabla 1.4.1 se encuentran las longitudes de línea aérea y subterránea de baja tensión de la ciudad de Mar del Plata expresadas en kilómetros y sus valores porcentuales al 31/12/2022.

Tabla 1.4.1 Longitudes de línea de baja tensión de Mar del Plata

Línea Baja Tensión [km]		Porcentaje
Aérea	2639	89%
Aéreo prensamblado	1941	65%
Aéreo prensamblado alto	438	15%
Convencional	259	9%
Subterráneo	326	11%
Total	2965	100%

El porcentaje de línea subterráneo de la ciudad es del 11%, comprende toda la red de la zona céntrica de la ciudad y de los barrios privados. En los barrios privados que se encuentran a las afueras de la ciudad, toda su red es subterránea. Utilizan redes subterráneas por distintos motivos, por estética, seguridad, menor impacto ambiental, etc. En la Tabla 1.4.2 se encuentran las longitudes de la línea de media tensión de la ciudad al 31/12/2022.

Tabla 1.4.2 Longitudes de línea de media tensión de Mar del Plata

Línea Media Tensión [km]		Porcentaje
CAS 13,2	373	30%
CAS 13,2 Rural	14	1%
CAS 13,2 Urbano	359	29%
LA 13,2	854	69%
LA 13,2 Rural	366	30%
LA 13,2 Urbano	488	39%
LART	11	1%
LART Rural	11	1%
LART	0	0%
Total	1238	100%

Siendo:

- CAS: Cable armado subterráneo
- LA: Línea aérea
- LART: Línea aérea de retorno por tierra



CAPITULO 2: MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN CABLES SUBTERRÁNEOS

2.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la eficiente detección y localización de fallas en sistemas de distribución de energía eléctrica, especialmente en cables subterráneos, constituye un desafío crucial para garantizar la continuidad del suministro y la seguridad de las redes, especialmente en entornos urbanos densamente poblados. La creciente adopción de cables subterráneos en las redes de distribución de energía ha resaltado la necesidad de desarrollar métodos precisos y oportunos para la identificación de fallas.

Este capítulo aborda la problemática asociada con la detección de fallas en cables subterráneos, centrándose en la importancia de la localización precisa y rápida de las mismas. Se exploran diferentes enfoques y metodologías utilizadas en la detección de fallas.

A través de una revisión exhaustiva de la literatura y la presentación de investigaciones relevantes en el campo, se analizan los avances tecnológicos. Además, se examinan los desafíos actuales y las oportunidades emergentes en el desarrollo y la implementación de algoritmos de detección de fallas, con el objetivo de mejorar la eficiencia y la fiabilidad de los sistemas de distribución eléctrica.

El capítulo proporciona un marco integral para comprender la importancia de los métodos de detección de fallas en sistemas de distribución eléctrica, así como una base sólida para la investigación y el desarrollo continuo en este campo crucial de la ingeniería eléctrica.

2.2 HISTORIA DE LOS MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN DE CABLES SUBTERRÁNEOS

Hasta 1950, los primeros métodos de localización de fallas se realizaban con puentes de medida y transformadores de quemado. Se necesitaban horas, días y hasta en algunos casos ni siquiera se lograba llegar a un resultado. El primer método de localización de fallas fue seccionamiento o método de acercamiento a mitad de camino. La seccionalización era una de las primeras técnicas a ser utilizadas para la localización de fallas en cables enterrados en forma directa. Su uso, hoy en día está limitado al de un último recurso. En el próximo apartado se explicará más en detalle este método.

Otro de los primeros métodos en aparecer fue el método de resistencia proporcional o también llamado método puente, es una variante del puente de Wheatstone. Entre los métodos modernos de localización de fallas, se debe mencionar al método de



reflectometría convencional como uno de los más importantes y más utilizados hasta la actualidad. También llamado reflectómetro de dominio de tiempo (TDR), fue desarrollado hace más 35 años, comenzó como un método para detectar fallas en líneas telefónicas. Sin embargo, este método tiene la limitación de no poder identificar fallas de alta resistencia, es por ello que surgió el método de reflectometría de alta energía o de alta tensión.

La reflectometría de alta energía se basa en un reflectómetro TDR con generadores de impulso, filtros o acopladores lo que le permite detectar fallas de alta y baja resistencia. Durante los últimos 25 años se desarrollaron tres sistemas básicos de reflectometría, el método de reflexión de arco, reflexión de impulsos y reflexión de decaimiento. El método de reflexión de arco es uno de los más preferidos para la localización de fallas subterráneas. Además de mostrar las fallas, también detecta empalmes, permitiendo generar un mapa eléctrico del cable bajo ensayo.

Los métodos de puntualización de la falla se basan en la detección de la falla a partir de la detección acústica. Esta técnica fue creada en 1950, su principio de funcionamiento es de aplicar una tensión alta al cable de forma tal que genere un ruido que sea capaz de detectarse con un detector acústico amplificado. Este tipo de métodos fue muy utilizado mientras los cables eran de aislamiento de papel impregnado en aceite. Con la aparición de cables con aislamiento en seco como PE o XLPE, se tuvo que tomar ciertas precauciones a la hora de utilizar este tipo de métodos ya que el pulso de alta tensión puede producir daños sobre estos cables. No se debe sobre exigir innecesariamente el cable para no provocar un deterioro de su aislamiento en tramos que se encuentran en buen estado con fallas prematuras. [14]

2.3 ETAPAS DE LA LOCALIZACIÓN DE FALLAS

La localización de fallas es un proceso que se realiza en una serie de pasos meticulosos y especializados que permiten identificar y corregir de manera eficiente cualquier anomalía que pueda interrumpir el suministro de energía eléctrica. A continuación, se abordará el proceso de localización de fallas en cables subterráneos, pero se hará especial énfasis en los pasos principales de este proceso.

Las etapas de la localización de fallas en cables subterráneos de baja tensión son:

- Prelocalización
- Localización puntual
- Seguimiento de trazas
- Identificación de cables
- Prueba de aislación



2.3.1 PRELOCALIZACIÓN

La prelocalización de fallas en cables subterráneos es un proceso crucial en la gestión eficiente de las redes eléctricas. Se basa en determinar la ubicación de la falla una vez que surge la avería, lo que implica una evaluación detallada del entorno de la zona afectada. Dependiendo de la naturaleza de la falla, se emplean diferentes métodos e instrumentos para su identificación precisa.

El objetivo principal de la prelocalización es reducir al mínimo la zona a medir, lo que facilita enormemente las tareas de diagnóstico y reparación. Para lograr esto, es fundamental que la prelocalización sea lo más exacta posible. Esto implica una selección cuidadosa del método y del instrumental a utilizar, adaptándolos a las características específicas de la avería. [11]

2.3.2 PUNTUALIZACIÓN

La puntualización de fallas en cables subterráneos es un paso muy importante en el proceso de localización de fallas. Aun contando con una excelente prelocalización, esta tarea es indispensable, especialmente cuando la información de los planos disponibles es poco confiable o incompleta.

La puntualización implica determinar con precisión la ubicación exacta de la falla dentro del área prelocalizada. Para lograr esto, se utilizan diferentes métodos que involucran la inyección de señales en el cable bajo prueba y el uso de captosres adecuados. Estas señales atraviesan la traza del cable, permitiendo a los técnicos determinar el punto exacto donde se requiere la excavación para proceder con la reparación. [11]

Una vez definida la ubicación de la avería, antes de definir donde realizar la excavación se debe:

- Asegurar que todas las cargas se encuentran desconectadas.
- Caracterizar el tipo de falla, sección del conductor y derivaciones
- Complementar con otros métodos de detección
- Analizar si es posible desconectar el neutro de la red
- Realizar un croquis de la cuadra a medir, con énfasis en la ubicación y distancia entre tomas
- Siempre realizar dos mediciones, una desde cada extremo del cable
- Asegurar una circulación de corriente constante y de igual magnitud en todas las mediciones
- Llevar un registro de antecedentes y ubicación de empalmes de reparación [15]



2.3.3 SEGUIMIENTO DE TRAZAS

En muchos casos, la falta de conocimiento sobre la traza del cable representa un desafío significativo en el proceso de localización y reparación de fallas en redes eléctricas subterráneas. Esta falta de información puede deberse a diversas razones, como la pérdida de los planos originales, modificaciones no documentadas, o la eliminación de referencias visibles que delimitan el recorrido del cable.

El conocimiento preciso de la traza del cable es fundamental para llevar a cabo una reparación exitosa. Para determinar esta traza en ausencia de información documentada, se recurre a técnicas especializadas. Una de las técnicas más comunes consiste en la inyección de una señal de frecuencia audible en el cable y el seguimiento de la ruta del conductor utilizando un captor inductivo. Este captor detecta el campo magnético asociado al cable y lo transmite a un receptor de alta ganancia, permitiendo así trazar con precisión la ubicación del cable subterráneo. [11]

2.3.4 IDENTIFICACIÓN DE CABLES

Durante este paso del proceso, se procede a realizar una identificación de un cable que se encuentra en un grupo de cables. Esta identificación puede realizarse a zanja abierta o no. Dependiendo del caso, como podría ser el ejemplo de un cable que se encuentra solo, este paso no es necesario tenerlo en cuenta. [11]

2.3.5 PRUEBA DE AISLACIÓN

La resistencia de aislación es un aspecto crucial en el diseño y mantenimiento de cables subterráneos. Los materiales aislantes están diseñados para soportar solicitaciones eléctricas, térmicas, mecánicas y condiciones ambientales específicas durante su vida útil. Sin embargo, estas condiciones de operación pueden provocar la degradación de las características aislantes, manifestándose en una reducción de la resistividad eléctrica, aumento de corrientes de fuga, o incremento de las descargas parciales.

La exposición de los aislantes a sobretensiones, temperaturas excesivas, daños mecánicos, agentes químicos, polución ambiental y radiaciones UV, puede acelerar la degradación de sus propiedades. Para prevenir fallas catastróficas y mantener la seguridad operativa, es esencial realizar pruebas periódicas de diagnóstico. Estas pruebas permiten evaluar el estado del aislamiento, detectando signos de envejecimiento y degradación prematura antes de que alcancen niveles críticos.

La prueba de aislación tiene como objetivo verificar la aptitud de la instalación para soportar sobretensiones provocadas por causas tales como averías, transitorios de operación, descargas atmosféricas, etc. La medición de la aislación se basa en la medición de su

resistencia a partir de la Ley de Ohm. [16]

2.3.5.1 ENSAYOS DE TENSION DE CORRIENTE CONTINUA

Para el caso de los ensayos de tensión de corriente continua, se solicita eléctricamente al aislamiento mediante la aplicación de tensiones superiores a la nominal y a continuación medir la corriente de circulación, es posible determinar el valor de la resistencia de aislación.

La corriente de circulación está compuesta por tres corrientes:

- Corriente de carga capacitiva: La corriente de carga corresponde a la capacidad del aislamiento probado. Inicialmente, es transitoria y relativamente alta, disminuyendo exponencialmente hacia un valor cercano a cero una vez que el circuito está completamente cargado. Después de unos segundos o decenas de segundos, esta corriente se vuelve insignificante en comparación con la corriente medida.
- Corriente de absorción: Se relaciona con la energía necesaria para reorientar las moléculas del aislante bajo el efecto del campo eléctrico aplicado. Decrece mucho más lentamente que la corriente de carga capacitiva y necesita más tiempo para alcanzar un valor cercano a cero.
- Corriente de conducción: Esta componente se llega a medir cuando el aislante está completamente cargado. Esta corriente es estable a través del aislamiento y generalmente se representa por una resistencia de valor muy alto en paralelo con la capacitancia del aislamiento. [16]

Las componentes de la corriente de circulación se grafican en la Figura 2.3.5.1.1:

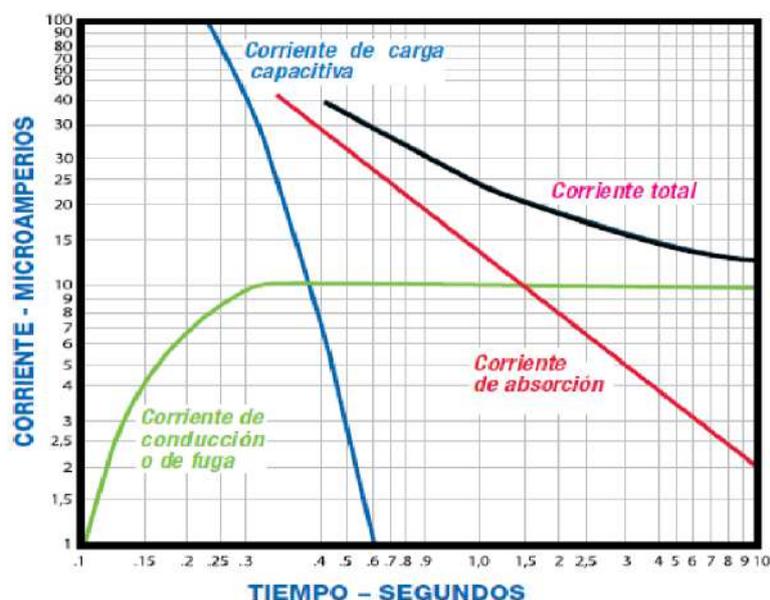


Figura 2.3.5.1.1 Gráfica de corriente de circulación y de sus componentes [16]

2.3.5.1.1 MEGÓHMETRO

Según la AEA 90364-7-770, para la medición de resistencias de aislación en baja tensión se utiliza Megóhmetro de tensión igual a 500 [V] o 1000 [V]. Para la medición se desconecta la línea de alimentación, las cargas, los interruptores deben permanecer cerrados incluyendo los aparatos de maniobra y protección. Luego se procede a realizar las siguientes mediciones:

- Entre conductores de fase.
- Entre conductores de fase unidos entre sí y neutro.
- Entre conductores de fase unidos entre sí y conductor de protección.
- Entre conductor neutro y conductor de protección.

El valor de la resistencia medido debe ser como mínimo 1000 [Ω] por cada Volt de tensión de prueba aplicado por cada tramo de la instalación de 100 [m] o fracción. La resistencia de aislación superará el ensayo si cada circuito presenta una resistencia de aislación igual o superior a los siguientes:

Tabla 2.3.5.1.1.1 Valores de Resistencia de aislación aceptables según AEA 90364-7-770 [16]

Tensión nominal del circuito [V]	Tensión de ensayo en corriente continua [V]	Resistencia de aislación [$M\Omega$]
MBTS MBTF	250	$\geq 0,25$
Inferior o igual a 500 V, con excepción del caso anterior	500	$\geq 0,5$
Superior a 500 V	1 000	$\geq 1,0$

Siendo:

- MBTS: Circuito de muy baja tensión de seguridad
- MBTF: Circuito de muy baja tensión funcional

Según la Norma IRAM 2325 las tensiones de corriente continua a ensayar según la tensión nominal del equipo son:

Tabla 2.3.5.1.1.2 Valores de tensiones continuas de ensayo a partir de la tensión nominal según IRAM 2325 [16]

Tensiones alternas nominales del equipamiento " U_N " (V)	Tensiones continuas de ensayo " E " (V)
$U_N \leq 110$	100 y 250
$110 < U_N \leq 660$	500 a 1000
$660 < U_N \leq 1000$	500 a 2500
$1000 < U_N \leq 3300$	1000 a 5000
$3300 \leq U_N$	2500 a $E_{m\acute{a}x}$ (*)

Siendo:

- $E_{Max} = 1,3 \cdot U_N$ para equipamiento sin uso
- $E_{Max} = 0,95 \cdot U_N$
- U_E = Valor eficaz de la tensión a frecuencia industrial (aplicada durante 1 minuto) prescripto en la norma particular del equipo para el mismo "sin uso". [16]

2.3.5.1.2 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE POLARIZACIÓN (IP)

Método simple que requiere la lectura de la resistencia de aislación del décimo minuto y la resistencia de aislación del primer minuto. El cálculo del índice se realiza a partir de la siguiente ecuación:

$$I_P = \frac{RA_{10 \text{ min}}}{RA_{1 \text{ min}}} \quad (2.3.5.1.2.1)$$

Si bien el cálculo y medición de este índice es fácil y útil, se debe tener en cuenta que existen materiales que al poseer una escasa absorción dieléctrica su valor puede ser cercano a 1. Valor que se puede mal interpretar como un aislante degradado.

Otro Índice importante a calcular es la Relación de absorción dieléctrica (RAD). El cálculo del RAD se utiliza en instalaciones o equipos que contengan aislantes en los cuales la corriente de absorción disminuye rápidamente. La relación se calcula a partir del cociente entre la lectura de la resistencia de aislación a los 60 segundos y a los 30 segundos. [16]

$$RAD = \frac{RA_{60 \text{ seg}}}{RA_{30 \text{ seg}}} \quad (2.9.5.1.2.2)$$

A continuación se encuentran valores orientativos del estado del aislamiento según los

índices:

Tabla 2.3.5.1.2.1. Estado del aislamiento a partir de los valores de los índices [16]

Relación de absorción dieléctrica	Índice de polarización	Estado del aislamiento
$RAD < 1,1$	$IP < 1$	Peligroso
$1,1 \leq RAD < 1,25$	$IP < 1,5$	Cuestionable
$1,25 \leq RAD < 1,4$	$1,5 \leq IP < 2$	Aceptable
$1,4 \leq RAD < 1,6$	$2 \leq IP < 3$	Bueno
$1,6 \leq RAD$	$3 \leq IP < 4$	Muy bueno
	$IP \geq 4$	Excelente

2.3.5.2 ENSAYO VERY LOW FREQUENCY (VLF)

El ensayo VLF se basa en la aplicación sobre la aislación de una corriente alterna a muy baja frecuencia. Generalmente el valor de frecuencia a utilizar es de 0,1 [Hz], siendo un ciclo completo 10 [s].

El equipo medidor poseen tensiones máximas que van desde los 20 [kV] a los 200 [kV]. El valor de frecuencia 0,1 [Hz] se debe a la potencia necesaria para energizar el cable a ensayar. Para la misma potencia, con 0,1 [Hz] se puede ensayar un cable 600 veces más largo que uno de 60 [Hz].

Según la IEE los niveles de prueba para dieléctricos de cables son de 2 a 3 veces la tensión U_0 durante 15 minutos. A diferencia de un ensayo de CC, el ensayo VLF no deteriora el cable ensayado, donde el daño real al aislamiento se produce durante la prueba, causando posibilidades de futuras fallas. El VLF no causa deterioro al aislamiento ya que se aplica la misma corriente a la cual ha sido diseñado el cable durante su servicio. En caso de que el cable se encuentre defectuoso, el ensayo será destructivo. Las normas que abalan este tipo de ensayos son:

- DIN-VDE 0276-620
- DIN-VDE 0276-1001
- IEE 400-2001
- AEA 95101 [17]

2.4 SECCIONALIZACIÓN

El método de seccionalización también se llama método de acercamiento a mitad de camino, método de cortar y probar o método de prueba y error. Fue una de las primeras

técnicas utilizadas para la localización de fallas en cables subterráneos. El fundamento de trabajo de este método se basa en medir la resistencia de aislación, ya que un cable con fallas presenta una resistencia de aislación menor que un cable sin daños.

Entonces aislando ambos extremos del cable, se conecta un óhmetro o un megóhmetro entre el conductor y el neutro o tierra. Luego de medir la resistencia del cable, se realizará corte del cable y se realiza una nueva medición en las nuevas mitades del cable. La mitad que contenga la falla tendrá un valor de resistencia de aislación menor que la mitad que se encontraba sana. El valor que posee la mitad de cable que contiene la falla, es el mismo valor de resistencia de aislación medido en el cable antes de cortar. En la Figura 2.4.1 se puede observar una representación esquemática de la ubicación de los cortes del método de seccionalización.

Este tipo de detección de fallas, es invasivo en el cable a ensayar, ya que se le realizan múltiples cortes al cable y posteriormente empalmes para su reincorporación. [14]

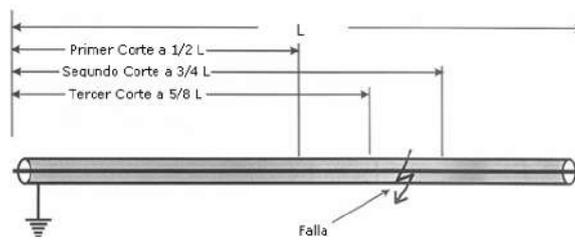


Figura 2.4.1 Método de seccionalización [14]

2.5 RESISTENCIA PROPORCIONAL

El método de resistencia proporcional o método puente, es una variación del Puente de Wheatstone. El principio de trabajo del método se basa en que el conductor tiene una resistencia uniforme por unidad de longitud, por lo tanto la distancia al punto de falla es proporcional a la resistencia en el hilo calibrado de un puente de Wheatstone. El puente debe conectarse de la siguiente manera:

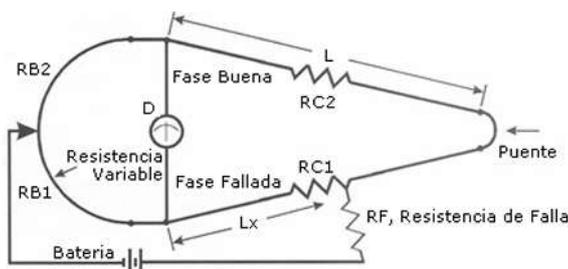


Figura 2.5.2 Método resistencia proporcional conexionado clásico [14]

También se puede realizar (si el caso lo requiere), un puente de lazo Murray invertido

cambiando de posición la batería y el detector de nulidad. El puente de lazo invertido se puede observar en la Figura 2.5.3.

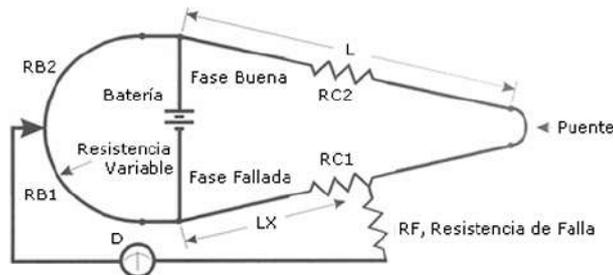


Figura 2.5.3 Método resistencia proporcional conexionado invertido [14]

Se debe tener en cuenta que las resistencias de la serie, longitud de la fase buena y la fase fallada deben ser iguales. Si las resistencias de la serie fueran distintas, la precisión del resultado será malo. Como puede ser el caso de cables que contengan empalmes en alguna de sus fases. Por ello este método se utiliza durante la pre localización. [14]

2.6 REFLECTÓMETRO DE DOMINIO DE TIEMPO (TDR)

La reflectometría convencional o TDR, transmite pulsos de baja tensión y alta frecuencia por el cable. El reflectómetro TDR es un emisor de señales pulsantes, de una tensión aproximada de 6 [Vpp] a 40 [Vpp] y una frecuencia del orden de los [kHz]. Diseñado para medir tiempos, a partir de los valores medidos y de la velocidad de propagación que el usuario puede ajustar, los transforma en unidades de longitud. Los equipos a utilizar son un analizador con generador de pulsos y un osciloscopio. El equipo es capaz de detectar anomalías tales como empalmes, cortes, derivaciones, fallas del tipo de derivación con una resistencia menor de 200 [Ω].

Su funcionamiento se basa en reflexiones de señales incidentes que demuestran los cambios de impedancia en el cable. Estos cambios de impedancia se deben a daños en el cable, ingreso de humedad, cambios en el tipo de cable, instalación inapropiada, empalmes, etc. Se entiende por cambios de impedancia en un cable a todos aquellos puntos de su recorrido que tengan una impedancia distinta a la impedancia característica (Z_0). Este tipo de métodos permite realizar un mapa eléctrico del cable. Las reflexiones de onda incidentes son el producto de los cambios de impedancia que puede poseer el cable, la naturaleza de estos cambios determinan la amplitud y sentido (positivo o negativo) de las reflexiones. Respecto a las fallas que muestra este tipo de aparatos, se deben mencionar que las fallas de baja resistencia entre el conductor a tierra o entre conductores poseen reflexiones descendentes, mientras que las fallas de muy alta resistencia de falla o cortes se observan como reflexiones ascendentes. [17]

En las siguientes Figuras (2.6.1, 2.6.2, 2.6.3, 2.6.4 y 2.6.5), se puede observar ejemplos de

distintos casos de fallas medidos por TDR.

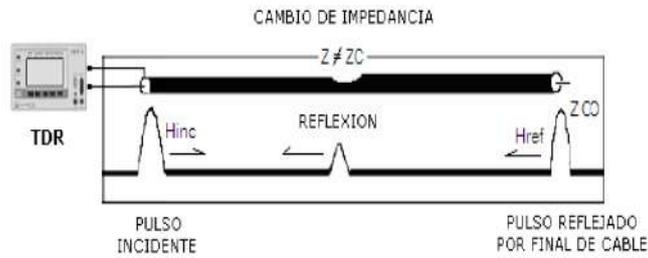


Figura 2.6.1 TDR en cable con cambio de impedancia [16]

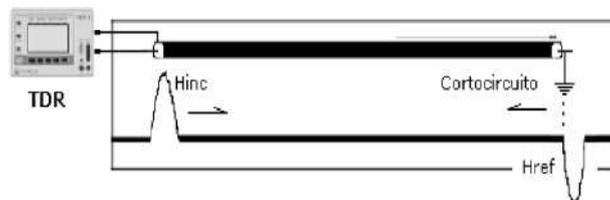


Figura 2.6.2 TDR en cable que posee cortocircuito [16]

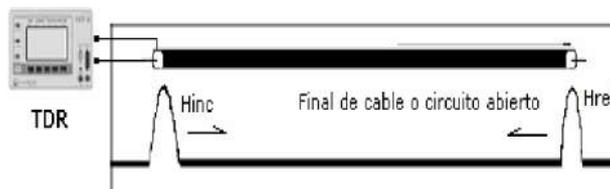


Figura 2.6.3 TDR en final de cable o circuito abierto [16]

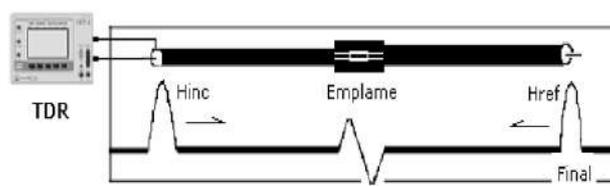


Figura 2.6.4 TDR en cable con empalme [17]

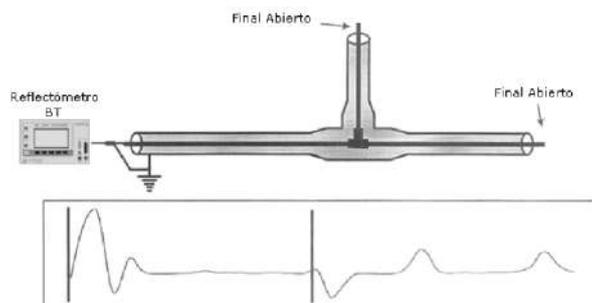


Figura 2.6.5 TDR en cable con empalme T [17]

Una de las limitaciones en este método, es que dependiendo de la ubicación de por ejemplo empalmes, será diferente la altura de la señal dependiendo de la posición física en la que se encuentre del cable. Un empalme ubicado al final del cable, producirá una menor reflexión a si estuviera ubicado cercano al punto de conexión del TDR. Esto quiere decir que para un mismo empalme, la altura de su gráfica depende de su ubicación espacial a lo largo del cable analizado. En la Figura 2.6.6 observamos el caso de la reflectometría producida por un mismo empalme pero en distinta ubicación. Mientras que en la Figura 2.6.7 se encuentra la reflectometría obtenida de medir un cable al que se le desplaza el empalme a tres posibles ubicaciones.

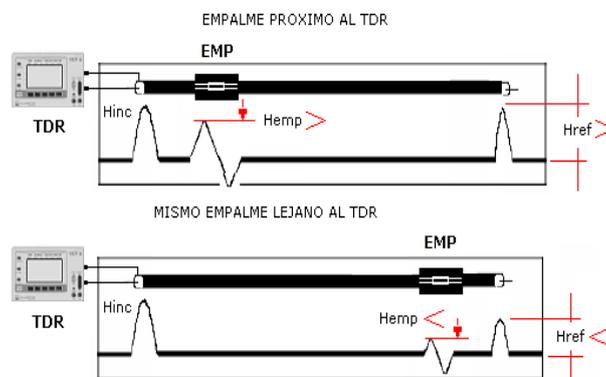


Figura 2.6.6 Ejemplo mismo empalme ubicado en distinta posición [17]

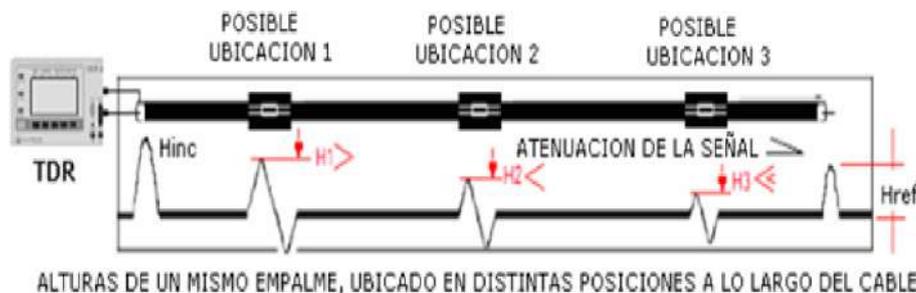


Figura 2.6.7 Ejemplo de alturas de un mismo empalme, ubicado en distintas posiciones a lo largo del cable [17]

Este efecto se debe a la atenuación/pérdidas producto de que la señal recorre el cable. Se define atenuación como las pérdidas de potencia eléctrica que sufren las señales incidentes y reflejadas al recorrer el cable ensayado. Estas atenuaciones se pueden deber a:

- Principios de atenuación y pérdidas de potencia que sufre toda señal de alta frecuencia al recorrer un cable de energía.
- Factor de longitud del conductor.
- Factor de ubicación o posición física aleatoria de un empalme.

Si la impedancia de carga no es igual a la impedancia característica del cable, como sucede en la realidad, entonces se producirán reflexiones múltiples. Parte de la energía que llega a la carga será absorbida por la carga y parte será reflejada hacia el equipo de medición.

Las irregularidades en la impedancia a lo largo del cable provocaran reflexiones, se puede definir como perdida de retorno a la relación en dB entre la onda reflejada y la incidente. Las pérdidas de retorno se utilizan para medir los cambios de impedancias en el cable, por ejemplo grandes pérdidas de retorno significan que gran cantidad de la señal se está reflejando en el punto de ocurrencia del cambio de impedancia.

Un factor a tener en cuenta es que si existen varios empalmes sobre un mismo cable, cada empalme debe poseer una altura de gráfica menor a sus inmediatos anteriores. Es decir, ningún empalme más cercano al extremo opuesto de medición debe poseer una altura mayor a los más cercanos al extremo donde se ubica el reflectómetro. En la figura 2.6.7, se encuentra un ejemplo de empalmes iguales sobre un cable, en la que a partir de su medición, no se pueden establecer objeciones ya que todas las alturas de los empalmes son proporcionalmente menores.

En caso de que una altura de la gráfica sea mayor que su antecesor (Figura 2.6.8), se puede deducir que al empalme se le deben realizar otras mediciones. Si es que no se trata de empalmes de transición, o de un cambio de sección, etc. [17]

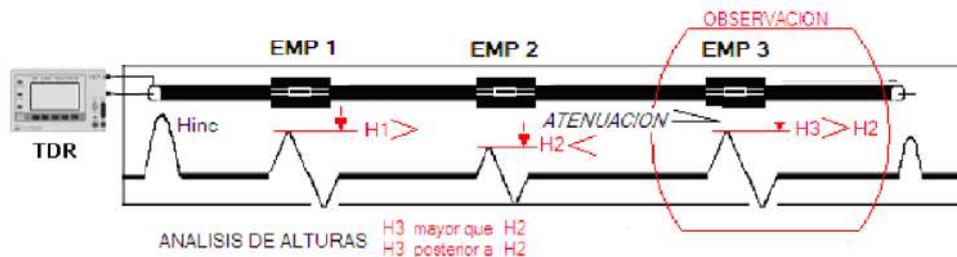


Figura 2.6.8 Ejemplo de un empalme que posee una altura gráfica mayor que su antecesor [17]

Análisis estadísticos han demostrado que aquellos empalmes que presentan una reflexión muy grande y fácilmente identificable en un reflectograma tienen una mayor probabilidad de falla que aquellos cuya reflexión es prácticamente imperceptible. [11]

2.6.1 REFLECTÓMETRO CONVENCIONAL MODELO 1401e - INDUCOR

El modelo 1401e es un reflectómetro TRD de la marca Inducor. Los factores que se deben tener en cuenta a la hora de realizar una medición con este TDR son:

- Velocidad de propagación de la onda sobre el cable: A partir de la medición del tiempo el equipo lo convierte en una distancia. Este valor de velocidad de propagación depende del tipo de aislación de cable y de su forma geométrica.
- Rango: Máxima longitud del cable que se puede ver en pantalla. Se debe escoger un rango que permita ver la totalidad de la longitud del cable. A su vez, mientras mayor sea el rango seleccionado con respecto a la longitud real del cable, menor será la definición del reflectograma obtenido.
- Ganancia: Ajuste de preferencia personal, aumenta la altura de las reflexiones que

se muestran en el display. Un aspecto importante a tener en cuenta sobre la ganancia es que es una cuestión de confort visual, no cambia la exactitud de la medición. Generalmente se utiliza para realizar varias mediciones sobre el mismo cable pero a distintas ganancias para obtener conclusiones de los cambios de altura de las ondas reflejadas.

- **Cursor:** Permite al operario conocer la distancia en metros desde los terminales conectores de la salida del TDR al punto de su interés. Dependiendo del modelo del equipo, se pueden fijar dos cursores para calcular la distancia entre esos dos puntos.
- **Zoom:** Permite inspeccionar con más detenimiento una zona fijando los cursores en una zona más precisa. Sin embargo, su uso ensancha la reflexión y pierde definición.[17]

La distancia a la falla el equipo la calcula de la siguiente manera:

$$L_x = \frac{1}{2} \cdot V_p \cdot (t_m - CEQ) \quad (2.5.1.1)$$

Siendo:

- L_x = Distancia a la falla [m]
- V_p = Velocidad de propagación [$\frac{m}{\mu s}$]
- t_m = Tiempo que separa a los cursores [μs]
- CEQ = Constante del equipo de medición [μs]. Hace referencia al largo del cable de salida del equipo.

En caso de no conocer la velocidad de propagación y no poder medir la misma sobre el cable bajo ensayo, se pueden utilizar los valores estimados de la siguiente tabla:

Tabla 2.6.1.1
VALORES ESTIMADOS DE VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN SEGÚN EL TIPO DE CABLE [14]

TIPO DE CABLE	Vp/2 (m/ μs)
Cables de Energía (aislación papel aceite)	80 – 86
Cables de Energía (aislación sintética EPR-XLP)	75 – 90
Líneas Aéreas (energía o comunicación)	146 – 148
Cables de telecomunicaciones	110 – 125
Cables de televisión	> 120

2.6.2 REFLECTÓMETRO CONVENCIONAL MODELO RC-200 - DAVNAR

Reflectómetro de la marca Davnar, posee 10 memorias donde registra el pulso incidente y el reflejado. Este equipo solicita al operador que identifique los puntos característicos del reflectograma tales como pie del pulso incidente y pie del pulso reflejado en la falla y presenta el resultado en metros en la pantalla. Estos puntos pueden ser decididos por el

equipo de forma automática. El equipo realiza el cálculo de distancia a la falla mediante la siguiente expresión:

$$L_x = \frac{V_f}{2} \cdot T_i \quad (2.6.2.1)$$

Siendo:

- L_x = Distancia a la falla [m]
- V_f = Velocidad de propagación [$\frac{m}{\mu s}$]
- T_i = Tiempo que separa al pulso incidente y el reflejado [μs]

A continuación se muestra un ejemplo de reflectograma de un cable con una fase fallada con este equipo en la Figura 2.6.2.1. [11]

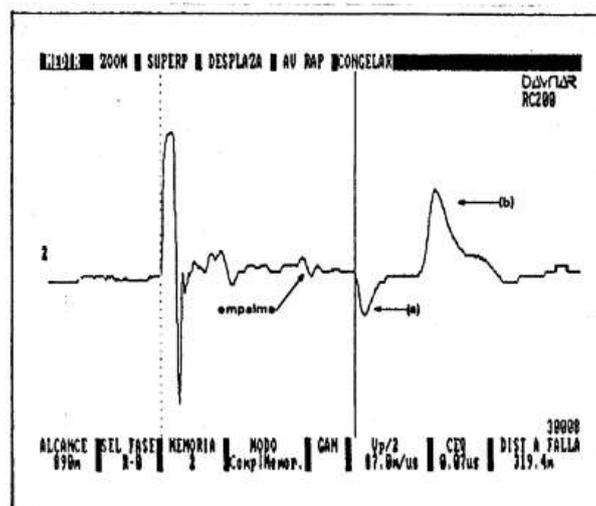


Figura 2.6.2.1 Ejemplo de reflectometría convencional con equipo RC-200 [11]

2.7 QUEMADO DE FALLA

El quemado de falla es uno de los primeros métodos creados para solucionar el problema de la reflectometría convencional de no poder identificar fallas de alta resistencia. El quemador se basa en un transformador con una elevada corriente de salida. Al circular esta corriente por la falla, modifica su característica y baja su resistencia.

El procedimiento se basa en aplicarle una tensión de prueba en aumento al cable hasta que la falla llegue a la ruptura, luego se inyecta una corriente que puede ser constante o en aumento disminuyendo la resistencia de falla del cable y reduciendo la tensión necesaria para la descomposición.



El método posee las siguientes dificultades:

- Al transformar la alta resistencia en una baja de la falla, modifica la característica lo que impide una futura medición y análisis de la falla.
- No permite realizar una puntualización exitosa, debido a la modificación de falla.
- No reduce la resistencia de falla en cables con aislaciones secas y puede producirle daños en tramos sanos del cable.
- El tiempo de localización es muy grande. [11]

2.8 REFLECTOMETRÍA DE ALTA TENSIÓN

De la misma forma que el quemado de falla, la reflectometría de alta tensión se basa en que una falla de alta resistencia se puede transformar en una de baja resistencia consiguiendo que se produzca un arco eléctrico en el lugar de la avería. Para ello, se inyecta al cable un impulso de alta tensión con la amplitud suficiente como para que se produzca una descarga disruptiva cuando este arribe al lugar de la falla.

En sus inicios poseía una baja frecuencia de repetición de las descargas de los generadores de onda de impulsos utilizados, lo que impedía tener una imagen permanente en la pantalla y con un alto grado de medición. Sin embargo, con la llegada de los convertidores digitales de alta velocidad, registradores de transitorios, ayudaron a la mejora de este método de medición.

A diferencia del método de quemado de falla, este método no modifica la característica de la falla. Es decir, que facilita la puntualización y el posterior estudio de la falla. Las ventajas del método de reflectometría de alta tensión son las siguientes:

- El operador se independiza de las características de la falla, el método es universal.
- Es un procedimiento veloz, basta con producir una descarga y registrar el transitorio con el reflectómetro de alta energía.
- No modifica la característica de la falla. [14]

A continuación se encuentran en las Figuras 2.8.1, 2.8.2 y 2.8.3, imágenes de mediciones realizadas por el equipo RCM-8000 de DAVNAR

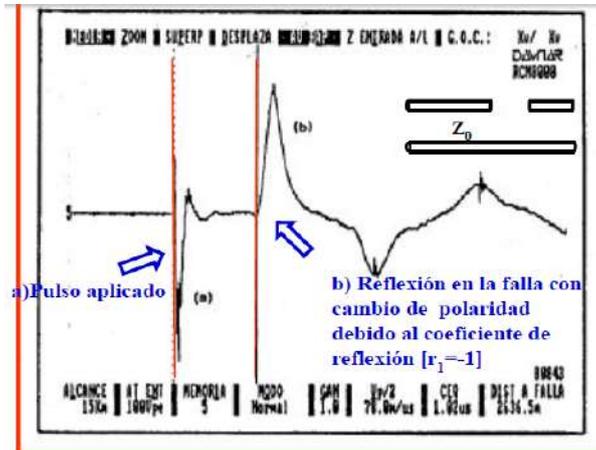


Figura 2.8.1 Reflectograma de un cable que presenta una de sus fases interrumpidas. [10]

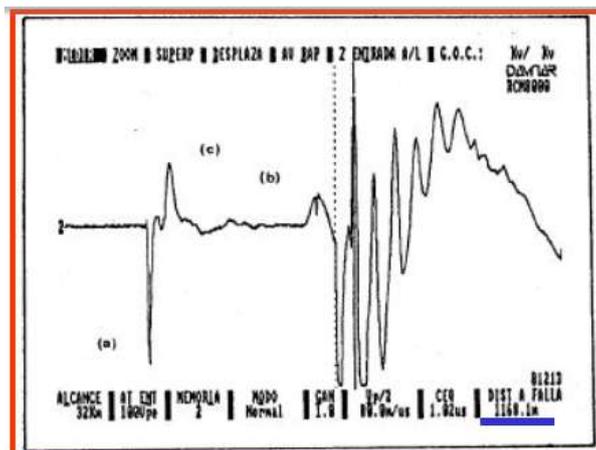


Figura 2.8.2 Reflectograma de un cable que presenta una falla de alta resistencia. [10]

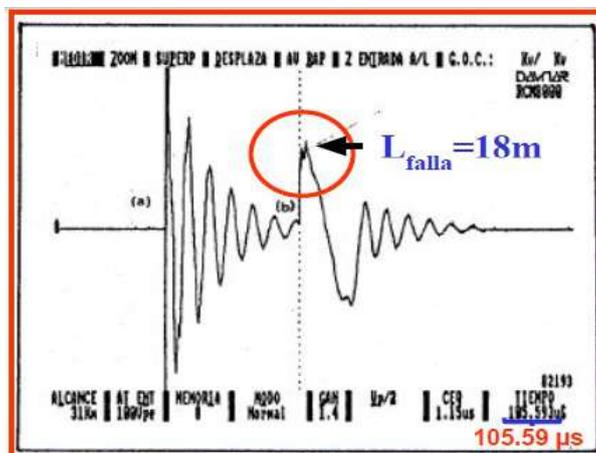


Figura 2.8.3 Reflectograma de un cable que presenta una falla con muy elevado tiempo de encendido [10]

2.8.1 GENERADOR DE IMPULSOS

Los equipos utilizados en la reflectometría de alta tensión son los generadores de impulsos. Los cuales están compuestos por una fuente de energía que carga a un capacitor, una llave que descarga la energía almacenada en el capacitor sobre el cable a ensayar y filtros de reflexión de arco. Su funcionamiento se basa en que una vez que el capacitor se encuentra cargado, un acercamiento del electrodo móvil hace que la energía almacenada en el capacitor se descargue en la fase a ensayar y un frente de onda viaja hacia la falla a la velocidad de propagación de frente de onda del cable. En la Figura 2.8.1.1 se encuentra el esquema conexionado del generador de impulsos y analizador. Mientras que en la Figura 2.8.1.2 se encuentra el diagrama en bloque del generador de impulso.

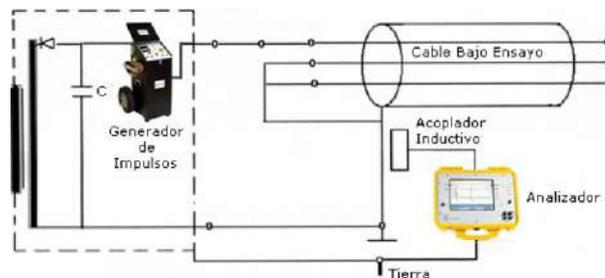


Figura 2.8.1.1 Conexión de generador de impulsos y analizador [14]

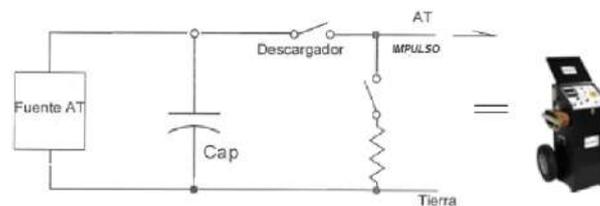


Figura 2.8.1.2 Diagrama en bloque del generador de impulso [14]

Cuando el impulso aplicado es mayor que la tensión de cebado de la falla, al llegar a ella se producirá un arco eléctrico que refleja la onda incidente al generador, de forma similar a lo que ocurre en la reflectometría estándar. Al regresar al generador, la onda reflejada se encontrará con una gran desadaptación, que producirá la reflexión total del pulso hacia la zona de falla. Pero la reflexión se encontrará con una baja impedancia (ya que el arco sigue encendido), produciendo una reflexión total.

La distancia a la falla se obtiene a partir de las múltiples reflexiones que ocurren después de que se produjo el encendido del arco de falla a partir de la siguiente ecuación:

$$X_f = \frac{1}{2} \cdot V_f \cdot T_i \quad (2.8.1.1)$$

Siendo:



- X_f = Distancia a la falla [m]
- V_f = Velocidad de propagación del pulso en cable [$\frac{m}{\mu s}$]
- T_i =Tiempo entre las múltiples reflexiones que sufre el pulso generado en la falla [μs]

Durante el funcionamiento del equipo, se debe aislar la sección del cable a ensayar. Ya que al cable se le inyecta una alta tensión y una corriente instantánea del orden de los miles de Amperes. Mientras se dispara al cable, el operario camina la ruta del cable buscando escuchar las descargas. Cuanto más Joule se le aplique al cable mayor será el ruido. Esta energía depende del tamaño del capacitor y de la tensión de ensayo.

El capacitor se encarga de almacenar la energía eléctrica que será descargada sobre el cable a ensayar, esta energía es función de la tensión a la cual se carga el capacitor. Cuanto mayor sea la longitud del cable, más alta será su capacitancia. Si la capacitancia del capacitor es menor a la capacitancia del cable, la falla no se descargará hasta que la capacitancia del cable esté completamente cargada. Pero si la capacitancia del cable es menor que la del capacitor, la falla se arqueará en el primer intento.

Un aspecto muy importante a tener en cuenta en los generadores de impulso, es la tensión a aplicar al cable a ensayar. Si la tensión es baja, la falla no se descompone, y no habrá ruido que permita identificar y ubicar con exactitud la falla. A su vez, si la tensión es muy elevada, el cable puede resultar dañado.

Para que el equipo pueda aplicar una tensión del orden de [kV] y pueda medir las señales que inciden y reflejan sobre el cable el equipo necesita filtros. Estos filtros poseen varias funciones, ellas son:

- Permiten al analizador “observar” a lo largo del cable mientras que es sometido a impulsos.
- No destruir el analizador en el proceso.
- Coordina que los pulsos de alta y baja tensión viajen por el cable.

Los filtros de reflexión de arco son del tipo inductivo y del tipo resistivo, ambos se colocan entre el generador de impulsos y el cable bajo ensayo. El filtro inductivo se encarga de extender el pulso en el tiempo, en vez de que sea espontaneo. De forma tal que el arco en la falla dura un mayor tiempo y puede reflejar más pulsos, aumentando la probabilidad de que las reflexiones sean capturadas. A su vez la inductancia de la bobina bloquea que los pulsos regresen al capacitor y se ponga en corto. Además limita la tensión aplicada al cable de forma tal que sea la mínima para descomponer la falla.

El segundo filtro (resistivo) tiene como ventajas un costo y tamaño menor que el anterior. Este filtro también bloquea los pulsos y cambia ligeramente el pulso del generador de pulsos, pero no es limitador de la tensión. En la Figura 2.8.1.3 se puede observar la ubicación de los filtros de reflexión de arco. [14]

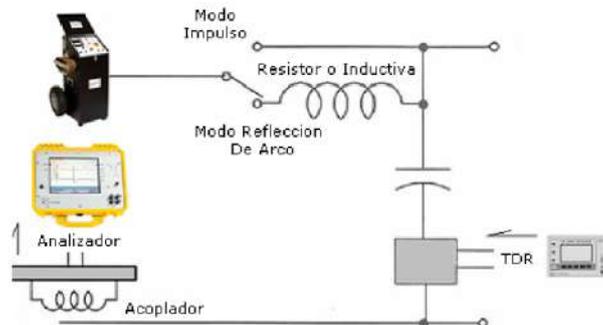


Figura 2.8.1.3 Ubicación de los filtros de reflexión de arco [14]

2.8.2 REFLECTOMETRIA DURANTE EL CEBADO DEL ARCO

La reflectometría durante el cebado del arco combina los beneficios de la reflectometría de alta energía y la reflectometría convencional. Método desarrollado por DAVNAR a partir de combinar el encendido de la falla a partir del método de reflectometría de alta energía, y la medición por comparación de reflectogramas obtenidos con pulsos de baja tensión sobre la misma fase antes y durante la descarga del arco. Este método surge por la necesidad de poder diferenciar las reflexiones de las derivaciones de las de la falla. Para ello el método más eficaz es el de comparar las fases buenas con la fase fallada encontrando la falla donde los reflectogramas se diferencian.

El reflectómetro que realiza mediciones durante el cebado del arco es el modelo RCM-8000 RDA (Figura 2.8.2.1). Cuenta con los beneficios de la reflectometría convencional en cables con fallas de alta resistencia o intermitentes y permite extender a los cables con múltiples derivaciones los principios generales de la reflectometría. A este equipo se le agrega el filtro de acoplamiento modelo FRDA-25 para cebar la falla, prelocalizando por comparación de reflectogramas obtenidos antes y durante el cebado del arco, con pulsos de baja tensión inyectados en el cable por intermedio del mismo filtro de acoplamiento.

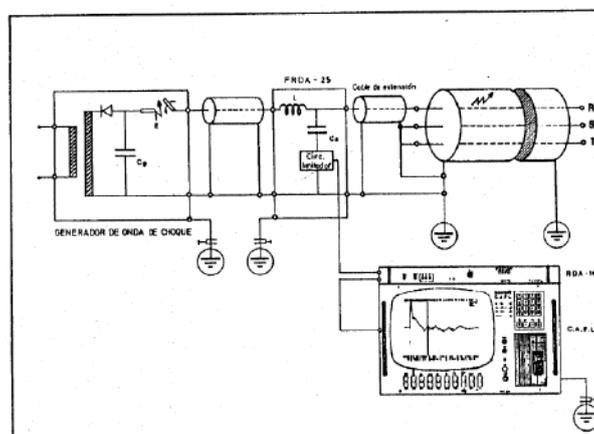


Figura 2.8.2.1 Esquema de conexión del método RDA. [11]

En la Figura 2.8.2.2 se puede observar a modo de ejemplo una reflectometría. Las ventajas de la reflectometría durante el cebado del arco son las siguientes:

- Es una medición rápida.
- El reflectograma es fácil interpretación.
- El reflectograma cuenta con referencias debidamente documentadas.
- Es aplicable a todo tipo de fallas.
- La exactitud de la medición depende de la exactitud del reflectómetro y no del generador de onda de choque. El error del reflectómetro es de 1% mientras que el del generador es entre 5% y 8%.
- No dificulta la puntualización de la falla.
- No modifica la característica de la falla, permitiendo su posterior estudio
- El método puede ser fácilmente adaptado a laboratorios móviles

La reflectometría durante el cebado del arco surgió como método para detectar fallas en media tensión, sin embargo es aplicable a cualquier tipo de red. Para baja tensión, se utilizan equipos de memorias múltiples. Un conjunto de memorias rápidas registra los reflectogramas correspondientes al cable en servicio y al precipitarse la falla otro conjunto de memorias graba la información asociada a las reflexiones producidas en el arco. La limitación que posee en baja tensión es la posibilidad o no de desconectar los usuarios limita las tensiones máximas a aplicar en el cable. Para este tipo de mediciones se utiliza el reflectómetro RCM-4000 BT y el reenergizador de estado sólido RES-6000 el cual se encarga de energizar el cable para producir el arco en el punto de la falla (Figura 2.8.2.3). El reenergizador alimenta el cable mientras el reflectómetro está conectado e interrumpe cuando aparece la corriente de falla, manteniendo así la característica inestable del arco para facilitar la localización puntual. [11]

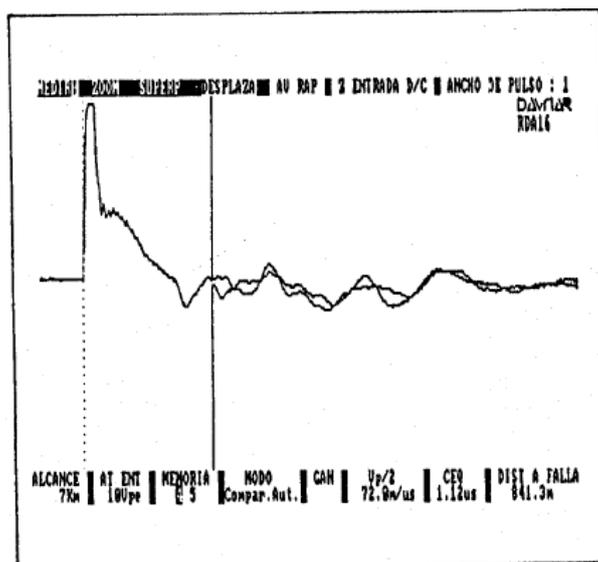


Figura 2.8.2.2 Reflectograma del método RDA [11]

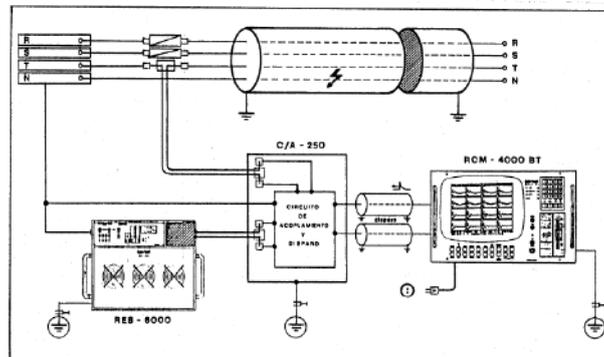


Figura 2.8.2.3 Esquema de conexión para la localización de fallas intermitentes en baja tensión [11]

2.9 DETECCIÓN ACÚSTICA

El método se basa en inyectar en cable bajo prueba señales acústicas y a partir de captadores (geófono) se capta las vibraciones producidas por la onda acústica que se genera cuando se ceba la falla. Caminando sobre la traza del cable se determina el lugar exacto donde debe hacerse la excavación para proceder a la reparación del cable. El lugar de la falla será el de máximo nivel sonoro. La detección acústica reduce la exposición del cable a altas tensiones.

En la figura 2.9.1, se encuentra un ejemplo de mediciones de un cable con falla. En la posición 1 se detecta la señal electromagnética producida por la descarga, pero todavía no se ha detectado sonido ya que se encuentra fuera de rango. En la posición 2 se detecta un sonido débil, a medida que más se acerque a la falla mayor será el sonido. Entonces en la posición 3 se detecta un sonido fuerte y un diferencial de tiempo más corto. Por último, en la posición 4 se detecta que el volumen disminuyó. Lo que significa que se está alejando el geófono de la falla. La posición de la falla es la posición 3. [17]

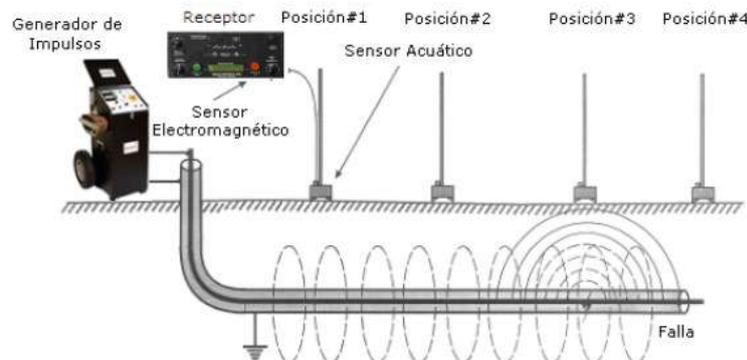


Figura 2.9.1 Medición acústica de un cable subterráneo con falla con un geófono. [17]

Es fundamental tener en cuenta que la detección acústica requiere la presencia de una



descarga audible para poder ser puntual y precisa. En este sentido, es crucial señalar que alcanzar esta condición puede resultar desafiante, especialmente cuando nos enfrentamos a fallas en cables de muy baja resistencia, y aún más en cables sin armadura. La falta de una descarga audible adecuada puede dificultar significativamente el proceso de detección, lo que destaca la importancia de considerar otras técnicas complementarias en tales casos. Por ello, se debe aclarar que el método de detección acústica no es útil para todos los tipos de fallas. Si bien puede ser una herramienta valiosa en muchos escenarios, su aplicabilidad puede verse comprometida en situaciones específicas, como aquellas donde la descarga audible es difícil de obtener. Por lo tanto, es necesario evaluar cuidadosamente las condiciones y características de cada sistema eléctrico antes de determinar la idoneidad de este enfoque de detección.

2.10 ONDA DE CHOQUE Y DETECCIÓN ACÚSTICA – CENTRIX SEBAKMT

En este caso, los pulsos no serán mayores a 1 [kV]. A partir de la inyección de una tensión que debe ser permitida según los parámetros del cable y no mayor a $4/3$ de la tensión disruptiva determinada en la prueba de CC. A partir de la sobreintensidad inyectada, se fuerza un contorneo de fallo regular y configurable que crea un ruido en el lugar del fallo. Mediante de dispositivos que detecten las intensidades sonoras, se obtiene la ubicación de la falla. [18]

2.11 INYECCIÓN DE AUDIO FRECUENCIA – CENTRIX SEBAKMT

El uso principal del generador de audio frecuencia es la localización exacta de fallos de cables poco resistivos. Además, se puede usar para localizar el trayecto del cable como se mencionó en el apartado de seguimiento de trazas. Para ello el generador de audio frecuencia transmite de forma continua una señal con características específicas al cable sujeto a prueba, señal que se puede localizar con un receptor adecuado. [18]

2.12 DESACOPAMIENTO DE VOLTAJE (DECAY) – TELEFLEX SX-1 MEGGER

El método Decay del equipo Teleflex Sx-1 de la marca Megger, se utiliza para prelocalizar fallas de cable de alta resistencia con un voltaje de alta frecuencia en cables. Para esto, el cable se carga con un voltaje de corriente continua (CC) hasta que excede el voltaje de ruptura de la falla. La energía almacenada en la capacitancia del cable se descarga a través de la falla y genera una onda viajera, que es registrada y mostrada por el Teleflex SX-1 como una oscilación atenuada. El período de esta oscilación se puede usar para determinar la distancia real de la falla.

El procedimiento para prelocalizar una falla de cable utilizando el método Decay es el siguiente:



1. En el submenú, active el elemento del menú correspondiente para activar el modo de operación.
2. En el menú de selección de fase, seleccione la fase del objeto de prueba conectada a través del cable de conexión HV al sistema de ubicación de fallas, y luego cierre el menú inclinándolo el codificador giratorio hacia un lado.
3. Use el elemento del menú o NVP para configurar la velocidad de propagación y luego use el elemento del menú para establecer el rango de medición a aproximadamente cinco a diez veces la longitud completa del cable.
4. Configure el Teleflex SX-1 en estado de preparación para la grabación utilizando el elemento del menú correspondiente.
5. Presione el botón "HV ON" en el SPG 40 o en la unidad de operación separada. Inicie el sistema de ubicación de fallas y habilite la activación de HV (con la conexión a tierra de la salida de HV desactivada).
6. Ajuste el voltaje, teniendo en cuenta el voltaje de ignición requerido. En el sistema de ubicación de fallas, aumente el voltaje lenta y constantemente hasta que ocurra una ruptura de voltaje.

Si el cable defectuoso se carga hasta el voltaje de ruptura, la pantalla muestra una curva de voltaje atenuada y oscilante. El software intenta automáticamente identificar un período de la oscilación y establecer las marcas correspondientes.

El procedimiento detallado continúa de la siguiente manera:

7. Apague el alto voltaje utilizando el elemento del menú correspondiente. Detenga la medición utilizando el elemento del menú correspondiente y solo entonces apague el alto voltaje en el sistema de ubicación de fallas.
8. Si la curva de decaimiento registrada está superpuesta en exceso por señales de interferencia, use los ajustes de filtro disponibles para suavizar la curva. Las amplitudes demasiadas altas se pueden contrarrestar reduciendo la ganancia. Cada vez que se realice un ajuste, el procedimiento debe repetirse desde el Paso 4.
9. Si las marcas establecidas automáticamente no encierran un período exactamente, se puede usar la función correspondiente para corregir sus posiciones. Lea la distancia entre las dos marcas directamente al lado de la marca roja. Dado que la longitud mostrada ya corresponde a la mitad de la distancia de un período, solo es necesario restar la longitud del cable de conexión para determinar la distancia de la falla. [19]

2.13 DESACOPLAMIENTO DE CORRIENTE (ICE) – TELEFLEX SX-1 MEGGER

La prelocalización utilizando el método de desacoplamiento de corriente (ICE) es particularmente efectiva para fallas en el rango de [kΩ] bajos y para distancias de falla extremadamente grandes.

Mediante el generador de ondas de choque se genera una descarga disruptiva en el punto



que se encuentra el defecto. Esto genera una onda transitoria atenuada que se desplaza de ida y vuelta varias veces entre la falla y el generador de ondas de choque. El desacoplamiento de la corriente permite al Teleflex SX-1 mostrar una oscilación, con un período equivalente a la distancia de la falla.

Para localizar una falla en el cable utilizando el método ICE con el equipo Teleflex Sx-1 Megger, se deben seguir los siguientes pasos:

1. En el modo de control remoto SPG 40, active el elemento de menú correspondiente en el submenú.
2. En el menú de selección de fase, seleccione la fase del objeto de prueba conectada a través del cable de conexión HV al sistema de localización de fallas, y luego cierre el menú inclinándolo el codificador rotatorio hacia un lado.
3. Configure el rango de voltaje requerido. Inicie el sistema de localización de fallas y habilite el HV para ser encendido (desactivación de la conexión a tierra de la salida HV).
4. Utilice el elemento de menú o NVP para configurar la velocidad de propagación y luego use el elemento de menú para configurar el rango de medición a aproximadamente cinco a diez veces la longitud completa del cable.
5. Coloque el Teleflex SX-1 en estado de preparación para grabación utilizando el elemento de menú correspondiente.
6. Presione el botón "HV ON" en el SPG 40 o en la unidad de operación separada. [19]

2.14 MÉTODO DE CAÍDA DE TENSIÓN

La implementación del método de Caída de Tensión es eficaz para localizar averías en líneas de baja tensión con múltiples derivaciones y con valores bajos de resistencia de falla. El análisis del tipo de falla y la cantidad de derivaciones en la línea principal juega un papel crucial en el proceso de detección.

El método consiste en hacer circular una corriente constante a través del conductor con la falla y medir la caída de tensión parcial en el mismo a través de las cajas de toma de las conexiones domiciliarias. Esta técnica permite identificar con precisión la ubicación de la falla, incluso en escenarios complejos con múltiples derivaciones.

La precisión en la localización de la falla mediante el método de Caída de Tensión está directamente influenciada por el número de derivaciones en la línea principal, la resistencia de la falla y la experiencia del operador. Este método es especialmente útil en situaciones donde no se obtiene una reflectometría TDR (reflectometría de dominio en el tiempo) clara que permita identificar la ubicación de la falla, y donde tampoco es posible detectar una descarga en el cable mediante métodos tradicionales de descargas puntuales. [15]

2.15 MÉTODO DE TENSIÓN DE PASO

El método de tensión de paso se basa en medir el gradiente de tensión generador por la corriente de medición en el punto de la falla de un cable subterráneo. La falla provoca que la corriente inyectada fluya hacia el suelo pudiéndose medir la misma con varillas a tierra y localizadores de falla.

El procedimiento consiste en inyectar pulsos de CC sobre el cable a ensayar. La corriente fluirá desde la ubicación de la falla al suelo, generando gradientes de tensión alrededor de la avería. Entonces se mide la tensión de paso de la superficie a partir de las varillas, la cual (a distancias iguales) aumenta a medida que se acerca a la posición de la avería. Cambia de polaridad directamente por encima del lugar de la falla y disminuye con polaridad inversa cuando se aleja de la falla.

A continuación se explicarán dos ejemplos de equipos y para que caso se usa cada uno:

- **ESG NT – MEGGER**

Equipo utilizado para detectar averías en cables sin armadura (Figura 2.15.1). Su limitación radica en que si tuviera armadura la onda de choque descargaría contra la armadura y no volvería por la tierra. El equipo posee calibración automática de cero, se adapta automáticamente al nivel de la tensión de entrada debido a que posee una detección automática del pulso. Factor que además le permite trabajar con cualquier tipo de generador de pulsos. [20]

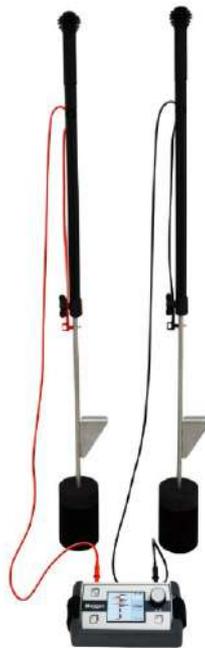


Figura 2.15.1 Localizador de fallas en cubiertas ESG NT Megger [20]

- **SHIRLA Y PROTAC – BAUR**

El equipo Shirla (Figura 2.15.2) se encarga de ensayar la cubierta de los cables, mientras que el equipo Protac (Figura 2.15.3) es el equipo a detectar la tensión de paso existente entre las varillas. El conjunto se encarga de detectar daños en la cubierta de los cables, a diferencia del equipo de Megger, el cable a ensayar puede ser armado.

Un aspecto a tener en cuenta es que si se desea buscar fallas en la cubierta, primero se debe asegurar que las fases estén óptimas de aislación, sino la descarga se producirá entre pantalla y fase y no se podría detectar ningún defecto.

Este método se utiliza para encontrar defectos en la cubierta y repararlos antes de que ingrese agua al cable y dañe su aislación. Si bien un cable con la cubierta dañada puede encontrarse perfectamente en estado operativo, su vida útil disminuirá debido a posibles ingresos de agua. [21]

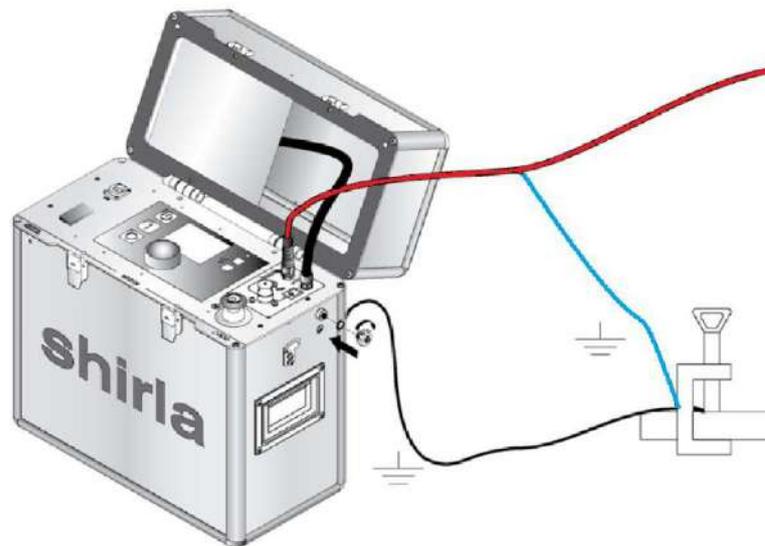


Figura 2.15.2 Ilustración de equipo Shirla Baur [21]



Figura 2.15.3 Ilustración de equipo Protac Baur [21]

Los dos equipos son similares, la diferencia que existe entre ellos radica en que tipo de falla pueden medir a partir de cómo se conectan. Si se busca fallas en la aislación, se levanta potencial en la fase de falla con respecto a tierra. Para este caso el cable no debe tener armadura y la pantalla no debe estar a tierra. El segundo equipo, que busca daños en la cubierta del cable, debe tener conectada a tierra todas las fases e inyecta potencial a la pantalla o a la armadura con respecto a tierra.



CAPITULO 3: SIMULACIÓN DE FALLAS EN PROGRAMA PSCAD

3.1 INTRODUCCIÓN

En el campo de la localización de fallas de cables eléctricos subterráneos, se han desarrollado diversas herramientas y metodologías, entre las cuales los programas de simulación desempeñan un papel fundamental. En este contexto, el programa PSCAD emerge como una poderosa herramienta que ofrece un entorno de simulación flexible y preciso para el análisis de sistemas eléctricos de potencia.

Este capítulo tiene como objetivo proporcionar una comprensión detallada del funcionamiento del programa PSCAD en el contexto específico de la localización de fallas en cables subterráneos de baja tensión. Se explorarán sus características principales, su aplicación práctica y su relevancia para la ingeniería eléctrica moderna.

A lo largo de este capítulo, se presentará un análisis del proceso de simulación en PSCAD, desde la configuración inicial del modelo hasta la interpretación de los resultados finales. Se simularán los distintos casos de fallas típicos en una falla de cable subterráneo de baja tensión. Se destacará la importancia de esta herramienta en la identificación y corrección eficiente de fallas.

3.2 ENTORNO DE TRABAJO PSCAD

El programa PSCAD es una interfaz gráfica poderosa y flexible para el motor de simulación de transitorios electromagnéticos (EMTDC), de renombre mundial. PSCAD permite al usuario construir esquemáticamente un circuito, ejecutar una simulación, analizar los resultados y gestionar los datos en un entorno gráfico completamente integrado. También se incluyen funciones de trazado en línea, controles y medidores, lo que permite al usuario alterar los parámetros del sistema durante la ejecución de una simulación y así ver los efectos mientras la simulación está en progreso.

PSCAD posee una biblioteca de modelos de simulación preprogramados y probados, que van desde elementos pasivos simples y funciones de control, hasta modelos más complejos, como máquinas eléctricas, líneas de transmisión y cables. Si un modelo requerido no existe, PSCAD proporciona vías para construir modelos personalizados. Por ejemplo, los modelos personalizados pueden construirse ensamblando modelos existentes para formar un módulo, o construyendo modelos rudimentarios desde cero en un entorno de diseño flexible. [22]

Existen muchas versiones del programa, pagas, estudiantiles, gratuitas, etc. Lo que cambia entre las distintas versiones es la libertad de trabajo sobre el programa. Para el desarrollo

de este trabajo, se utilizó una licencia estudiantil cortesía de Manitoba Hydro International.

A continuación se realizará un punteo de cómo realizar un proyecto.

- I. Para comenzar a trabajar en el programa se genera un nuevo proyecto siguiendo el procedimiento de las Figuras 3.2.1, 3.2.2 y 3.2.3.

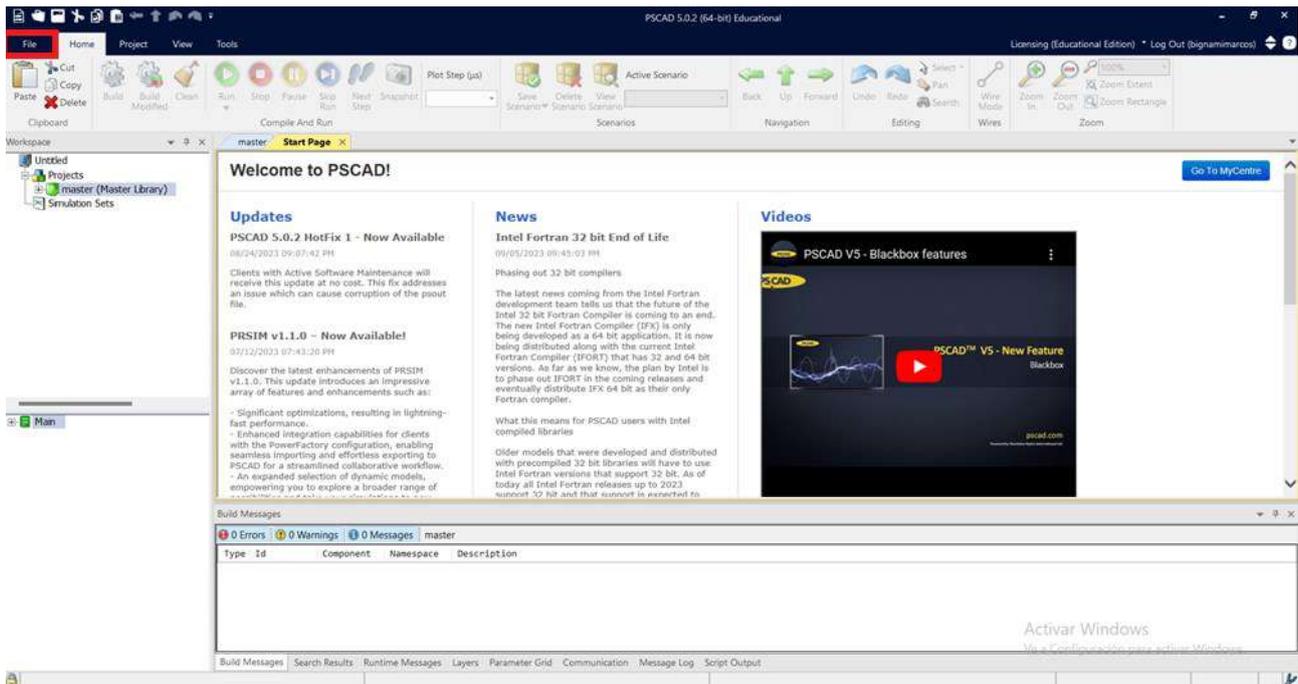


Figura 3.2.1. Inicio de programa PSCAD



Figura 3.2.2. Creación de espacio de trabajo

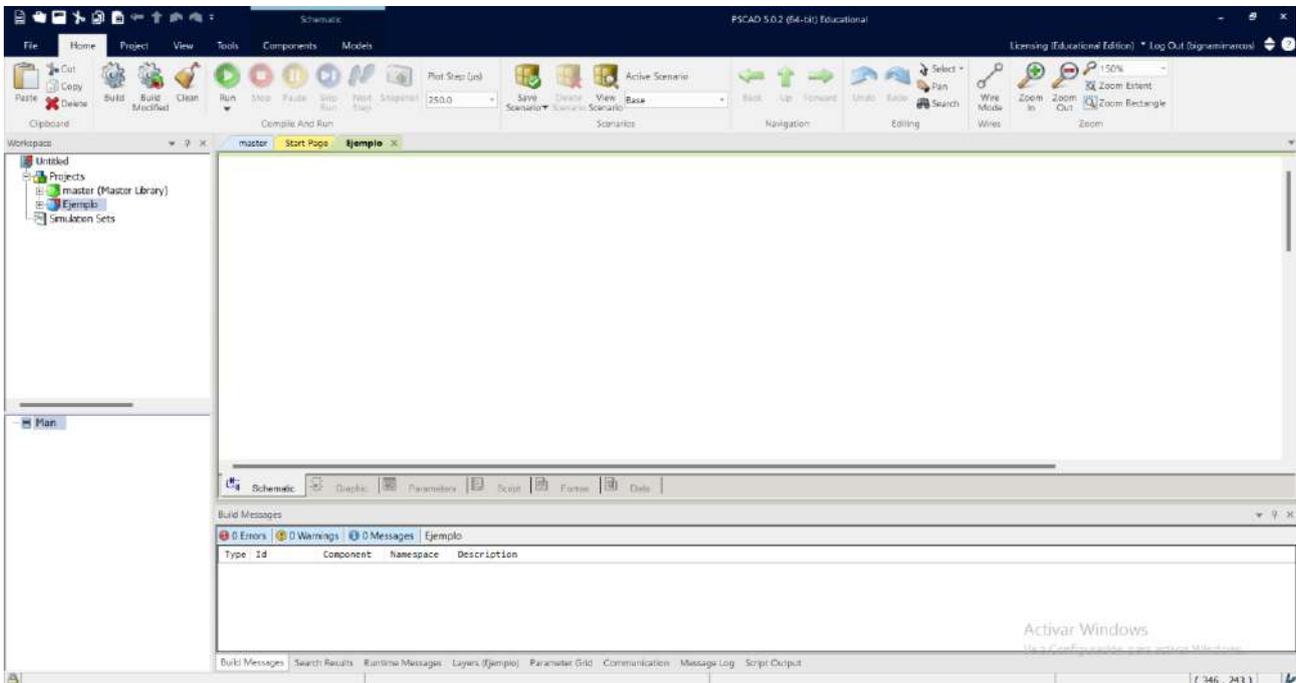


Figura 3.2.3. Espacio de trabajo del Ejemplo

Se realizará el modelo base del cual partirán posteriormente los distintos modelos a simular. Se realizará un sistema trifásico el cual estará compuesto por tres cables unipolares que serán alimentados por una fuente de pulso cuadrado para simular el método de reflectometría.

- II. Para agregar los cables al espacio de trabajo se debe ir a la librería “master” e ingresar a la carpeta “Cables”. Figura 3.2.4

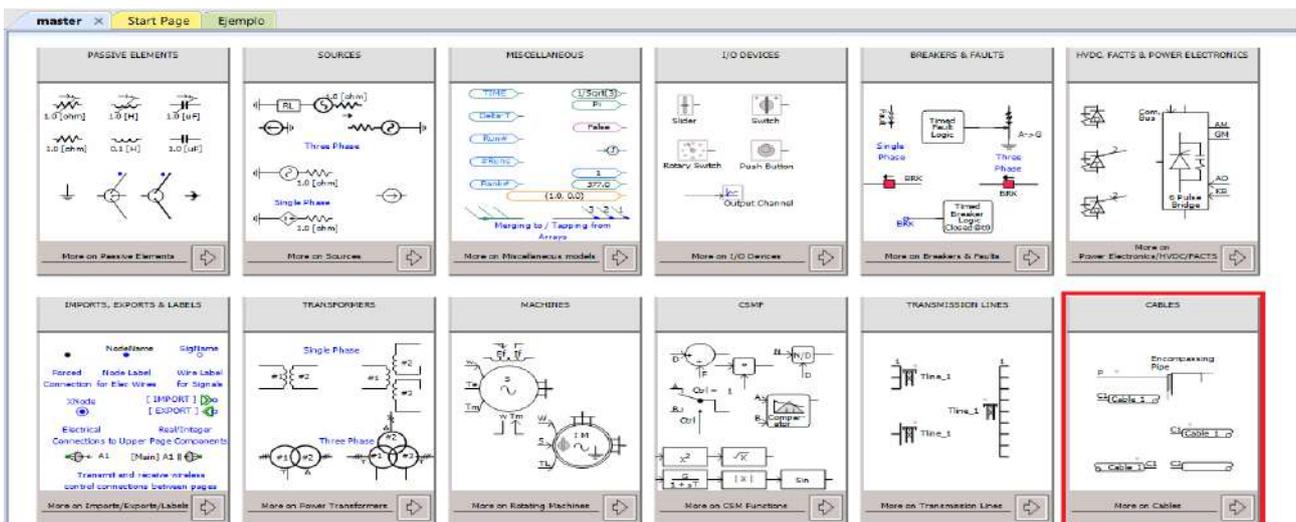


Figura 3.2.4. Librería “Master”

III. Luego de ingresar a la carpeta de “Cables” haciendo doble click sobre la flecha de “More of Cables”. En esta nueva ventana, el entorno del programa explica como incorporar al espacio de trabajo activo un cable y darle valores a sus características. Siguiendo las Figuras 3.2.5, 3.2.6 y 3.2.7.

STEP 1 - CREATE A CABLE CONFIGURATION COMPONENT INTO YOUR CIRCUIT.
(Use right click "Component Wizard..." and then select "Cable")

- Enter a name. Name must be unique to this simulation project.
- Select "Edit Parameters..." and enter Line length and steady state frequency.

DO NOT COPY DIRECTLY INTO ANOTHER PROJECT.

CREATE A CABLE AS DESCRIBED.

STEP 2 - COPY THIS CABLE INTERFACE COMPONENT INTO YOUR CIRCUIT
(or use right click menu -> Add Component) Cable Interface)

Edit Parameters:

- Enter a Cable Name (the name must be unique in the simulation and must match the name given in cable configuration).
- Enter the # of Cables coupled in one model (1-9).
- Enter the Electrical Connections for Each Cable (Conductor Sheath, Armour)
- Copy this component to the receiving end of the cable electrical system.



STEP 3 - OPEN THE CABLE CONFIGURATION
(Right click - edit definition...)

STEP 4 - SELECT A TRANSMISSION MODEL AND OPTIONS

- Only one of the following must be copied to the cable module. Default transmission model would be created automatically. If the default model is not the desired one, then remove the default model and select one of the transmission models.
- (Right click menu) "Select Transmission Model"

Bergeron Model Options

Travel Time Interpolation: On
Reflections Line (e Infinite Length): Yes

Frequency Dependent (Phase) Model Options

Travel Time Interpolation: On
Curve Fitting Starting Frequency: 0.02 [Hz]
Curve Fitting End Frequency: 1.0E6 [Hz]
Total Number of Frequency Increments: 100
Maximum Order of Fitting for Yc: 20
Maximum Fitting Error for Yc: 0.2 [%]
Max. Order per Entry City for Prop. Funcs.: 20
Maximum Fitting Error for Prop. Funcs.: 0.2 [%]
DC Correction: Disabled
Temperature checking: Disabled
Passivity Enforcement: Disabled

The Bergeron Model is a very simple, constant frequency model based on travelling waves.

It is useful for studies whenever it is important to get the correct steady state impedance/admittance of the line or cables, but should not be used where the transient or harmonic behaviour is important.

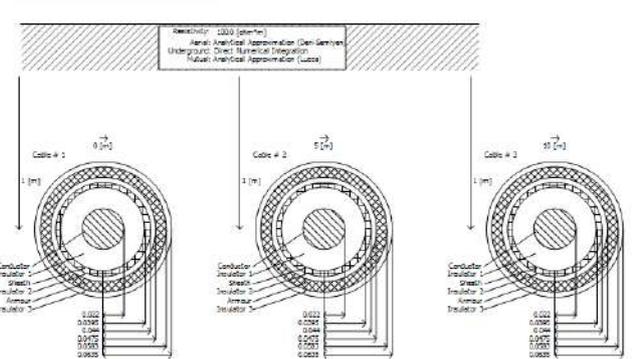
The Full Order (Shaw) Model (Improved Line Model) is a frequency dependent transmission line model based on travelling waves. It is the most advanced time domain model available as it represents the full frequency dependence of all line parameters. This model accurately considers the effect of a frequency dependent transform.

It is useful for studies whenever the transient or harmonic behaviour of the line or cable is important.

Figura 3.2.5. Pasos de cómo crear un cable en el espacio de trabajo

STEP 5 - CABLE DATA ENTRY

- Edit parameters of the Ground Component
- Add Cable Construction, impedance and wire parameters.



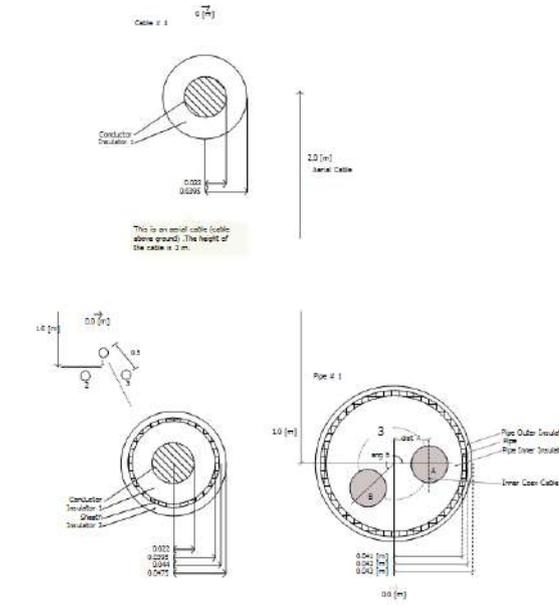
This is a three cable system with flat configuration (the distance between two adjacent cables is 5m). Each cable is modelled with a single-core cable with a steel centre conductor. Data is required for the Conductor, Sheath, Armour and Insulation Layers 1-3.

Note: Remember to enter Cable Number information for each cable. The numbering is shown on the cable graphs (Cable #1-#3) corresponds to the numbering in the connections to the electrical circuit.

Note: The cable interface should match the cable configuration.

Summary:

- On the cable interface, the number of cable cables should be 3, since there are three cables. The Layer Configuration of each cable is (C1) (C1) (C1) (C1) (C1). There are three conductors (c1, conductor), (c2, sheath), (c3, armour) and three insulation layers (1, 2, 3). Hence the "external electrical connection" for each cable cable in the cable interface should be: "conductor/sheath/armour" (assume "Conductor Layer Elimination" option is set to "None").
- If the "Conductor Layer Elimination" option is set to "Automated only", then the "external conducting layer (armour)" is eliminated, so the "external electrical connection" of cable interface should be modified as "conductor/sheath".
- Based on "Conductor Layer Elimination" or "Steel cross-bonding" (where steel) is automatically eliminated, the interface should be accordingly changed (see help for more details).
- If the Layer Configuration of each cable is (C1) (C1) (C1) (C1) (C1) then armour (C3) is connected to the ground (c3/armour) and hence automatically eliminated. Hence "external electrical connection" is "conductor/sheath". Also if the Layer Configuration of each cable is (C1) (C1) (C1) the "external electrical connection" is just "conductor".



This is an aerial cable (cable above ground). The height of the cable is 3m.

Simplified cable model

This simplified cable user interface is aimed to model an underground cable system. In this cable, five cables are (shown below in flat or ladder configuration) along a single cable (duct). The typical values of material data are also provided.

3 Cables in a pipe buried at a depth of 10m. Data is required for the cable outer and inner insulation of the pipe in addition to the data of individual cables inside the pipe.

Figura 3.2.6 Paso 5 de cómo crear un cable en el espacio de trabajo

STEP 6 - VERIFY TRANSMISSION LINE MODEL

- Left-click the transmission line definition page and select "solve constants"
- View the LOG page (see bottom of the definition page) to see any error/warning message
- View the OUTPUT page to see the RIB data

NOTE

Per-UNIT output of the RIB values in the output file is based on 100 MVA 230kV base. This base value could be changed by adding "Additional Options" component in the Cable Configuration subpage.

Additional Options	
<u>Output File Display Settings:</u>	
Frequency for Calculations	60.0 [Hz]
Display Zero Tolerances	1.0E-10
Rated System Voltage (L-L RMS)	230 [kV]
Rated System MVA	100 [MVA]
<u>Miscellaneous:</u>	
Create 95-Section Component?	No

Figura 3.2.7 Paso 6 de cómo crear un cable en el espacio de trabajo

- IV. Siguiendo el paso 1 se creó el Cable denominado "AAA", luego se sigue el paso 2 para crear los conductores. Figura 3.2.8 y 3.2.9.

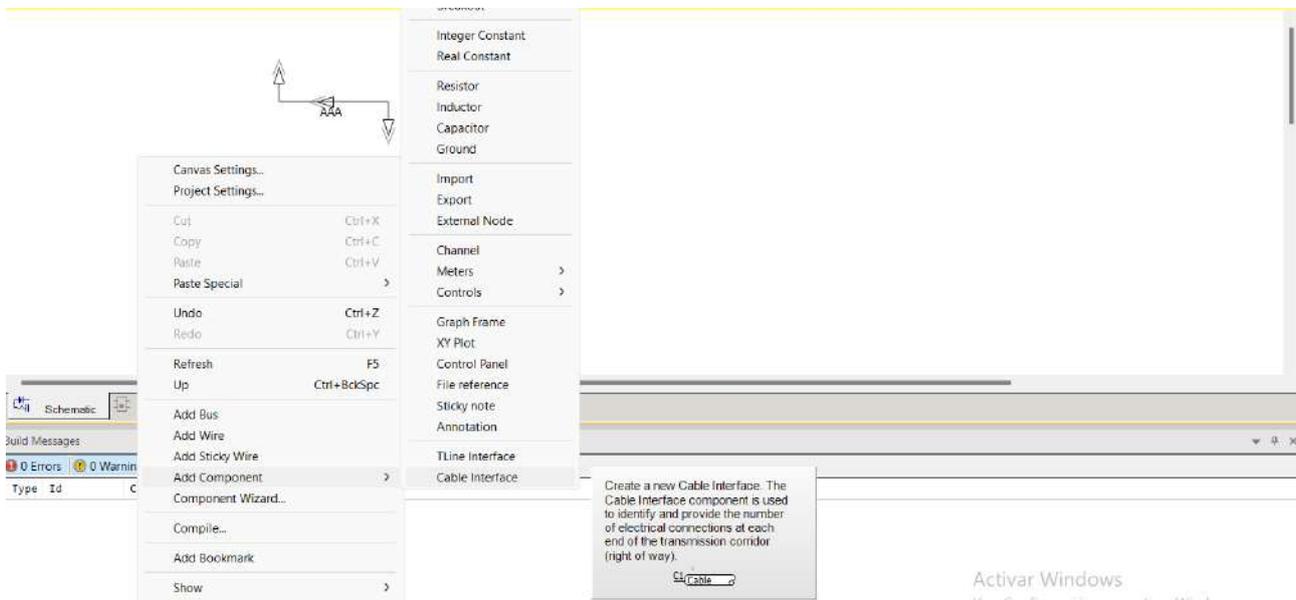


Figura 3.2.8 Creación de interface del cable

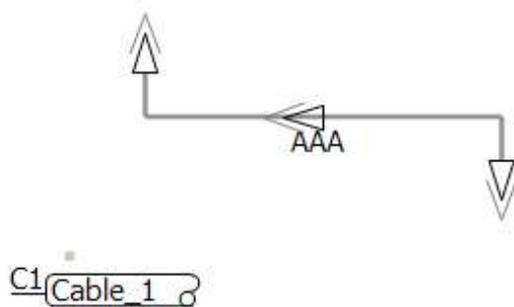
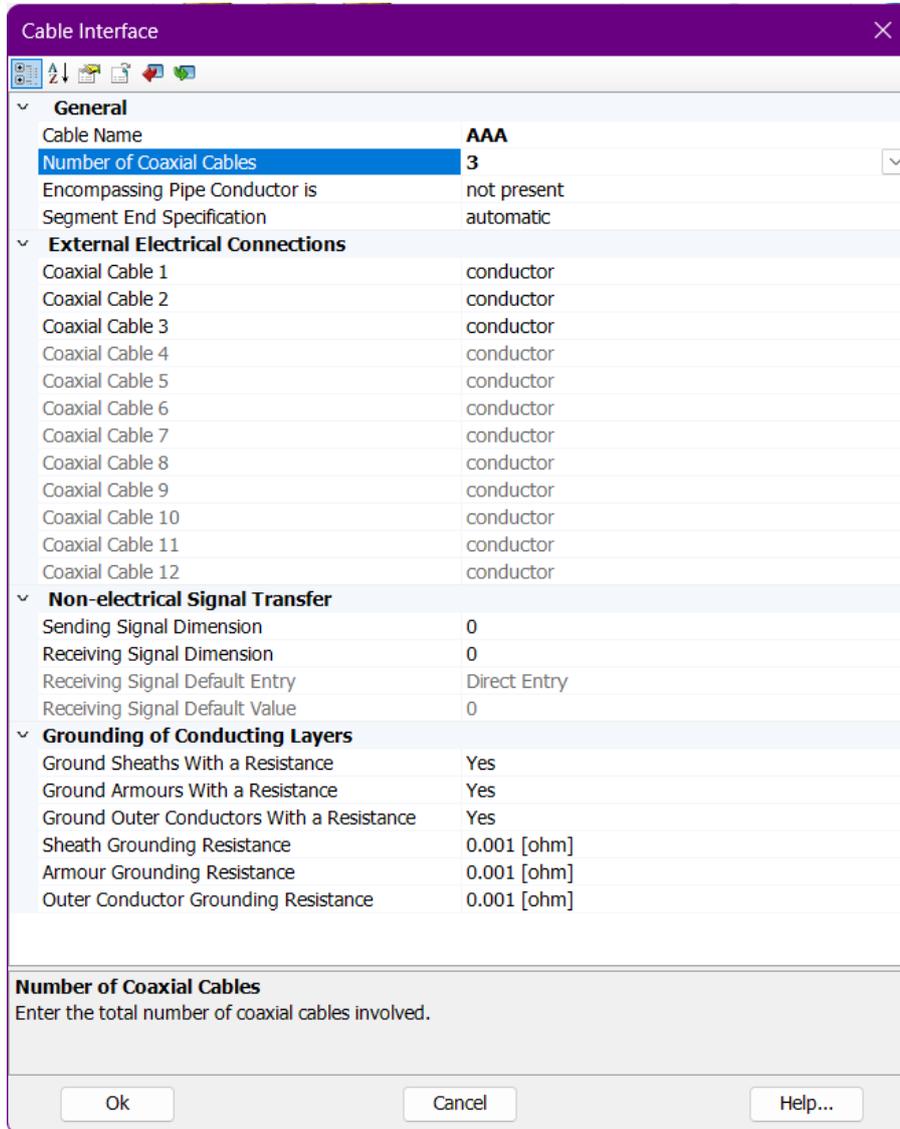


Figura 3.2.9 Interface de cable creado

- V. Lo que prosigue es asignarle al interface de cable creado la identidad del cable AAA. Para ello se selecciona la interface del cable creado y se realiza click derecho sobre

el mismo y se escoge del menú desplegable “Edit parameters”, lo que abre las siguientes opciones (Figura 3.2.10):



The screenshot shows a dialog box titled "Cable Interface" with a purple header and a close button. It contains several sections of parameters:

- General**
 - Cable Name: AAA
 - Number of Coaxial Cables: 3
 - Encompassing Pipe Conductor is: not present
 - Segment End Specification: automatic
- External Electrical Connections**
 - Coaxial Cable 1 to 12: All set to "conductor".
- Non-electrical Signal Transfer**
 - Sending Signal Dimension: 0
 - Receiving Signal Dimension: 0
 - Receiving Signal Default Entry: Direct Entry
 - Receiving Signal Default Value: 0
- Grounding of Conducting Layers**
 - Ground Sheaths With a Resistance: Yes
 - Ground Armours With a Resistance: Yes
 - Ground Outer Conductors With a Resistance: Yes
 - Sheath Grounding Resistance: 0.001 [ohm]
 - Armour Grounding Resistance: 0.001 [ohm]
 - Outer Conductor Grounding Resistance: 0.001 [ohm]

At the bottom, there is a section for "Number of Coaxial Cables" with the instruction "Enter the total number of coaxial cables involved." and three buttons: "Ok", "Cancel", and "Help..."

Figura 3.2.10 Parámetros editables del interface del cable

Como se observa en la figura anterior, se asignó como nombre del cable el mismo que el del cable creado en el paso 1 (AAA), se agregaron dos cables más y se especificó que los tres cables son conductores. Figura 3.2.11.

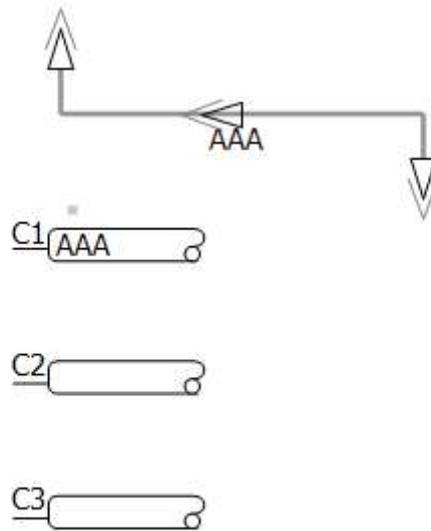


Figura 3.2.11 Interface asignado al cable AAA.

- VI. Haciendo click derecho sobre el cable AAA y desde el menú desplegable seleccionar “Edit parameters”, se accede a las siguientes opciones, se ajusta la frecuencia a 50 [Hz] y se le da la longitud de 50 [m].

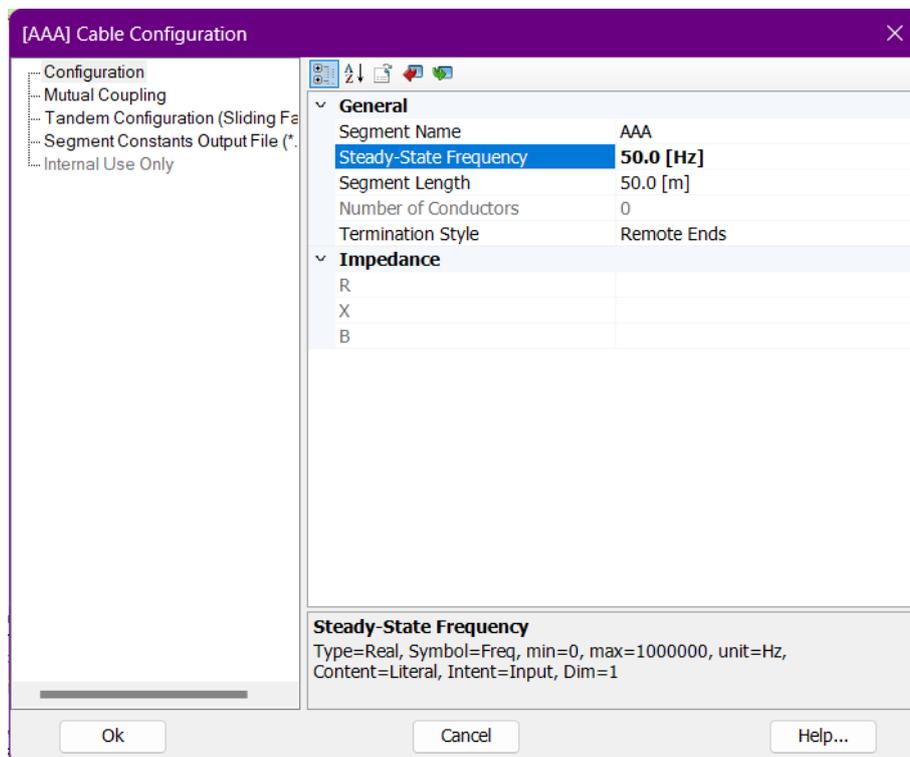


Figura 3.2.12 Parámetros editables del cable AAA

- VII. Haciendo click derecho sobre el cable AAA y desde el menú desplegable seleccionar “Edit Definition” se accede a la siguiente sección en la que se agregan las características del cable AAA.

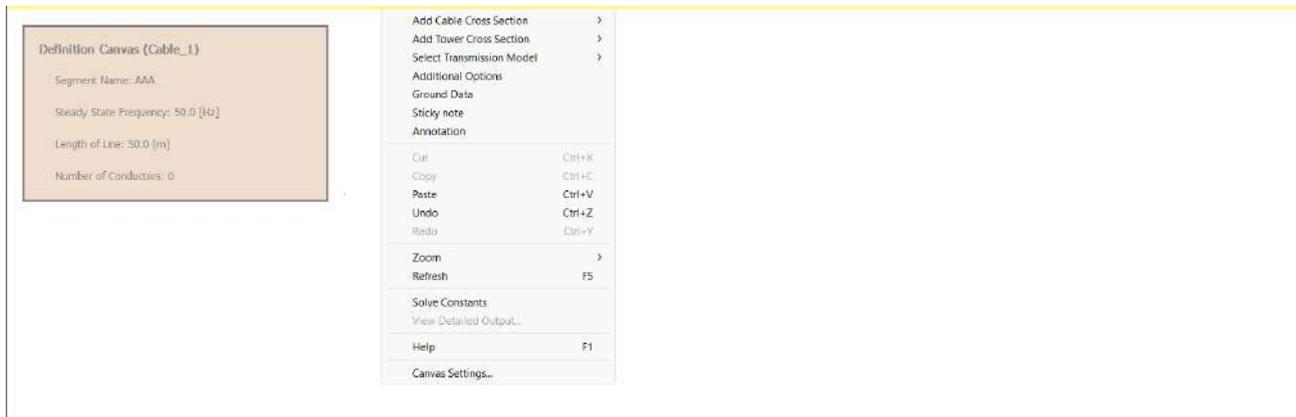


Figura 3.2.13 Edit Definition del Cable AAA

Haciendo click derecho sobre el espacio de trabajo se obtienen las siguientes características para agregar:

- **Add Cable Cross Section:** Se escoge el tipo de cable a utilizar. Se puede agregar Coax Cable, Pipe – Type Cable o Simplified Cable. En la figura 3.2.6 se encuentran explicadas las diferencias de los tres cables. Para este caso se utilizará Coax Cable. Se agrega la misma cantidad de cables como fases se vayan a utilizar en el cable como se puede observar en la Figura 3.2.15. En la Figura 3.2.14 se observan las características de cada cable, se escogió una profundidad de 1 [m] de enterrado del cable. Como se posee solamente un conductor con aislación se escoge Layer configuration C1 | I1. Respecto a Horizontal translation from centre para el primer cable se escoge una distancia igual a 0 [m], pero para el segundo cable se escoge 0,2 [m] y para el tercero 0,4 [m]. Figura 3.2.14.

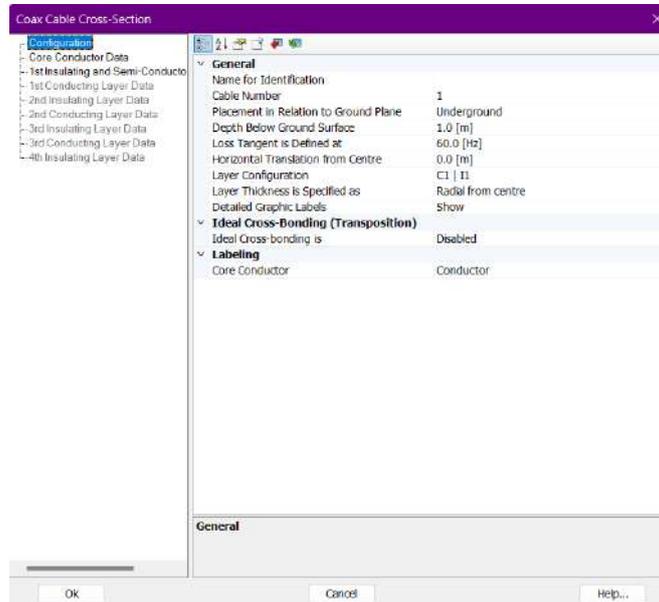


Figura 3.2.14 Características de cada cable

- **Select Transmission Model:** Se escoge el modelo de transmisión a simular. Se puede escoger entre el modelo de Bergeron o dependiente de la frecuencia. Las diferencias se encuentran en la figura 3.2.5 paso 3 de los dos modelos. Para este caso se utilizará el modelo Frequency dependent.
- **Ground Data:** Agrega las características del suelo. Las características del suelo se observan en la Figura 3.2.15:

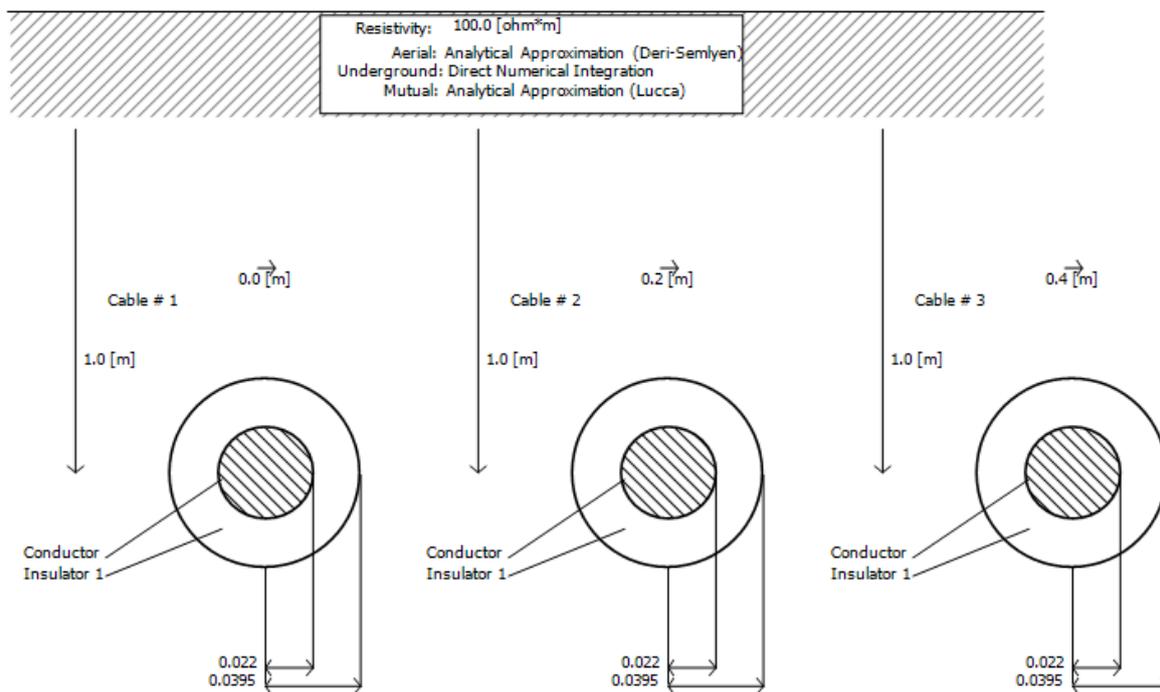
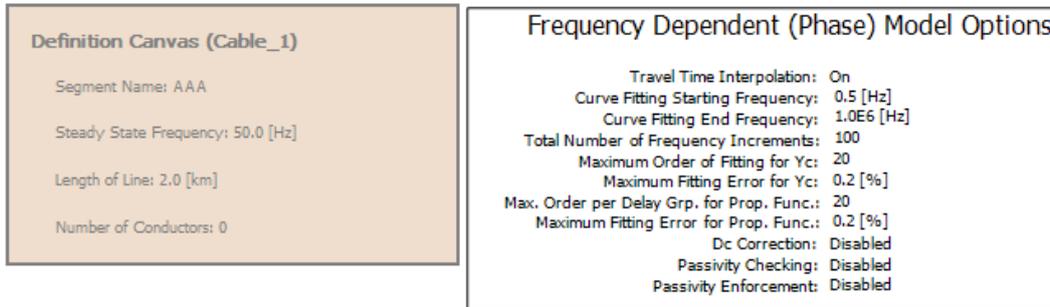


Figura 3.2.15 Características del cable AAA

- VIII. Luego se debe crear otro cable para más adelante agregar entre ellos las fallas. El segundo tramo de cables se crea siguiendo desde el paso II al paso VII. Y se llega al circuito de la Figura 3.2.16.

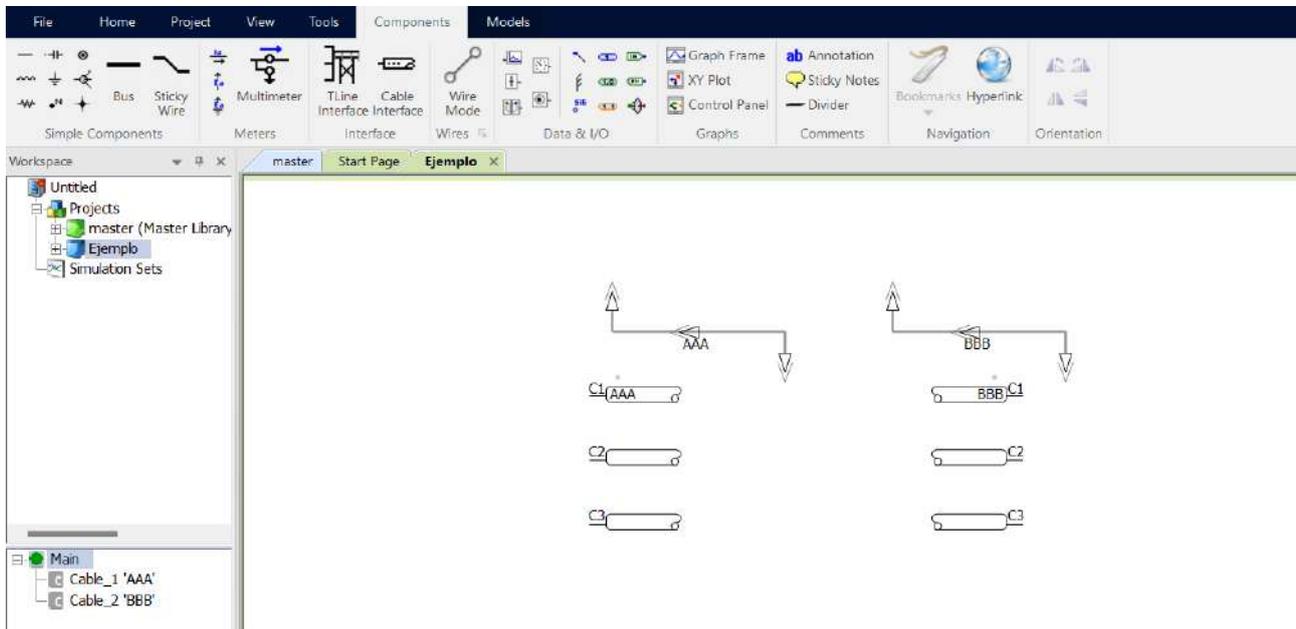


Figura 3.2.16 Los dos cables creados en el espacio de trabajo

A partir de la función Wire Mode se unen los nodos de los dos cables.

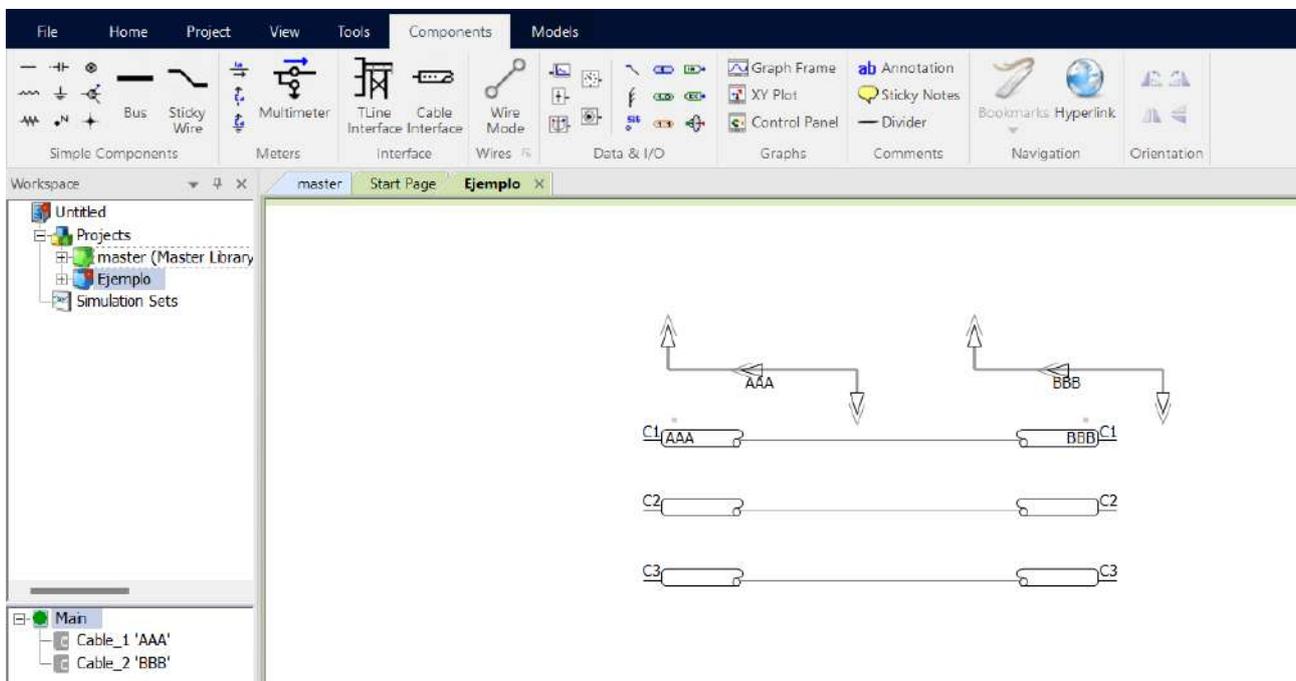


Figura 3.2.17 Cable AAA y BBB unido a través de la función Wire Mode

- IX. Se debe crear la fuente de pulso cuadrado, para ello se ingresa en Master Library y se ingresa a la sección de "CSMF" que hace referencia a los sistemas de control de

funciones de modelado. Se escoge la fuente “ Non-Linear Transfer Characteristic”.

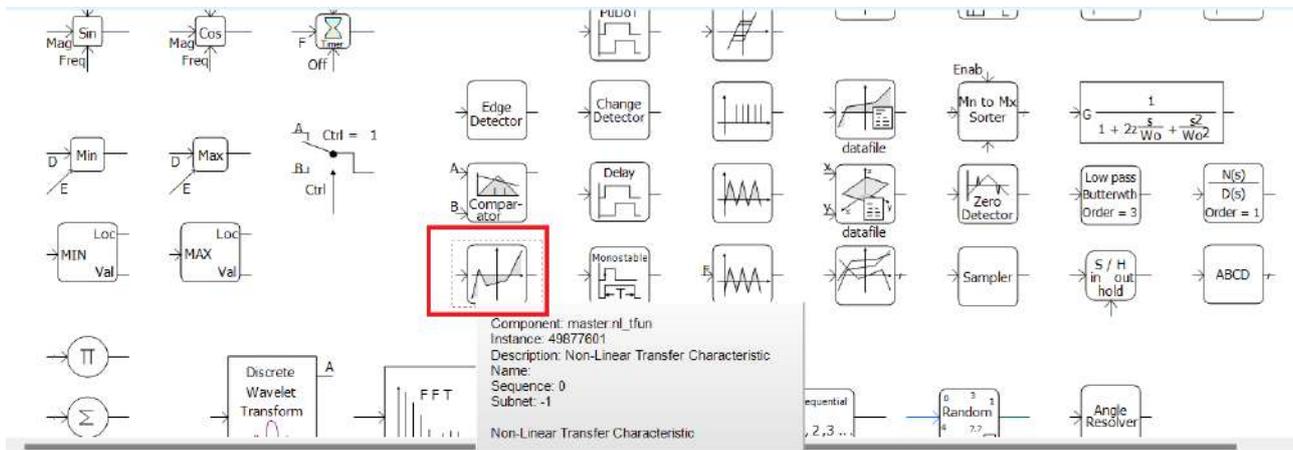


Figura 3.2.18 Fuente Non-Linear Transfer Characteristic

A partir de los valores que el usuario le da a la fuente no lineal, puede generar cualquier tipo de onda a su criterio. Para este caso se le dará los siguientes valores para obtener un pulso cuadrado de 10000 [kV]. Con click derecho sobre la fuente e ingresando en “Edit parameters” se escogen la cantidad de puntos que uno desea para realizar su función, para este caso se escogió agregar 6 puntos (Figura 3.2.19).

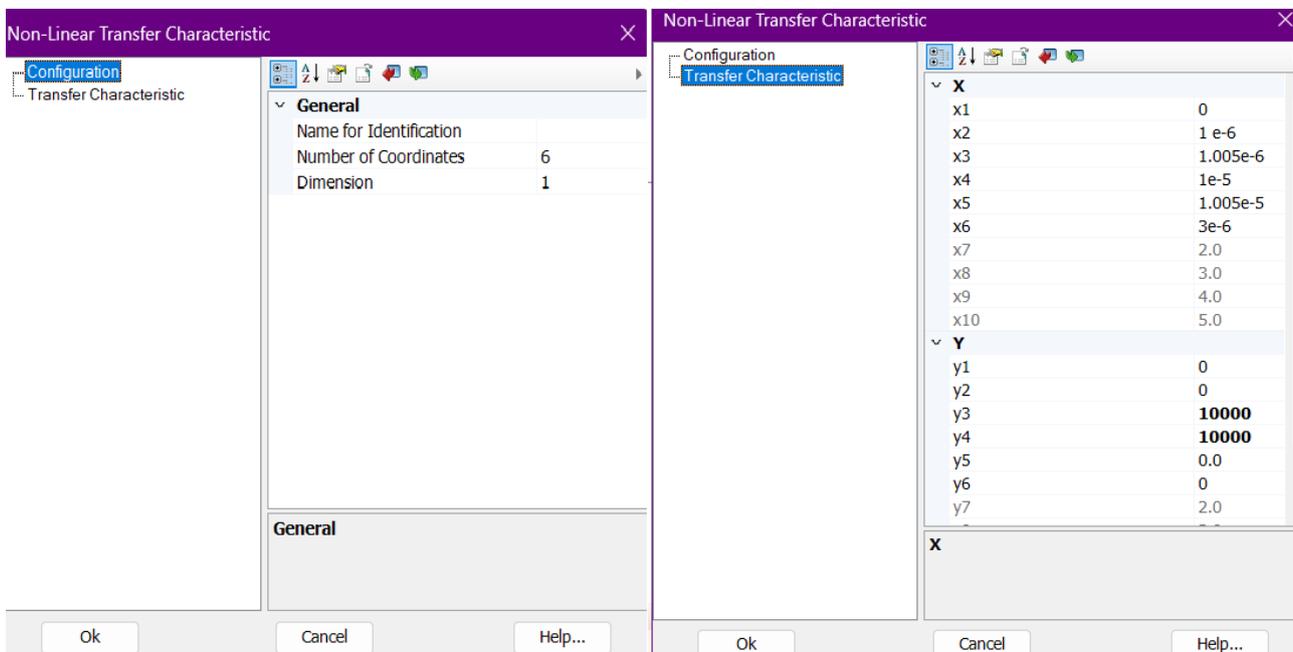


Figura 3.2.19 Parámetros modificables de la fuente de pulso

- X. Se agrega el tiempo para que de él dependa la fuente de pulso cuadrado, para ello se ingresa en Master Library y se ingresa a la sección de “Miscellaneous”. Se escoge

- el componente "Time".
- XI. Se agrega una fuente monofásica dependiente de una tensión de entrada. Desde sus características se modifica para que sea una fuente real de 50 [Ω].

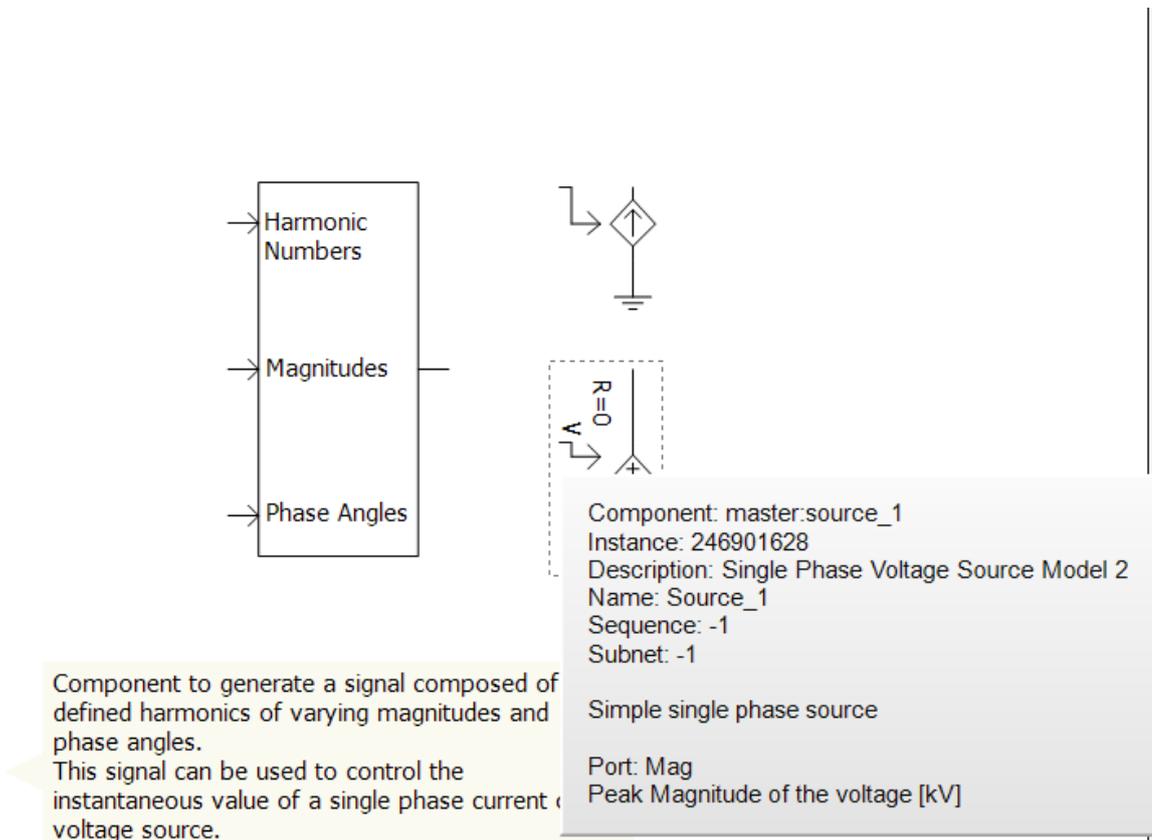


Figura 3.2.20 Fuente monofásica dependiente de una variable de entrada

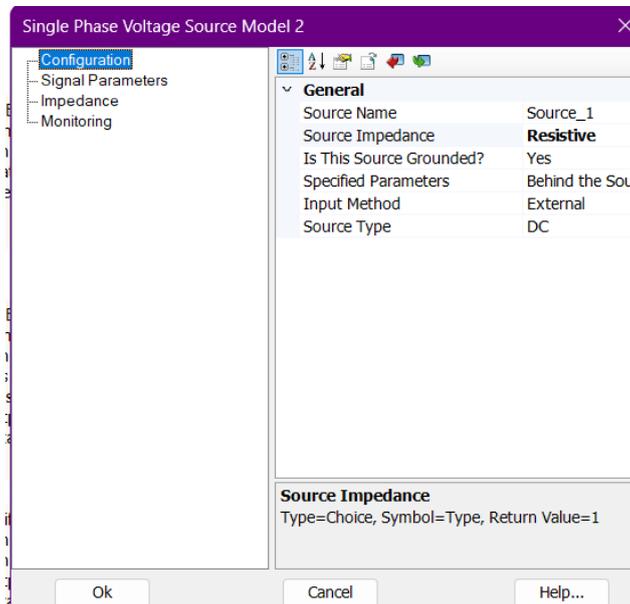


Figura 3.2.21 Características de la fuente monofásica dependiente de una variable de entrada

La fuente se conecta al sistema de la siguiente manera:

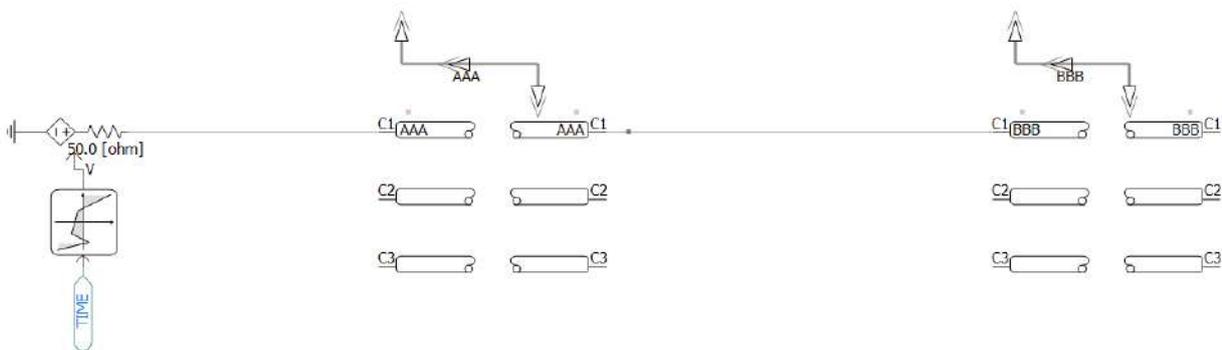


Figura 3.2.22 Fuente conectada al sistema

- XII. Se agrega un voltímetro en la entrada de cada fase, el voltímetro se agrega desde la pestaña "Components" y los componentes de "Meters". Desde los componentes de "Data & I/O" se agrega un "Datalabel" por cada voltímetro agregado.
- XIII. Por cada voltímetro se agrega un "Output Channel" y por último se agrega el "Graph Frames". Para agregar los valores de cada "Output Channel" se deben copiar y pegar dentro del gráfico. El sistema quedaría de la siguiente manera:

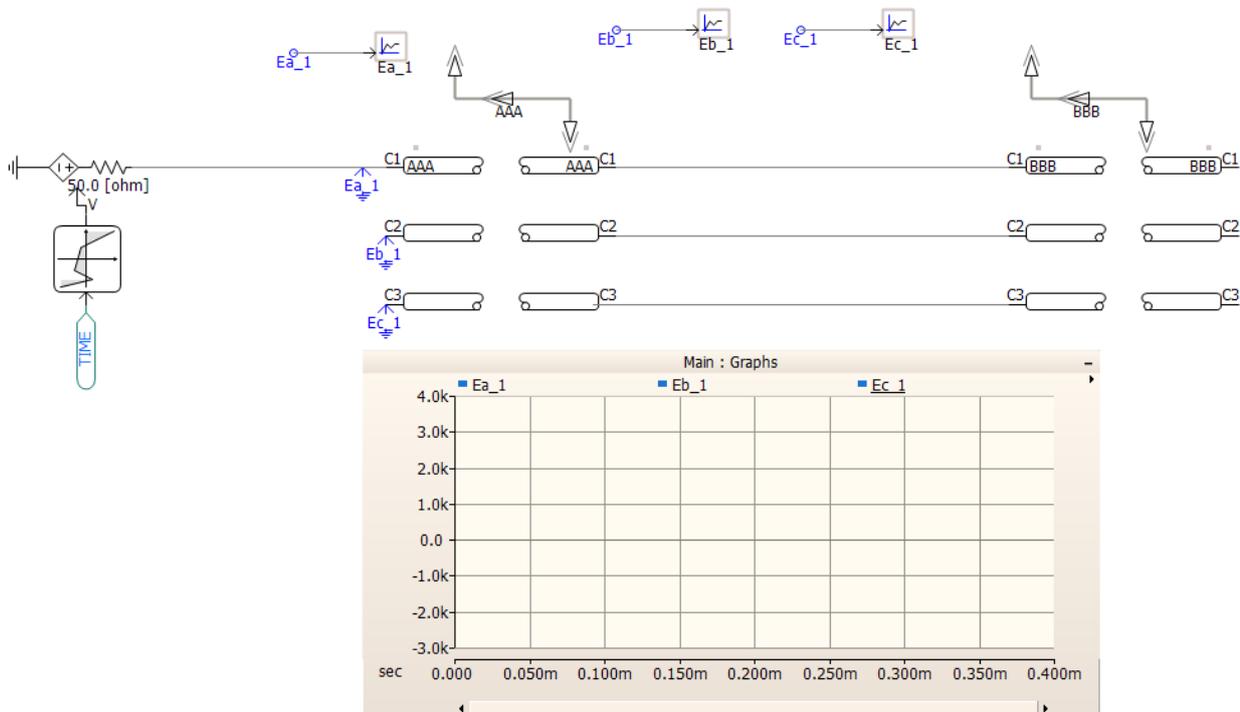


Figura 3.2.23 Ejemplo base terminado

3.3 FALLA MONOFÁSICA CIRCUITO ABIERTO

Una vez armado el ejemplo desde el cual se va a trabajar, se modifica para realizar una medición de reflectometría de una falla monofásica de circuito abierto. Para la falla monofásica de circuito abierto se incorpora entre los dos tramos de cables una resistencia de valor 100000 [Ω] que hará de circuito abierto sobre la longitud en la que se encuentra ubicada. Al ser dos sistemas de cables de 2000 [m] cada uno, la falla se encontrará en la mitad (2000 [m]) de la longitud total de cables de 4000 [m]. La fuente será de 1000 [V] de entrada y la impedancia característica de los cables fue seteada a 20 [Ω]. El circuito es el siguiente:

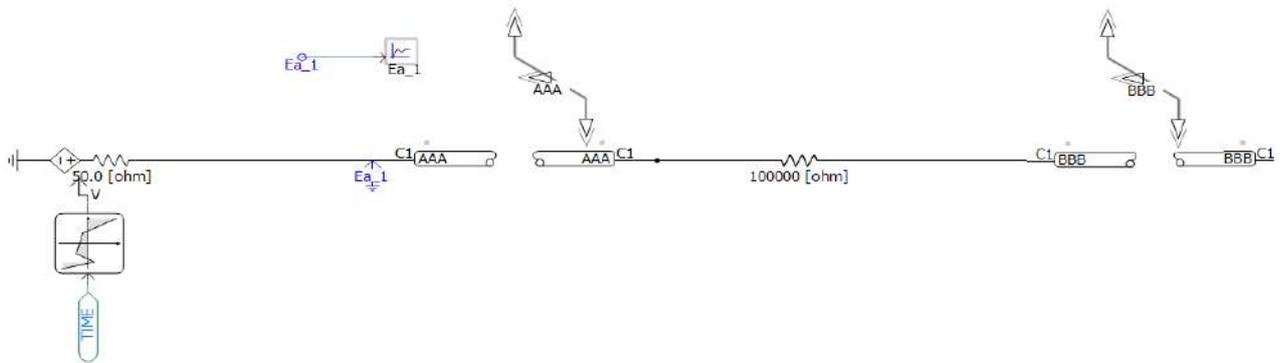


Figura 3.3.1 Circuito de falla circuito abierto monofásica

Una vez simulado el programa haciendo click sobre el botón Run, se obtiene el siguiente gráfico:

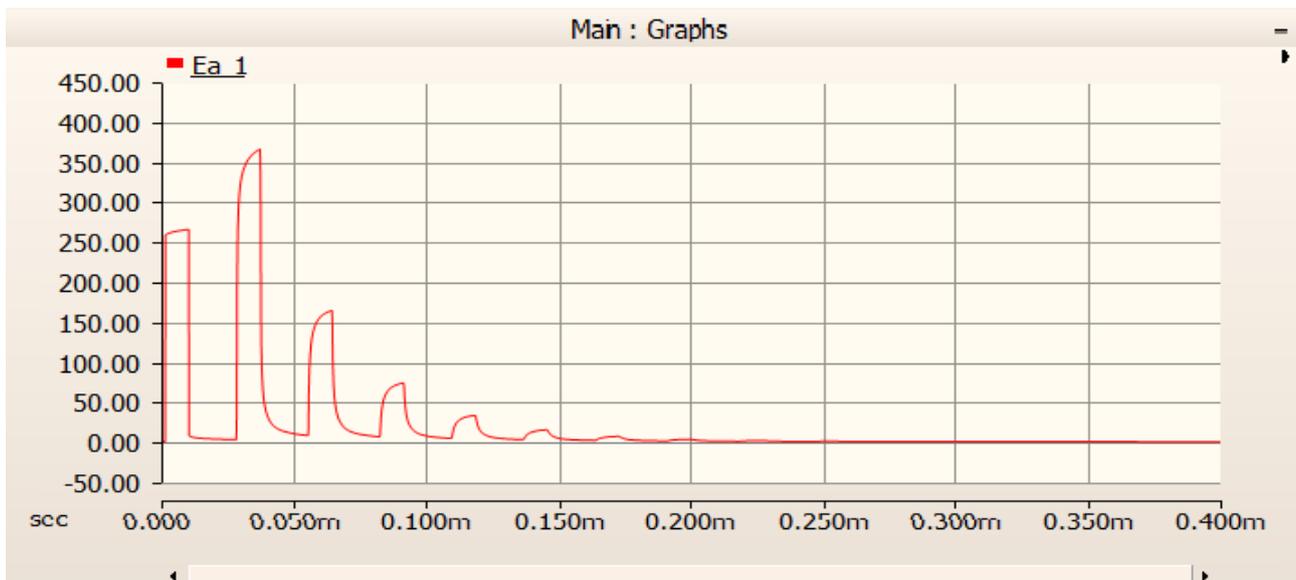


Figura 3.3.2 Respuesta a falla de circuito abierto

La primera reflexión tiene una magnitud mayor que la del pulso original aplicado al sistema. Este fenómeno es característico de un circuito abierto, donde no hay un camino completo para que la corriente fluya. En un circuito abierto, la energía del pulso se refleja con el mismo signo en lugar de continuar a través del circuito, lo que resulta en una reflexión con una magnitud mayor que la del pulso inicial. Para entender mejor el pico obtenido por la primera reflexión, se procede a explicar cualitativamente el valor de reflexión a partir de los coeficientes de reflexión y de transmisión.

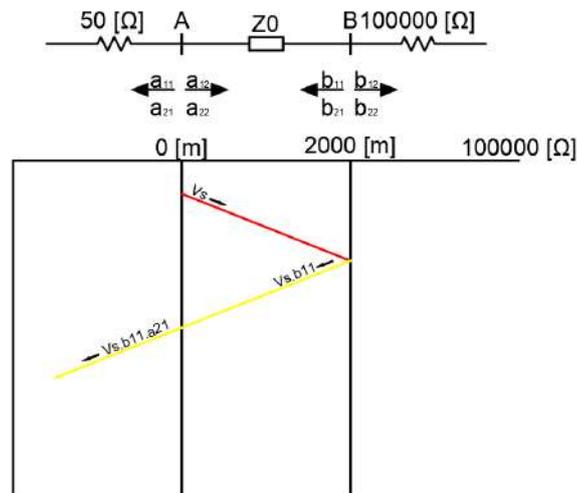


Figura 3.3.3 Diagrama de reflexiones para falla de circuito abierto

En la Figura 3.3.3 se puede observar que la primera reflexión es el pico de la onda transmitida hacia la fuente proveniente de la reflejada del extremo B. Se puede calcular como:

$$V = V_s \cdot b_{11} \cdot a_{21} \quad (3.3.1)$$

Siendo

- $b_{11} = \frac{Z_{Falla} - Z_0}{Z_{Falla} + Z_0}$
- $a_{21} = \frac{2 \cdot Z_{Fuente}}{Z_{Fuente} + Z_0}$
- V_s la tensión de la onda incidente.

Por simularse una falla de circuito abierto cuya impedancia es muy alta (mucho mayor que la Z_0 del cable), la onda incidente se refleja con un valor positivo que se suma a la de la fuente incrementando el valor medido en el punto A como se observa en la Figura 3.3.2.

Para obtener la distancia entre la falla y el punto de medición, se debe obtener el tiempo en que sucede la primera reflexión. Observando la Figura 3.3.4, la primera reflexión sucede a los 27,94 $[\mu s]$.

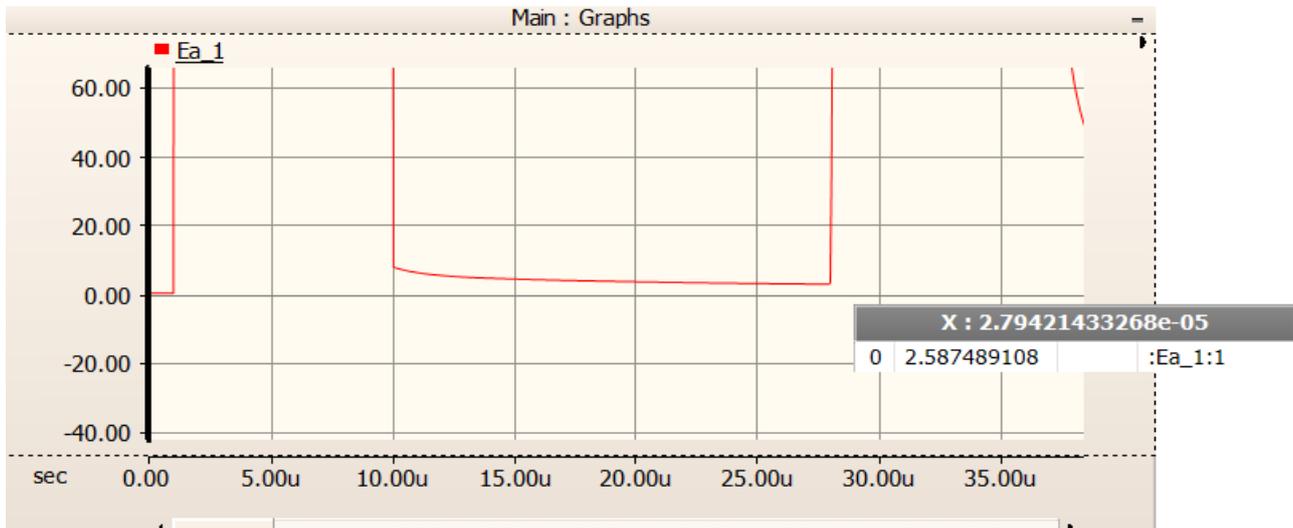


Figura 3.3.4 Valor de tiempo utilizado de reflexión de falla circuito abierto

Para el cálculo, se debe discriminar el retardo de 1 [μs] que posee la fuente generadora de pulsos cuadrados. Entonces el tiempo de reflejo del pulso será 26,94 [μs]. La velocidad de propagación del cable se calcula a partir de la permitividad relativa del cable a ensayar. Entonces la velocidad será para todos los casos posteriores iguales y será de:

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (3.3.2)$$

$$v = \frac{3 \cdot 10^8 \left[\frac{m}{s} \right]}{\sqrt{4,1}} = 148159439,5 \left[\frac{m}{s} \right]$$

La ubicación de falla se calcula a partir de la Ecuación 2.7.1.1 de la siguiente manera:

$$X_f = \frac{1}{2} \cdot 148159439,5 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 26,94 \left[\mu s \right] = 1995,86 \left[m \right]$$

Entonces la ubicación medida de la falla es de 1995,86 [m]. Conociendo la ubicación real de la falla, se calcula el error relativo de la medición a partir de la siguiente ecuación:

$$Error_{relativo\%} = \frac{2000 \left[m \right] - 1995,86 \left[m \right]}{2000 \left[m \right]} \cdot 100\% = 0,207\%$$

Se concluye que el error relativo de la medición es de 0,207%.

3.4 FALLA MONOFÁSICA A TIERRA

Realizando el mismo procedimiento del ejemplo anterior, se agrega una resistencia en paralelo de valor $1 \mu\Omega$. La resistencia se agrega desde la pestaña "Components" y se selecciona el ítem "resistor" el cual se conecta a la línea que conecta los dos cables y luego se agrega desde la misma pestaña la tierra "ground". El circuito será el siguiente:

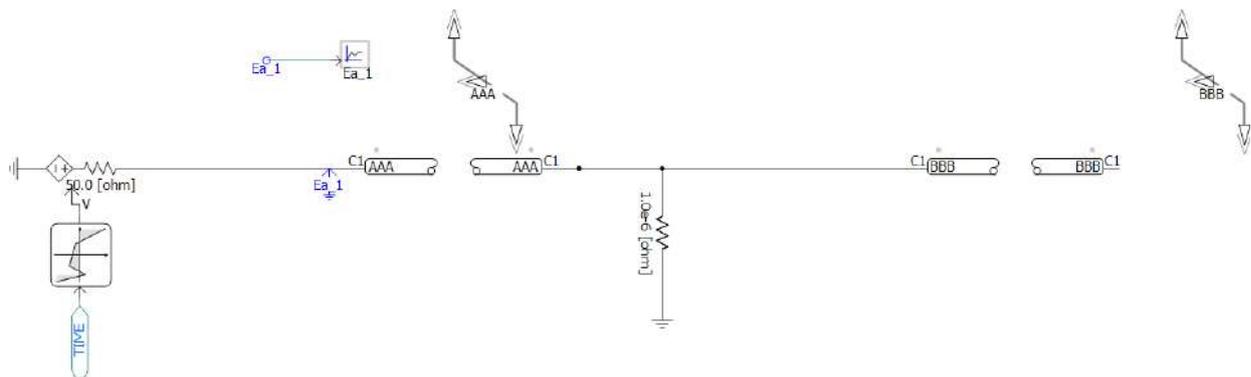


Figura 3.4.1 Circuito falla monofásica a tierra

El gráfico obtenido luego de simular el circuito es:

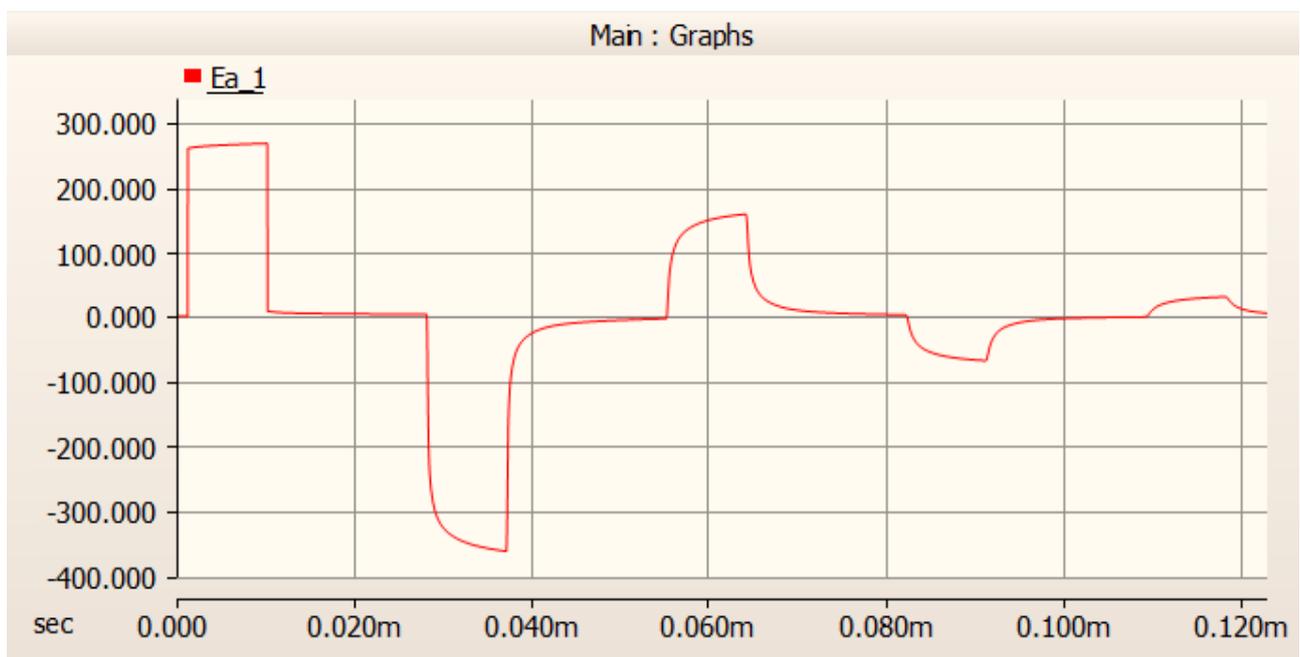


Figura 3.4.2 Respuesta a falla a circuito abierto

Al observar la primera reflexión y su sentido, se observa que posee un sentido negativo, por lo tanto se considera que existe una falla a tierra. Para obtener la distancia entre la falla y el punto de medición, se debe obtener el tiempo en que sucede la primera reflexión. La

primera reflexión sucede a los 28 [μs].

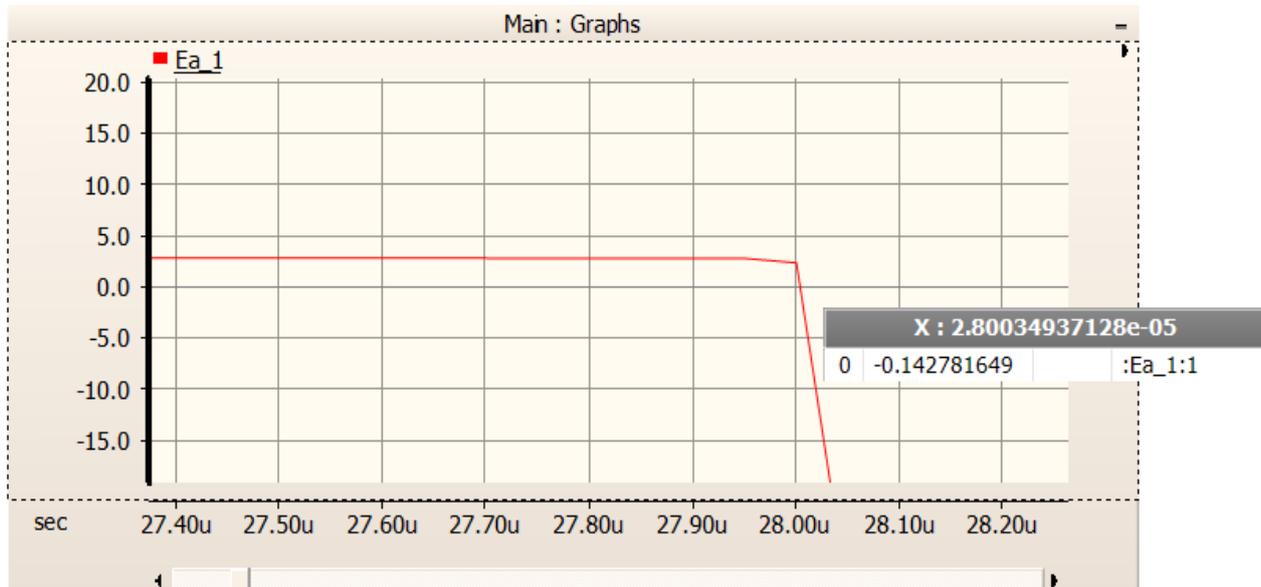


Figura 3.4.3 Valor de tiempo utilizado de reflexión de falla a tierra

Para el cálculo, se debe discriminar el retardo de 1 [μs] que posee la fuente generadora de pulsos cuadrados. Entonces el tiempo de reflejo del pulso será 27 [μs]. A partir de la velocidad de propagación calculada anteriormente y la Ecuación 2.7.1.1 se calcula la distancia de falla:

$$X_f = \frac{1}{2} \cdot 148159439,5 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 27 [\mu s] = 2000,15 [m]$$

Para entender mejor el pico obtenido por la primera reflexión, se procede a explicar cualitativamente el valor de reflexión a partir de los coeficientes de reflexión y de transmisión.

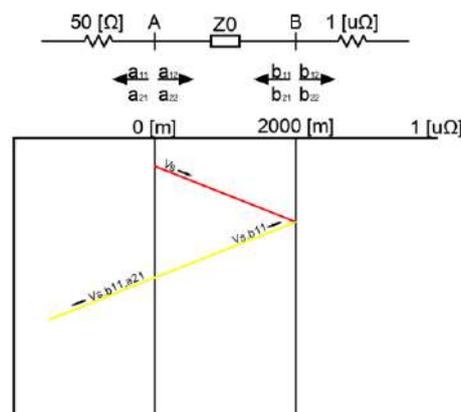


Figura 3.4.4 Diagrama de reflexiones para falla de circuito abierto

En la Figura 3.4.4 se puede observar que la primera reflexión se puede calcular a partir de la Ecuación 3.3.1. En este caso, la impedancia de $1 [\mu\Omega]$, es mucho menor que la impedancia característica del cable, por lo que la reflejada posee un signo negativo.

Entonces la ubicación medida de la falla es de $2000,15 [m]$. Conociendo la ubicación real de la falla, se calcula el error relativo de la medición a partir de la siguiente ecuación:

$$Error_{relativo\%} = \frac{2000,15 [m] - 2000 [m]}{2000 [m]} \cdot 100\% = 0,008\%$$

Se concluye que el error relativo de la medición es de $0,008\%$.

3.5 PEQUEÑAS CORRIENTES DE FUGA A TIERRA

El caso simulará a una falla en el aislamiento donde existen pequeñas corrientes de fuga. Se agrega una resistencia en paralelo en la mitad de los dos tramos de cables como en el caso 3.3 pero esta vez tendrá un valor de $20 [\Omega]$.

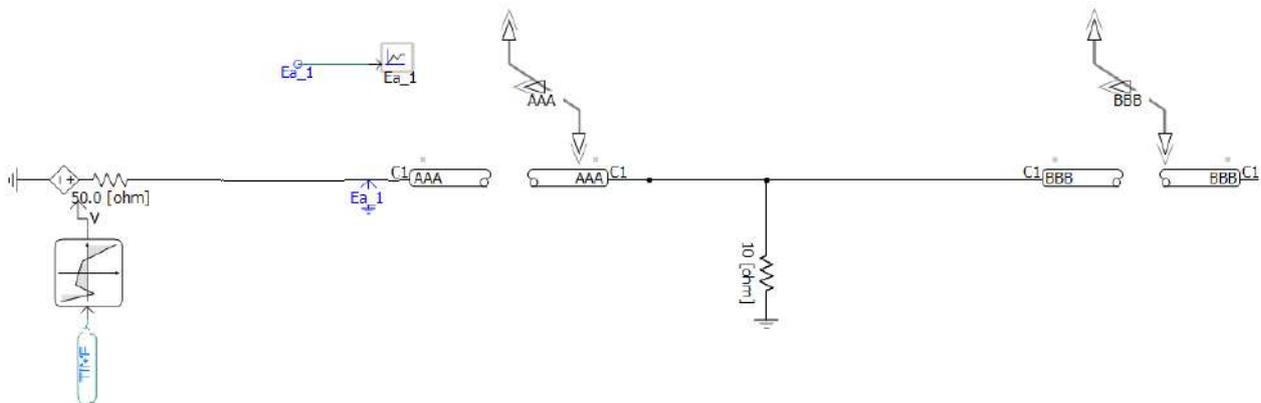


Figura 3.5.1 Circuito falla pequeñas corrientes de fuga a tierra

El gráfico obtenido luego de simular el circuito es:

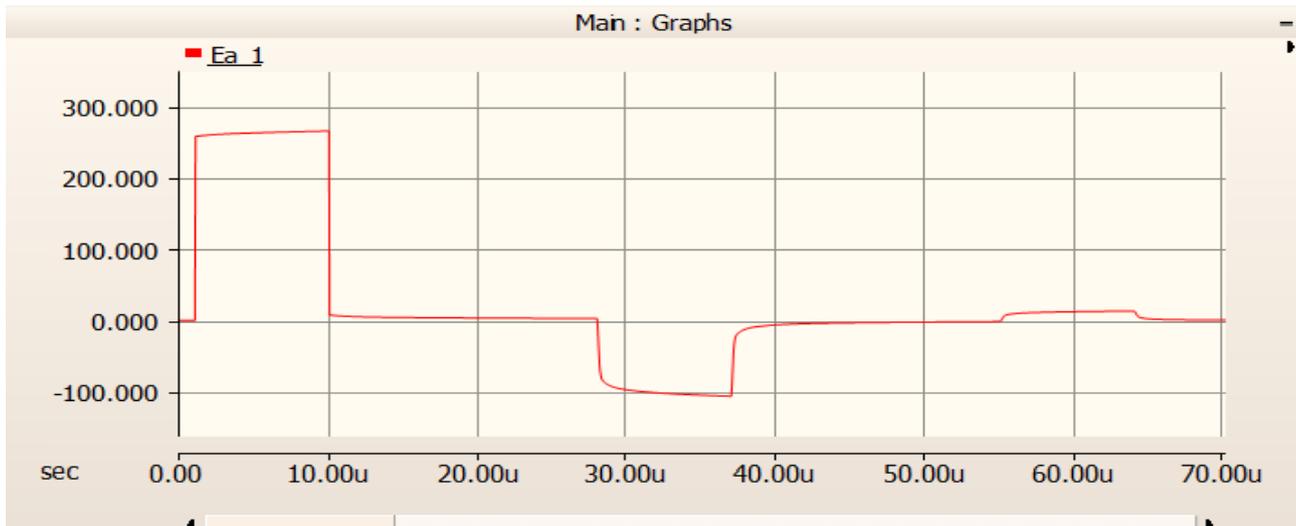


Figura 3.5.2 Respuesta de pequeñas fugas de corriente a tierra

La primera reflexión sucede a los 27,98 [μ s]. Para el cálculo, se debe discriminar el retardo de 1 [μ s] que posee la fuente generadora de pulsos cuadrados. Entonces el tiempo de reflejo del pulso será 26,98 [μ s]. Como se observa en la Figura 3.5.2, la magnitud de las reflexiones es menor en comparación a las reflexiones de los casos anteriores. Esto se debe a que son reflexiones de pequeñas corrientes de fuga a tierra producto del deterioro del aislamiento. Es recomendable, que frente a casos de pequeñas fugas de corriente a tierra, se tomen medidas preventivas para evitar que acaben en una falla a tierra. Al ser la impedancia de falla menor que la impedancia característica, el pulso es negativo.

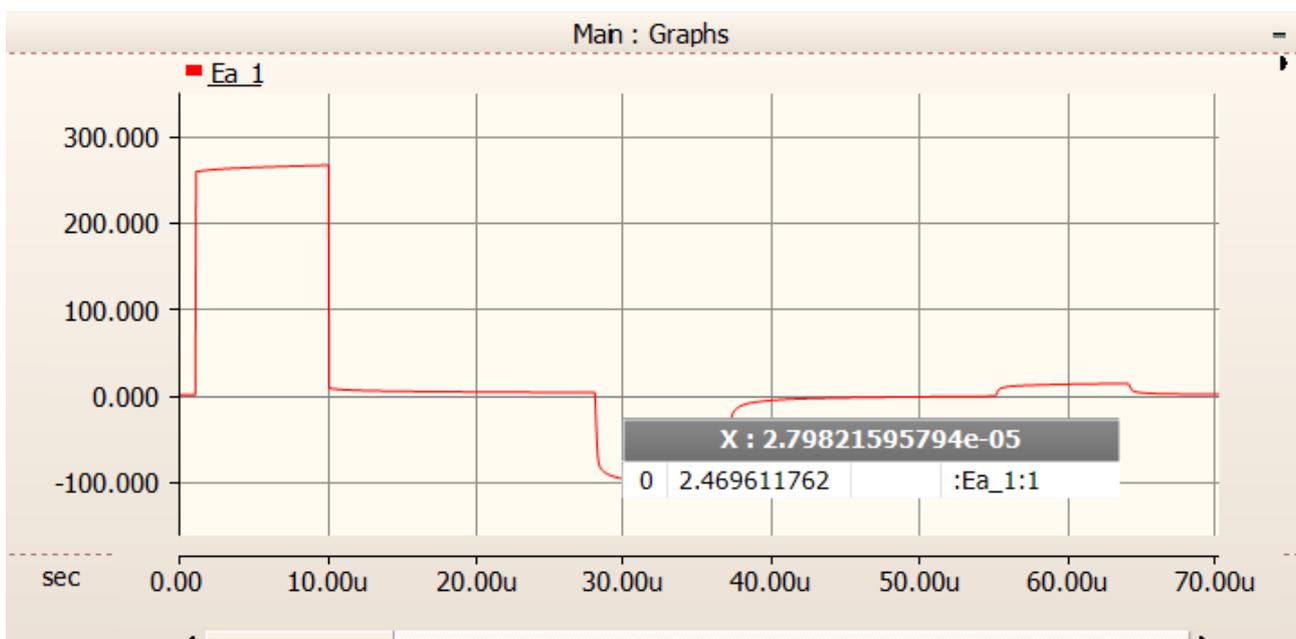


Figura 3.5.3 Valor de tiempo utilizado en pequeñas fugas de corriente a tierra

A partir de la Ecuación 2.7.1.1 se calcula la distancia de falla

$$X_f = \frac{1}{2} \cdot 148159439,5 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 26,98 [\mu s] = 1998,67 [m]$$

Entonces la ubicación medida de la falla es de 1998,67 [m]. Conociendo la ubicación real de la falla, se calcula el error relativo de la medición a partir de la siguiente ecuación:

$$Error_{relativo\%} = \frac{2000 [m] - 1998,67 [m]}{2000 [m]} \cdot 100\% = 0,0665\%$$

Se concluye que el error relativo de la medición es de 0,0665%.

3.6 FALLA TRIFÁSICA

Al aplicar un pulso sobre un cable bajo ensayo, afecta indirectamente a los cables adyacentes debido al acoplamiento entre fases, produciendo una tensión inducida baja y distorsionada en los otros dos cables. Es por ello, que en cada caso se analizará la tensión de los otros dos cables, independientemente de si se encuentran en falla o no. A diferencia de los ejemplos de fallas monofásicas, en las fallas trifásicas la tensión de entrada será de 10 [kV]. Se escogió dicho valor para que las tensiones inducidas sean mayores y poder visualizar sus reflectometrías con mayor grado de detalle.

Para obtener una falla trifásica, se conectan dos resistencias de 1 [$\mu\Omega$], una entre la fase A y B y otra entre la fase B y C. Se utilizan estas resistencias para simular la falla, debido a que el software no permite conectar directamente los cables, por ende se escogió utilizar dos resistencias de valores muy próximos al cero.

3.6.1 PULSO APLICADO EN FASE A

El circuito a simular será el siguiente:

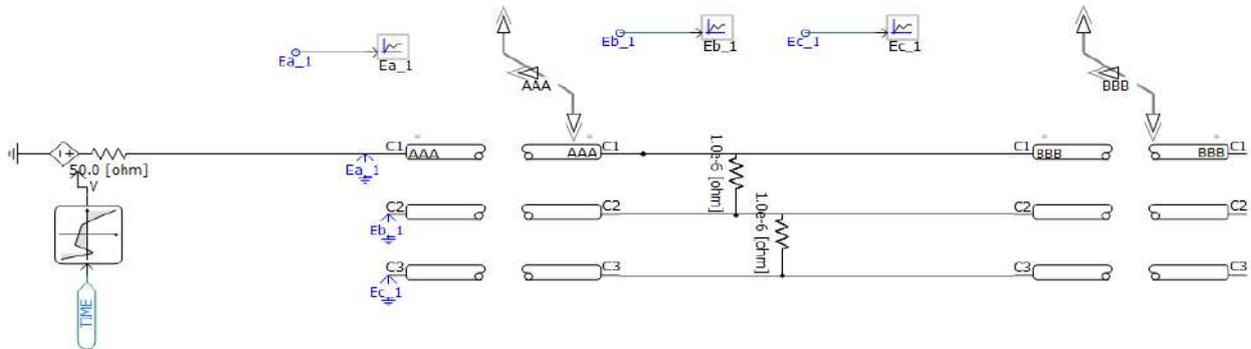


Figura 3.6.1.1 Circuito falla trifásica aplicando pulso en la Fase A

Al simular el circuito el resultado fue el siguiente

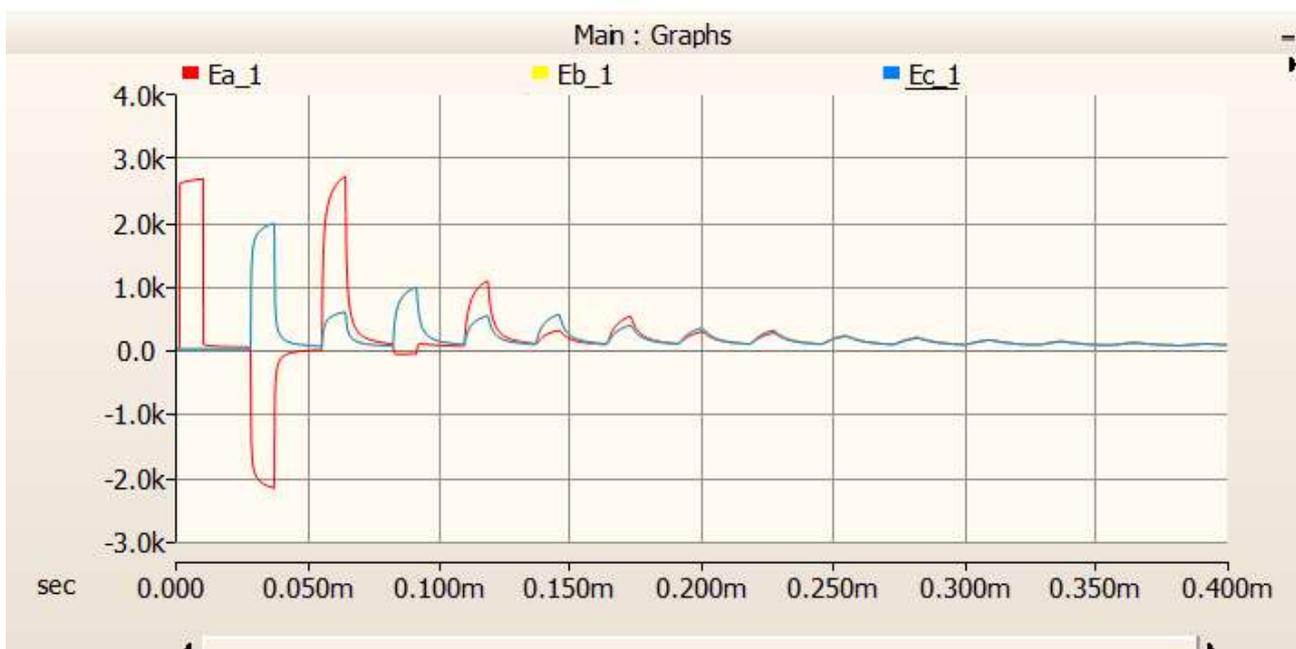


Figura 3.6.1.2 Respuestas a falla trifásica aplicando pulso en la Fase A

A continuación se encuentran la respuesta en la Fase A, B y C por separado.

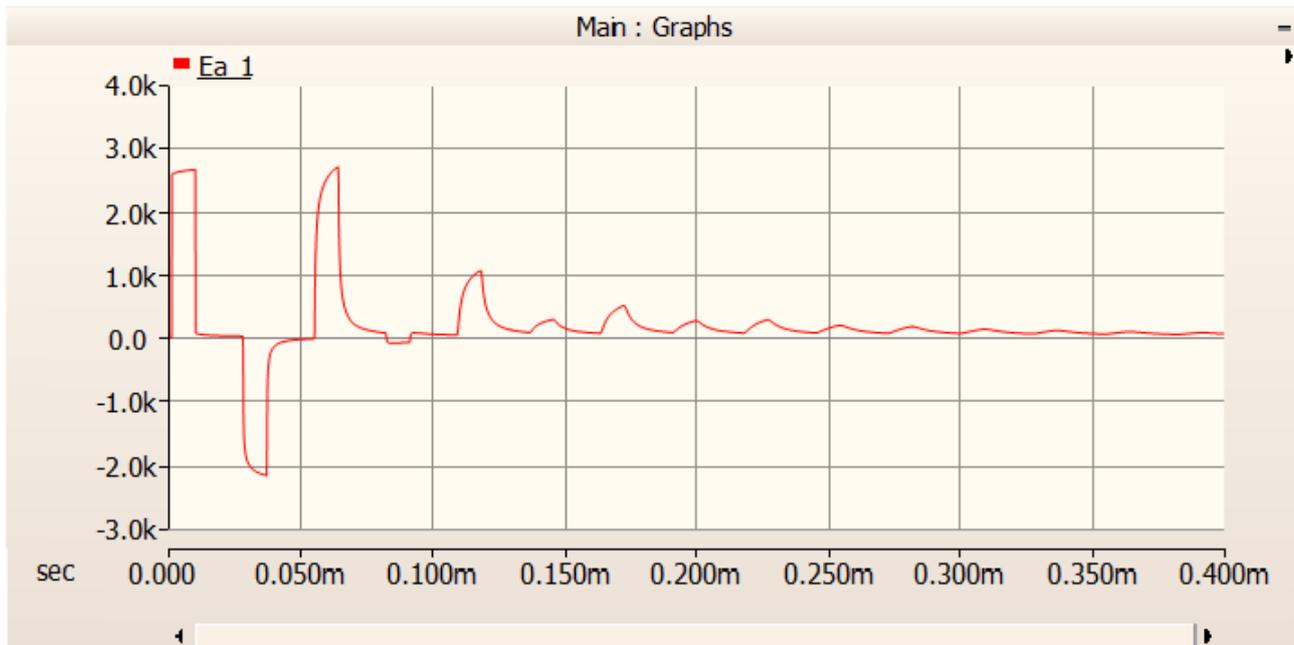


Figura 3.6.1.3 Respuesta en Fase A a falla trifásica aplicando un pulso en la Fase A

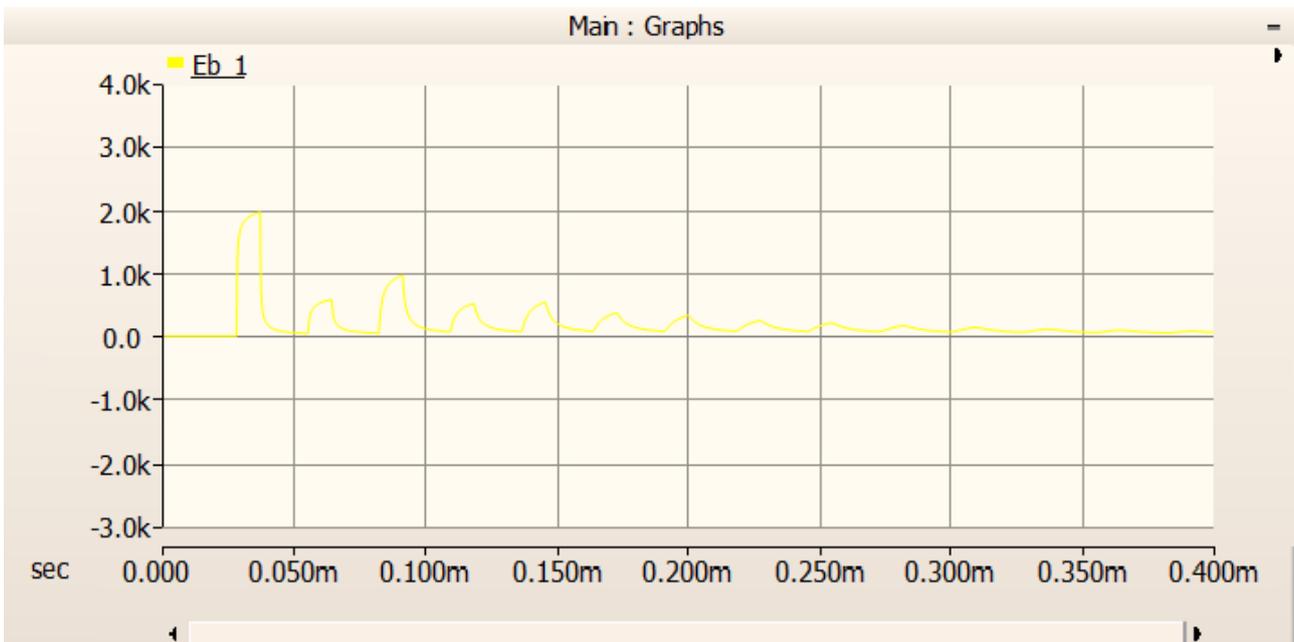


Figura 3.6.1.4 Respuesta en Fase B a falla trifásica aplicando un pulso en la Fase A

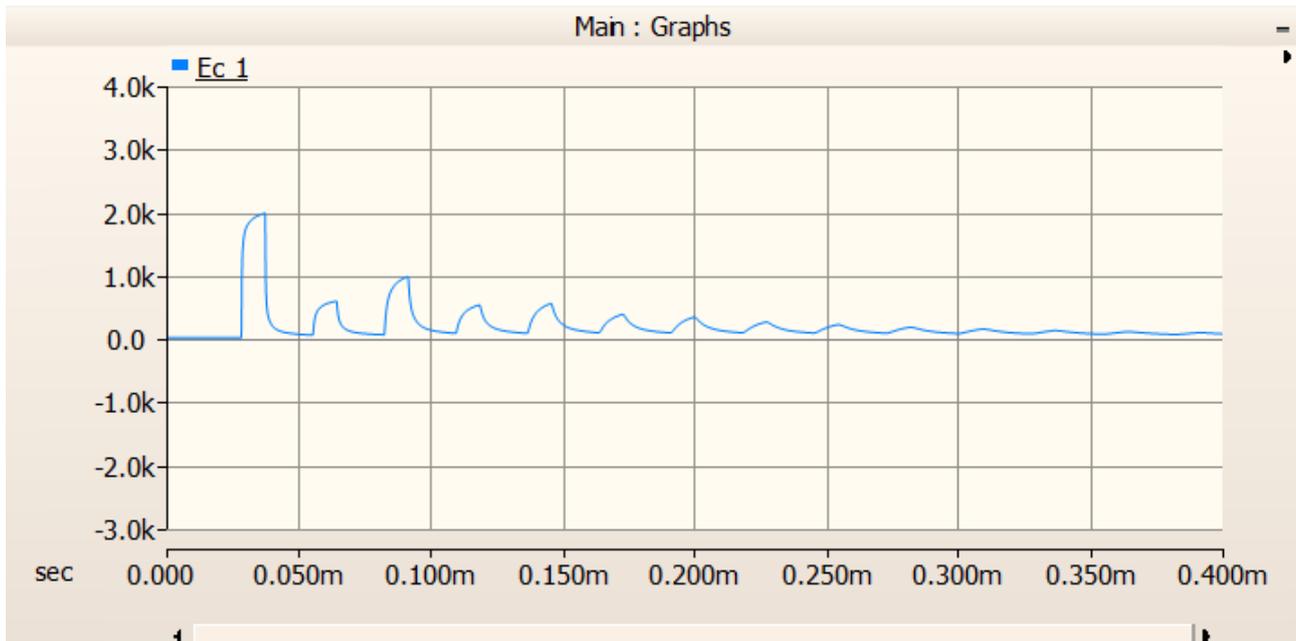


Figura 3.6.1.5 Respuesta en Fase C a falla trifásica aplicando un pulso en la Fase A

Como se observa en las Figuras 3.6.1.2 y 3.6.1.3, la reflexión de la Fase A posee sentido negativo, debido a que se trata de un cortocircuito de baja resistencia. Las Fases B y C poseen la misma respuesta debido a que no se aplica un pulso por ellas. La primer reflexión posee un sentido positivo debido a que detecta la tensión entregada por el cortocircuito proveniente de la Fase A. Para la Fase B y la Fase C, el pulso proveniente del cortocircuito es una onda incidente.

En las tres fases, la reflexión de la falla se produce en el mismo instante. Al participar las tres fases en el cortocircuito, las reflexiones de las tres fases detectan la falla. Entonces al calcular la distancia de la falla a partir de la respuesta de cualquiera de las fases, se llegará al mismo resultado.

La primera reflexión sucede a los 27,84 [μ s]. Para el cálculo, se debe discriminar el retardo de 1 [μ s] que posee la fuente generadora de pulsos cuadrados. Entonces el tiempo de reflejo del pulso será 26,84 [μ s].

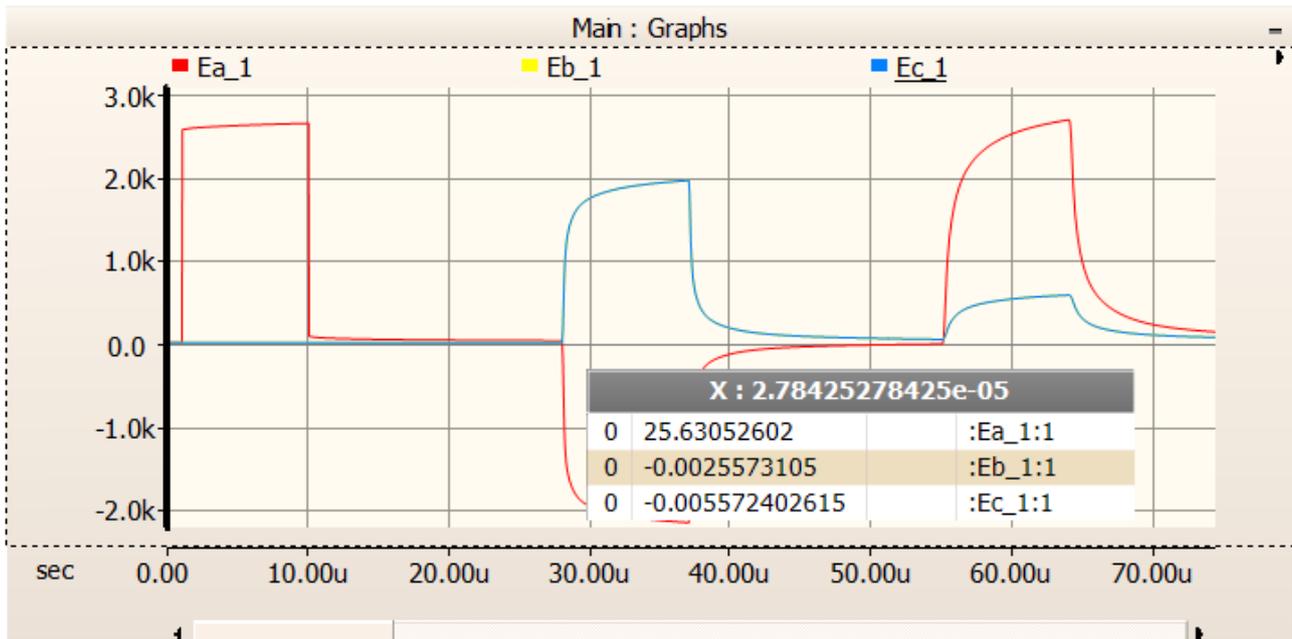


Figura 3.6.1.6 Valor de tiempo utilizado en falla trifásica aplicando un pulso en la Fase A

A partir de la Ecuación 2.7.1.1 se calcula la distancia de falla

$$X_f = \frac{1}{2} \cdot 148159439,5 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 26,84 [\mu s] = 1988,3 [m]$$

Entonces la ubicación medida de la falla es de 1988,3 [m]. Conociendo la ubicación real de la falla, se calcula el error relativo de la medición a partir de la siguiente ecuación:

$$Error_{relativo\%} = \frac{2000 [m] - 1988,3 [m]}{2000 [m]} \cdot 100\% = 0,585\%$$

Entonces el error relativo de la medición es de 0,585%.

3.6.2 PULSO APLICADO EN FASE B

El circuito a simular será el siguiente:

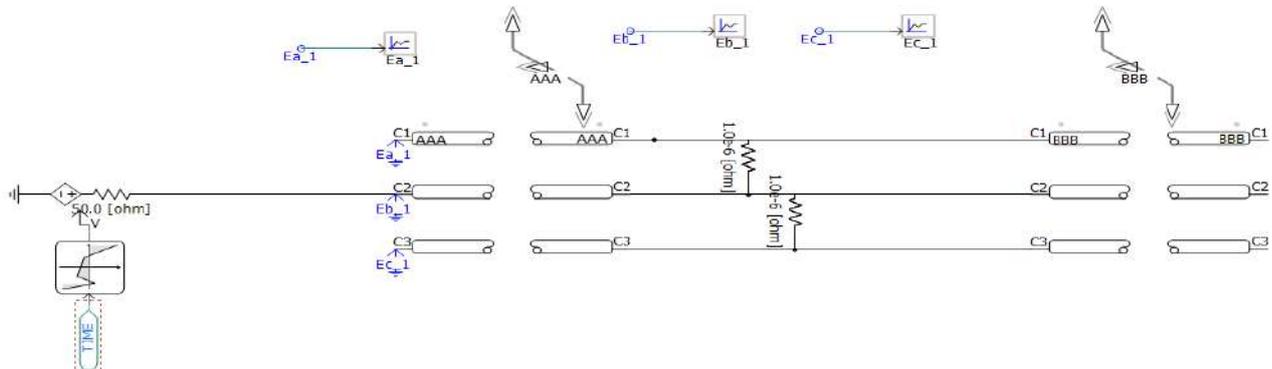


Figura 3.6.2.1 Circuito falla trifásica aplicando pulso en la Fase B

Al simular el circuito el resultado fue el siguiente

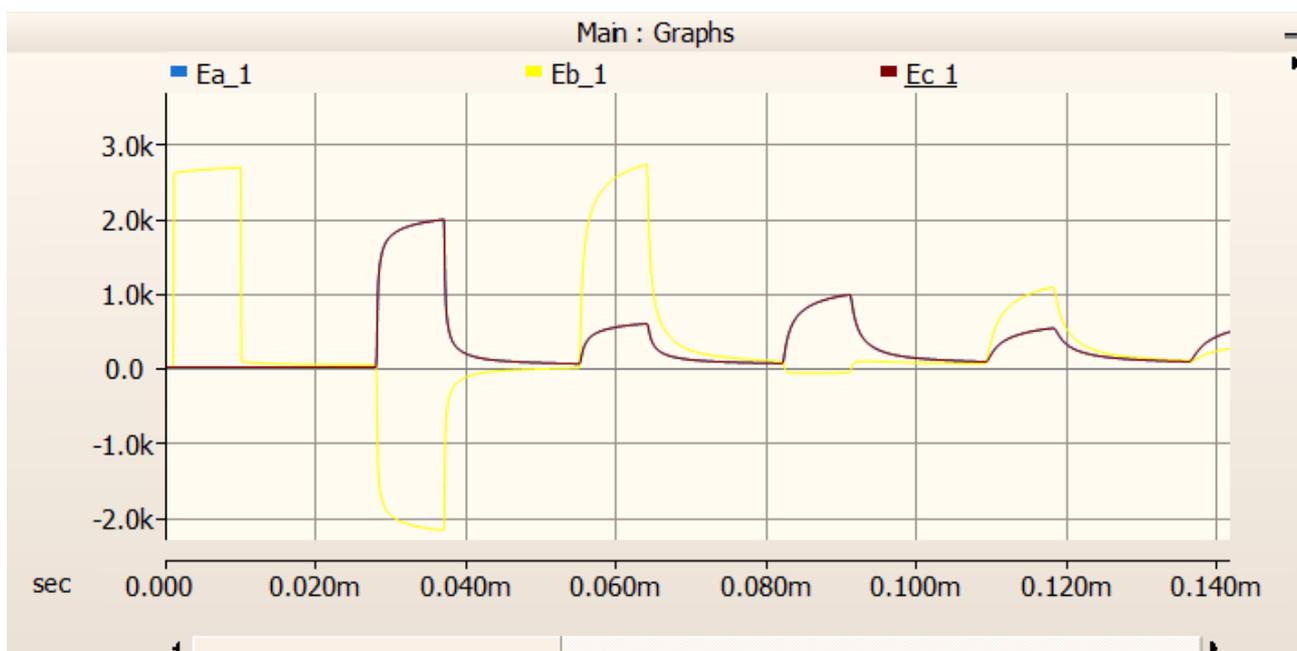


Figura 3.6.2.2 Respuestas a falla trifásica aplicando pulso en la Fase B

A continuación se encuentran la respuesta en la Fase A, B y C por separado.

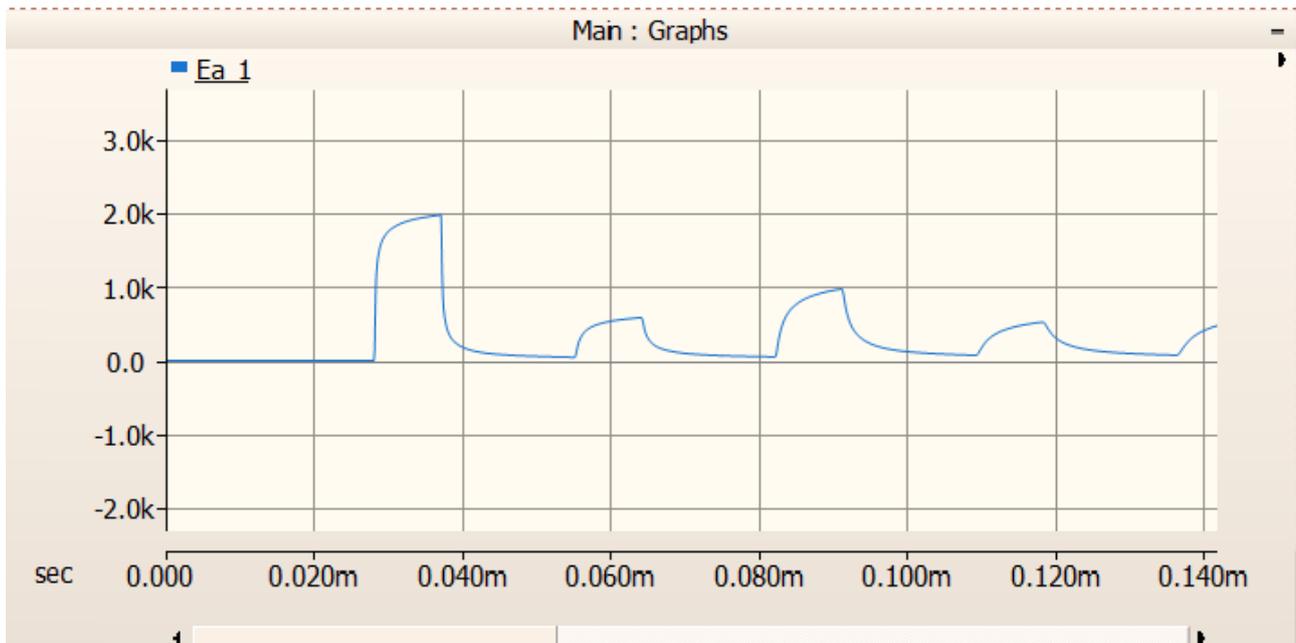


Figura 3.6.2.3 Respuesta en Fase A a falla trifásica aplicando un pulso en la Fase B

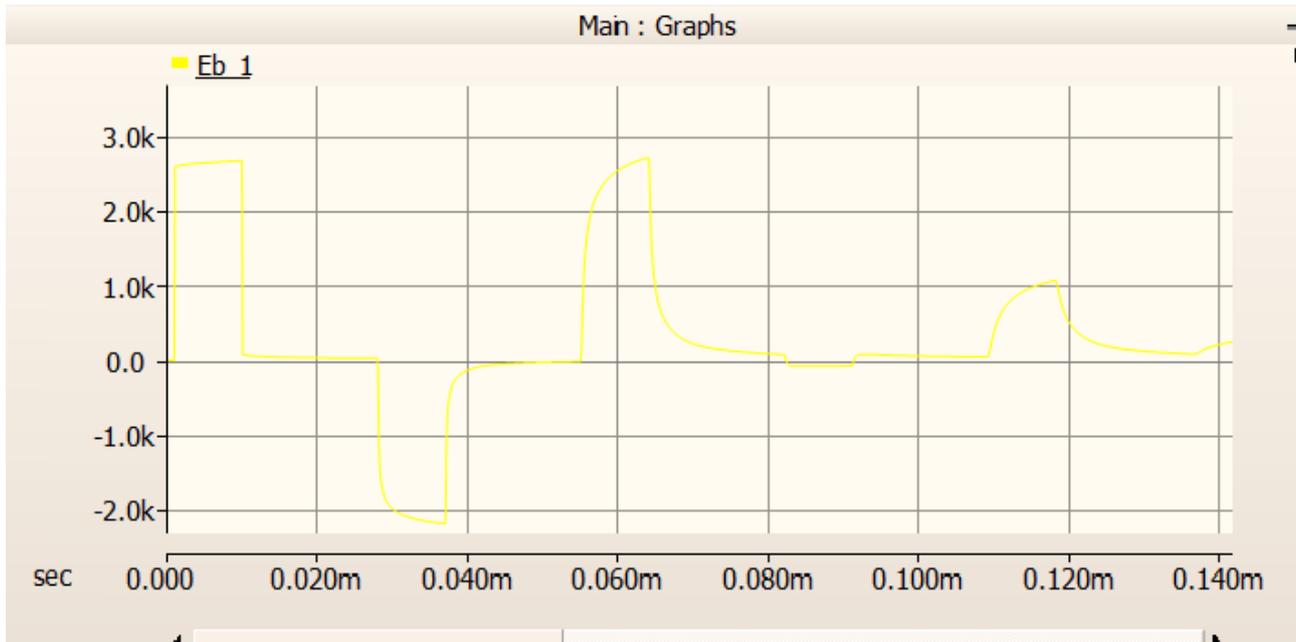


Figura 3.6.2.4 Respuesta en Fase B a falla trifásica aplicando un pulso en la Fase B

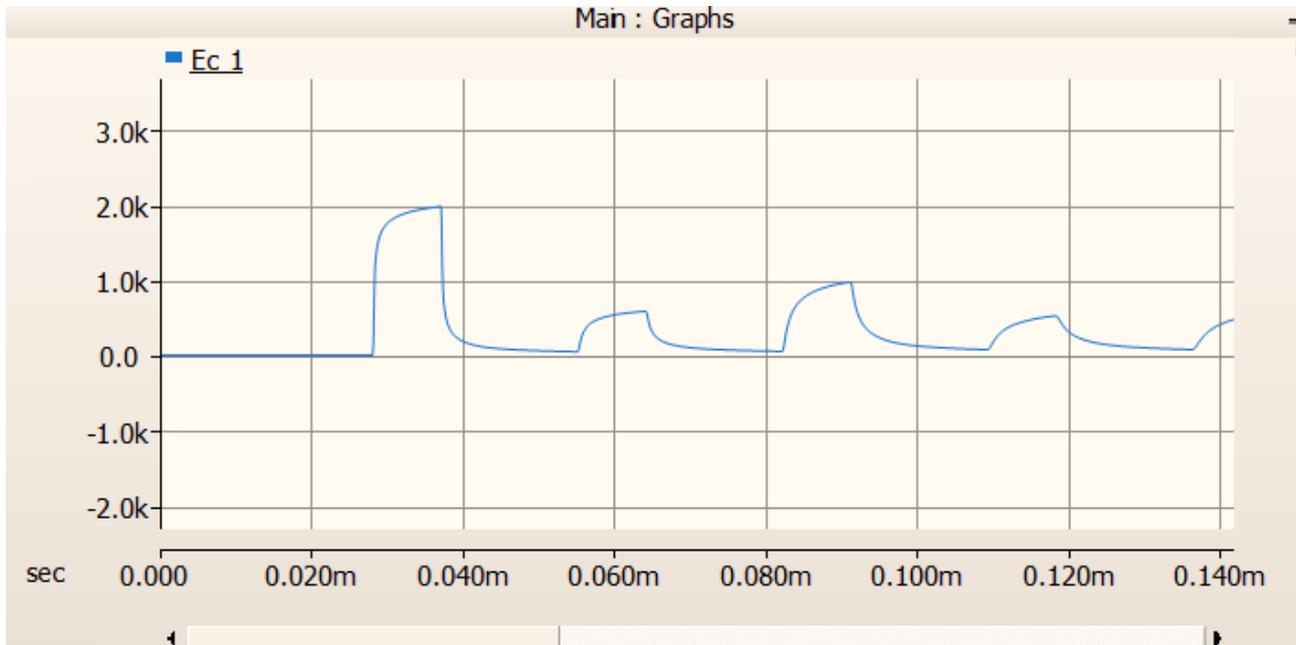


Figura 3.6.2.5 Respuesta en Fase C a falla trifásica aplicando un pulso en la Fase B

Como se puede observar en la Figuras 3.6.2.2, 3.6.2.3, 3.6.2.4 y 3.6.2.5 las reflexiones son similares al caso en el que el pulso es aplicado en la Fase A, la reflexión del cable al que se le aplica el pulso es siempre la misma y las reflexiones de los cables adyacentes son iguales. La primera reflexión sucede a los 27,28 μs . Para el cálculo, se debe discriminar el retardo de 1 μs que posee la fuente generadora de pulsos cuadrados. Entonces el tiempo de reflejo del pulso será 26,28 μs .

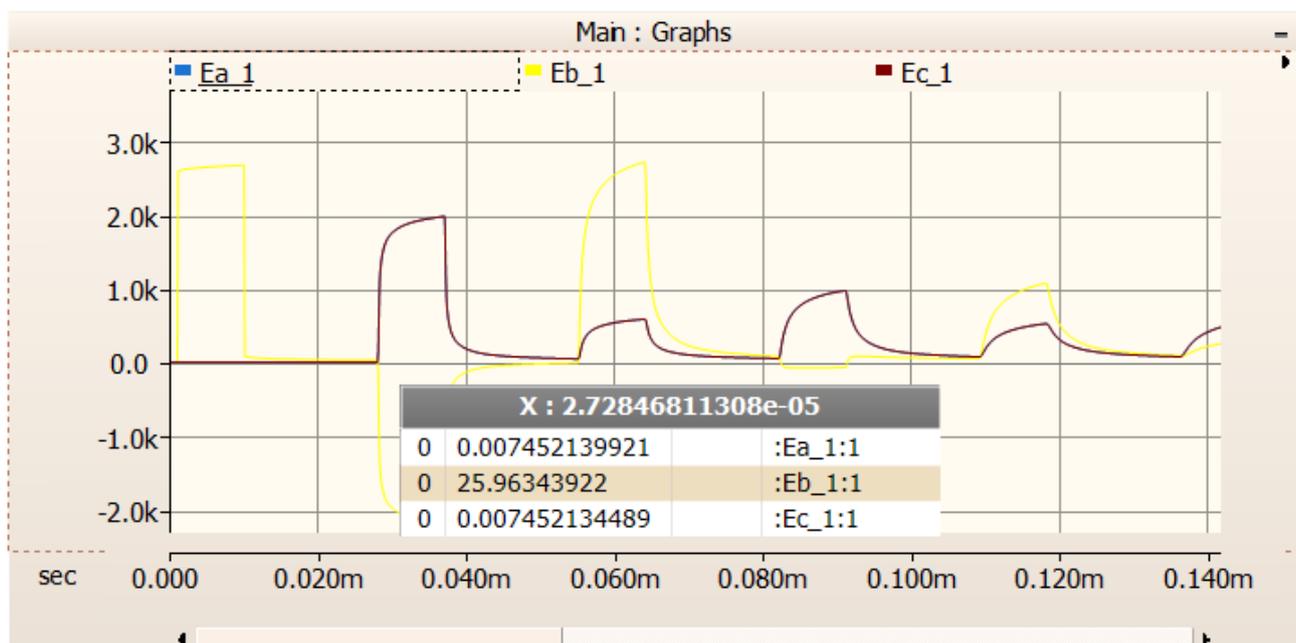


Figura 3.6.2.6 Valor de tiempo utilizado en falla trifásica aplicando un pulso en la Fase B

A partir de la Ecuación 2.7.1.1 se calcula la distancia de falla

$$X_f = \frac{1}{2} \cdot 148159439,5 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 26,28 [\mu s] = 1946,8 [m]$$

Entonces la ubicación medida de la falla es de 1946,8 [m]. Conociendo la ubicación real de la falla, se calcula el error relativo de la medición a partir de la siguiente ecuación:

$$Error_{relativo\%} = \frac{2000 [m] - 1946,8 [m]}{2000 [m]} \cdot 100\% = 2,66\%$$

Entonces el error relativo de la medición es de 2,66%.

3.6.3 PULSO APLICADO EN FASE C

El circuito a simular será el siguiente:

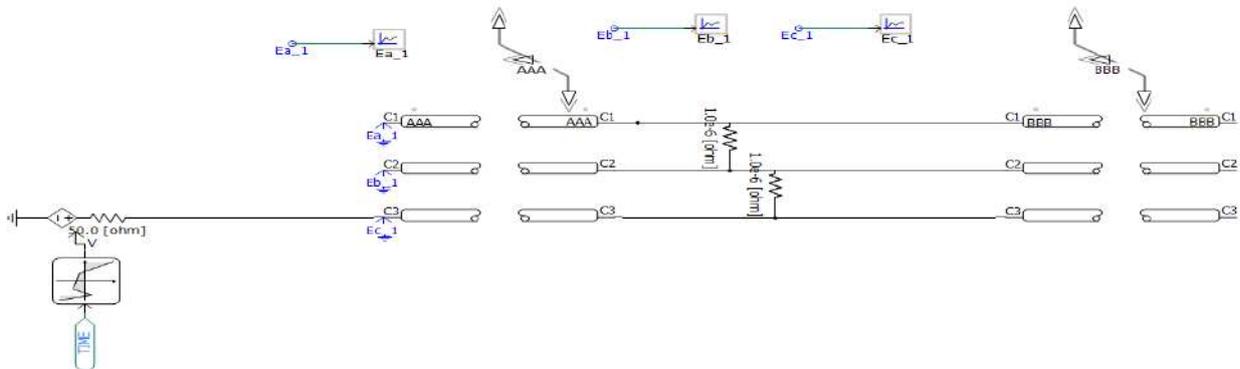


Figura 3.6.3.1 Circuito falla trifásica aplicando pulso en la Fase C

Al simular el circuito el resultado fue el siguiente

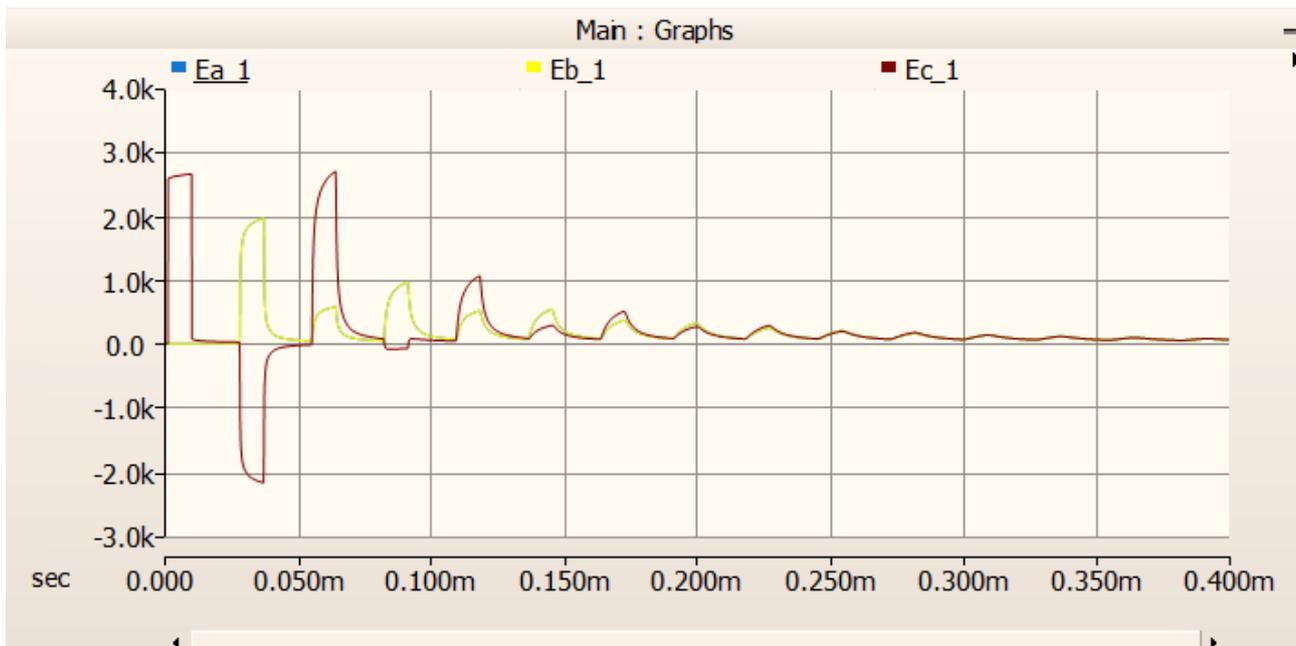


Figura 3.6.3.2 Respuestas a falla trifásica aplicando pulso en la Fase C

A continuación se encuentran la respuesta en la Fase A, B y C por separado.

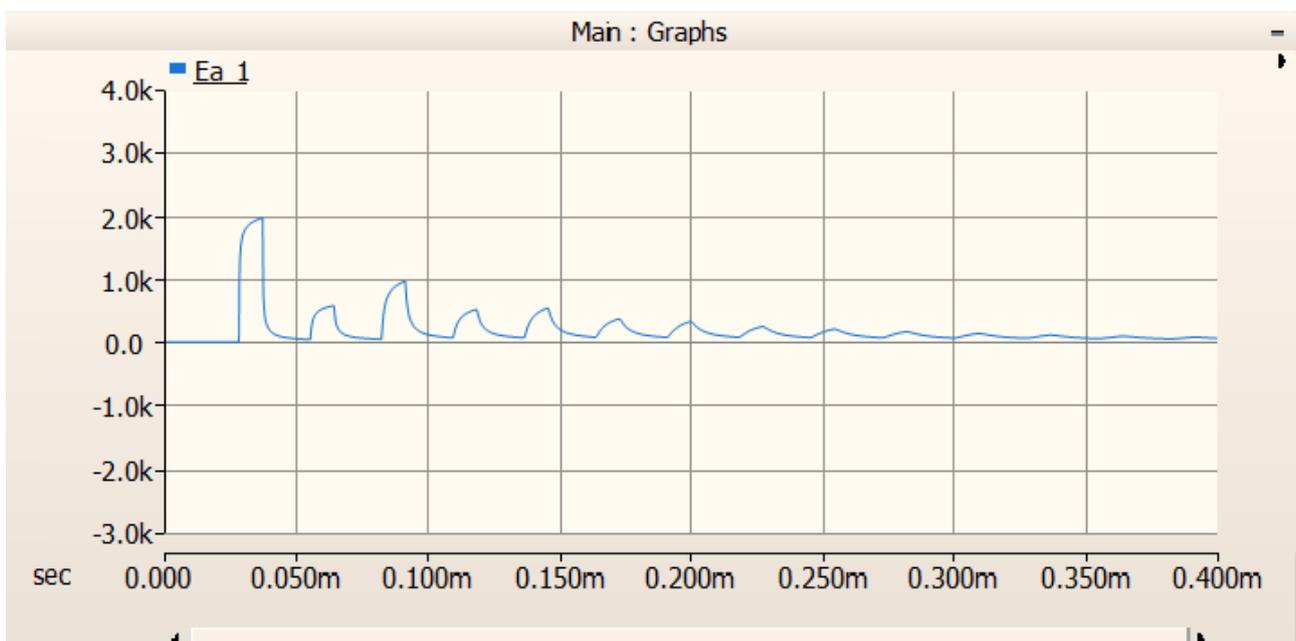


Figura 3.6.3.3 Respuesta en Fase A a falla trifásica aplicando un pulso en la Fase C

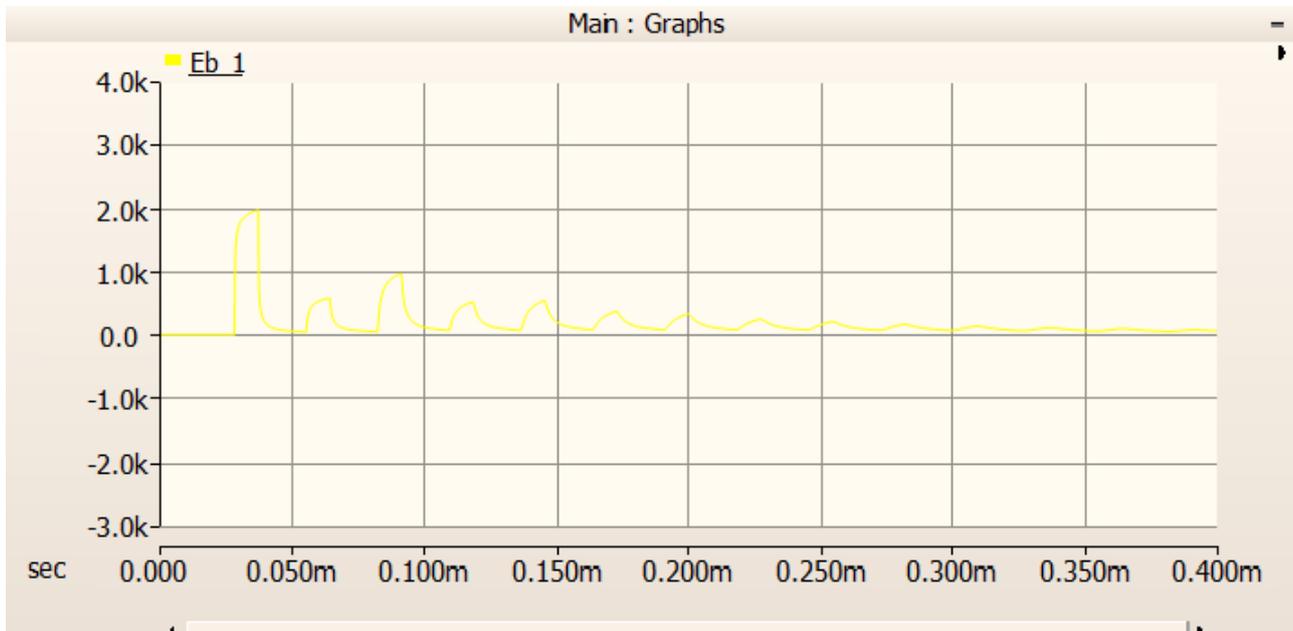


Figura 3.6.3.4 Respuesta en Fase B a falla trifásica aplicando un pulso en la Fase C

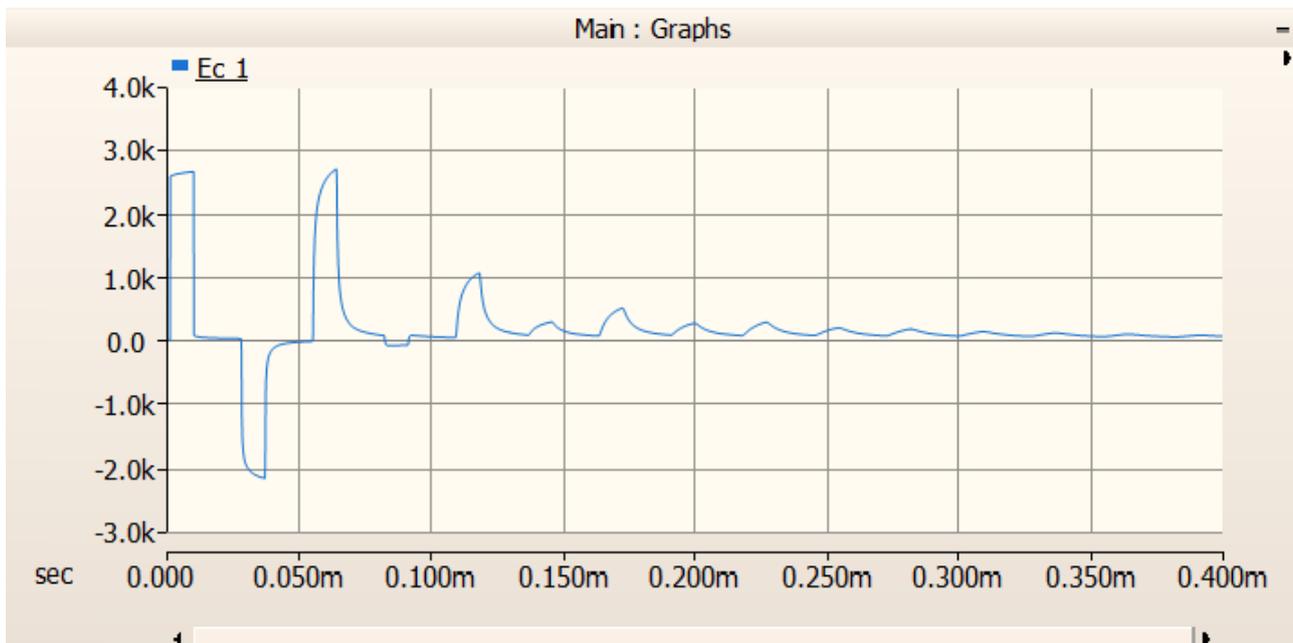


Figura 3.6.3.5 Respuesta en Fase C a falla trifásica aplicando un pulso en la Fase C

Como se puede observar en la Figuras 3.6.3.2, 3.6.3.3, 3.6.3.4 y 3.6.3.5 las reflexiones son similares a los casos anteriores en los que se aplica un pulso en la Fase A y en la Fase B. La primera reflexión sucede a los 27,45 [μs]. Para el cálculo, se debe discriminar el retardo de 1 [μs] que posee la fuente generadora de pulsos cuadrados. Entonces el tiempo de reflejo del pulso será 26,45 [μs].

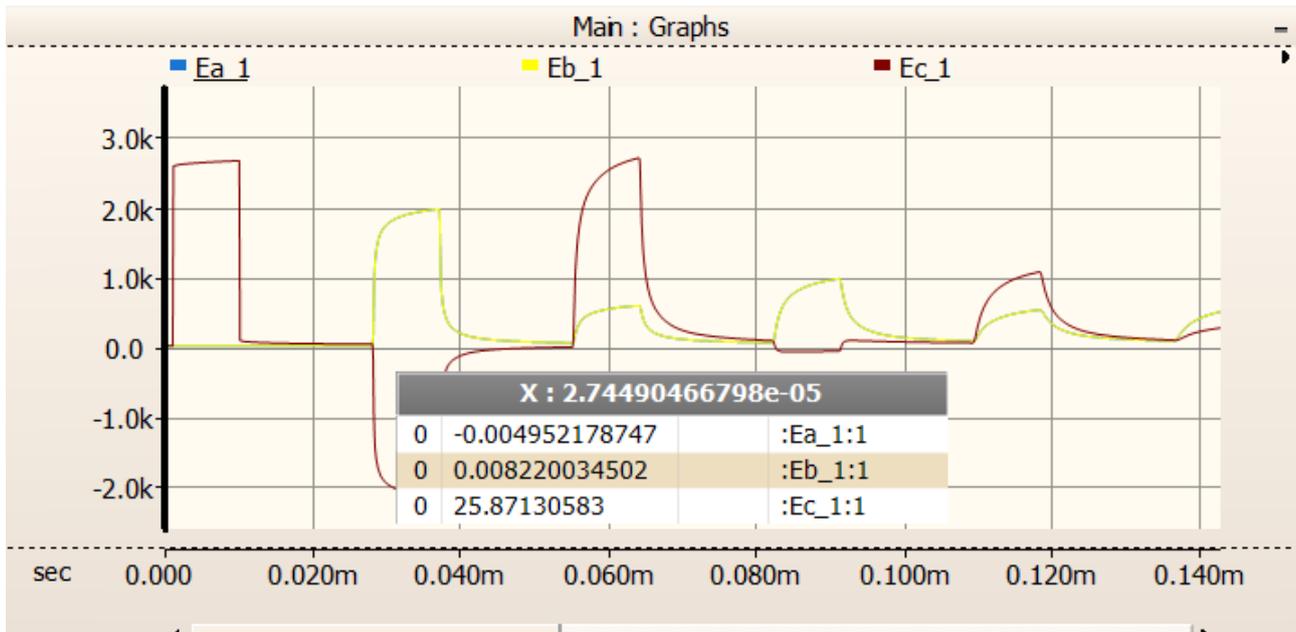


Figura 3.6.3.6 Valor de tiempo utilizado en falla trifásica aplicando un pulso en la Fase C

A partir de la Ecuación 2.7.1.1 se calcula la distancia de falla

$$X_f = \frac{1}{2} \cdot 148159439,5 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 26,45 [\mu s] = 1959,4 [m]$$

Entonces la ubicación medida de la falla es de 1959,4 [m]. Conociendo la ubicación real de la falla, se calcula el error relativo de la medición a partir de la siguiente ecuación:

$$Error_{relativo\%} = \frac{2000 [m] - 1959,4 [m]}{2000 [m]} \cdot 100\% = 2,03\%$$

Entonces el error relativo de la medición es de 2,03%.

3.7 FALLA BIFÁSICA

En el caso de la falla bifásica, se tendrá una resistencia de 1 [$\mu\Omega$] entre la fase A y B que serán las fases en falla. La tensión de entrada será de 10 [kV] para poder detectar las tensiones inducidas en los cables adyacentes con mayor grado de detalle.

3.7.1 PULSO APLICADO EN FASE A

El circuito a simular será el siguiente:

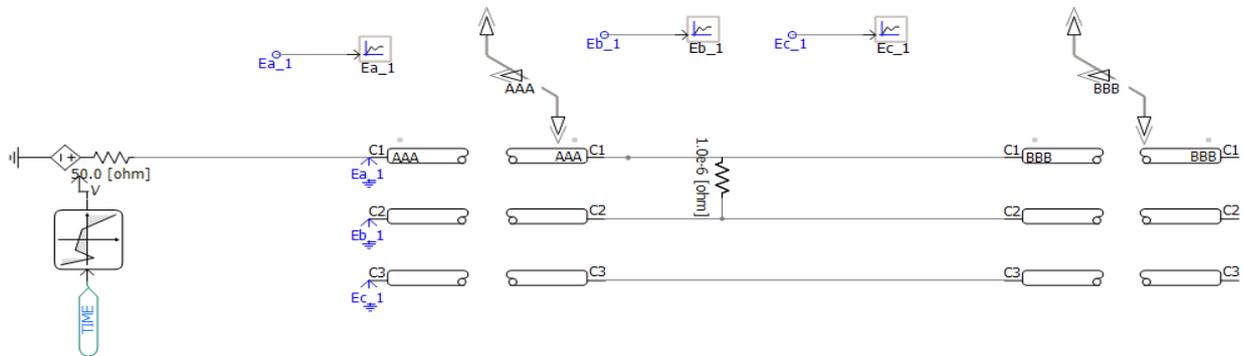


Figura 3.7.1.1 Circuito falla bifásica aplicando pulso en la Fase A

Al simular el circuito el resultado fue el siguiente

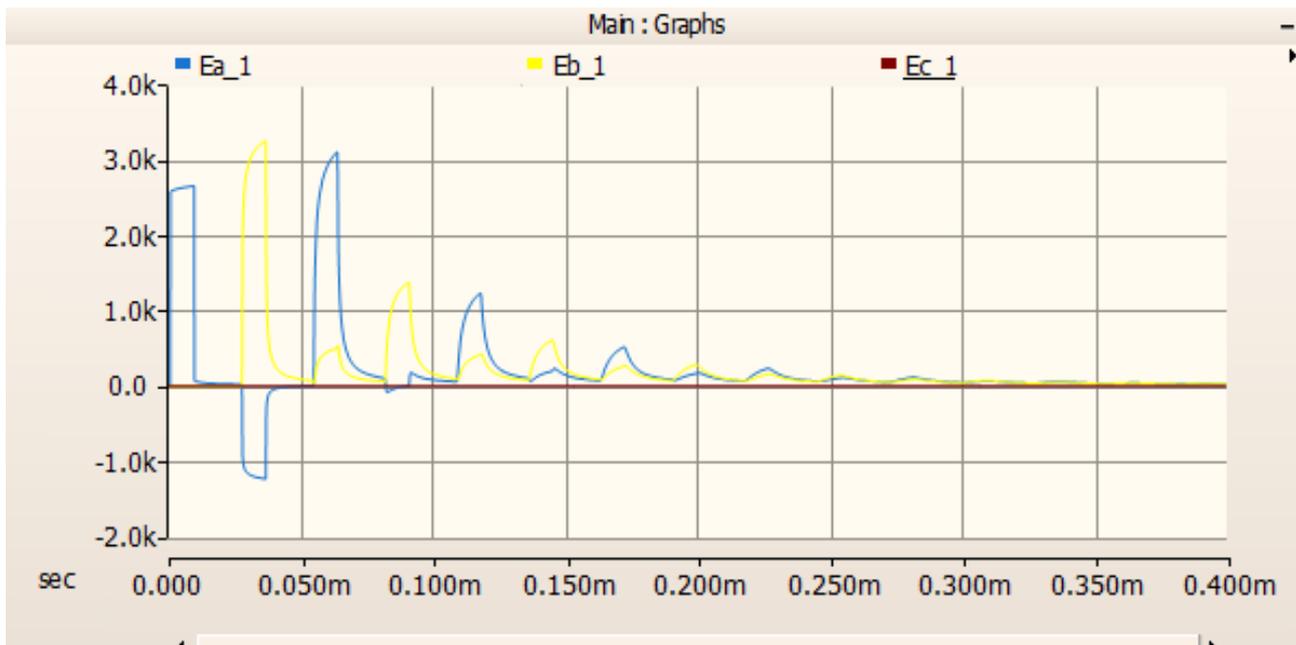


Figura 3.7.1.2 Respuestas a falla bifásica aplicando pulso en la Fase A

A continuación se encuentran la respuesta en la Fase A, B y C por separado.

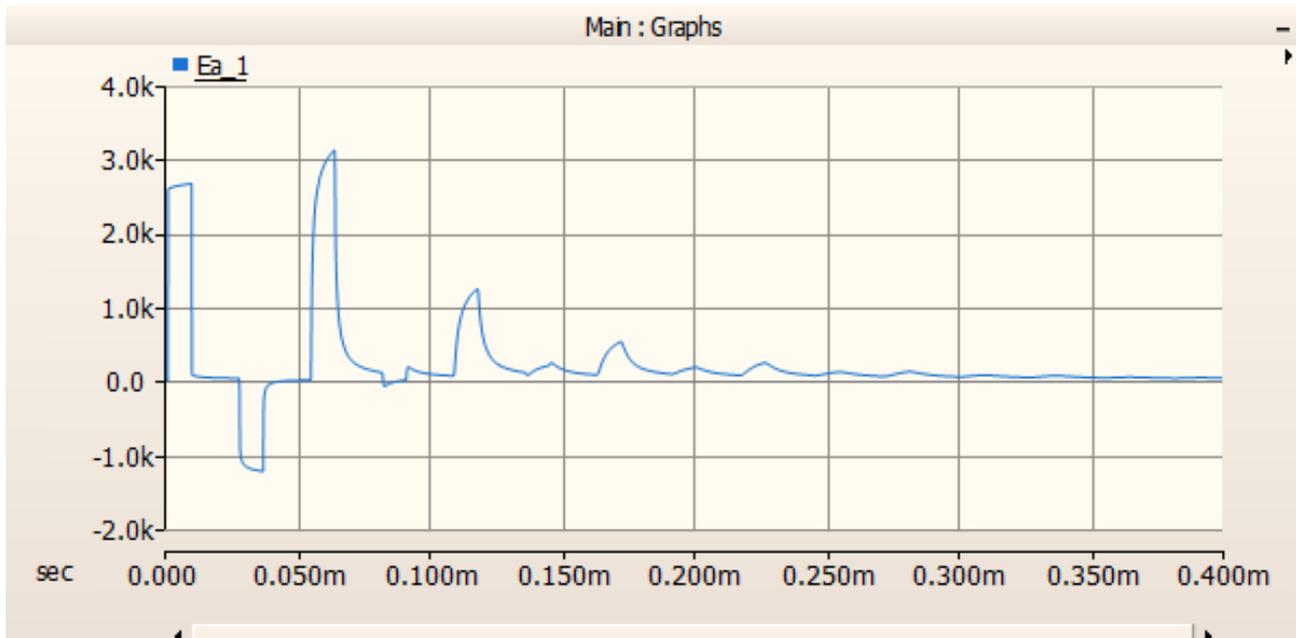


Figura 3.7.1.3 Respuesta en Fase A a falla bifásica aplicando un pulso en la Fase A

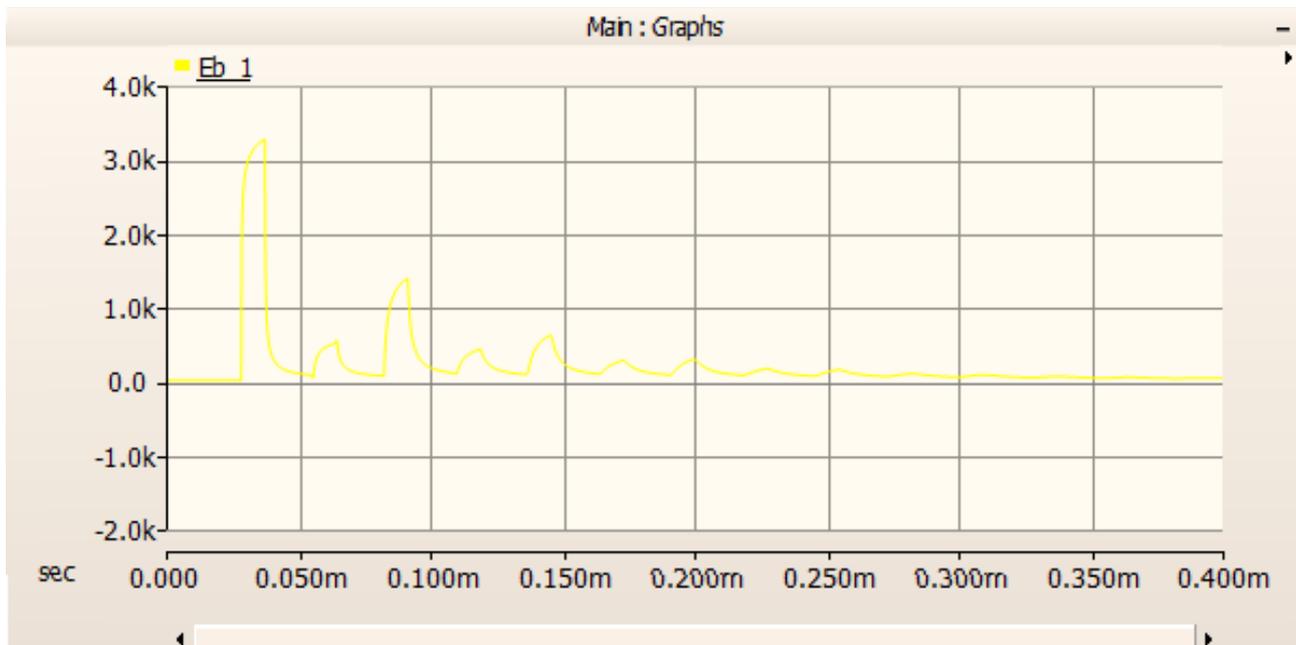


Figura 3.7.1.4 Respuesta en Fase B a falla bifásica aplicando un pulso en la Fase A

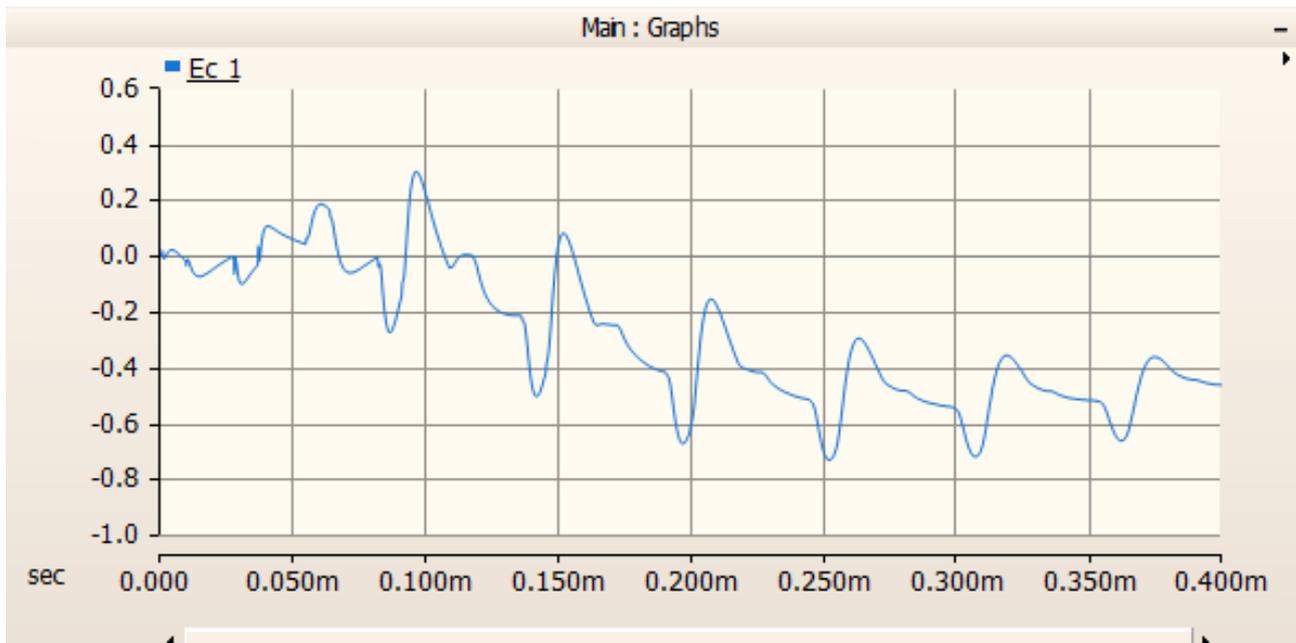


Figura 3.7.1.5 Respuesta en Fase C a falla bifásica aplicando un pulso en la Fase A

Como se puede observar en la Figura 3.7.1.3, la reflexión de la Fase A posee sentido negativo, debido a que la tensión aplicada por la fuente generadora ve la baja impedancia de falla. El sentido de la primer reflexión de la respuesta de la Fase B es positiva, producto de la tensión emitida por el punto de la falla.

En la Figura 3.7.1.5, se observa que en la Fase C no está afectada por la falla. Sin embargo, posee una mínima inducción. La reflexión presente en la Fase C no demuestra ninguna característica del tipo de falla ni de la ubicación de la misma.

A partir de la primera reflexión de las fases participantes de la falla, se puede obtener el punto de falla.

La primera reflexión sucede a los 28 [μ s]. Discriminando el retardo de 1 [μ s] que posee la fuente generadora de pulsos cuadrados el tiempo de reflejo del pulso será 27 [μ s].

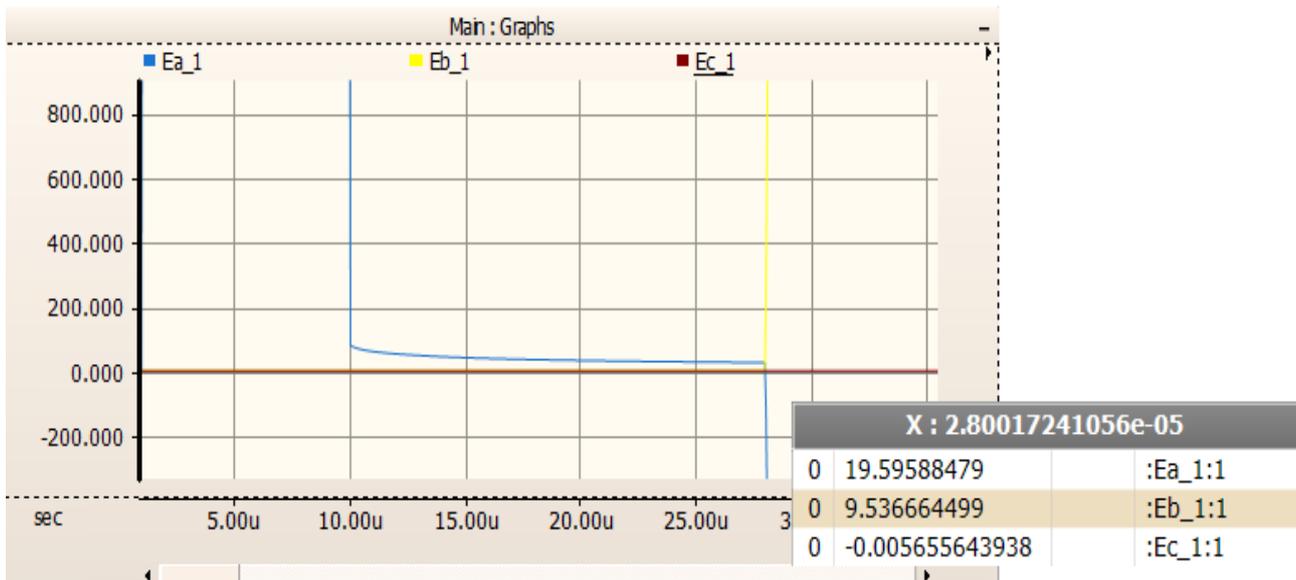


Figura 3.7.1.6 Valor de tiempo utilizado en falla bifásica aplicando un pulso en la Fase A

A partir de la Ecuación 2.7.1.1 se calcula la distancia de falla

$$X_f = \frac{1}{2} \cdot 148159439,5 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 27 [\mu s] = 2000,15 [m]$$

Entonces la ubicación medida de la falla es de 2000,15 [m]. Conociendo la ubicación real de la falla, se calcula el error relativo de la medición a partir de la siguiente ecuación:

$$Error_{relativo\%} = \frac{2000,15 [m] - 2000 [m]}{2000 [m]} \cdot 100\% = 0,008\%$$

Entonces el error relativo de la medición es de 0,008%. La medición debe realizarse en cada uno de los cables. Para saber qué tipo de falla se posee se debe comparar los tiempos en los que según las mediciones los cables poseen una falla y conocer en cuáles cables la reflexión es producto de una inducción de bajo voltaje.

3.7.2 PULSO APLICADO EN FASE B

El circuito a simular será el siguiente:

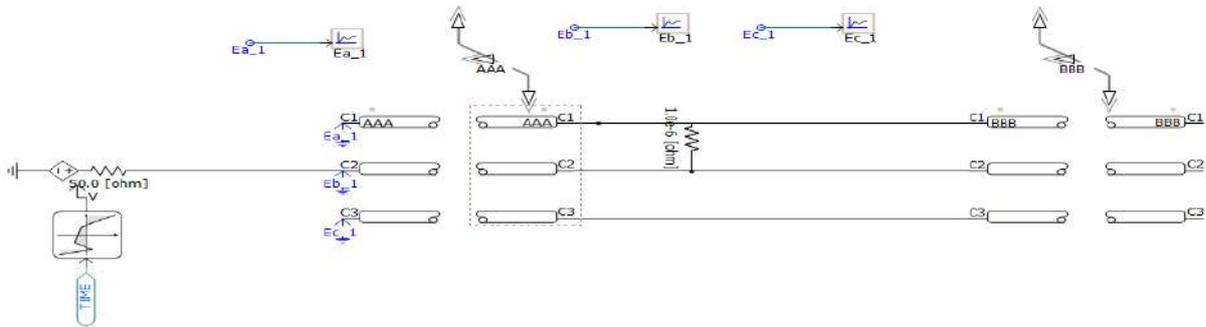


Figura 3.7.2.1 Circuito falla bifásica aplicando pulso en la Fase B

Al simular el circuito el resultado fue el siguiente

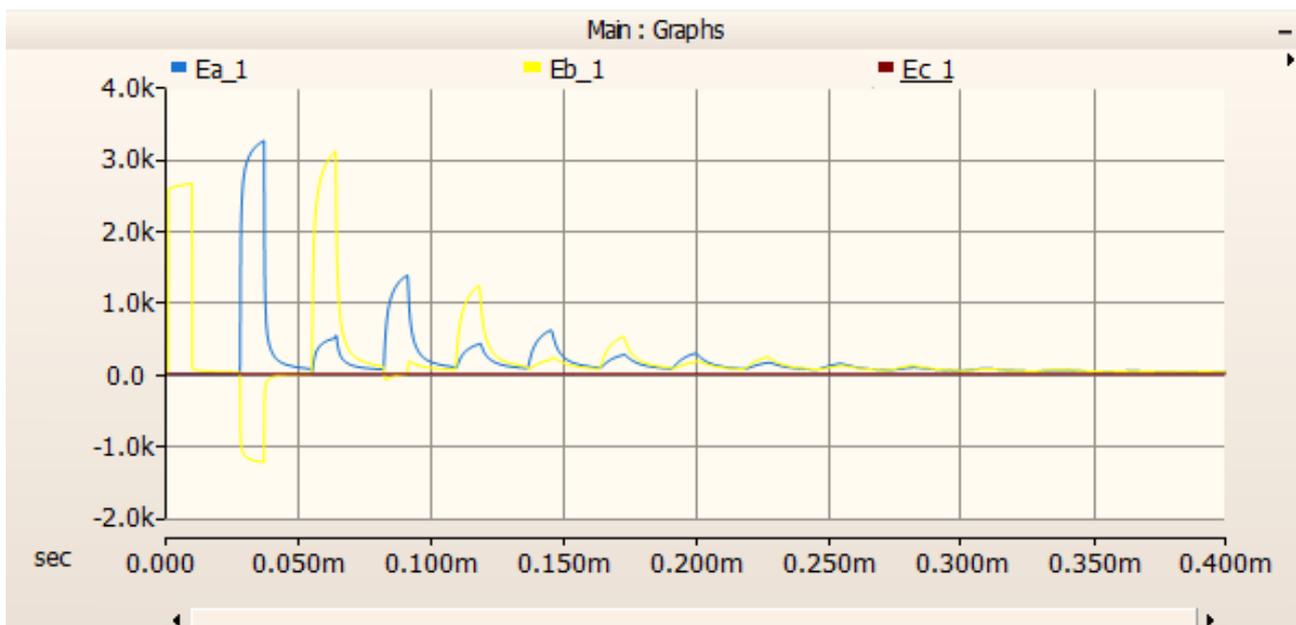


Figura 3.7.2.2 Respuestas a falla bifásica aplicando pulso en la Fase B

A continuación se encuentran la respuesta en la Fase A, B y C por separado.

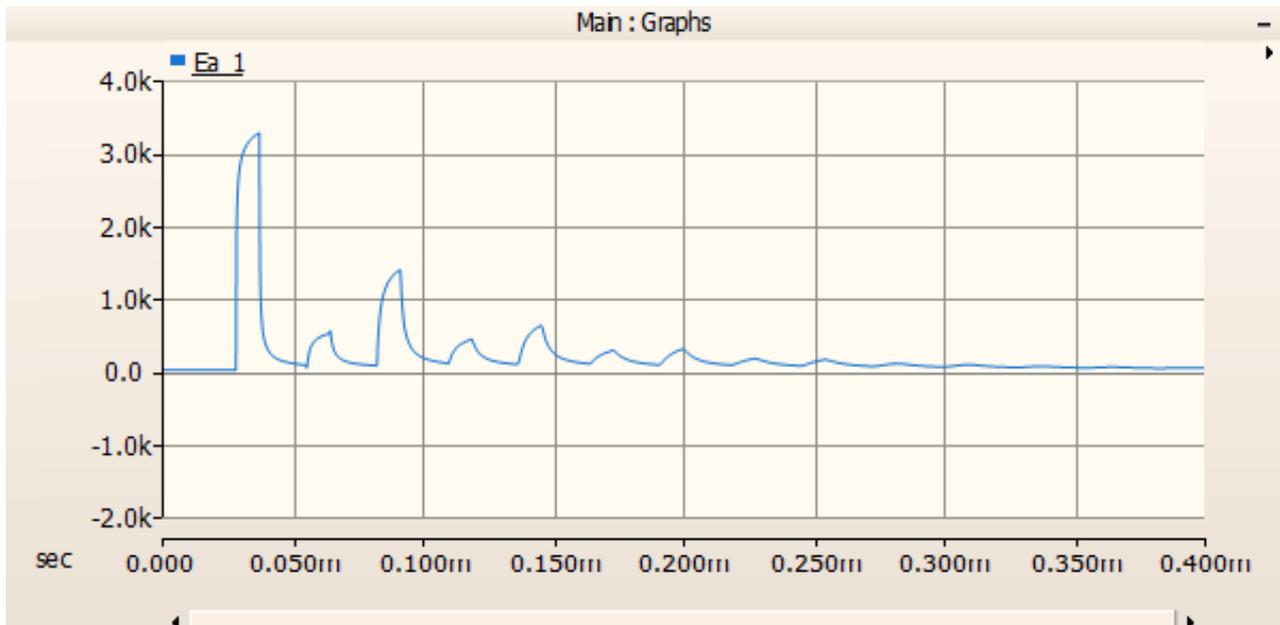


Figura 3.7.2.3 Respuesta en Fase A a falla bifásica aplicando un pulso en la Fase B

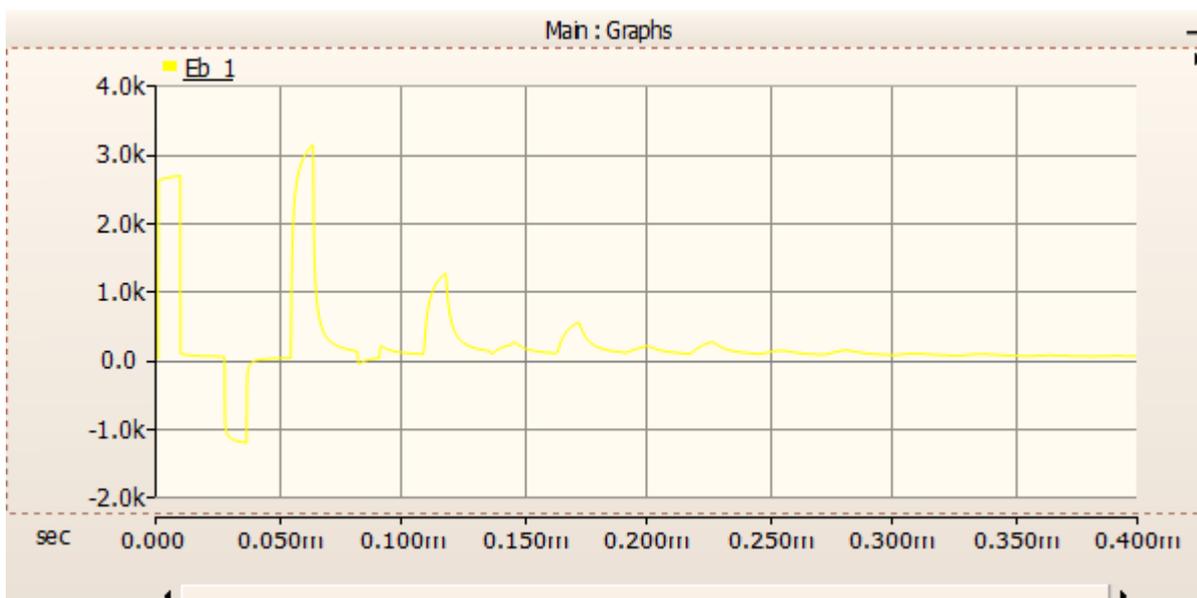


Figura 3.7.2.4 Respuesta en Fase B a falla bifásica aplicando un pulso en la Fase B

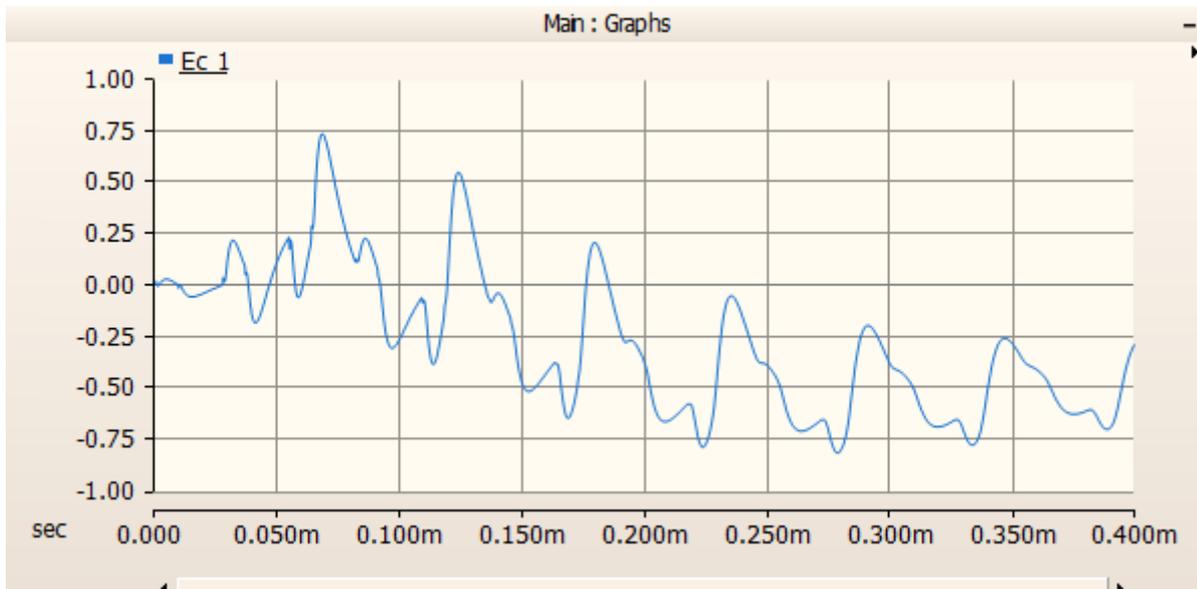


Figura 3.7.2.5 Respuesta en Fase C a falla bifásica aplicando un pulso en la Fase B

Analizando las figuras del caso 3.7.1 y del caso 3.7.2 se deduce que la respuesta de la Figura 3.7.1.3 es igual a la de la Figura 3.7.2.4, mientras que 3.7.1.4 es igual a 3.7.2.3 mientras que las respuestas en la Fase C son iguales (Figuras 3.7.1.5 y 3.7.2.5).

La primera reflexión sucede a los 27,76 [μs], al discriminar el retardo de 1 [μs] que posee la fuente generadora de pulsos cuadrados, el tiempo de reflejo del pulso será 26,76 [μs].

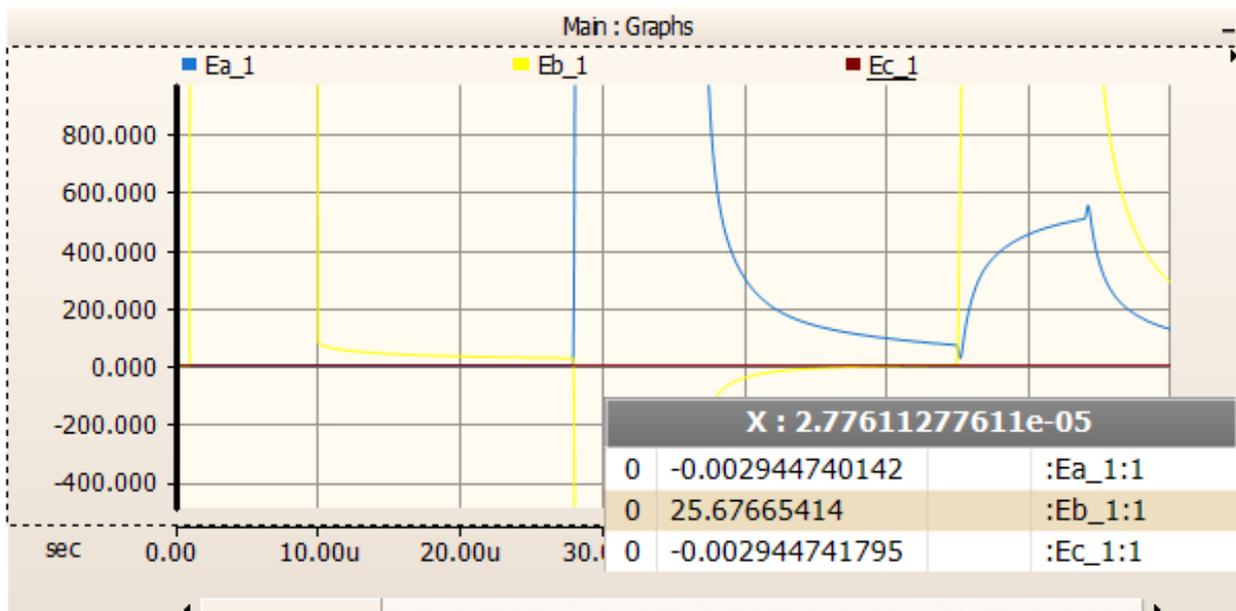


Figura 3.7.2.6 Valor de tiempo utilizado en falla bifásica aplicando un pulso en la Fase B

A partir de la Ecuación 2.7.1.1 se calcula la distancia de falla

$$X_f = \frac{1}{2} \cdot 148159439,5 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 26,76 [\mu s] = 1982,37 [m]$$

Entonces la ubicación medida de la falla es de 1982,37 [m]. Conociendo la ubicación real de la falla, se calcula el error relativo de la medición a partir de la siguiente ecuación:

$$Error_{relativo\%} = \frac{2000 [m] - 1982,37 [m]}{2000 [m]} \cdot 100\% = 0,88\%$$

Entonces el error relativo de la medición es de 0,88%.

3.7.3 PULSO APLICADO EN FASE C

El circuito a simular será el siguiente:

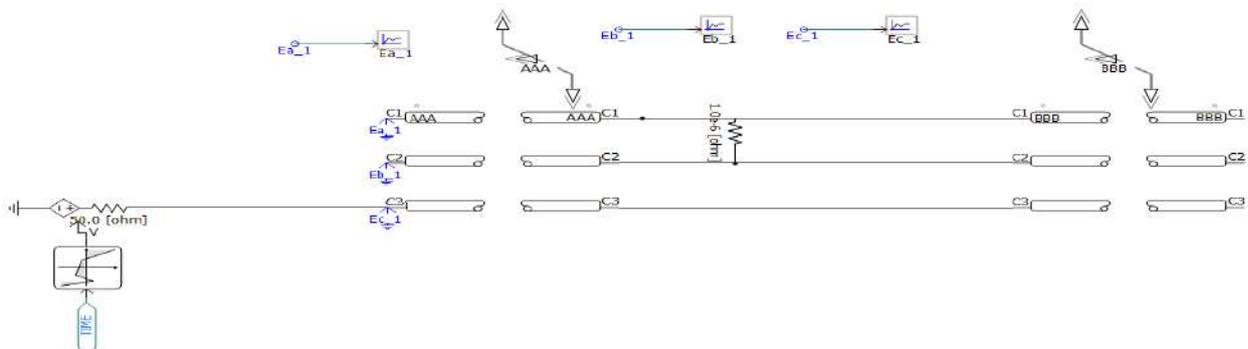


Figura 3.7.3.1 Circuito falla bifásica aplicando pulso en la Fase C

Al simular el circuito el resultado fue el siguiente

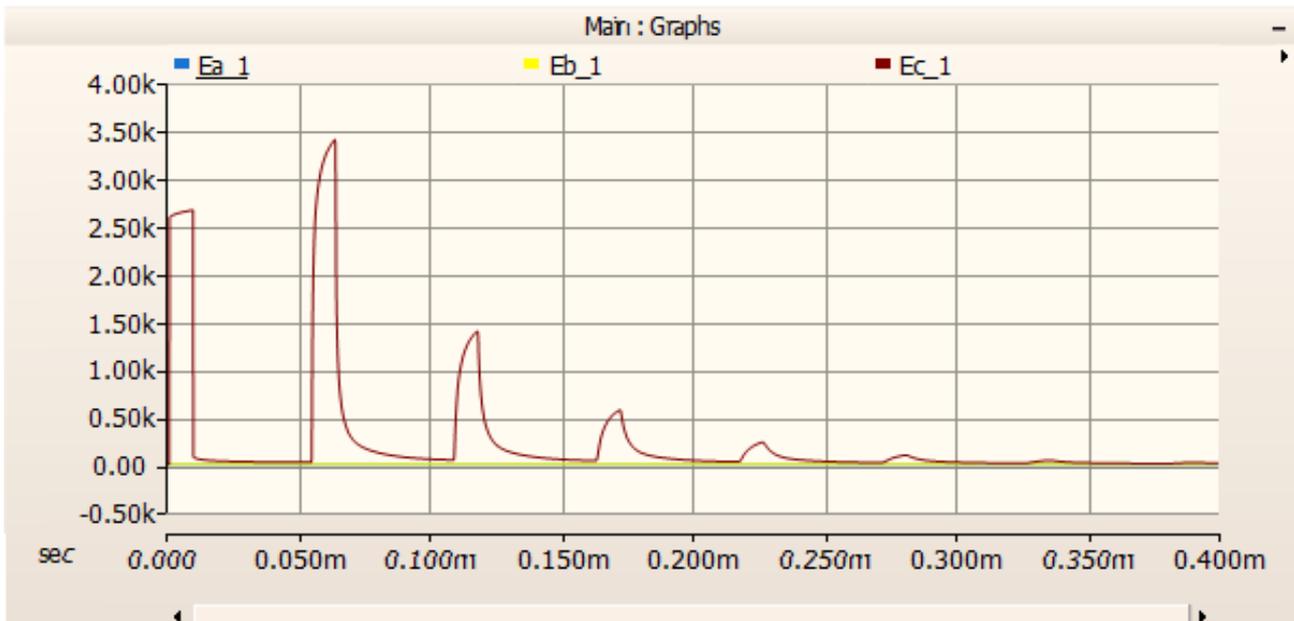


Figura 3.7.3.2 Respuestas a falla bifásica aplicando pulso en la Fase C

A continuación se encuentran la respuesta en la Fase A, B y C por separado.

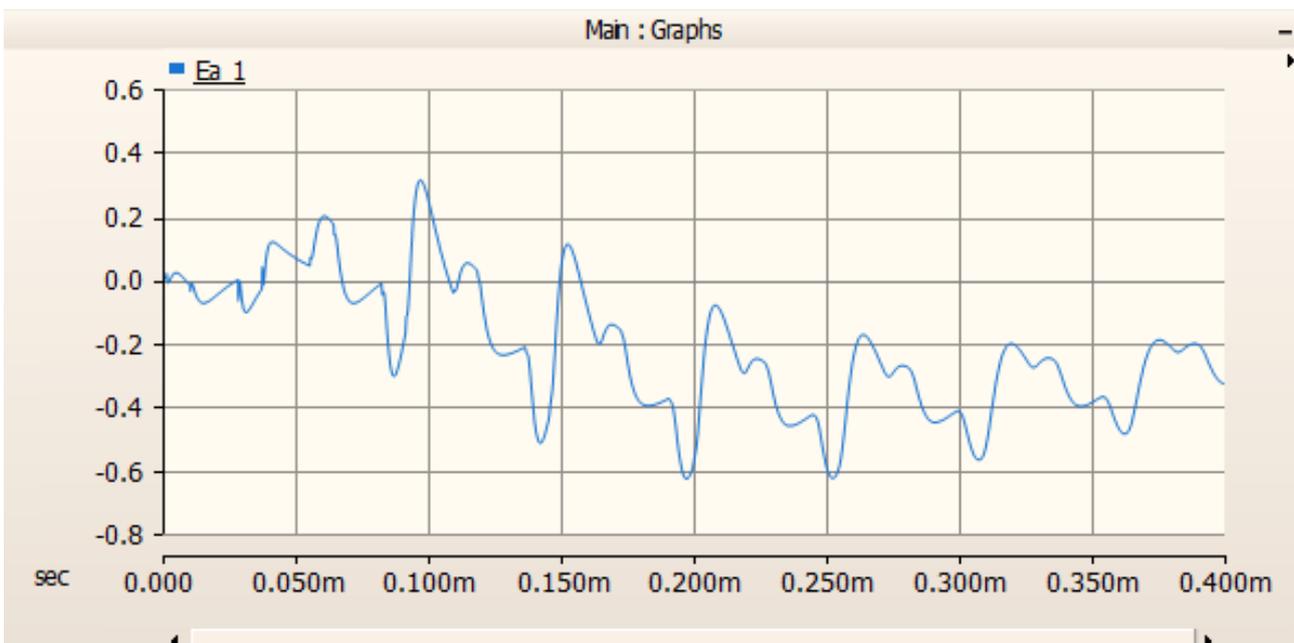


Figura 3.7.3.3 Respuesta en Fase A a falla bifásica aplicando un pulso en la Fase C

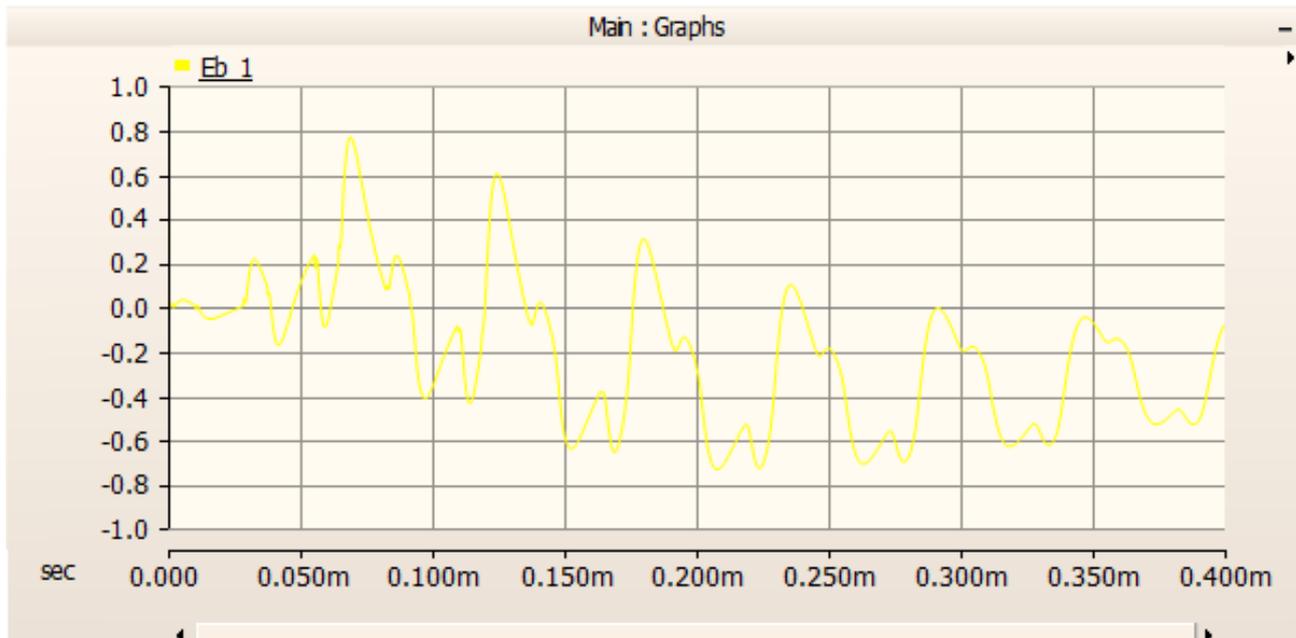


Figura 3.7.3.4 Respuesta en Fase B a falla bifásica aplicando un pulso en la Fase C

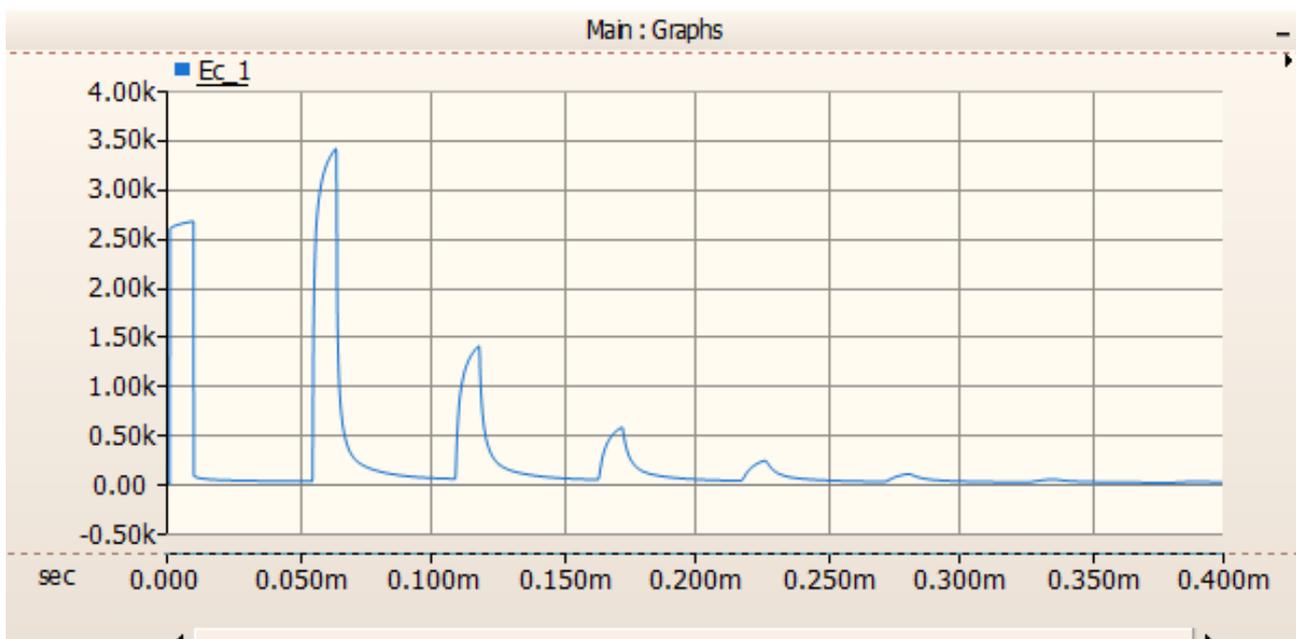


Figura 3.7.3.5 Respuesta en Fase C a falla bifásica aplicando un pulso en la Fase C

Las respuestas de las Fases A y B (Figura 3.7.3.3 y 3.7.3.4) son el resultado de aplicar un pulso en la Fase C que no participa de la falla. Las reflexiones en estas figuras son bajas y distorsionadas, por ende no proporcionan ningún dato importante.

En la respuesta de la Fase C (Figura 3.7.3.5), al observar la primera reflexión, da un tiempo de 55,03 [μs]. Para el cálculo, se debe discriminar el retardo de 1 [μs] que posee la fuente generadora de pulsos cuadrados. Entonces el tiempo de reflejo del pulso será 54,03 [μs].

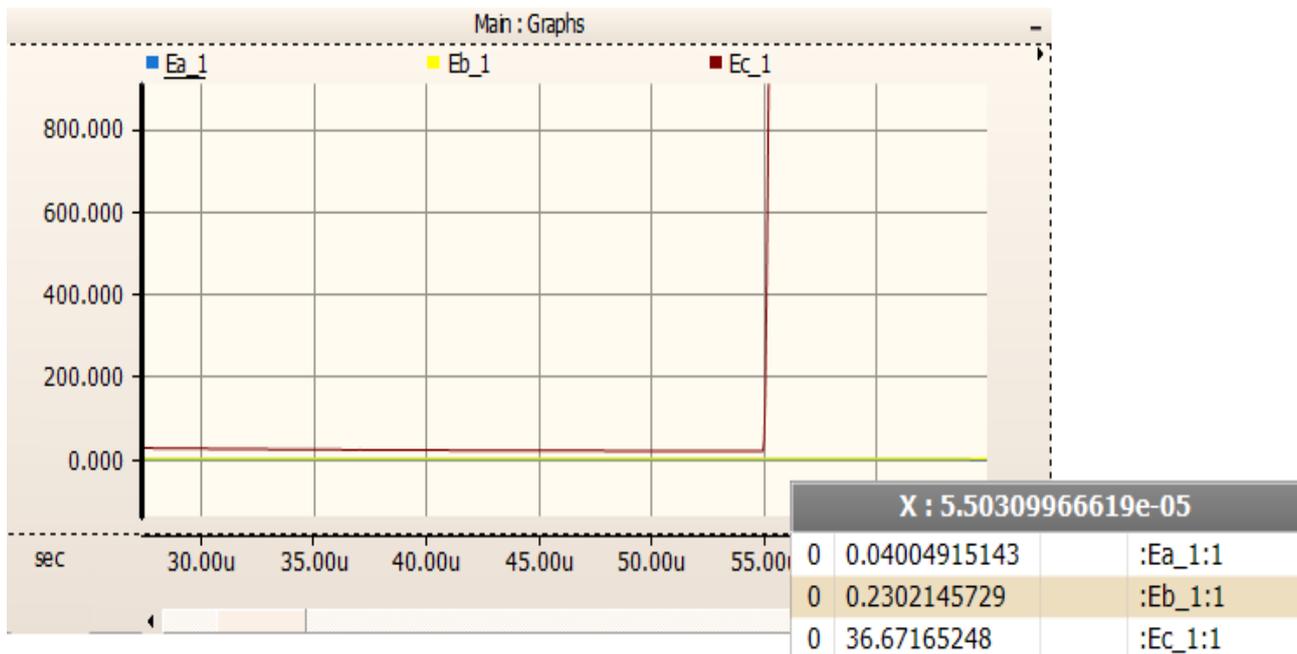


Figura 3.7.3.6 Valor de tiempo utilizado en falla bifásica aplicando un pulso en la Fase C

A partir de la Ecuación 2.7.1.1 se calcula la distancia de falla

$$X_f = \frac{1}{2} \cdot 148159439,5 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 55,03 [\mu s] = 4002,57 [m]$$

Este valor que de distancia podría ser el valor de una falla de alta resistencia o el fin de la línea. Pero sabiendo que la longitud del sistema es de 4000 [m], el valor arrojado es el de la distancia final.

3.8 FALLA BIFÁSICA A TIERRA

Para la falla bifásica a tierra, se realiza a partir del caso de falla bifásica. Partiendo de este modelo, se ingresa una resistencia de 1 [μΩ]. La resistencia se agrega desde la pestaña "Components" y se selecciona el ítem "resistor" el cual se conecta a la Fase B y luego se agrega desde la misma pestaña la tierra "ground". La tensión de entrada será de 10 [kV] para poder visualizar las tensiones inducidas en la reflectometría.

3.8.1 PULSO APLICADO EN FASE A

El circuito a simular será el siguiente:

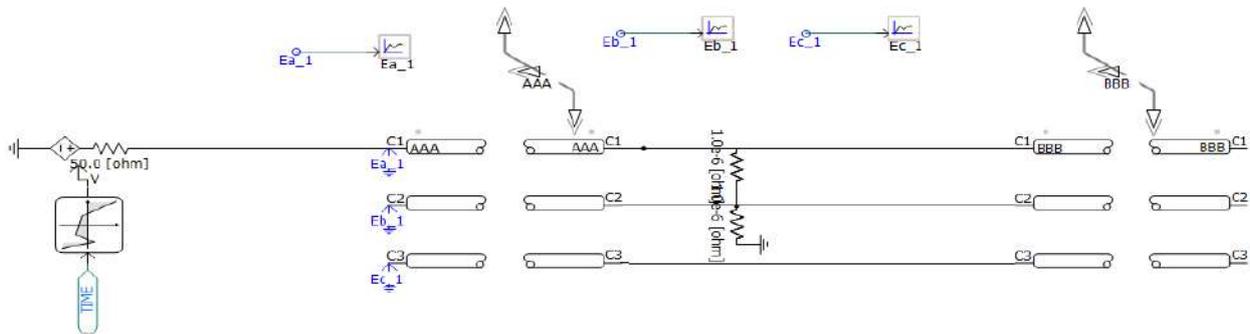


Figura 3.8.1.1 Circuito falla bifásica a tierra aplicando pulso en la Fase A

Al simular el circuito el resultado fue el siguiente

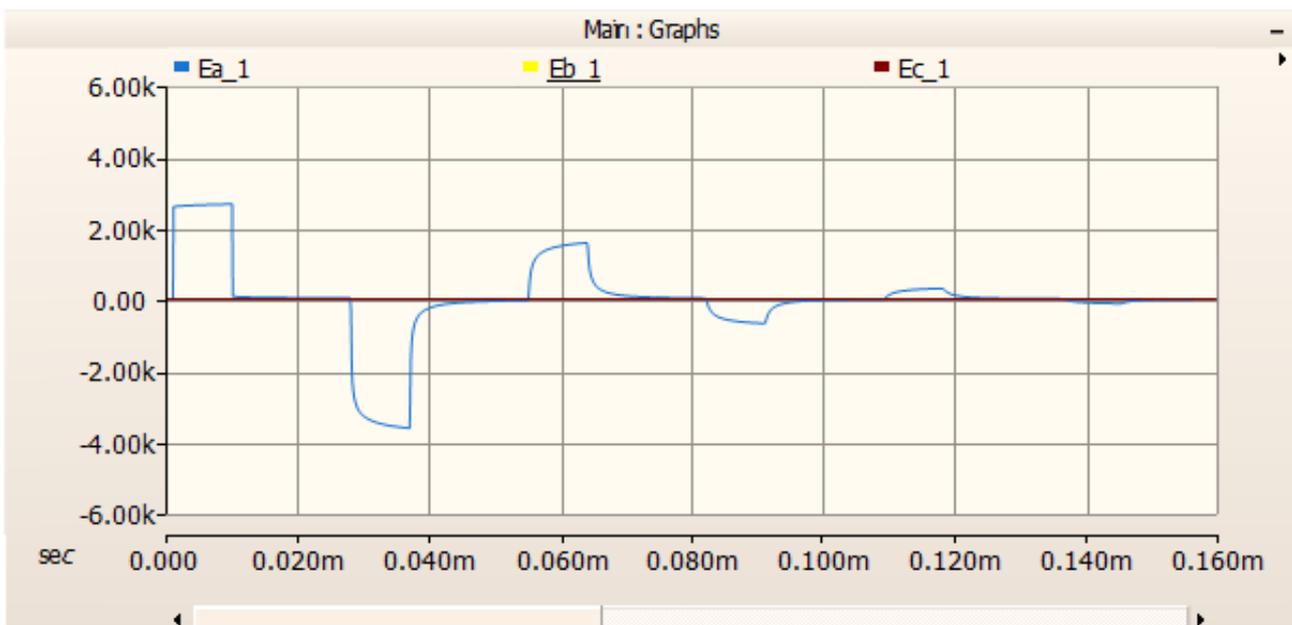


Figura 3.8.1.2 Respuestas a falla bifásica a tierra aplicando pulso en la Fase A

A continuación se encuentran la respuesta en la Fase A, B y C por separado.

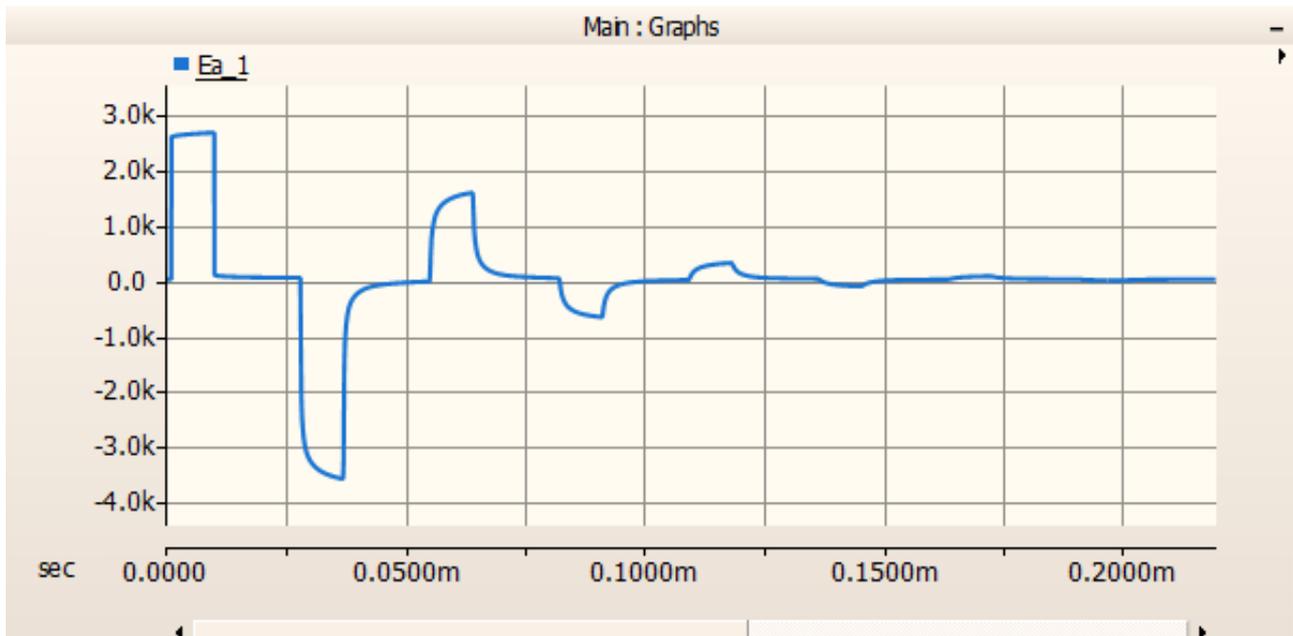


Figura 3.8.1.3 Respuesta en Fase A a falla bifásica a tierra aplicando un pulso en la Fase A

Analizando la Figura 3.8.1.3 se deduce como en los casos anteriores que al aplicar un pulso en el cable que posee una falla con impedancia baja la reflexión será negativa.

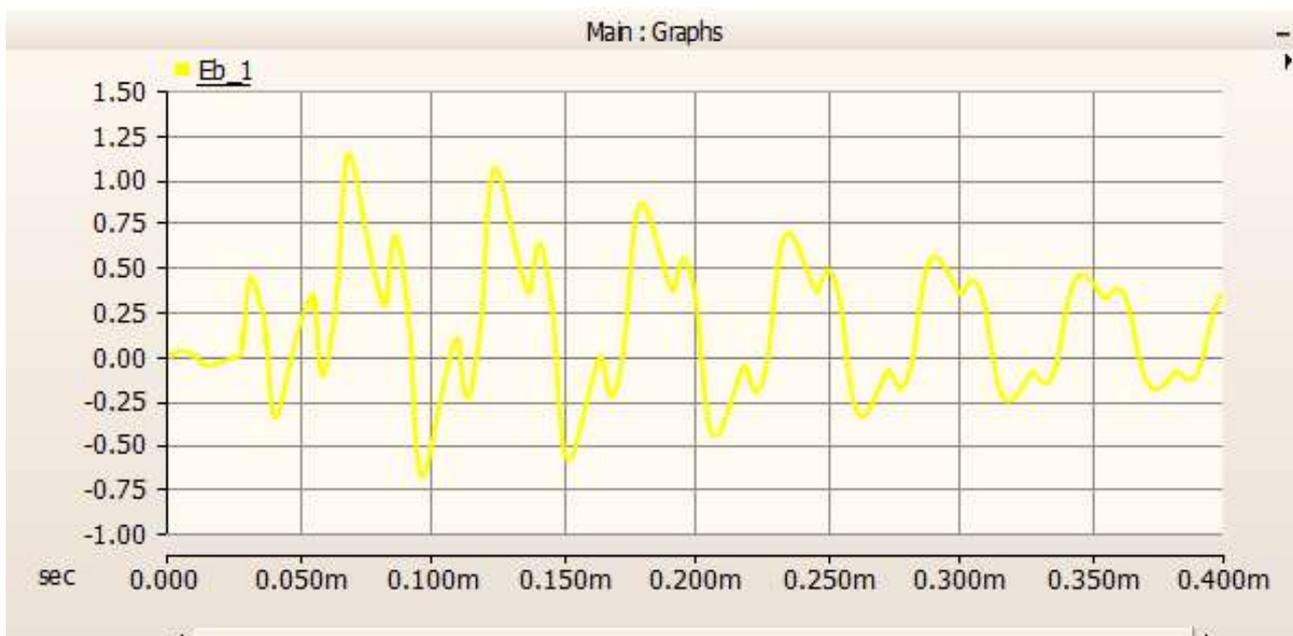


Figura 3.8.1.4 Respuesta en Fase B a falla bifásica a tierra aplicando un pulso en la Fase A

En la Figura 3.8.1.4 se puede observar que presenta una pequeña reflexión. Si bien está en corto circuito con la Fase A y posee una falla a tierra, la tensión del pulso que se trasmite

de la fase bajo prueba atenúa considerablemente la tensión.

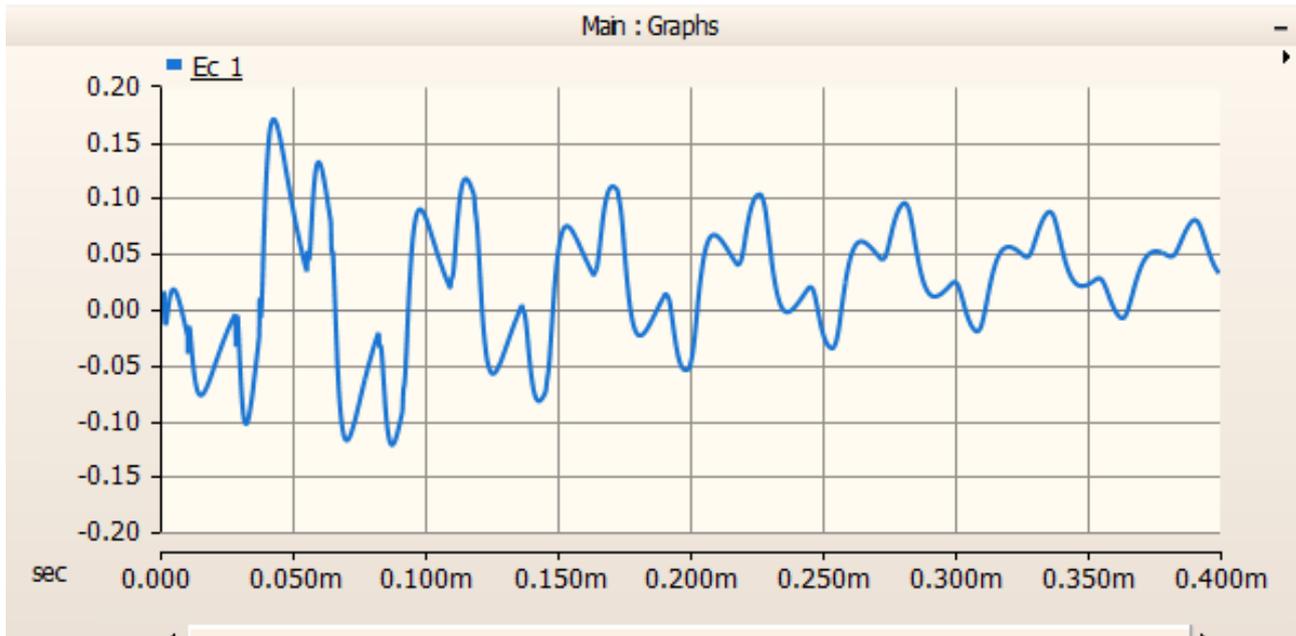


Figura 3.8.1.5 Respuesta en Fase C a falla bifásica a tierra aplicando un pulso en la Fase A

Como se puede observar en la Figura 3.8.1.5, la reflexión se debe a una mínima inducción y no está afectada por la falla. La reflexión presente en la Fase C no demuestra ninguna característica del tipo de falla ni de la ubicación de la misma.

Analizando la Figura 3.8.1.3, la primera reflexión sucede a los 27,98 [μs]. Discriminando el retardo de 1 [μs] que posee la fuente generadora de pulsos cuadrados el tiempo de reflejo del pulso será 26,98 [μs].

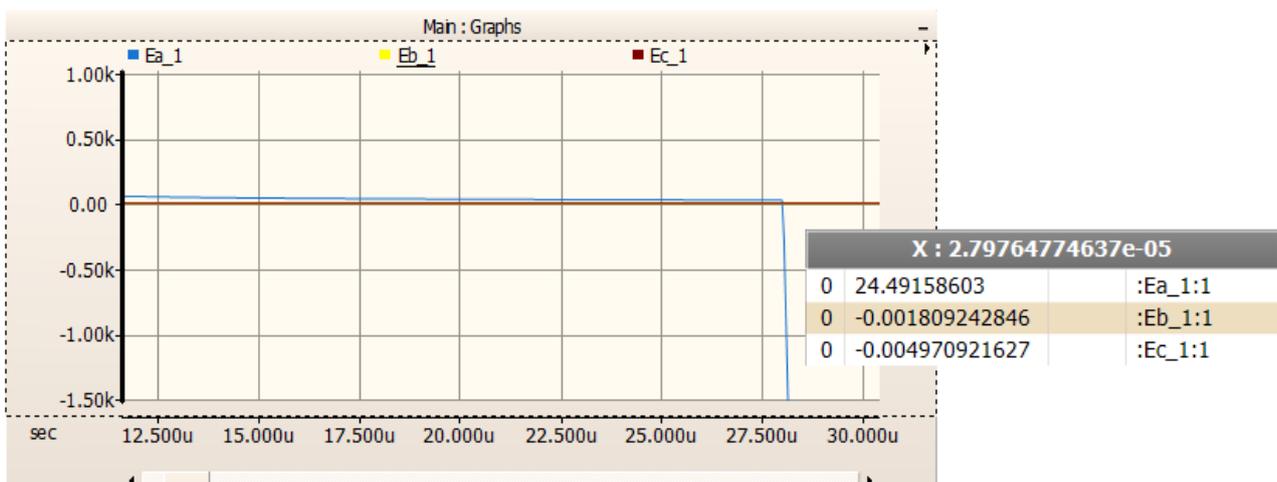


Figura 3.8.1.6 Valor de tiempo utilizado en falla bifásica a tierra aplicando un pulso en la Fase A

A partir de la Ecuación 2.7.1.1 se calcula la distancia de falla

$$X_f = \frac{1}{2} \cdot 148159439,5 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 26,98 [\mu s] = 1998,41 [m]$$

Entonces la ubicación medida de la falla es de 1998,41 [m]. Conociendo la ubicación real de la falla, se calcula el error relativo de la medición a partir de la siguiente ecuación:

$$Error_{relativo\%} = \frac{2000 [m] - 1998,41 [m]}{2000 [m]} \cdot 100\% = 0,0795\%$$

Entonces el error relativo de la medición es de 0,0795%. La medición debe realizarse en cada uno de los cables. Ya que la Fase A es la única que indicará una posición de falla. Al medir las otras fases, éstas darán información sobre el tipo de falla que existe.

3.8.2 PULSO APLICADO EN FASE B

El circuito a simular será el siguiente:

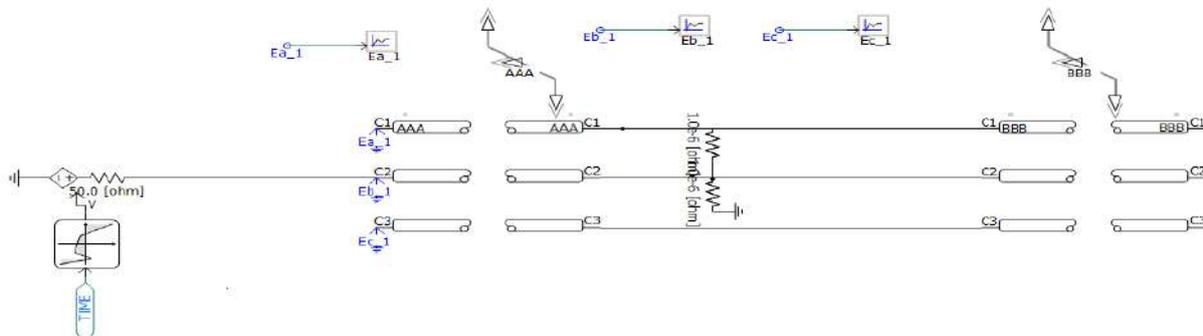


Figura 3.8.2.1 Circuito falla bifásica a tierra aplicando pulso en la Fase B

Al simular el circuito el resultado fue el siguiente

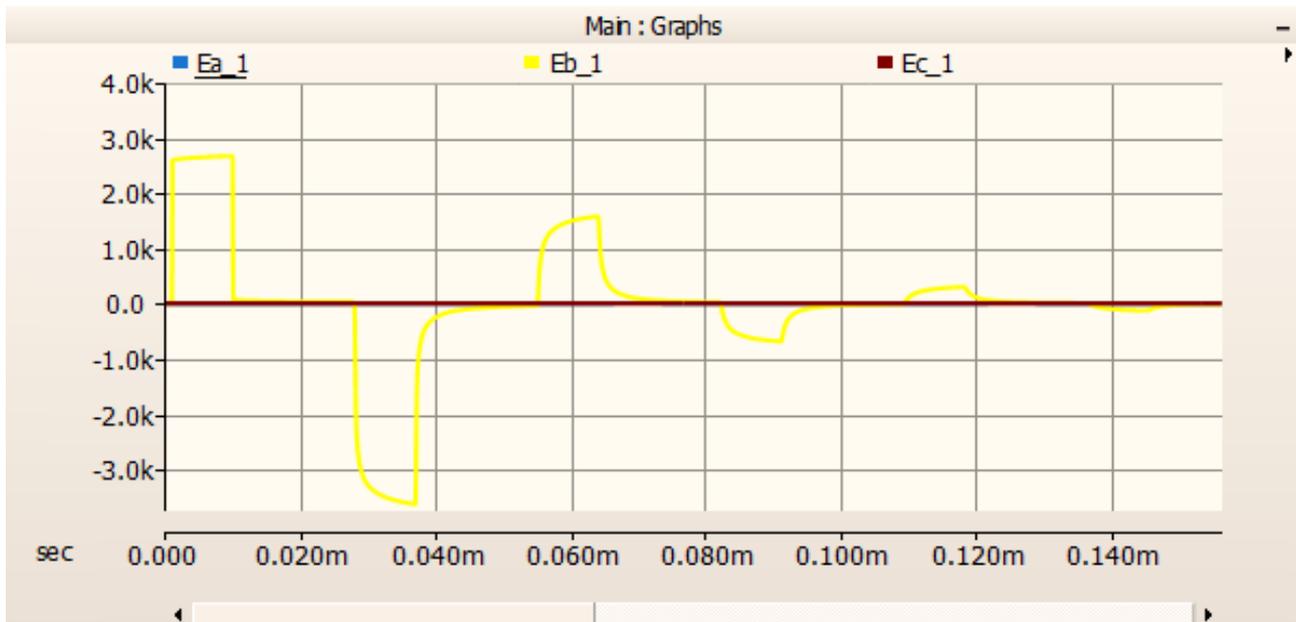


Figura 3.8.2.2 Respuestas a falla bifásica a tierra aplicando pulso en la Fase B

A continuación se encuentran la respuesta en la Fase A, B y C por separado.

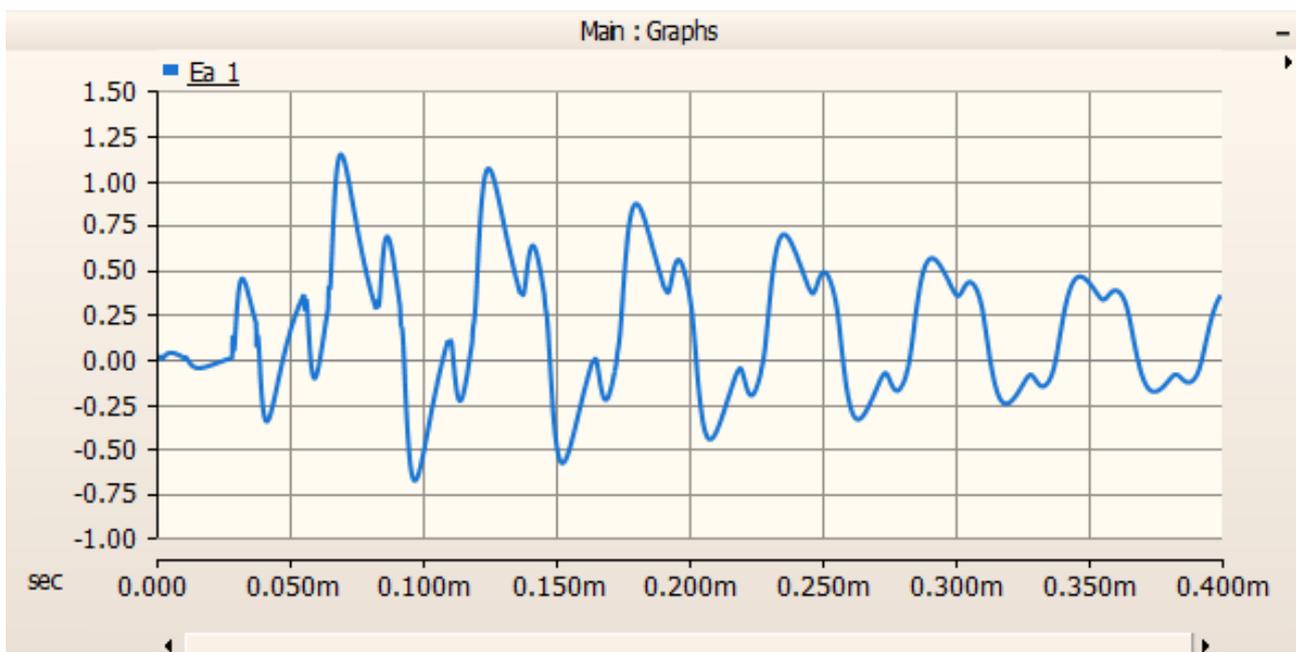


Figura 3.8.2.3 Respuesta en Fase A a falla bifásica a tierra aplicando un pulso en la Fase B

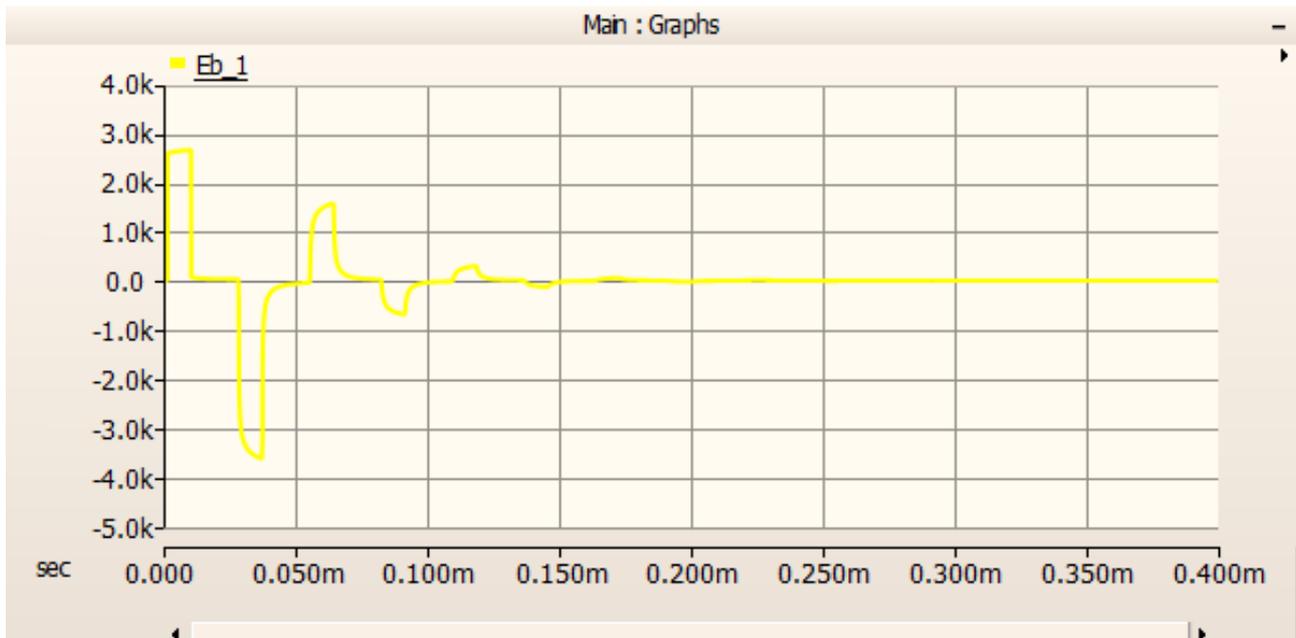


Figura 3.8.2.4 Respuesta en Fase B a falla bifásica a tierra aplicando un pulso en la Fase B

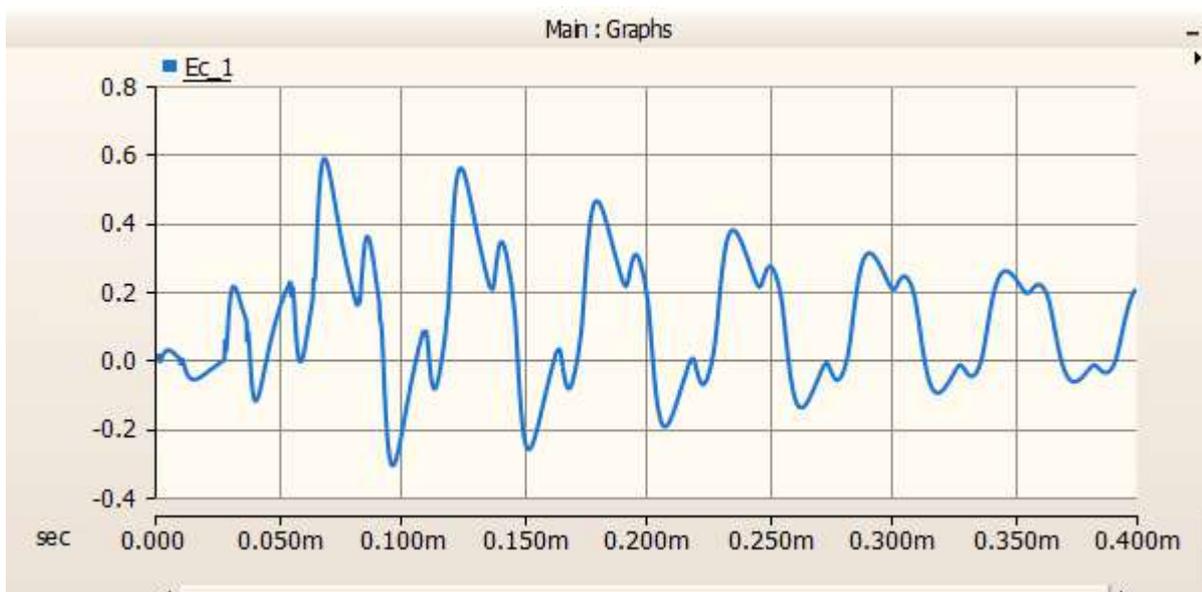


Figura 3.8.2.5 Respuesta en Fase C a falla bifásica a tierra aplicando un pulso en la Fase B

Analizando la Figura 3.8.2.4, la primera reflexión sucede a los 27,96 [μs]. Discriminando el retardo de 1 [μs] que posee la fuente generadora de pulsos cuadrados el tiempo de reflejo del pulso será 26,96 [μs].

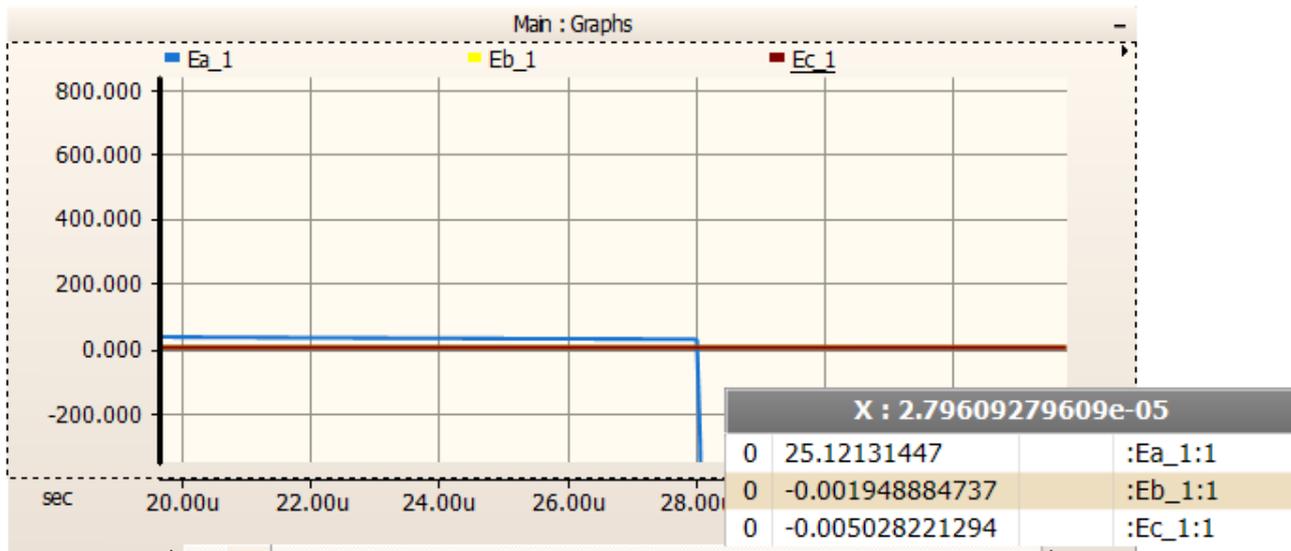


Figura 3.8.2.6 Valor de tiempo utilizado en falla bifásica a tierra aplicando un pulso en la Fase B

A partir de la Ecuación 2.7.1.1 se calcula la distancia de falla

$$X_f = \frac{1}{2} \cdot 148159439,5 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 26,96 [\mu s] = 1997,19 [m]$$

Entonces la ubicación medida de la falla es de 1997,19 [m]. Conociendo la ubicación real de la falla, se calcula el error relativo de la medición a partir de la siguiente ecuación:

$$Error_{relativo\%} = \frac{2000 [m] - 1997,19 [m]}{2000 [m]} \cdot 100\% = 0,14\%$$

Entonces el error relativo de la medición es de 0,14%.

3.8.3 PULSO APLICADO EN FASE C

El circuito a simular será el siguiente:

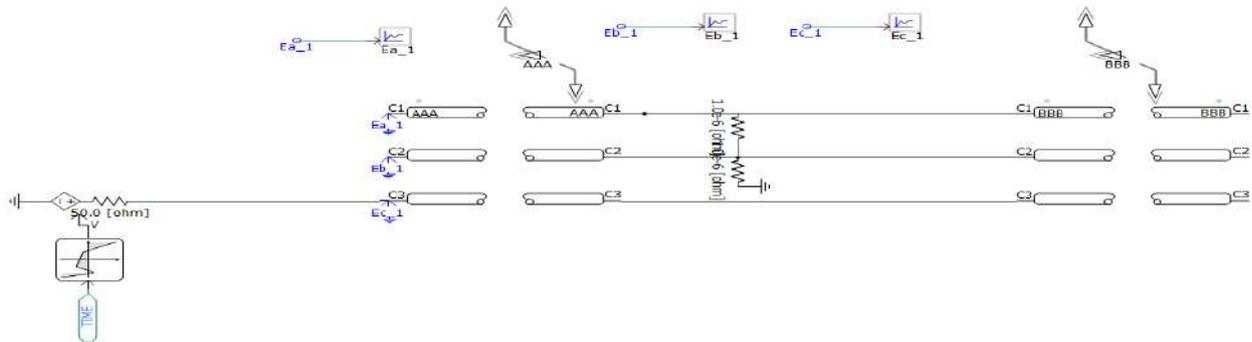


Figura 3.8.3.1 Circuito falla bifásica a tierra aplicando pulso en la Fase C

Al simular el circuito el resultado fue el siguiente

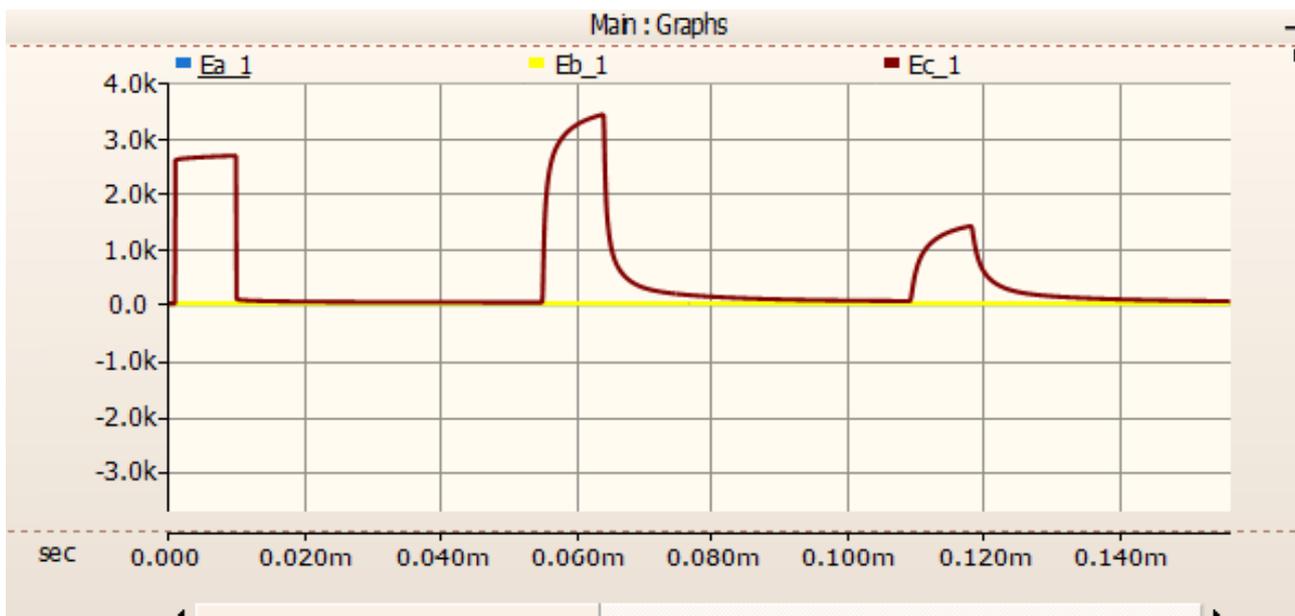


Figura 3.8.3.2 Respuestas a falla bifásica a tierra aplicando pulso en la Fase C

A continuación se encuentran la respuesta en la Fase A, B y C por separado.

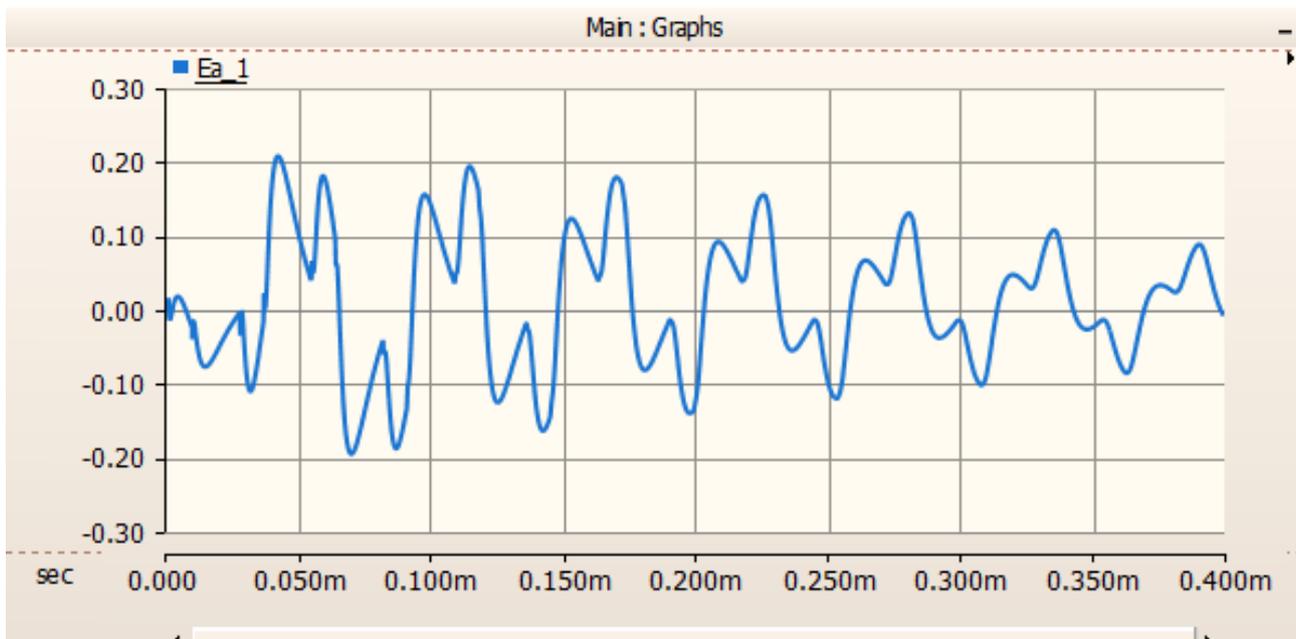


Figura 3.8.3.3 Respuesta en Fase A a falla bifásica a tierra aplicando un pulso en la Fase C

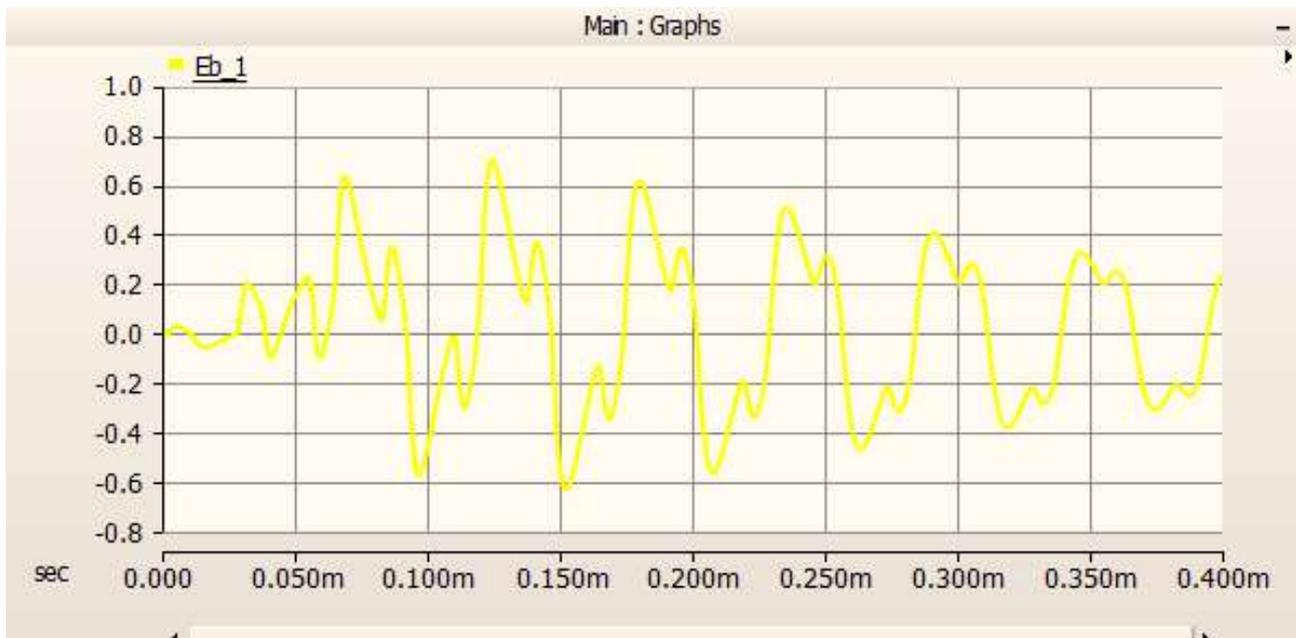


Figura 3.8.3.4 Respuesta en Fase B a falla bifásica a tierra aplicando un pulso en la Fase C

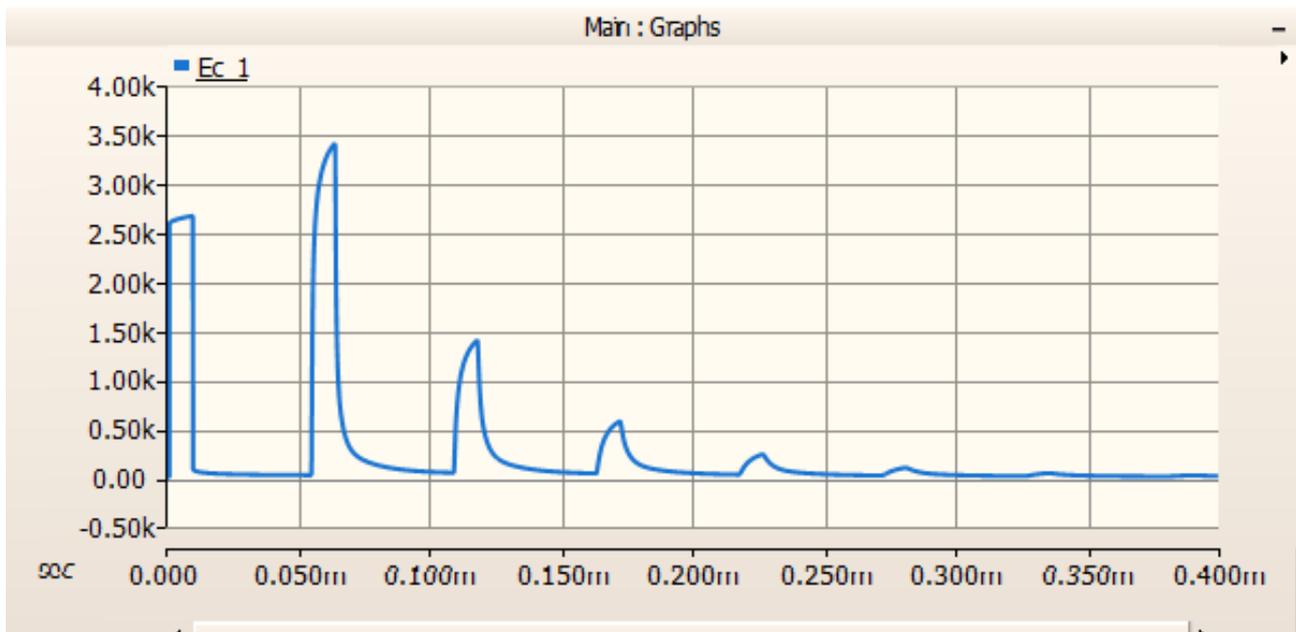


Figura 3.8.3.5 Respuesta en Fase C a falla bifásica a tierra aplicando un pulso en la Fase C

Las respuestas de las Fases A y B (Figura 3.8.3.3 y 3.8.3.4) son el resultado de aplicar un pulso en la Fase C que no participa de la falla. Las reflexiones en estas figuras son bajas y distorsionadas, por ende no proporcionan ningún dato importante.

En la respuesta de la Fase C (Figura 3.8.3.5), al observar la primer reflexión, da un tiempo de 54,99 μs . Para el cálculo, se debe discriminar el retardo de 1 μs que posee la fuente generadora de pulsos cuadrados. Entonces el tiempo de reflejo del pulso será 53,99 μs .

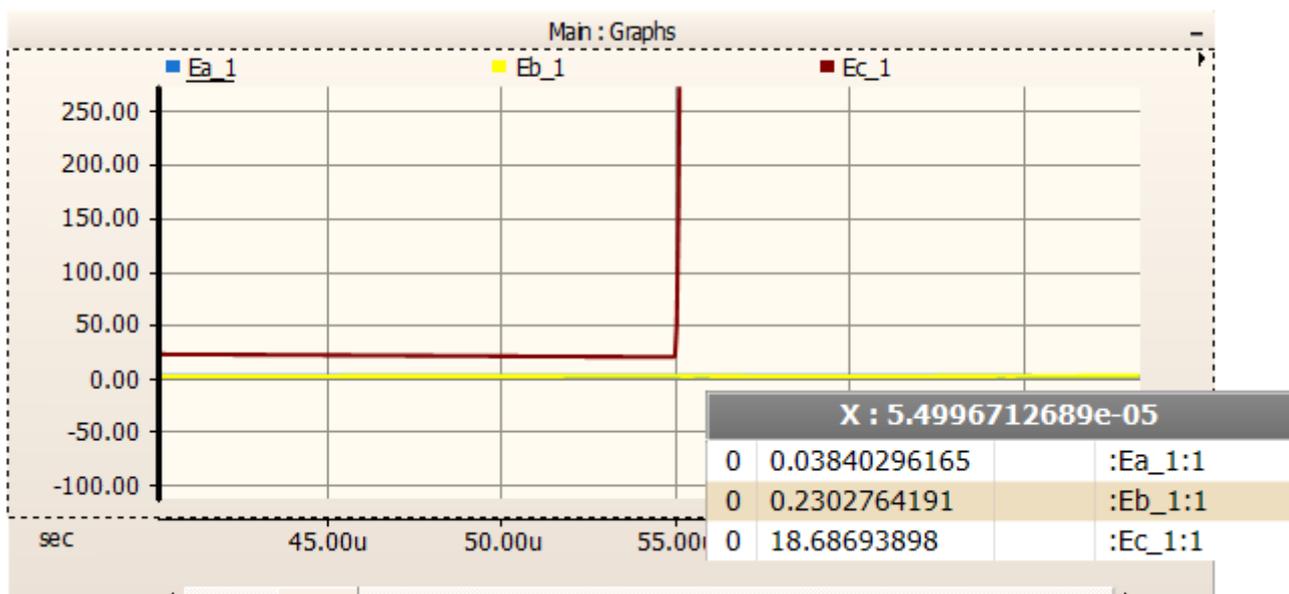


Figura 3.8.3.6 Valor de tiempo utilizado en falla trifásica aplicando un pulso en la Fase C



A partir de la Ecuación 2.7.1.1 se calcula la distancia de falla

$$X_f = \frac{1}{2} \cdot 148159439,5 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 53,99 [\mu s] = 4000,08 [m]$$

La reflexión que presenta la Fase C se debe a la alta resistencia que encuentra el pulso debido al fin de la línea. Al dar la distancia 4000,8 [m], se demuestra que la Fase C se encuentra en buen estado y no presenta daños.

CAPITULO 4: MEDICIONES DE CAMPO

4.1 INTRODUCCIÓN

El capítulo se centra en las mediciones de campo para la detección de fallas en cables subterráneos de baja tensión. Se describirán los procedimientos de medición, los equipos utilizados y los resultados obtenidos en diversos escenarios de fallas.

El objetivo principal de este capítulo es proporcionar una comprensión exhaustiva de las técnicas de medición de campo para la detección de fallas en cables subterráneos de baja tensión, contribuyendo así al desarrollo de estrategias de mantenimiento más eficientes y a la mejora de la gestión de la infraestructura eléctrica subterránea.

Se analizarán dos casos de detección de fallas por medio de reflectometría tradicional (TDR).

4.2 CASO N°1

Debido a la denuncia de falta de suministro el día 27/05/2024 por los usuarios que son alimentados por el cable troncal ubicado en la zona “peatonal”, San Martín vereda par entre Corriente y Santa Fe. Utilizando un reflectómetro T625 de la marca Bicotest se realizaron mediciones de TDR midiendo desde el buzón ubicado en Corrientes impar San Martín Par.

Los pasos para utilizar un reflectómetro son los siguientes:

1. Se debe preparar el cable a ensayar. Se realizará una inspección visual y sobre las conexiones asegurándose que el cable esté completamente desconectado del sistema eléctrico y de cualquier fuente de energía.
2. Configurar el equipo TDR. Se ajustan los parámetros iniciales, tales como la velocidad de propagación, la escala, etc.
3. Se conecta el TDR al cable asegurando que la conexión sea segura y esté bien ajustada para evitar pérdidas de señal o falsos reflejos.
4. Se realiza la medición interpretando las discontinuidades existentes en el cable como empalmes, empales de derivación, cambios de cable, etc.
5. Obtención de la distancia del punto de medición hasta la ubicación de las discontinuidades.
6. Registro de datos

Los valores arrojados de reflectometría se pueden observar en la Figura 4.1.1, 4.1.2 y 4.1.3:

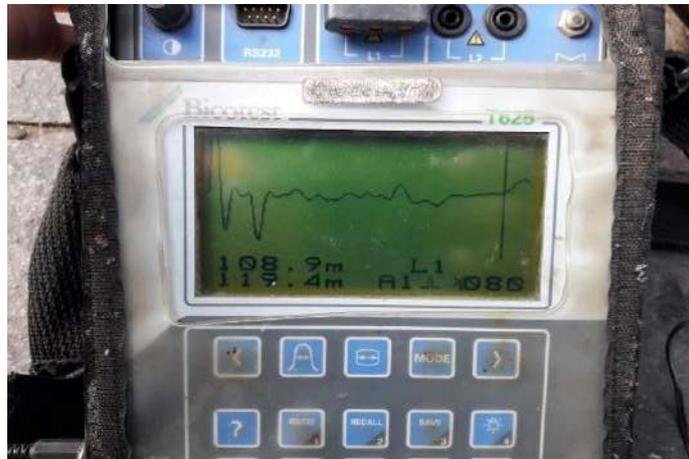


Figura 4.1.1. Reflectometría de fase sana de 109 [m]

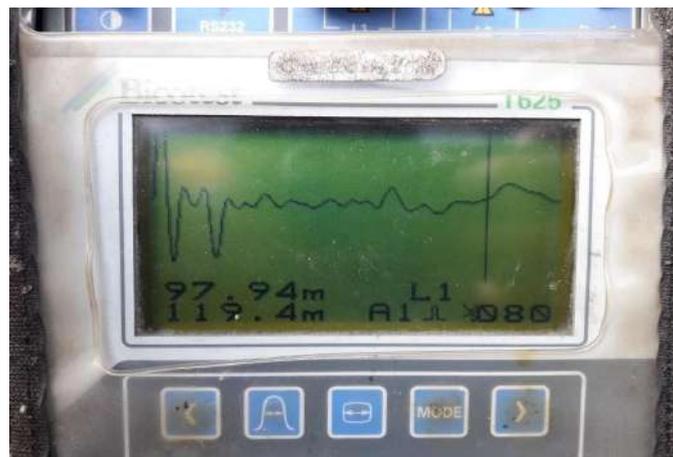


Figura 4.1.2 Reflectometría de fase cortada a los 98 [m]

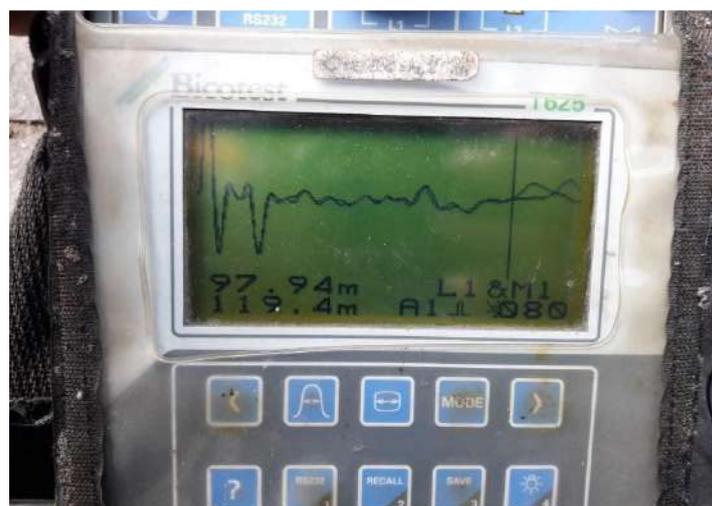


Figura 4.1.3 Superposición de reflectometrías

En la Figura 4.1.1 se puede observar que se realiza la medición de la fase sana. Se llega a la conclusión de que la fase se encuentra en buenas condiciones debido a que a los 109 [m] se encuentra la reflexión de final de la línea. Entonces se procede a medir otra fase, en la Figura 4.1.2 se encuentra la reflectometría realizada a la fase en falla. Se llega a la conclusión de que la fase posee una falla debido a que posee una reflexión a los 98 [m].

Una vez prelocalizada la falla a partir de reflectometría, se procedió a puntualizar la falla aplicando una descarga longitudinal. Para ello, se cortocircuitó en el buzón ubicado en la calle Santa fe, la fase cortada a tierra y se efectuaron ondas de choque desde el buzón de corriente (Figura 4.1.4).



Figura 4.1.4 Conexión de buzón al cual se le realizaron las ondas de choque

Una vez detectada la falla a partir de la puntualización, se determinó el punto de falla y se procedió a realizar una excavación en esa zona. En la Figura 4.1.5 se observa la excavación realizada, una vez encontrado el cable, se buscó sobre el mismo la ubicación de la falla. En la Figura 4.1.6 y 4.1.7, se observan el estado de la falla del cable.



Figura 4.1.5 Zanjeo para determinar la zona de la falla



Figura 4.1.6 Falla a tierra de cable



Figura 4.1.7 Daño del cable sufrido por la falla

4.3 CASO N°2

El segundo caso a medir sucedió en Juncal entre San Lorenzo y Roca. El cliente reclama baja tensión en una fase. Se trata de una alimentación exclusiva a un cliente con un cable tetrapolar $3 \times 240 + 1 \times 120$ [mm^2] de aluminio y aislación XLPE.

A partir del mismo procedimiento que para el Caso N°1, se realizó la medición de reflectometría. El resultado arrojado fue el siguiente:

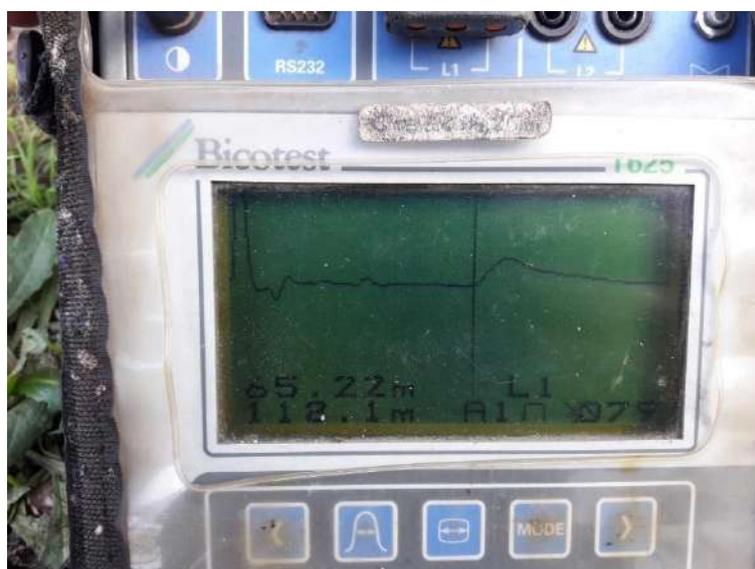


Figura 4.2.1 Reflectometría de fase en falla



Figura 4.2.2 Reflectometría de fase sana y fase en falla



Figura 4.2.3 Conexión de los cables para realizar mediciones de reflectometría

Debido a que la Figura 4.2.1 no arroja información clara sobre una posible ubicación de la falla, se compara en la Figura 4.2.2 la reflectometría de la fase sana y la fase en falla. Al superponer las reflectometrías, se pudo observar al final del cable la variación de la onda. Esto se debe a que la falla se encontraba a menos de un metro de la caja de toma, justo en la bajada.



Figura 4.2.4 Zona afectada por la falla



Figura 4.2.5 Fase cortada



Figura 4.2.6 Fase cortada



Figura 4.2.7 Fase cortada



CAPITULO 5: ENSAYOS EN LABORATORIO

5.1 INTRODUCCIÓN

Se expondrán los resultados de ensayos experimentales realizados en el laboratorio de mediciones eléctricas de la Facultad de Ingeniería de Mar del Plata. Se realizarán pruebas sobre un cable coaxial rg6 de 75 [Ω]. Se ensayará este cable debido a su semejanza de respuesta a fallas a la hora de utilizar reflectometría básica.

Se realizarán las pruebas a partir de un oscilograma y un generador de pulsos cuadrados. Se realizará la medición sobre un caso de cable sano, cable cortado, cable que presenta cortocircuito y cable con derivación.

5.2 DESARROLLO

A partir de un cable coaxial rg6 de 75 [Ω] con las siguientes características:

HOJA DE DATOS GARANTIZADOS		Emisión 04/12/09	Revisión 01 16 09 10	HDG 219
		CLIENTE:		
		PRODUCTO: CABLE COAXIAL RG 6 FOAM 67% BISHIELD - AUTOSUSPENDIDO		
		DIVISION: COAXIALES 75 OHM		
		Descripción		
		Las cables coaxiales RG6 están constituidos por conductor de acero cobreado aislados en Polietileno expandido, blindados con cinta de aluminio, trenza de alambres de aluminio al 67%, portante de alambre de acero galvanizado, todo el conjunto con cubierta perfil ocho de PVC negro resistente UV e intemperie.		
		Aplicación		
		Los cables coaxiales RG6 se utilizan para la transmisión de señales de televisión por cable.		
		Características		
		Instalaciones entre el poste de distribución y el primer punto de fijación domiciliario.		
		Normas		
		IRAM 4045 MIL CL7		
Características Formales				
1	Fabricante	CABLES EPUYEN SRL		
2	Código	CXA 8657		
3	Marca	CABLES EPUYEN		
4	Origen	ARGENTINA		
Características Generales - Constructivas / Físicas / Eléctricas				
1	Cantidad de Conductores/Pares/Tarnas/Cuadretes	Conduct.	1 Conductor	
2	Diámetro nominal de los conductores	AWG	18	
3	Material de la aislación		Polietileno Expandido	
4	Diámetro nominal de la aislación	mm	4.50	
5	Material del blindaje electrostático		Cinta Aluminio-Poliéster	
6	Cubrimiento del blindaje electrostático	%	100	
7	Material del trenzado		Alambre Aluminio 0.16 mm	
8	Cubrimiento del trenzado	%	67	
9	Material del portante		Acero Galvanizado	
10	Diámetro del portante	mm	1.25	
11	Espesor nominal de la cubierta	mm	0.90	
12	Dimensión nominal	mm	7.20 x 8.45	
13	Material de la cubierta		PVC	
14	Color de la cubierta		Negro	
15	Resistencia eléctrica máxima a 20 °C en c.c.	Ohm/Km.	105	
16	Capacidad mutua nominal	pF/m	55	
17	Impedancia característica	Ohm	75	
18	Velocidad de propagación	%	82	
19	Máxima atenuación en 100 m	55Mhz	5.8	
20	Máxima atenuación en 100 m	211Mhz	10.8	
21	Máxima atenuación en 100 m	300Mhz	12.9	
22	Máxima atenuación en 100 m	400Mhz	15.0	
23	Máxima atenuación en 100 m	750Mhz	20.7	
24	Máxima atenuación en 100 m	1000Mhz	24.2	

Figura 5.2.1 Hoja de datos de Cable Coaxil Epuyen Rg6

A partir de un generador de onda Gw Instek AFG-2225 y un osciloscopio Rigol DS1054z se preparó el siguiente circuito:

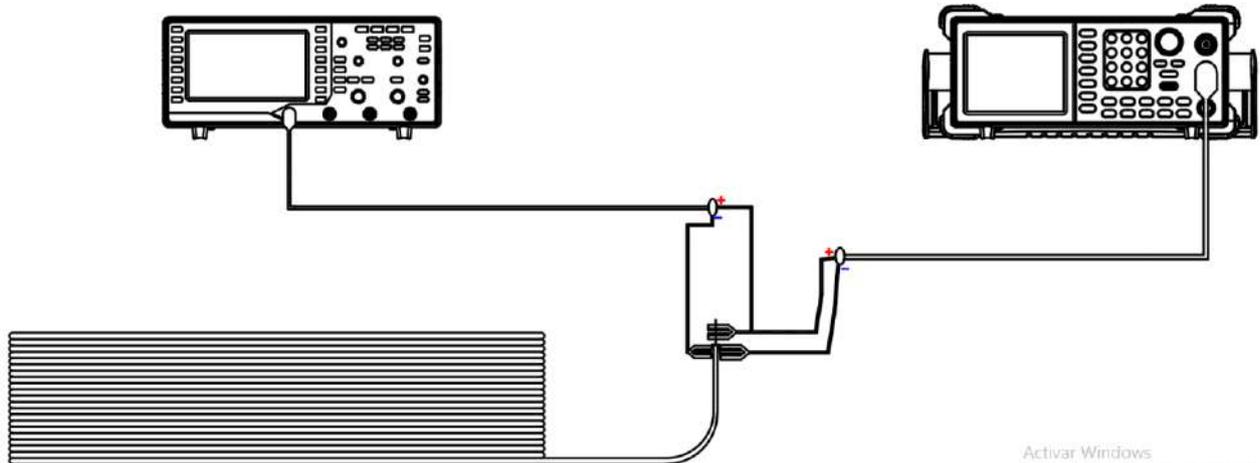


Figura 5.2.2 Esquema eléctrico del conexionado

Como se observa en la Figura 5.2.3 y 5.2.4, se conectaron dos canales al osciloscopio. Sin embargo, se utilizó solamente el canal 1 para mostrar las reflexiones (Figura 5.2.2). El generador de pulsos se configura de forma tal de entregar al cable un pulso de onda cuadrada de 3,6 [Vpp] (Volt pico a pico) a una frecuencia de 50 [kHz]. El generador de pulsos se encuentra en la Figura 5.2.5 y en la Figura 5.2.6 el osciloscopio.



Figura 5.2.3 Conexión del osciloscopio y el generador de pulsos al cable coaxial



Figura 5.2.4 Vista superior del conexionado del Generador de pulsos, el osciloscopio y el cable coaxil



Figura 5.2.5 Generador de pulsos Gw Instek AFG-2225



Figura 5.2.6 Osciloscopio Rigol DS1054z

Se simularán y analizarán distintos casos de circuitos. Se analizará:

- 120 metros de cable en buenas condiciones
- Cable de 120 metros de longitud con una falla de alta resistencia a los 50 metros del inicio del cable
- Cable de 120 metros de longitud con una falla de baja resistencia a los 50 metros del inicio del cable
- Cable de 120 metros con una derivación a 50 metros del inicio del cable

Estos ensayos servirán para conocer la respuesta arrojada para cada caso. Mediante los datos del fabricante del cable de la Figura 5.2.1, se calcula la velocidad de propagación del cable a partir de la siguiente ecuación:

$$v_{Cable} = v_{Luz} \cdot v\% \quad (5.2.1)$$

Siendo

- $v_{Luz} = 3 \times 10^8 \left[\frac{m}{s} \right]$, la velocidad de la luz
- $v\%$ la velocidad de propagación porcentual del cable coaxil

Entonces

$$v_{Cable} = 3 \times 10^8 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 82\% = 246000000 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Mediante el valor de tiempo arrojado por la reflexión se puede obtener el valor de la distancia de la misma forma que se calcula en la ecuación (2.6.2.1)

5.2.1 ENSAYO DE TRAMO DE CABLE SANO

El primer ensayo se basa en analizar la respuesta de un cable sano de 120 [m]. Se conecta el generador de pulsos y el osciloscopio, se envía pulso a través del cable y la respuesta arrojada fue:

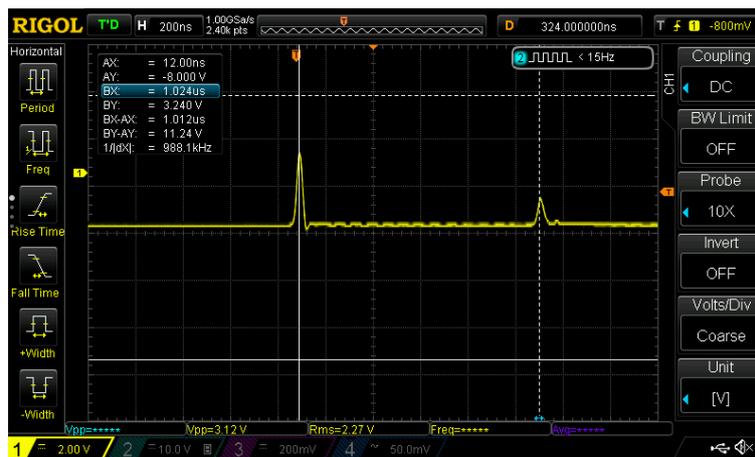


Figura 5.2.1.1 Reflectometría de cable sano

La primera reflexión se debe al pulso de la fuente. Como se observa en la Imagen anterior, se mide la diferencia de tiempo entre la onda del pulso incidente y la reflexión. La diferencia de tiempo se puede ver en la Figura 5.2.1.1 como la diferencia $Bx-Ax=1,012 [\mu S]$. Este tipo de reflexiones ascendentes (reflexión del mismo sentido que el pulso incidente) suceden para los casos de fallas de alta resistencia o cuando se encuentra el extremo final de la línea. Como se estudió en el Capítulo 1 y 2, las fallas de alta resistencia pueden deberse a fallas en el aislamiento y tierra o entre conductores.

Sabiendo la velocidad de propagación del cable y el tiempo de la segunda reflexión, se procede a calcular la distancia de la segunda reflexión.

A partir de la Ecuación 2.7.1.1 se calcula la distancia de falla

$$X_f = \frac{1}{2} \cdot 246000000 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 1,012 [\mu s] = 124,47 [m]$$

Entonces la ubicación medida de la falla es de 124,47 [m]. Conociendo la ubicación real de la falla, se calcula el error relativo de la medición a partir de la siguiente ecuación:

$$Error_{relativo\%} = \frac{124,47[m]-120 [m]}{120 [m]} \cdot 100\% = 3,725\%$$

Luego se analizó el caso en el que se une la malla metálica con el cobre conductor, entonces la reflexión cambia de sentido.

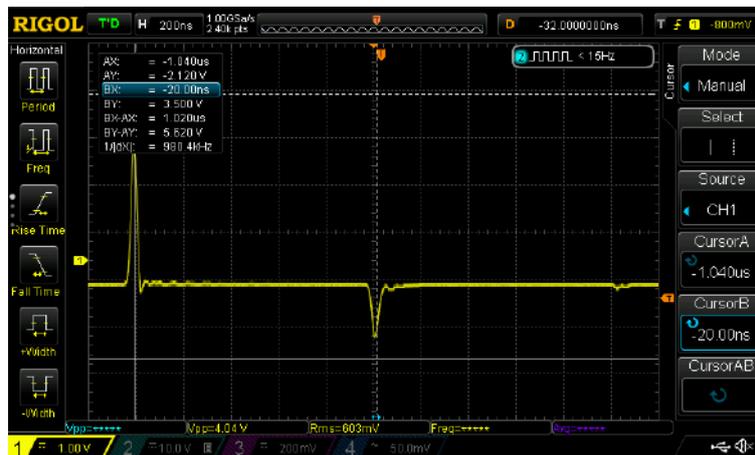


Figura 5.2.1.2 Reflectometría de falla al final del cable

5.2.2 ENSAYO DE TRAMO DE CABLE CON FALLA A LOS 50 METROS

En el segundo ensayo se analizará el caso de una falla producida por la unión de la malla metálica y el cobre conductor en el cable a los 50 metros. Como se observa en la Figura 5.2.2.1, el pulso reflejado es de sentido contrario al pulso incidente, entonces puede observarse que nos encontramos con una falla de baja resistencia. A partir de la medición de la reflexión se llega que la falla se encuentra a:

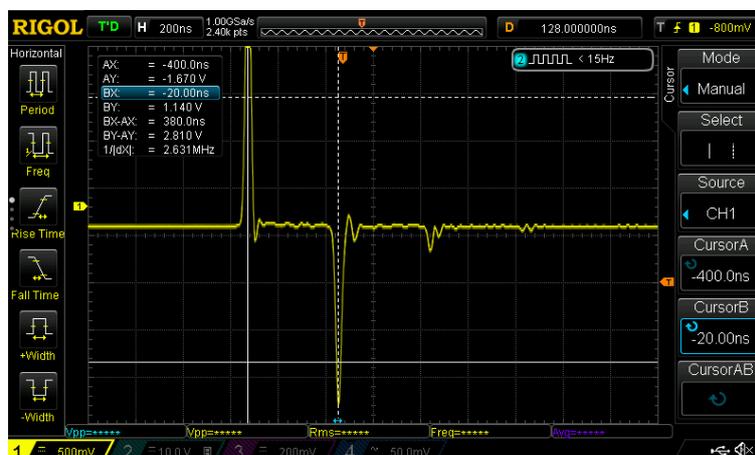


Figura 5.2.2.1 Reflectometría de falla en cable a los 50 [m]

Para lograr la falla, se debió cortar el aislante y se cortocircuitó la malla con el conductor y se generó un corto a los 50 metros. La distancia de la reflexión de la falla es:

$$X_f = \frac{1}{2} \cdot 246000000 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 380 [ns] = 46,74[m]$$

Entonces la ubicación medida de la falla es de 46,74 [m]. Conociendo la ubicación real de la falla, se calcula el error relativo de la medición a partir de la siguiente ecuación:

$$Error_{relativo\%} = \frac{50 [m] - 46,74 [m]}{50 [m]} \cdot 100\% = 6,52\% \quad (5.2.2.2)$$

5.2.3 ENSAYO DE TRAMO DE CABLE CON DERIVADOR COMO EMPALME

Se analizará el caso en el que un cable posea un empalme. Para ello se agregó un derivador de 2 vías como el que se observa en la Figura 5.2.2.3, al agregarse una sola conexión al módulo, el derivador funciona como un empalme recto.



Figura 5.2.2.3 Derivador de 2 Vías funcionando como empalme recto

En la figura 5.2.2.4 se encuentra la reflexión captada por el oscilograma



Figura 5.2.2.4 Oscilograma de todo la longitud del cable con Derivador de 2 vías funcionando como empalme recto

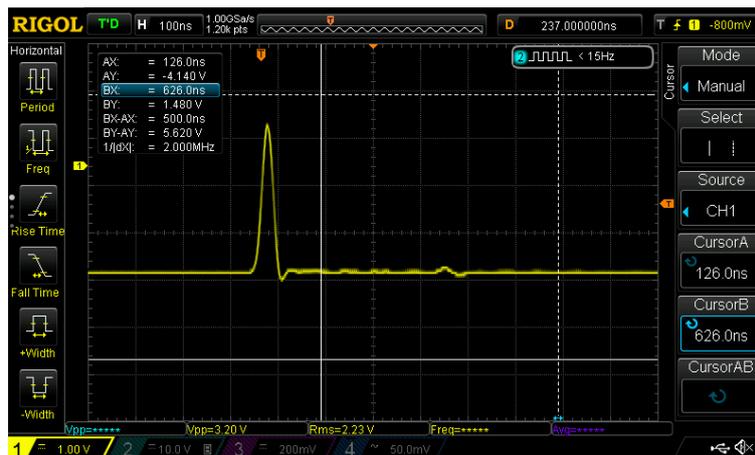


Figura 5.2.2.5 Oscilograma del sector donde se encuentra el empalme del cable con Derivador de 2 vías funcionando como empalme recto

Analizando la Figura 5.2.2.4, se observa que la reflectometría total del cable con empalme recto es similar a la reflectometría de la Figura 5.2.1.1. La diferencia entre ellas radica en que ahora al tener un empalme recto, el osciloscopio lo detecta como ruido. Esta anomalía puede observarse con mayor detalle en la Figura 5.2.2.5. Se concluye que existe una variación en la reflectometría de la misma naturaleza que la reflectometría de la Figura 2.6.4.

5.2.4 ENSAYO DE TRAMO DE CABLE CON DERIVACIÓN A LOS 50 METROS

Se realizará una derivación a los 50 metros, para ello se conecta al derivador de 2 vías, un tramo de cable coaxial en la salida que en el apartado 5.2.3 quedó vacío. La derivación que

se agrega posee unos 15 metros de longitud. El derivador queda conectado de la siguiente manera:



Figura 5.2.4.1 Derivador de 2 vías funcionando como empalme de derivación

La imagen obtenida por el oscilograma fue la siguiente:



Figura 5.2.4.2 Reflectometría de un empalme de derivación

La distancia de la reflexión del final de la línea es:

$$X_f = \frac{1}{2} \cdot 246000000 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 920 [ns] = 113,16 [m]$$

Luego se procede a medir el tiempo en el que aparece la reflectometría del empalme de derivación.



Figura 5.2.4.3 Medición de la reflectometría del empalme de derivación

Analizando la Figura 5.2.4.3, se observa que la respuesta del cable con derivación concuerda con la reflectometría a esperar en cables con derivación (Figura 2.6.5). Al tener un empalme derivación, el pulso de la onda incidente se divide para recorrer cada extremo del derivador. El anteúltimo pulso, corresponde a la vuelta del pulso incidente al recorrer la derivación. El último pulso se debe al final de la línea. Por último, se puede concluir que ambos pulsos son del mismo sentido que la onda incidente debido a que eran extremos de líneas abiertos.

La ubicación del empalme de derivación es:

$$X_f = \frac{1}{2} \cdot 246000000 \left[\frac{m}{s} \right] \cdot 384 [ns] = 47,2 [m]$$

Conociendo la ubicación real de la falla, se calcula el error relativo de la medición a partir de la siguiente ecuación:

$$Error_{relativo\%} = \frac{50 [m] - 47,2 [m]}{50 [m]} \cdot 100\% = 5,6\%$$



FACULTAD DE
INGENIERIA
Departamento Ingeniería



CAPITULO 6: EVALUACIÓN DE IMPACTO ECONÓMICO

6.1 INTRODUCCIÓN

Las fallas en los cables subterráneos no solo generan interrupciones en el suministro eléctrico, sino que también tienen consecuencias económicas directas e indirectas que afectan a los usuarios, empresas y la economía en general. Estos impactos van desde los costos asociados a la restauración del servicio hasta las pérdidas por la interrupción de actividades comerciales y productivas. Por lo tanto, comprender y cuantificar estos impactos económicos es fundamental para justificar la inversión en tecnologías y metodologías de localización de fallas más eficientes.

En este contexto, se examinarán detalladamente el impacto económico de las fallas en cables subterráneos de baja tensión, destacando la necesidad de abordar este problema de manera integral y proactiva.

6.2 COSTOS DE LOS SISTEMAS DE CABLES SUBTERRÁNEOS

Se denomina costo al sacrificio total que debe ser cedido o negociado a los efectos de obtener un producto o resultado final deseado. Dentro de esta definición, se puede incluir dinero, mano de obra, materiales, terrenos, esfuerzo, oportunidades perdidas, etc. Generalmente los ejemplos mencionados anteriormente como costos, se miden bajo el común denominador del dinero.

Se debe mencionar dos categorías de costos existentes a la hora de realizar cualquier instalación.

- Costo inicial: los costos para adquirir los equipos/cables necesarios e instalarlos. Estos pueden ser ingeniería, permisos, cateos, terrenos, cables, accesorios, obra civil, etc. A este tipo de costos se los denomina inversiones y se amortizan en varios periodos anuales.
- Costo corriente: los costos para mantener el sistema en operación. Una vez instalado el sistema, son los costos para mantenerlo en un estado óptimo. Son por ejemplo inspección, mantenimiento, piezas de reemplazo, impuestos, seguros, pérdidas eléctricas, etc. Estos costos existirán mientras que el sistema exista. A los costos corrientes generalmente se los denomina gastos y se absorben dentro del mismo periodo en que se incurren.

6.3 ANÁLISIS DE COSTOS

Para el análisis de costos, se contactó con la empresa DAL – LAZARTE S.A., empresa con



más de 12 años de experiencia en reparaciones de cables subterráneos de media y baja tensión. A partir de datos proporcionados por su departamento comercial, se obtuvieron los costos de las tareas vinculadas a una falla en cable subterráneo en baja tensión.

Para obtener los costos asociados a las tareas vinculadas a la detección y reparación de fallas, se debe conocer el procedimiento de trabajo. Una vez determinada la existencia de una falla en una línea y se ha desenergizado el cable en cuestión, las tareas a realizar son las siguientes:

1. Medición de técnico especialista en mediciones de fallas de cables subterráneos.
2. Rotura de vereda.
3. Zanjeo en el recinto donde se encuentra la falla determinado por el técnico según sus mediciones y su experiencia.
4. Una vez que se encuentra la falla del cable, se procede a la realización del empalme del cable.
5. Se realiza una media tapada del cable con arena o tierra limpia en toda la totalidad del cable.
6. Ubicación de ladrillos dispuestos en forma perpendicular sobre la ubicación del cable.
7. Tapado y compactado de tierra sobre el zanjeo realizado.
8. Reparación de vereda.

A las tareas anteriormente mencionadas, se le puede adicionar dependiendo de la cantidad de clientes afectados por el corte y el tiempo sin energía, la realización de un tendido provisorio. Este tendido provisorio, se debe instalar ni bien se produce la falla, con el fin de evitar dejar al cliente sin energía durante grandes lapsos de tiempo. Una vez terminadas las tareas listadas anteriormente, se procede a retirar este tendido provisorio. Sin embargo, a los fines de analizar los costos será despreciado.

Para realizar la evaluación de impacto económico, se decidió realizar el cálculo de costos asociados a una acertada localización de fallas y compararlo con una detección de falla a la cual se debió realizar un segundo zanjeo. Como se analizó durante todo este trabajo, en campo es sumamente difícil obtener la ubicación de la falla con la primera intervención del suelo. La complejidad se debe a la diversidad de la línea, de la falta de información del tendido de algunos sectores, por no poseer interferencias del lugar, porque el método de medición no es el más certero para el tipo de falla a medir, etc. Por estas razones, es que en un trabajo de detección de fallas, es normal tener que realizar roturas del terreno en más de un sector.

Los costos de las tareas enviadas por la empresa Lazarte poseen la unidad de 1 [m^3], entonces todas las tareas serán realizadas y calculadas a partir de dicha unidad. De modo de simplificar el estudio y el análisis de resultados, se procedió a calcular los costos a partir de 1 [m^3] de trabajo de suelo en el caso de una acertada localización de fallas en el primer intento de rotura para un cable de baja tensión tetrapolar. Estos valores se compararán con una exitosa localización de fallas en el segundo intento de abertura de terreno, el cual tendrá

asociado los costos de 2 [m³] de trabajo de suelo. Los costos incluyen mano de obra y provisión de materiales. Si bien la empresa no se dedica a la detección de fallas, pudieron detallar el valor de la medición de por un técnico especializado.

Los costos de realizar una localización de fallas en el primer intento de intervención del terreno se encuentran en la Tabla 5.2.1:

Tabla 5.2.1 Valores de costos de localización de falla en el primer intento de intervención del terreno

Ítem	Tarea	Valor [USD]	Unidad de medida	Costo [USD]
1.1	Medición por técnico	\$ 129.00	1 Unidad	\$ 129.00
1.2	Rotura de vereda	\$ 35.00	1 [m3]	\$ 35.00
1.3	Zanjeo	\$ 44.00	1 [m3]	\$ 44.00
1.4	Empalme Tetrapolar	\$ 88.00	1 Unidad	\$ 88.00
1.5	Instalación de ladrillos	\$ 5.00	1 [m3]	\$ 5.00
1.6	Rellenado de zanja	\$ 18.00	1 [m3]	\$ 18.00
1.7	Reparación de vereda	\$ 48.00	1 [m3]	\$ 48.00
TOTAL				\$ 367.00

Mientras que los valores de realizar una localización de falla en la segunda intervención del terreno se encuentran en la Tabla 5.2.2:

Tabla 5.2.2 Valores de costos de localización de falla en el segundo intento de intervención del terreno

Ítem	Tarea	Valor [USD]	Unidad de medida	Costo [USD]
1.1	Medición por técnico	\$ 129.00	1 Unidad	\$ 129.00
1.2	Rotura de vereda	\$ 35.00	2 [m3]	\$ 70.00
1.3	Zanjeo	\$ 44.00	2 [m3]	\$ 88.00
1.4	Empalme Tetrapolar	\$ 88.00	1 Unidad	\$ 88.00
1.5	Ladrillos	\$ 5.00	2 [m3]	\$ 10.00
1.6	Rellenado de zanja	\$ 18.00	2 [m3]	\$ 36.00
1.7	Reparación de vereda	\$ 48.00	2 [m3]	\$ 96.00
TOTAL				\$ 517.00

A partir de los totales obtenidos, se calcula el porcentaje de aumento de costos de la siguiente manera

$$\text{Aumento de costo [\%]} = \frac{\$517 - \$367}{\$367} \cdot 100\% = 40,87\%$$



Como se puede observar en la ecuación anterior, el costo por realizar una segunda intervención del terreno aumenta un 40,87% con respecto a los costos si se encontrara la falla con una sola medición. En el caso de que sea necesario realizar una tercera medición este porcentaje aumentaría a un 82% aproximadamente.



CAPITULO 7: EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

7.1 INTRODUCCIÓN

La infraestructura de cables subterráneos es un componente esencial en los sistemas de distribución eléctrica moderna, permitiendo una transmisión de energía eficiente y segura. Sin embargo, como cualquier infraestructura técnica, los cables subterráneos no están exentos de fallas, las cuales pueden tener diversas repercusiones no solo en la confiabilidad del suministro eléctrico, sino también en el medio ambiente.

Estas fallas no solo pueden provocar interrupciones en el servicio eléctrico, sino que también pueden desencadenar impactos ambientales significativos. Entre estos impactos se incluyen la contaminación del suelo y el agua por materiales aislantes, la emisión de calor y gases tóxicos, y la interferencia electromagnética, que puede afectar tanto a la flora y fauna locales como a otras infraestructuras subterráneas.

El propósito de este capítulo es realizar una evaluación de los impactos ambientales derivados de las fallas en cables subterráneos. La importancia de este análisis radica en la necesidad de identificar y comprender los potenciales riesgos ambientales, para poder desarrollar estrategias de mitigación efectivas y mejorar la gestión de estos sistemas críticos. Esta evaluación contribuirá no solo a minimizar los daños ambientales, sino también a asegurar un suministro eléctrico más sólido y sostenible.

7.2 DESARROLLO

Se realizará un análisis de los distintos factores que pueden verse afectados por el producto de una falla en un cable subterráneo de baja tensión. Los aspectos ambientales que pueden sufrir daños son:

- Suelo
 - Composición y estructura: Las fallas de cables subterráneos pueden causar derrames de materiales aislantes y otros compuestos químicos, contaminando el suelo. La estructura y la composición del suelo afectarán la propagación de estos contaminantes.
 - Uso del suelo: En áreas residenciales o agrícolas, la contaminación del suelo puede provocar efectos adversos en los cultivos y la salud humana.
- Agua
 - Cuerpos de agua superficiales y subterráneos: Las fallas pueden llevar a la infiltración de sustancias tóxicas en los cuerpos de agua cercanos, afectando la calidad del agua y la biodiversidad acuática. Los acuíferos subterráneos, que son fuentes cruciales de agua potable, también pueden verse comprometidos.



- Vientos y patrón de vientos: En el caso de incendios o explosiones causadas por fallas, el humo y los contaminantes pueden dispersarse a través del viento, afectando áreas más amplias.
- Flora: La contaminación del suelo y del agua puede afectar negativamente a la vegetación local, provocando la muerte de plantas y la alteración de los ecosistemas terrestres.
- Fauna: Los animales que habitan en el suelo pueden ser directamente afectados por las sustancias tóxicas liberadas durante una falla. La fauna subterránea, en particular, es vulnerable a cambios en las condiciones térmicas y químicas del suelo.
- Población: Las fallas de cables pueden causar interrupciones en el suministro eléctrico, afectando a la población local y provocando problemas de salud y seguridad.
- Suministro de agua: La contaminación del agua subterránea puede comprometer el suministro de agua potable, mientras que las interrupciones eléctricas pueden afectar la disponibilidad de servicios esenciales como hospitales y escuelas.

Todos estos factores fueron analizados para el caso de que suceda una falla subterránea, se debería realizar un análisis de factores que influyen sobre la reparación de la falla. De la misma forma que durante la evaluación del impacto económico, se comparará el caso de una detección acertada de falla con una detección de falla a la cual se debió realizar una segunda rotura de terreno debido a un erróneo primer intento de ubicación de la falla. Para ello, se debe tener en cuenta que los daños ambientales que se producen por la existencia de la falla para el caso de una acertada detección de falla al primer intento o para una detección en la que se realizaron más de una rotura en el suelo son los mismos. El impacto ambiental asociado al reparar una falla subterránea se encuentra en los siguientes factores:

- Arquitectónico: Las excavaciones y reparaciones necesarias tras una falla pueden dañar sitios arqueológicos y otros lugares de importancia cultural.
- Contaminación visual: El trabajo de operarios, las excavaciones, genera contaminación visual puede perturbar la visualización de sectores.
- Contaminación sonora: Al realizar roturas en el suelo, se generan ruidos molestos para las personas por los altos decibeles que producen los martillos neumáticos a la hora de trabajar.

Estos factores contaminantes son los que serán mayores o menores dependiendo del éxito de la localización de la falla. Para poder mitigarlos, se organizan los trabajos asociados a la reparación de fallas en los horarios con menor movimiento de personas y que sean acordes para realizar ruido. Por ello, generalmente se realizan en las primeras horas de la mañana.



CAPITULO 8: CONCLUSIONES

En esta tesis se han explorado los distintos métodos de localización de fallas en cables subterráneos de baja tensión. Se estudió en un mayor grado de detalle los métodos más utilizados a la hora de buscar el punto de localización de la falla en baja tensión. Se analizaron fallas en campo en la ciudad de Mar del Plata, demostrando el comportamiento de los distintos componentes y de las fallas de una red subterránea de baja tensión.

A partir del programa PSCAD, se realizaron simulaciones de casos ideales de fallas en cables subterráneos de baja tensión. A su vez se realizó el Laboratorio de Mediciones Eléctricas de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata, ensayos sobre un cable coaxial para poder comparar las reflectometrías con las obtenidas en las simulaciones. Los resultados arrojados en el laboratorio, confirmaron las reflectometrías obtenidas en las simulaciones. Mientras que las mediciones realizadas en campo, demostraron que en los casos reales, la respuesta de la reflectometría frente a fallas coincide con los ideales. Sin embargo, se pudo observar que en sus reflectometrías existe ruido debido a los empalmes de derivación, los empalmes rectos, a los cambios de impedancia de los cables.

Para las mediciones realizadas en el laboratorio, a la hora de comparar el valor de ubicación de la falla con el medido en el osciloscopio, se calculó el error existente a partir del valor medido y el real. Ese error, se debe a:

- Error proveniente de la medición de la longitud donde se encontraba ubicada la falla.
- Error proveniente por tomar la medida de tiempo en el osciloscopio a partir de los picos de la señal por el pulso incidente y por el pulso reflejado en la falla.

La reflectometría de dominio de tiempo, es eficaz para la localización de fallas de baja y alta resistencia, aunque presenta limitaciones en ambientes con alto ruido electromagnético y en cables con múltiples empalmes. A su vez, es importante destacar otros métodos como el método de detección acústica que proporciona una localización precisa de fallas al captar vibraciones y señales acústicas, reduciendo la necesidad de aplicar altas tensiones a los cables durante la detección. Sin embargo, su eficacia depende de la presencia de una descarga audible, lo que puede ser limitante en ciertos escenarios.

Para mejorar la efectividad de la detección y localización de fallas en cables subterráneos, se recomienda:

- Integrar diversos métodos de detección para aprovechar las fortalezas de cada técnica y compensar sus limitaciones.
- Fomentar la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías y mejoras en los métodos actuales para abordar las limitaciones identificadas.
- Proveer capacitación continua a los técnicos e ingenieros en el uso de estas tecnologías para asegurar una implementación efectiva y segura en el campo.



Se concluye que una combinación de técnicas de detección, como el TDR y la detección acústica, puede mejorar significativamente la fiabilidad y precisión en la localización de fallas en cables subterráneos. Además, se destaca la importancia de continuar con la investigación y desarrollo de métodos más robustos y precisos, así como la capacitación continua de los profesionales encargados de la implementación y operación de estas tecnologías.



BIBLIOGRAFIA

- [1] Asociación Electrotécnica Argentina, “Reglamentación sobre Líneas Subterráneas Exteriores de Energía y Telecomunicaciones AEA 95101”, ejemplar N°054. Argentina, 2007.
- [2] William A. Thue, “Electrical Power Cable Engineering”, Tercera Edición, Taylor & Francis Group. Marcel Dekker, Inc. New York.
- [3] Viakon Conductores Monterrey, “Manual Eléctrico”, Segunda Edición, Conductores Monterrey S.A., Mexico.
- [4] James F. Shackelford. “Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros”, sexta edición. Pearson Educación S.A. Madrid, 2005.
- [5] D. José Ramírez Vázquez. “Materiales Electrotecnicos”, segunda edición. Ediciones CEAC, S.A. Barcelona, 1990.
- [6] R. Bartnikas, K. D. Srivastava, “Power cable engineering”, primera edición. Sandford Educational Press, 1987.
- [7] Endesa distribución. “Norma de empalmes para cables subterráneos de alta tensión”, segunda edición. KNE 00202. 2008.
- [8] 3M. “Resina y empalmes de resina 3M Scotchcast”. 2022.
- [9] Milton Yovanny Rendón Marín, Ahmed Giovanny López Cano. “Manual para diagnóstico de fallas en redes de media tensión según equipo Centrix SebaKMT”. Universidad Tecnológica de Pereira. 2008.
- [10] Distribución de la E.E., “Localización de fallas en cables subterráneos”. Facultad de ingeniería de Mar del plata. 2010.
- [11] Tecnología DAVNAR. “Localización de fallas industria Argentina 2001”. Calidad de servicio – Medición y control. 2001.
- [12] Gustavo Adrián Tarsia, “Localización de fallas en cables subterráneos”. Medidas eléctricas, Facultad de ingeniería UBA. 2022.
- [13] Victor Agüero, “Ingeniería de cables aislados para transmisión de energía eléctrica”. Eudeba, Facultad de ingeniería UBA. 2014.
- [14] Inducor, “Teoría y prácticas detección de fallas en cables subterráneos”.



Séptima jornadas de: Capacitación y entrenamiento en técnica de ensayos, diagnóstico y detección de fallas en cables subterráneos de energía. 2010.

[15] Joaquín Sánchez, Alan Martuccio, “Localización de averías mediante el método de caída de tensión en líneas subterráneas”. EDEA. Argentina. 2023

[16] Gustavo Adrián Tarsia, “Medición de Resistencias en CC”. Medidas Eléctricas, Facultad de ingeniería UBA, 2021.

[17] Pablo Porfiri, Rogelio Cortegoso, “Empalmes de cables subterráneos – Identificación de estado por reflectometría convencional y cambios de impedancias”. XIV ERIAC.

[18] Milton Yovanny Rendón Marín, Ahmed Giovanny López Cano, “Manual para diagnóstico de fallas en redes de media tensión según equipo Centrix Sebakmt”. SebaKMT. Colombia. 2008.

[19] Megger Limited, “USER GUIDE Portable reflectometer and control unit of the fault location system Surgeflex 40”. Alemania. 2023.

[20] Megger Limited, “ESG NT Localizador de fallas en cubierta”. Estados Unidos.

[21] Baur, “Pruebas en la cubierta de cables y fallas resistivas”.

[22] Powered by Manitoba Hydro International Ltd, “User’s Guide on the use of PSCAD”. Canadá. 2018.