

**UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



**“APLICACIÓN DE LA REFLECTOMETRÍA PARA DIAGNOSTICAR FALLAS EN  
EL CABLE DE POTENCIA DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO  
DE LA EMPRESA SCHLUMBERGER EN LA REGIÓN LORETO”**

---

**TESIS PARA OBTENER EL TITULO  
PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO**

---

**AREA:**

Control y Automatización

**AUTOR:**

Br. Arnold Leonel Merino Amaral

**ASESOR:**

Ing. Saúl Noé Linares Vértiz

Trujillo – Perú

2014

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO ELECTRÓNICO**

TÍTULO:

“APLICACIÓN DE LA REFLECTOMETRÍA PARA DIAGNOSTICAR FALLAS EN EL  
CABLE DE POTENCIA DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO DE LA  
EMPRESA SCHLUMBERGER EN LA REGIÓN LORETO”

DESARROLLADA POR:

---

Br. Arnold Leonel Merino Amaral

Tesista

APROBADA POR:

---

Ing. Luis Alberto Vargas Díaz

Presidente

C.I.P. N° 104175

---

Ing. Lenin Humberto Llanos León

Secretario

C.I.P. N° 139213

---

Ing. Oscar Miguel De La Cruz Rodríguez

Vocal

C.I.P. N° 085598

---

Ing. Saúl Noé Linares Vértiz

Asesor

C.I.P. N° 142213

## **PRESENTACION**

### **Señores Miembros del Jurado:**

Dando cumplimiento al Reglamento de Grados y Títulos de la Universidad Privada “Antenor Orrego”, para el título Profesional de Ingeniero Electrónico, es grato poner a vuestra consideración, la presente tesis titulada: *“APLICACIÓN DE LA REFLECTOMETRÍA PARA DIAGNOSTICAR FALLAS EN EL CABLE DE POTENCIA DEL SISTEMA DE BOMBEO ELECTROCENTRÍFUGO DE LA EMPRESA SCHLUMBERGER EN LA REGIÓN LORETO”*

Esperamos que el presente trabajo logre cubrir las expectativas que tienen al respecto, excusándose de antemano por los errores involuntarios incurridos en el desarrollo del mismo.

Br. Arnold Leonel Merino Amaral.

## DEDICATORIA

Hoy se concreta uno de mis objetivos: “Obtener el título de Ingeniería Electrónica, alcanzarlo motiva en mi un sin número de perspectivas, que sin duda me encaminan y comprometen a perfeccionar y aplicar con creatividad los diferentes conocimientos recibidos durante los cinco años de formación universitaria”.

No podría dejar pasar este logro sin conocer a quienes me acompañaron y fortalecieron desde siempre:

A Dios, el Ser Supremo, quien nos da e ilumina nuestro camino,

A mi Mama Rubí, por esa calidez y sonrisa que alegran mis días,

A mis padres, Oswaldo y Rubí, por sus orientaciones, apoyo, paciencia; por estar conmigo siempre que los necesito.

A todos mis familiares y amigos, quienes forman parte importante en mi vida.

Esperando que esta investigación sirva de aporte a profesionales de la carrera y con el compromiso de seguir dando lo mejor; quedo desde ya agradecido por siempre.

Arnold Leonel Merino Amaral

## AGRADECIMIENTO

A Dios, por darme la vida y la oportunidad de realizar este sueño.

A mis padres, quienes con tanto sacrificio no dudaron en apoyarme en mis estudios sin esperar otra recompensa más que la satisfacción de verme convertido en una persona de provecho.

A todos mis tíos y primos, por quienes siempre recibí su apoyo y buenos consejos.

A toda mi familia con quien comparto este gran momento de alegría y felicidad.

A mis amigos que siempre me motivaron para continuar en este camino.

A los profesores que tuvieron que ver con mi formación académica, por haberme brindado sus conocimientos y amistad.

## RESUMEN

Actualmente en todo el mundo se está utilizando nuevos sistemas artificiales de bombeo para la producción de petróleo, en específico el sistema de bombeo electrocentrífugo (BEC). Sin embargo, durante la operación del sistema BEC se han presentado problemas por la falla de sus componentes eléctricos, sobre todo del equipo instalado dentro del pozo. Las fallas han resultado con un costo elevado por la disminución en la producción.

Para el mantenimiento de este sistema de bombeo artificial, se cuentan con procedimientos para realizar pruebas de verificación del estado de los equipos eléctricos de fondo. Pero en el caso de una falla eléctrica en el cable de potencia, no se puede determinar su ubicación. Dado que se instalan a grandes distancias del cabezal del pozo de producción.

Las fallas en el sistema BEC se han presentado principalmente, en los componentes del equipo de fondo, como son cables de 5kV y sus accesorios (empalmes y conectores), utilizados para interconectar el transformador elevador con el motor eléctrico de fondo.

En este trabajo se describe el método de la reflectometría en el dominio del tiempo como una técnica para la localización de fallas en cables de potencia. Mediante simulaciones en un paquete computacional para el análisis de transitorios electromagnéticos se muestran diferentes casos de fallas en cables de potencia.

Las simulaciones pueden ser utilizadas para definir los criterios necesarios para poder identificar en la práctica los diferentes tipos de falla que pueden aparecer en un cable de potencia. Mediante simulaciones se pueden representar una gran variedad de fallas que de otra manera sería difícil poder ver en campo.

Uno de los principales problemas en los cables de potencia es la localización de fallas. Existen diferentes tipos de fallas que se pueden clasificar como: fallas de baja y alta resistencia. La falla de baja resistencia se puede presentar físicamente como un corto circuito. Por otro lado, las fallas de alta resistencia son ocasionadas particularmente por fallas de interrupción (cable cortado) y fallas intermitentes.

En este trabajo se hablará sobre los modelos matemáticos más comunes de cables, es decir, la descripción matemática de su funcionamiento (la propagación de la onda a lo largo del material conductor del cable). Estos modelos son utilizados principalmente en los paquetes computacionales para solucionar diferentes problemas relacionados con el análisis transitorio de sistemas eléctricos.

La técnica de reflectometría consiste en la aplicación de pulsos de alta frecuencia y baja tensión en cada una de los terminales de las tres fases del circuito eléctrico del equipo de fondo y tierra. La respuesta de cada fase es visualizada utilizando un osciloscopio de resolución adecuada. El pulso aplicado en los terminales del equipo de fondo viaja a través de toda la instalación del circuito eléctrico. Cuando en su trayectoria de viaje el pulso aplicado encuentra impedancias diferentes a la impedancia característica del cable por el que se transmite, se presentan fuertes reflexiones del pulso. El cambio de impedancia puede ser debido a los equipos instalados en el circuito eléctrico, a los empalmes, a los terminales o discontinuidades del cable o bien a las fallas.

También se presentan las pruebas que se realizaron para caracterizar las señales y sus formas de onda. Los resultados del trabajo demuestran la bondad de la técnica RDT para solucionar este tipo de aplicaciones. El uso de esta herramienta podría extenderse a la detección de derivaciones en cableados de la red eléctrica o detección de fallas entre otras aplicaciones.

## ABSTRACT

Worldwide are currently being used new artificial pumping systems for oil production, specifically electrocentrífugo pumping system (BEC). However, during operation of the BEC system problems were presented by the failure of its electrical components, especially the equipment installed in the well. Failures have resulted in a high cost for the decrease in production.

To maintain this system of artificial lift is equipped with testing procedures for checking the state of the electrical equipment in the background. But in the case of an electrical failure in the power cord, you can not determine your location. As installed at great distances from wellhead production.

The BEC system failures have occurred mainly in the background computer components, such as cables and accessories 5kV (splices and connectors) used for connecting the transformer to the electric motor line.

In this paper the method of reflectometry in the time domain as a technique for locating faults in power cables is described. Simulations on a software package for the analysis of transient electromagnetic different cases of power cable fault is.

Simulations can be used to define the criteria to identify in practice the different types of failure that can occur in a power cable. Simulations can represent a variety of faults that otherwise would be difficult to see how in the field.

One of the main problems with the power cables is troubleshooting. There are different types of faults that can be classified as low and high fault resistance. Failure of low resistance can be physically present as a short circuit.

This paper will discuss the most common mathematical models of cables, ie the mathematical description of its operation (the wave propagation along the cable conductor material). These models are mainly used in computer packages to solve different problems related to transient analysis of electrical systems.

Reflectometry technique involves the application of high frequency pulses and low voltage in each of the terminals of the three phases of the electric circuit of the equipment and ground line. The response of each phase is displayed using an oscilloscope suitable



resolution. The pulse applied to the terminals of the equipment line travels through the entire installation of the electrical circuit. When you travel on your path is different applied pulse impedance to the characteristic impedance of the cable laying transmitted pulse strong reflections occur. The impedance change may be due to the equipment installed in the electrical circuit, joints, terminal or cable discontinuities or to failure.

Tests that were performed to characterize the signals and their waveforms are also presented. The results demonstrate the goodness of the RDT technique to solve this kind of applications. The use of this tool could be extended to the detection of lead in the mains wiring or fault detection and other applications.

## INDICE GENERAL

JURADO EVALUADOR.....	ii
PRESENTACION.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
RESUMEN.....	vi
ABSTRACT.....	viii
<b>CAPITULO I. INTRODUCCION.....</b>	<b>12</b>
I.1. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	12
I.1.1. Situación y contexto de la problemática.....	12
I.1.2. Características de la realidad.....	14
I.1.3. Análisis de las características.....	14
I.2. OBJETIVOS.....	17
I.3. ANTECEDENTES.....	18
I.4. HIPOTESIS.....	20
I.5. VARIABLES.....	20
I.6. MARCO TEORICO.....	22
I.6.1. Extracción del petróleo crudo.....	22
I.6.1.1. Sistema de bombeo artificial.....	22
I.6.1.2. Sistema de bombeo electrocentrífugo.....	23
I.6.1.3. Esquema eléctrico del sistema BEC.....	24
I.6.2. Reflectometría en el dominio del tiempo.....	25
I.6.2.1. Características de las ondas electromagnéticas.....	26
I.6.2.2. Circuito equivalente de la línea de transmisión.....	27
I.6.2.3. Características de la transmisión.....	28
I.6.3. Técnica de la reflectometría en el dominio del tiempo.....	29
I.6.4. Falla en cables.....	33
I.6.4.1. Falla de baja resistencia.....	34
I.6.4.2. Falla de alta resistencia.....	34

<b>CAPITULO II. MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS</b> .....	<b>36</b>
II.1. Materiales.....	36
II.2. Procedimientos.....	39
II.2.1. Familiarización con el software PSCAD.....	41
II.2.2. Definición.....	41
II.2.3. Descripción del entorno de trabajo.....	43
II.2.4. Diseño de un sistema trifásico en PSCAD.....	44
<b>CAPITULO III. DESARROLLO DEL TRABAJO DE TESIS</b> .....	<b>53</b>
III.1. Recolección de datos.....	53
Caso1. Falla por aislamiento deteriorado (pequeñas corrientes de fuga).....	53
▪ Falla a 2000 m.....	53
▪ Falla a 3000 m.....	54
▪ Falla a 4000 m.....	55
Caso 2. Falla de cable parcialmente abierto.....	55
▪ Falla a 2000 m.....	55
▪ Falla a 3000 m.....	56
▪ Falla a 4000 m.....	57
Caso 3. Falla sólida a tierra.....	58
▪ Falla a 2000 m.....	58
▪ Falla a 3000 m.....	58
▪ Falla a 4000 m.....	59
Caso 4. Falla de circuito abierto (cable cortado).....	60
▪ Falla a 2000 m.....	60
▪ Falla a 3000 m.....	61
▪ Falla a 4000 m.....	62
Casos en un sistema trifásico.....	62
<b>CAPITULO IV. RESULTADOS</b> .....	<b>69</b>
<b>CAPITULO V. DISCUSION DE LOS RESULTADOS</b> .....	<b>81</b>
<b>CAPITULO VI. CONCLUSIONES</b> .....	<b>84</b>
<b>CAPITULO VII. RECOMENDACIONES</b> .....	<b>87</b>
<b>CAPITULO VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>88</b>
<b>ANEXOS</b> .....	<b>90</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.2. Operacionalización de la Variable Independiente.....	20
Tabla 2.3. Operacionalización de la Variable Dependiente .....	21
Tabla 3.1. Resultados obtenidos de la medición de resistencia aislamiento y ohmica. ....	63
Tabla 3.2. Resultados de resistencia aislamiento y ohmica con falla monofasica.....	64
Tabla 3.3. Resultados de resistencia aislamiento y ohmica con falla bifásica. ....	65
Tabla 3.4. Cuadro de los resultados obtenidos con el software PSCAD. ....	67

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1.1. Reportes de las causas de las paradas de pozo en el año 2013. ....	14
Figura 1.2. Esquema de un sistema de extracción de petróleo.....	22
Figura 1.3. Sistema de bombeo artificial.....	22
Figura 1.4. Partes de un sistema de bombeo electrocentrífugo .....	24
Figura 1.5. Equipos principales que conforman un sistema BEC .....	25
Figura 1.6. Opreación básica de un radar .....	25
Figura 1.7 Operación básica de un RTD en cables de potencia .....	26
Figura 1.8. Modelo de una linea de transmisión .....	28
Figura 1.9. Aplicación del RTD en cables de potencia .....	31
Figura 1.10. Representación de una falla.....	33
Figura 1.11 Falla de baja resistencia.....	34
Figura 1.12. Falla de alta resistencia.....	34
Figura 2.1. Cuadro comparativo de características del cable.....	39
Figura 3.1. Librerías del PSCAD.....	42
Figura 3.2. Entorno gráfico del PSCAD.....	43
Figura 3.3. Diagrama de los cables de potencia.....	44
Figura 3.4. Modelos de cables que maneja el PSCAD.....	44
Figura 3.5. Configuración de los cables.....	45
Figura 3.6. Cable monofásico en el área de trabajo PSCAD.....	45
Figura 3.7. Diseño de la fase.....	46
Figura 3.8. Configuración del cable.....	46
Figura 3.9. Editor de sección transversal del cable.....	47
Figura 3.10. Constantes y datos del cable.....	48
Figura 3.11. Diagrama de un sistema de cable trifásico en PSCAD.....	48

Figura 3.12. Tabla para modular la forma de la señal en PSCAD.....	49
Figura 3.13. Diagrama de un sistema trifásico en PSCAD.....	49
Figura 3.14. Sistema eléctrico para el caso de estudio en PSCAD.....	59
Figura 3.15. Cuadro de configuración del tiempo de duración de la simulación.....	51
Figura 3.16. Corrida del sistema modelado en PSCAD.....	51
Figura 3.17. Arreglo de una falla por aislamiento deteriorado a 2000 m.....	53
Figura 3.18. Respuesta de una falla por aislamiento deteriorado a 2000 m.....	54
Figura 3.19. Arreglo de una falla por aislamiento deteriorado a 3000 m.....	54
Figura 3.20. Respuesta de una falla por aislamiento deteriorado a 3000 m.....	54
Figura 3.21. Arreglo de una falla por aislamiento deteriorado a 4000 m.....	55
Figura 3.22. Respuesta de una falla por aislamiento deteriorado a 4000 m.....	55
Figura 3.23. Arreglo de una falla parcialmente abierto a 2000 m.....	56
Figura 3.24. Respuesta de una falla parcialmente abierto a 2000 m.....	56
Figura 3.25. Arreglo de una falla parcialmente abierto a 3000 m.....	56
Figura 3.26. Respuesta de una falla parcialmente abierto a 3000 m.....	57
Figura 3.27. Arreglo de una falla parcialmente abierto a 4000 m.....	57
Figura 3.28. Respuesta de una falla parcialmente abierto a 4000 m.....	57
Figura 3.29. Arreglo de una falla sólida a 2000 m.....	57
Figura 3.30. Respuesta de una falla sólida a 2000 m.....	57
Figura 3.31. Arreglo de una falla sólida a 3000 m.....	59
Figura 3.32. Respuesta de una falla sólida a 3000 m.....	59
Figura 3.33. Arreglo de una falla sólida a 4000 m.....	59
Figura 3.34. Respuesta de una falla sólida a 4000 m.....	60
Figura 3.35. Arreglo de una falla por cable cortado a 2000 m.....	60
Figura 3.36. Respuesta de una falla por cable cortado a 2000 m.....	61
Figura 3.37. Arreglo de una falla por cable cortado a 3000 m.....	62
Figura 3.38. Respuesta de una falla por cable cortado a 3000 m.....	62

Figura 3.39. Arreglo de una falla por cable cortado a 4000 m.....	62
Figura 3.40. Respuesta de una falla por cable cortado a 4000 m.....	62
Figura 3.41. Arreglo de un sistema trifásico en PSCAD.....	63
Figura 3.42. Respuesta de un sistema trifásico sin falla.....	64
Figura 3.43. Arreglo de un sistema trifásico con falla.....	65
Figura 3.44. Respuesta de un sistema trifásico con falla.....	65

# **CAPITULO I**



## **CAPITULO I. SITUACION Y CONTEXTO DE LA PROBLEMÁTICA ACTUAL**

### **I. INTRODUCCIÓN**

#### **I.1. DELIMITACION DEL PROBLEMA**

Como se referencia en el portal del Activo Integral Canterrel Pemex Exploración y Producción: “El petróleo es una mezcla de hidrocarburos que se encuentran en fase sólida, líquida y gaseoso, que reciben su nombre por estar constituidos principalmente por átomos de carbón e hidrogeno, que también incluyen en algunas de sus moléculas porciones pequeñas de otros elementos como el nitrógeno, azufre, oxígeno y algunos metales. (URL 01)

La definición de hidrocarburo se relaciona con el carbono y el hidrogeno (Joan Josep Escobar – Xavier Marti – 2002), un cuerpo simple, un gas, que participa en la composición del agua. Es catorce veces más liviano que el aire, inflamable y arde con una llama pálida. [1]

De acuerdo al informe 122 quincenal de la SNMPE (Sociedad Nacional De Minería, Petróleo y Energía) se dice que: “Actualmente, las grandes empresas petroleras están utilizando nuevos sistemas artificiales de bombeo para la producción de petróleo, en específico el sistema de bombeo electrocentrífugo (BEC)”. [Doc01]

Como se hace referencia en la página de Petrogroup Training and Consulting Company: “Considerando la problemática que implica que el pozo ya no sea factible de explotar, se han desarrollado nuevas técnicas de bombeo, las cuales están basadas en la utilización de bombas electrocentrífugas accionadas por medio de motores de fondo, de velocidad variable. Esta opción de bombeo es de especial importancia por las ventajas que brinda para manejar la extracción de crudo. [URL02]

Sin embargo durante la operación del sistema BEC se han presentado problemas por la falla de sus componentes eléctricos, sobre todo del equipo instalado dentro del pozo. Las fallas han resultado con un costo elevado por la disminución en la producción y por los trabajos de mantenimiento correctivo.

Según Gunnar Englund (1988) “Las fallas del sistema BEC, se han presentado principalmente en los componentes del equipo de fondo, como son cables de interconexión y de extensión, y sus accesorios (empalmes y conectores), utilizados para interconectar el transformador elevador con el motor eléctrico de fondo”. [2]

Debido a que hay una urgencia por mantener la producción de petróleo, cuando el sistema de bombeo electrocentrifugo sale de operación, se efectúan varios intentos de inmediato para tratar de arrancarlo nuevamente. En algunas ocasiones se produce el arranque, sometiendo el equipo a sobreesfuerzos eléctricos y térmicos que pueden envejecer el aislamiento y producir su falla, pero en otras, se realizan varios intentos sin lograrlo.

De acuerdo a la Gerencia de Equipos Eléctricos, Instituto de Investigaciones Eléctricas: “cuando se presenta un paro en los equipos, el personal operativo del sistema de bombeo electrocentrífugo, realiza como diagnostico la medición de la resistencia de aislamiento y de la resistencia óhmica. Los criterios para determinar que un equipo de fondo está en buenas condiciones es que la medición de resistencia de aislamiento se obtengan valores del orden de Megaohms y que se tenga continuidad, y que los valores de resistencia óhmica sean similares entre cada una de las fases. Estas técnicas de diagnóstico son de gran ayuda, pero si la falla es en el cable de potencia y de alta impedancia (corto circuito), no es fácil detectarla y no determinan el sitio donde se encuentra. [3]

### 1.1.1. Características de la Realidad

Parada de los pozos debido a las fallas.

- Presencia de armónicos y transitorios.
- Sobreesfuerzos eléctricos, mecánicos y térmicos.
- Averías en el cable de potencia.

### 1.1.2. Análisis de las Características

#### 1.1.2.1. Parada de los pozos debido a las fallas.

El área de TESTING (Investigación técnica de un producto bajo prueba) es el encargado de elaborar los reportes mensuales de las diversas paradas de los pozos en la zona de pluspetrol, a continuación se muestra (observar la figura 2.1) un gráfico representativo de las diversas causas por la que hubo parada de pozo en el año 2013.

El gráfico muestra el número de paradas de pozo que ocurrió en cada mes y las causas que causaron dicha falla.

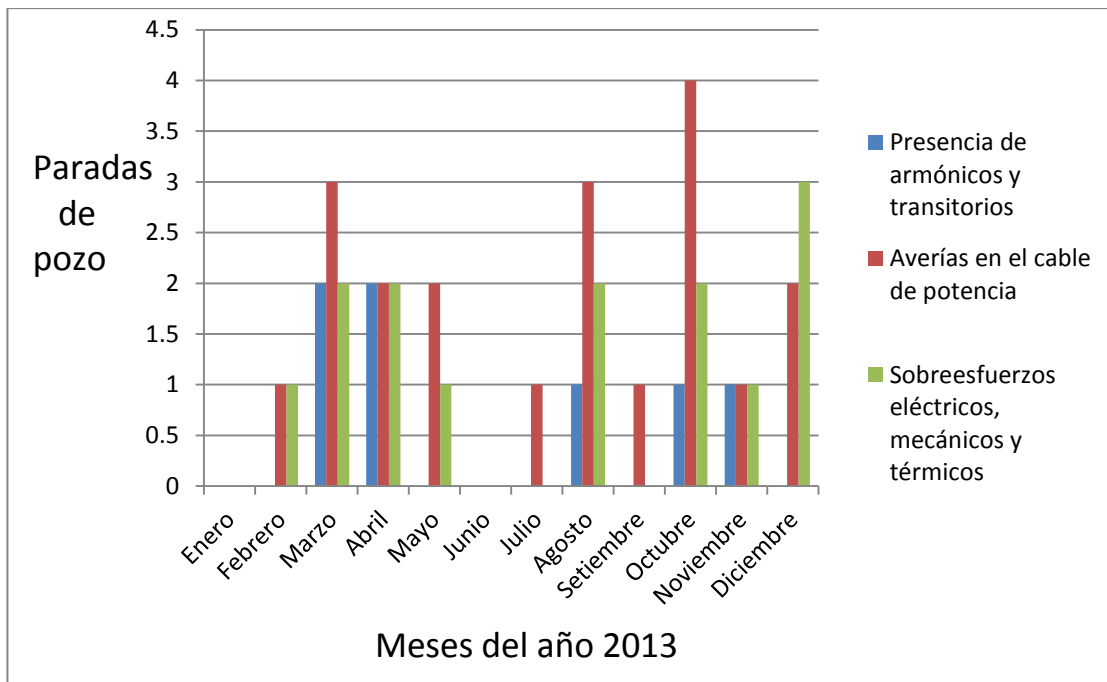


Figura 1.1. Reporte de las causas de las paradas de pozo en el año 2013

Fuente: Área de Testing de Schlumberger Del Perú -2013

La Figura 1.1 muestra las estadísticas acumuladas en cuanto a eventos de fallas del sistema de bombeo electrocentrífugo de petróleo en la zona de pluspetrol, zona en donde existen 36 pozos petroleros. Se puede notar que el mayor número de incidencias se generan por diversas fallas en el cable de potencia lo cual genera energía al equipo de fondo. Les sigue los eventos por sobreesfuerzos eléctricos, mecánicos y térmicos que repercuten en el bloqueo de la flecha de la bomba y también por presencia de armónicos y transitorios que generan daño y repercutan el aislamiento del cable de potencia.

#### **1.1.2.2. Presencia de ondas de voltaje y corriente no senoidales.**

La gerencia de equipos eléctricos, Instituto de investigaciones Eléctricas IIE/03/32/RP-02/2002, es el encargado de considerar las diferentes condiciones a las que son sometidos los equipos de fondo, y desde el punto de vista eléctrico y térmico, los equipos de fondo se ven sometidos a los esfuerzos generados por la operación de los variadores de velocidad, es decir a la presencia de armónicos y transitorios.

Como se observa en la Figura 1.1. Se registraron 8 paradas de pozo debido a la presencia de armónicos y transitorios la cual representa el 21.5% de falla en el año 2013.

Debido a su tecnología de diseño y fabricación, durante la operación de los variadores se generan ondas de voltaje y corriente no senoidales.

Estas ondas están contaminadas con armónicos y transitorios, lo cual impacta la operación de los equipos de fondo. **(Ver anexo 1 y 2)**

Los armónicos y los transitorios que ocurren durante la operación de los variadores provocan calentamiento y sobrevoltaje por la resonancia del circuito, los cuales deterioran paulatinamente el aislamiento de los equipos de fondo, hasta la ocurrencia de su falla.

### **1.1.2.3. Exceso de esfuerzos eléctricos, mecánicos y térmicos**

Según Wong, N. Electrical submersible pumps for oil well applications. Vol. 17, July 1989: “durante su operación, los equipos de fondo se ven expuestos a la combinación de esfuerzos eléctricos, mecánicos y térmicos, que van deteriorando paulatinamente hasta su falla”. [3]

Otro esfuerzo eléctrico presente en la operación de los equipos de fondo y que puede envejecer prematuramente el aislamiento, es el voltaje reflejado, cuya magnitud depende de la longitud del cable que interconecta el motor, con el variador de velocidad. De acuerdo a la teoría clásica de líneas de transmisión, la reflexión de voltaje repercute en las terminales del motor y puede alcanzar hasta dos veces el voltaje normal de operación (2.0 p.u). La impedancia de un motor de inducción es principalmente inductiva y a las altas frecuencias de conmutación generadas por el variador, se comporta como un circuito abierto. Por tal motivo existe la probabilidad de que una onda de voltaje incidente, viajando a las terminales del motor y dependiendo de su magnitud, pueda ocasionar severos daños al aislamiento.

### **1.1.2.4. Averías en el cable de potencia**

Según Josep R. Kinsley. “Why testing Cat. 1 cable in the home makes sense” (octubre 2000) define a una falla como a la condición física que ocasiona la avería de un cable o que no permite que el mismo retenga o mantenga la tensión de servicio requerido. [4]

El área de testing de Schlumberger del Perú menciona que las fallas en el sistema BEC se han presentado en los componentes del equipo de fondo, como son cables de potencia y de extensión, además poseen accesorios tales como empalmes y conectores que son utilizados para interconectar el transformador elevador con el motor eléctrico.

Como se observa en la figura 1.1. El gráfico nos muestra las diferentes fallas que se dan en el sistema de bombeo electrocentrífugo y también fallas que ocurren en el cable de potencia ya que a lo largo del año 2013 se registraron 18 paradas de pozo debido a que el cable de potencia falló. Esto representa el 44.9% del total de paradas de pozo en el año 2013.

Toda estructura de cableado real tiene pérdidas propias por la naturaleza de los conductores por el tipo de aislante, a ello hay que añadirle la posibilidad de que ocurran fallas debido a problemas físicos en la instalación, a factores de carácter ambiental o a fallas en los equipos de fondo.

El área de testing de Schlumberger del Perú considera las amplias posibilidades de distintos tipos de fallas tales como: averías por alta resistencia, baja resistencia, fase a fase o fase a tierra, malos empalmes. Lo cual generan mal funcionamiento en el proceso de bombeo electrocentrífugo.

La motobomba de fondo se instala en el pozo a una profundidad mayor a los 3000 m, por lo tanto para suministrar la energía eléctrica para la operación de la misma, se requiere un cable de potencia que la interconecte con el transformador elevador.

El área de testing de Schlumberger del Perú posee políticas de cableado que consideran que cada 2000 pies – 609.6 metros se realiza un empalme o conector para la extensión del cable hacia la motobomba y utilizan cable de categoría 1 ya que son cables muy resistentes para esta operación. **(Ver anexo 3)**

## **I.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo General**

- Detectar averías y fallas en el cable de potencia, mediante la simulación de la técnica de reflectometría en el dominio del tiempo y localizar el sitio donde ocurre la falla eléctrica.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Analizar los diferentes causas del deterioro del sistema de bombeo electrocentrífugo.
- Analizar la técnica de la reflectometría con todos sus principios.
- Aplicar el programa de simulación para transitorios electromagnéticos para analizar la efectividad de la técnica de la reflectometría para localizar e identificar diversos casos de falla.

### **I.3. ANTECEDENTES**

Para sustentar este proyecto de investigación se ha tomado como antecedentes diversos estudios relacionados con la aplicación de la técnica de la reflectometría en el dominio del tiempo.

**Título:** “Reflectometría en el dominio del tiempo y su aplicación a la detección de fallas y a la medición de parámetros en redes de comunicación”

**Institución:** Centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico.

**Publicado** en 2008

**Autor:** Guillermo Cahue Díaz

Este trabajo resuelve parte de la problemática de detección de fallas de comunicación en el nivel de cableado y contribuye a caracterizar sus parámetros más importantes coadyuvando con ello a mejorar la confiabilidad y la productividad de la actividad, especialmente en aplicaciones en campo.

También permite comprender la técnica de la reflectometría en el dominio del tiempo para detectar fallas en cables de red y a comprender teorías como:

- Conceptos básicos sobre líneas de transmisión
- Características de las ondas electromagnéticas.
- Teoría de la reflectometría en el dominio del tiempo.
- Propiedades de la longitud de onda.
- Caracterización de cables de acuerdo a su longitud:
  - ✓ Cable de 50 metros
  - ✓ Cable de 70 metros
  - ✓ Cable de 200 metros
  - ✓ Cable de 500 metros

Este desarrollo consiste en un módulo electrónico que realiza funciones de inyección de señales de alta frecuencia en el cableado bajo prueba y mide la respuesta por medio de un submódulo de adquisición de datos. También en este trabajo de presentan pruebas que se realizaron para caracterizar las señales y sus formas de onda. Los resultados del trabajo demuestran la bondad de la técnica RTD para solucionar este tipo de aplicaciones. El uso de esta herramienta podría extenderse a la detección de derivaciones en cableados de la red eléctrica o detección de fallas en cables de fibra óptica, entre otras aplicaciones.

**TÍTULO:** “Localización de fallas en cables subterráneos mediante el método de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR).”

**INSTITUCION:** Universidad Industrial de Santander

**AUTOR:** Bach. Camargo Piña Daniel

**Publicado** en 2011

En este trabajo se describe el método de la reflectometría en el dominio del tiempo como una técnica para la localización de fallas en cables de potencia.

Nos muestra los diferentes tipos de falla como:

- ✓ Falla de baja resistencia
- ✓ Falla solida a tierra
- ✓ Falla de circuito abierto (cable cortado)
- ✓ Falla de cable parcialmente abierto

Mediante simulaciones en un paquete computacional para el análisis de transitorios electromagnéticos se muestran diferentes casos de fallas en cables de potencia.

Las simulaciones pueden ser utilizadas para definir los criterios necesarios para poder identificar en la práctica los diferentes tipos de falla que pueden aparecer en un cable de potencia. Mediante simulaciones se pueden representar una gran variedad de fallas que de otra manera sería difícil poder ver en el campo.



## **I.4. HIPÓTESIS**

### **1.4.1. Hipótesis General**

La aplicación de la técnica de la reflectometría en el dominio del tiempo permitirá detectar fallas eléctricas en el cable de potencia en el sistema de bombeo electrocentrífugo de petróleo en la región Loreto.

### **1.4.2. Variables**

#### **1.4.2.1. Variable Independiente**

- Reflectometría en el dominio del tiempo

##### **Indicadores:**

- Modelamiento y descripción matemático del funcionamiento del cable.
- Caracterización y análisis de transitorios electromagnéticos.
- Características de las señales y sus formas de onda.
- Análisis de las reflexiones.

#### **1.4.2.2. Variable Dependiente:**

- Detección de fallas eléctricos en el cable de potencia del sistema de bombeo electrocentrífugo

##### **Indicadores:**

- Impedancia Característica del cable.
- Velocidad de propagación en el cable
- Distancia de la discontinuidad o falla.
- Tiempo de viaje del pulso.

### I.4.3. Operacionalización de las variables.

**Tabla 2.2 Operacionalización de la Variable Independiente**

VARIABLE INDEPENDIENTE	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	INDICADORES	INSTRUMENTO	FORMULA	UNIDADES MEDIDA
Técnica de la reflectometría en el dominio del tiempo	La reflectometría en el dominio del tiempo es una técnica utilizada para caracterizar y localizar los defectos en un cable de potencia, donde ayudan a determinar la existencia y la ubicación de empalmes de cable	La reflectometría es una técnica que proporciona en forma más precisa y directa, las características del sistema bajo prueba. Usando un generador de señales de alta frecuencia se aplica un tren de pulsos de tensión en la línea de transmisión bajo análisis.	Caracterización y análisis de transitorios electromagnéticos.	Procesamiento digital de señales.	-	-
			Modelamiento y descripción matemático del funcionamiento del cable	Registros técnicos de las características del cable de potencia.		-
			Características de las señales y sus formas de onda.	Procesamiento digital de señales		-
			Análisis de las reflexiones.	Procesamiento digital de señales		-

Fuente: Elaboración Propia

**Tabla 2.3 Operacionalización de la Variable Dependiente**

VARIABLE DEPENDIENTE	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	INDICADORES	INSTRUMENTO	FORMULA	UNIDADES MEDIDA
Detección de fallas en el cable de potencia que generan deterioro del sistema de bombeo electrocentrífugo de petróleo en la región Loreto.	Se define a una falla como la condición física que ocasiona la avería de un cable o que no permite que el mismo retenga o mantenga la tensión de servicio requerido.	Las fallas en el sistema de bombeo electrocentrífugo se han presentado principalmente en los componentes del equipo de fondo, como son cables de potencia, de extensión y tiene accesorios (empalmes y conectores) que son utilizados para interconectar el transformador elevador con el motor eléctrico	Impedancia característica del cable.	Datos y características del cable.	$Z_0 = \sqrt{R/G}$	Ohm
			Velocidad de propagación en el cable	Parámetros del cable.	$V = V_0 / \sqrt{\epsilon r}$	m/s
			Tiempo de viaje del pulso.	Parámetros del cable.	$\tau = L/V$	S
			Distancia de la discontinuidad o falla.	Registro de datos.	$D = V * \tau / 2$	m

Fuente: Elaboración Propia

## I.5. MARCO TEÓRICO

### 1.5.1. Extracción del Petróleo Crudo

Juan Josep E. – Xavier, M. (2002) menciona que: El petróleo crudo se extrae de los reservorios y que se encuentran bajo tierra a profundidades que van desde los 1000 m hasta los 4500 m. [5]

La Figura N° 1.2, muestra los niveles del sub-suelo que tienen que pasar el ducto para poder llegar a la reserva del petróleo crudo y poder realizar la extracción.

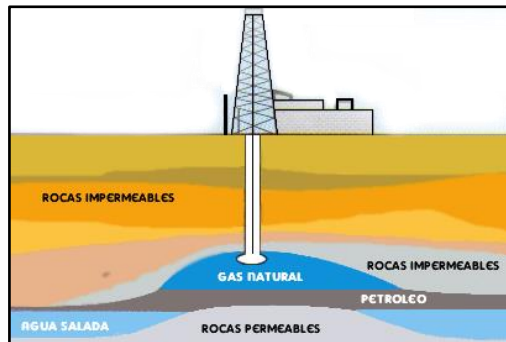


Figura N° 1.2: Esquema de un sistema de extracción de petróleo

Fuente: Página web de Osinergmin.

#### 1.5.1.1. Sistema de Bombeo Artificial

Como menciona Bonnet, Austin H (1987): “normalmente, la extracción de petróleo crudo se efectúa utilizando la presión misma del yacimiento, la cual hace que el petróleo emerja a la superficie a través del tubo de producción”. (Ver figura 1.3.)

La fuerza de empuje viene de la energía natural de los fluidos comprimidos o almacenados en el yacimiento.

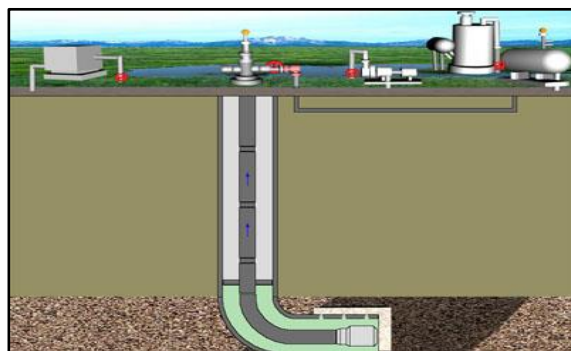


Figura 1.3. Sistema de bombeo artificial

Fuente: Petrogroup training and consulting

Wong N (1989) menciona: La declinación de la energía para que el pozo produzca, es el resultado de una reducción en la presión entre el yacimiento y la cavidad del pozo. Si la diferencia de presión entre el yacimiento y las instalaciones de producción de la superficie es lo suficientemente grande, el pozo fluirá naturalmente a la superficie, utilizando solamente la energía natural suministrada por el mismo yacimiento.

Cuando la energía natural asociada con el petróleo no produce una presión diferencial lo suficientemente grande entre el yacimiento y la cavidad del pozo, como para levantar los fluidos del yacimiento hasta la superficie y hacia sus instalaciones, o como para conducirlos con un volumen suficiente, entonces esta debe ser incrementada por alguna forma de explotación artificial.

Como se menciona en la página de Petrogroup Training and Consulting: Una de las formas de explotación artificial de uso más generalizado es el bombeo neumático. Esta técnica se basa en la inyección de gas o agua a presión en los pozos, para lograr impulsar el petróleo hasta la superficie, pero tiene el inconveniente de que cuando la extracción se ha realizado durante mucho tiempo, o cuando la presión natural del crudo es demasiado baja y adicionalmente, la relación agua/petróleo o gas/petróleo se ha incrementado (en otras palabras mucho gas inyectado, poco petróleo extraído), es entonces cuando el pozo se considera como “no-factible para producción”

Considerando la problemática que implica que el pozo ya no sea factible de explotar, se han desarrollado nuevas técnicas de bombeo, las cuales están basadas en la utilización de bombas electrocentrífugas, accionadas por medio de motores eléctricos de velocidad variable. Esta opción de bombeo es de especial importancia, por las ventajas que brinda para manejar la extracción de crudo y se considera un medio económico y efectivo para levantar grandes cantidades de fluido desde grandes profundidades y en diversas condiciones del pozo.

#### **1.5.1.2. Sistema de bombeo electrocentrífugo:**

Según Petrogroup Training and Consulting: Un sistema de bombeo electrocentrífugo puede instalarse en un pozo localizado en tierra o en una plataforma marítima. Los componentes de un sistema BEC se clasifican de acuerdo con su localización física, de la siguiente forma:

- a) **Equipos superficiales:** son los que se encuentran localizados en la superficie, ya sea en tierra o en una plataforma marítima. Entre estos equipos se encuentran los generadores y transformadores eléctricos, el variador de velocidad, interruptores, válvulas de retención y drenaje.
- b) **Equipos de fondo:** son aquellos que se encuentran localizados en la cavidad del pozo, como puede ser la motobomba, el cable de alimentación o de fondo, el separador de gas rotativo y las partes que constituyen la tubería de extracción.

En la Fig. 1.4 se muestran esquemáticamente, los equipos que forman un sistema de bombeo electrocentrífugo, implementado en una plataforma marina. Normalmente, la profundidad de los pozos o del yacimiento de petróleo es mayor a los 3,000 m.

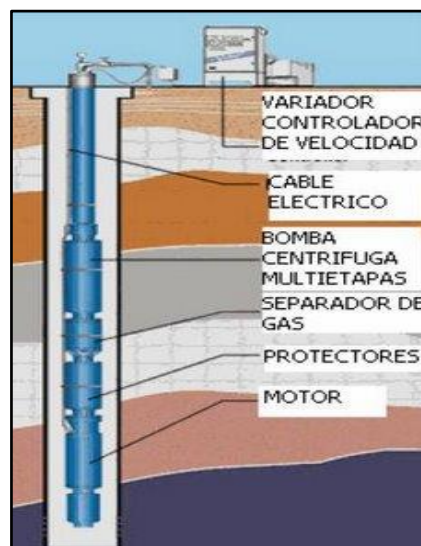


Figura 1.4 partes de un sistema de bombeo electrocentrífugo

Fuente: Petrogroup training and consulting company

### 1.5.2. Esquema eléctrico del sistema BEC y los equipos principales que lo conforman.

De acuerdo a Electrical submersible pumps for oil applications: El circuito eléctrico del sistema BEC y los equipos principales que lo forman se muestran en la Fig. 1.5

La motobomba de fondo se instala en el pozo, a una profundidad mayor a los 3,000 m, por lo tanto, para suministrar la energía eléctrica para la operación de la misma, se requiere un cable de potencia que la interconecte con el transformador elevador.

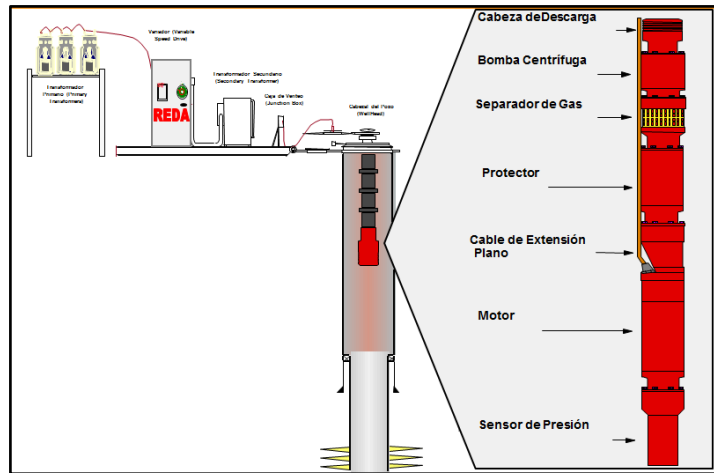


Figura 1.5. Equipos principales que conforman un sistema BEC

Fuente: Schlumberger Del Perú

### 1.5.3. Reflectometría en el dominio del tiempo.

Alastair Clunie (1997) “La reflectometría en el dominio del tiempo (RTD), es una técnica de medición eléctrica que originalmente se usó para localizar rupturas en cables de transmisión de potencia, y a la localización espacial y naturaleza de algunos objetos” [6]. Este consiste de: un transmisor, el cual emite un pulso corto de microondas; una antena direccionable; y un radio receptor sensible. La forma en que se hace la medición es de la siguiente forma: (i) medir el tiempo entre el envío de la onda electromagnética y la detección de la señal, (ii) medir la amplitud de la reflexión, (iii) determinando la dirección de la reflexión y la velocidad de propagación de la onda se puede establecer el tamaño y posición del objeto que causó la reflexión (ver figura 1.6)

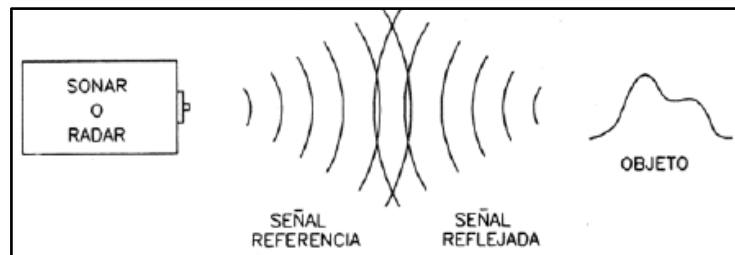


Fig. 1.6 operación básica del radar

Fuente: Electronic Design

En aplicaciones en un cable de potencia, la RTD transmite un pulso de energía sobre el conductor. Cuando ese pulso alcanza el extremo del cable, o se encuentra un cambio en la impedancia característica del cable, parte o toda la energía del pulso se refleja con un retardo al instrumento RTD. (Ver figura 1.7)



Fig. 1.7 Operación básica de un RTD en cables de potencia

Fuente: Electronic Design

### 1.5.3.1. Características de las ondas electromagnéticas:

- Velocidad de onda: las ondas viajan a distintas velocidades dependiendo del tipo de onda y de las características del medio de propagación.
- Frecuencia y longitud de onda: las oscilaciones de una onda electromagnética son periódicas y repetitivas. Por tanto, se caracterizan por una frecuencia. La proporción en la que la onda periódica se repite es su frecuencia. La distancia de un ciclo en el espacio se llama longitud de onda y se determina por la siguiente ecuación fundamental.

$$\text{Distancia} = \text{velocidad} \times \text{tiempo} \dots \dots \dots (1)$$

Si el tiempo para un ciclo se sustituye por el periodo de la onda en la ecuación (1), obtenemos la longitud de un ciclo, que se llama longitud de onda ( $\lambda$ )

$$\lambda = v \times T \dots \dots \dots (1)$$

Donde  $v$ , es la velocidad de la onda en el medio y  $T$  es el periodo de la onda.

Ya que:



$$T = 1/f \dots\dots\dots (2)$$

$$\lambda = \frac{v}{f} \dots\dots\dots (3)$$

Para la propagación en el espacio libre,  $v=c$ ; donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío cuyo valor es  $3 \times 10^8$  m/s, por tanto, la longitud de onda de un ciclo es:

$$\lambda = \frac{c}{f} \dots\dots\dots (4)$$

**1.5.3.2. Circuito equivalente de la línea de transmisión:**

Líneas distribuidas uniformemente.

Debido a que los cables en una L.T. no pueden ser conductores, ellos tienen una resistencia de valor finito. Esta resistencia/conductancia está determinada por la longitud del cable y el área de la sección transversal. Algunos modelos de L.T. poseen una resistencia en serie, que representa la conductividad de los cables. Es conveniente establecer la resistencia en unidades por longitud.

De la misma forma, el medio de separación de los cables no está perfectamente aislado, por lo que existen corrientes de fuga, estas corrientes de fuga pueden generar conductancias. [5]

Las características de una línea de transmisión se determinan por sus propiedades eléctricas, como la conductancia de los cables y la constante dieléctrica del aislante, y sus propiedades físicas, como el diámetro del cable y los espacios del conductor.

Estas propiedades determinan a su vez las constantes eléctricas primarias:

- Resistencia de cd en serie (R)
- Inductancia en serie (L)
- Capacitancia de derivación (C)
- Conductancia de derivación (G)

La resistencia y la inductancia ocurren a lo largo de la línea, mientras que entre los dos conductores ocurren la capacitancia y conductancia. (Ver figura 1.8)

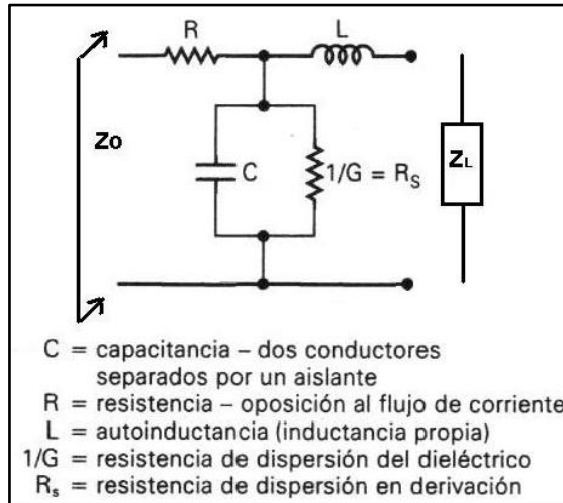


Fig. 1.8 modelo de una línea de transmisión

Fuente: Electronic Design

#### 1.5.4. Características de la transmisión

Las características de una línea de transmisión se llaman constantes secundarias y se determinan con las cuatro constantes primarias. Las constantes secundarias son impedancia característica y constante de propagación.

##### 1.5.4.1. Impedancia característica:

Para una máxima transferencia de potencia, desde la fuente a la carga (o sea, sin energía reflejada), una línea de transmisión debe terminarse en una carga puramente resistiva igual a la impedancia característica de línea. La impedancia característica ( $Z_0$ ), de una línea de transmisión es una cantidad compleja que se expresa en ohms, que idealmente es independiente de la longitud de la línea, y que no puede medirse. Se define como la impedancia que se ve desde una línea infinitamente larga o la impedancia que se ve desde el largo finito de una línea que se termina en una carga totalmente resistiva a la impedancia característica de la línea.

$$Z_0 = \sqrt{R/G} \dots \dots \dots (6)$$

#### **1.5.4.2. Constante de propagación:**

La constante de propagación (a veces llamada coeficiente de propagación) se utiliza para expresar la atenuación (Pérdida de la señal) y el desplazamiento de fase por unidad de longitud de una línea de transmisión. Conforme se propaga una onda, a lo largo de la línea de transmisión, su amplitud se reduce con la distancia viajada. La constante de propagación se utiliza para determinar la reducción en voltaje o corriente en la distancia conforme a la TEM se propaga a lo largo de la línea de transmisión.

#### **1.5.4.3. Factor de velocidad:**

Los instrumentos que usan la RTD miden el tiempo entre el envío del pulso y la recepción de la señal. Este tiempo es convertido a distancia usando una conversación conocida como factor de velocidad [6] se define simplemente como la relación de la velocidad real de propagación, a través de un medio determinado a la velocidad de propagación a través del espacio libre. Matemáticamente el factor de velocidad es:

$$V_{f=} \frac{Vp}{c}$$

#### **1.5.5. Técnica de la reflectometría en el dominio del tiempo.**

Los cables metálicos, como todos los componentes, dentro de un sistema de comunicación electrónica, pueden desarrollar problemas que inhiben su habilidad de funcionar como se espera. Cuando ocurre un problema con un cable, puede consumirse mucho tiempo y, en consecuencia, puede ser bastante costoso, para determinar el tipo y el lugar exacto donde ocurre el problema.

Una técnica que puede utilizarse para localizar el deterioro de un cable metálico se llama reflectometría en el dominio del tiempo (RTD). Con la RTD, los deterioros en la línea de transmisión pueden localizarse en una radio de algunos metros hasta distancias de varios kilómetros. RTD hace uso de la teoría, bien establecida, que dice que el deterioro de las líneas de transmisión, con cortos y abiertos, hace que una porción de la señal incidente regrese a la fuente. Cuanto regresa, depende del tipo y de la magnitud del deterioro. El punto en la línea donde el deterioro se localiza

representa una discontinuidad de la señal. Esta discontinuidad hace que una parte de la señal transmitida será reflejada, en lugar de que continúe a lo largo del cable. Si no regresa la energía (o sea, que la línea de transmisión y la carga están perfectamente acopladas), la línea esta infinitamente larga o está terminada en una carga puramente resistiva con una impedancia igual a la impedancia característica de la línea RTD.

Un pulso de corta duración con un rápido tiempo de elevación se propaga a lo largo del cable; luego se mide el tiempo para que una porción de esa señal regrese a la fuente. Esta señal de retorno se llama a veces eco. Conociendo la velocidad de propagación en el cable, puede determinarse la distancia exacta entre el deterioro y la fuente utilizando la siguiente relación matemática.

$$d = \frac{v * t}{2}$$

En donde:

d= distancia de la discontinuidad (metros)

v= velocidad (metros/ segundos)

v = k x c (metros/ segundo)

k = factor de velocidad (v/c)

c = velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  metros /segundos)

t = tiempo transcurrido (segundos)

Según Andrew S. Tanenbaum: “El RTD mide el tiempo que le toma a la señal viajar por el cable, ve el cambio en  $Z_0$ , y lo refleja de regreso a la fuente”. Históricamente la RTD ha sido reservada sólo por compañías grandes y la ingeniería de alto nivel. Esto se debe a la complejidad de funcionamiento y al elevado costo de los instrumentos. Algunas compañías como Riserbond Instruments reconocieron estas limitaciones y desarrollaron los primeros RTD a principios de los 80’s.

Gracias a los adelantos en la tecnología de hoy, el funcionamiento e interpretación de un RTD se ha simplificado grandemente. Debido a su habilidad de identificar los problemas del cableado, el RTD está cobrando ahora rápidamente la popularidad en la industria de las comunicaciones [3].

En la figura 1.9 se puede observar que el generador de pulsos produce una onda incidente positiva que se aplica al circuito eléctrico bajo análisis. El pulso viaja por la línea de transmisión a la velocidad de propagación de la misma. Si la impedancia de la carga ( $Z_L$ ) es igual a la impedancia característica de la línea ( $Z_0$ ), no se refleja ninguna onda y lo que registrará el osciloscopio es el pulso de tensión incidente. Por otro lado, si la impedancia de carga es diferente a la impedancia característica, parte de la onda incidente se refleja y la onda reflejada de tensión aparecerá en el osciloscopio.

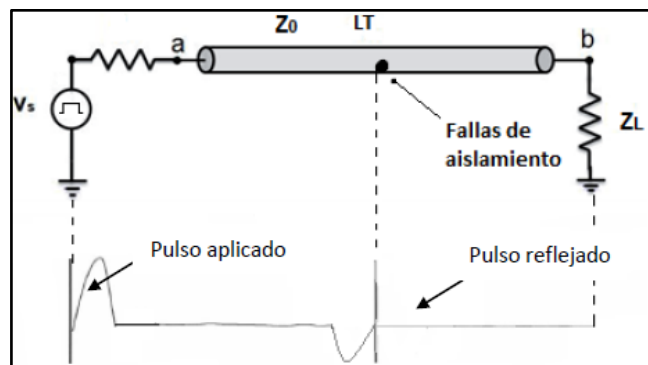


Figura 1.9 Aplicación de TDR en cables de energía

Fuente: Electronic Design

La magnitud de la onda que se refleja está en función del coeficiente de reflexión ( $T$ ). Los valores de dicho coeficiente puede ser de  $T=1$  cuando se tiene un circuito abierto o  $T=-1$  cuando se tiene un corto circuito en el cable de potencia bajo análisis. El valor de cero significa que no hay reflexión; esto se puede deberse a que está mal conectado el equipo o la magnitud del pulso aplicado no es suficiente. El coeficiente de reflexión de tensión se calcula a partir de la ecuación vista anteriormente.

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

Donde:

$T$ : Coeficiente de reflexión de tensión

$Z_L$ : Impedancia de la carga

$Z_0$ : Impedancia característica del cable

La velocidad a la que viaja el pulso aplicado depende de los parámetros constitutivos (permitividad, permeabilidad y conductividad) del medio en que se propaga. Despreciando el efecto de pérdidas a lo largo del cable, y considerando que la permeabilidad relativa del cable es generalmente igual a la del vacío, la permitividad del material aislante del que está compuesto el cable determinará la reducción en la velocidad de propagación en relación a la velocidad de la luz en el vacío.

Matemáticamente, esto es:

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$$

Donde:

v: Velocidad de propagación en el cable [m/s]

v<sub>0</sub>: Velocidad de la luz (300000 km/seg)

ε<sub>r</sub>: Permitividad relativa del aislamiento del cable

Con la técnica de reflectometría se puede determinar el tiempo que tarda en viajar el pulso, a lo largo de un conductor eléctrico. Este tiempo es directamente proporcional a la longitud del cable bajo ensayo e inversamente proporcional a su velocidad de propagación, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\tau = \frac{l}{v}$$

Donde:

τ = Tiempo de viaje del pulso [s]

l = Longitud del cable bajo ensayo [m]

El método de reflectometría es un método eficiente que elimina la necesidad de cálculos complicados que se presentan en métodos preliminares tales como los puentes. En este método se envía un pulso a partir de un extremo del cable con falla, el cual se refleja total o parcialmente dependiendo del cambio de impedancia. Se calcula considerando el tiempo que tarda el pulso de salida de una fuente en regresar hacia la misma y la velocidad de propagación de pulso en el cable al que se le aplica. El punto de la falla se calcula con la siguiente ecuación:

$$l = v \frac{\tau}{2}$$

Donde:

$l$ : Distancia al punto de la falla [m]

$\tau$  : Tiempo en que se refleja el pulso [s]

### 1.5.6. Fallas en cables

Se le denomina falla a la condición física que ocasiona la avería de un cable o que no permite que el mismo retenga o mantenga la tensión de servicio requerida. Existen diferentes tipos de fallas: alta resistencia, baja resistencia, fase a fase, fase a tierra, etc.

Una falla también puede verse como una resistencia no lineal en paralelo con un explosor (spark-gap), como se muestra en la figura 1.10

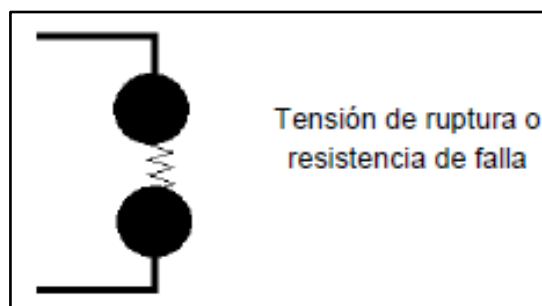


Figura 1.10 Representación de una falla

Fuente: Electronic Design

### 1.5.6.1. Tipos de fallas:

Como ya se mencionó existen diversos tipos de fallas en cables, pero en el caso de cables de potencia los más probables son dos tipos de fallas: las fallas de alta y baja resistencia.

#### ➤ **Falla de baja resistencia:**

La falla de baja resistencia se presenta cuando el aislamiento del cable está dañado (la resistencia de falla a tierra es mucho menor que la resistencia de aislamiento), y existen altos niveles de corriente de fuga. Este tipo de fallas se produce como consecuencia de falla entre fases, fase/neutro y fase/tierra, como se muestra en la fig. 1.11

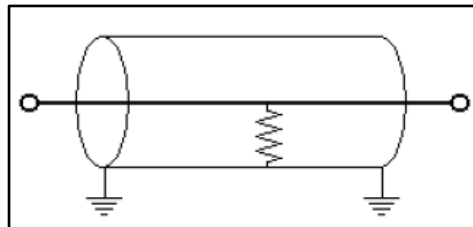


Fig. 1.11 Falla de baja resistencia

Fuente: Electronic Design

#### ➤ **Falla de alta resistencia:**

También llama falla de cable cortado, esta falla está caracterizada por la falla de continuidad en los extremos del conductor, como se muestra en la Fig. 1.12. En otras palabras, se dice que es de alta resistencia debido a que necesita una mayor tensión de operación para poder romper la resistencia y poder retomar continuidad con el otro extremo del conductor.

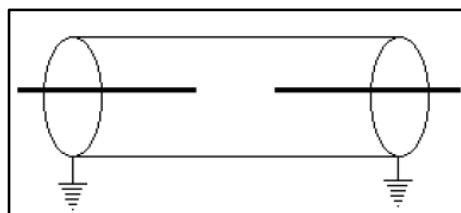


Fig. 1.12 Falla de alta resistencia

Fuente: Electronic Design



## **CAPITULO II**

## II. MATERIALES Y PROCEDIMIENTOS

### II.1. Materiales

#### ➤ Tesis:

**Título:** *“Reflectometría en el dominio del tiempo y su aplicación a la detección de fallas y a la medición de parámetros en redes de comunicación”*

Este trabajo resuelve parte de la problemática de detección de fallas de comunicación en el nivel de cableado y contribuye a caracterizar sus parámetros más importantes coadyuvando con ello a mejorar la confiabilidad y la productividad de la actividad, especialmente en aplicaciones en campo.

También permite comprender la técnica de la reflectometría en el dominio del tiempo para detectar fallas en cables de red y a comprender teorías como:

- Conceptos básicos sobre líneas de transmisión
- Características de las ondas electromagnéticas.
- Teoría de la reflectometría en el dominio del tiempo.
- Propiedades de la longitud de onda.
- Caracterización de cables de acuerdo a su longitud:
  - ✓ Cable de 50 metros
  - ✓ Cable de 70 metros
  - ✓ Cable de 200 metros
  - ✓ Cable de 500 metros

Este desarrollo consiste en un módulo electrónico que realiza funciones de inyección de señales de alta frecuencia en el cableado bajo prueba y mide la respuesta por medio de un submódulo de adquisición de datos. También en este trabajo de presentan pruebas que se realizaron para caracterizar las señales y sus formas de onda. Los resultados del trabajo demuestran la bondad de la técnica RTD para solucionar este tipo de aplicaciones. El uso de esta herramienta podría extenderse a la detección de derivaciones en cableados de la red eléctrica o detección de fallas en cables de fibra óptica, entre otras aplicaciones.

**TÍTULO:** “*Localización de fallas en cables subterráneos mediante el método de reflectometría en el dominio del tiempo (TDR).*”

En este trabajo se describe el método de la reflectometría en el dominio del tiempo como una técnica para la localización de fallas en cables de potencia.

Nos muestra los diferentes tipos de falla como:

- ✓ Falla de baja resistencia
- ✓ Falla solida a tierra
- ✓ Falla de circuito abierto (cable cortado)
- ✓ Falla de cable parcialmente abierto

Mediante simulaciones en un paquete computacional para el análisis de transitorios electromagnéticos se muestran diferentes casos de fallas en cables de potencia.

Las simulaciones pueden ser utilizadas para definir los criterios necesarios para poder identificar en la práctica los diferentes tipos de falla que pueden aparecer en un cable de potencia. Mediante simulaciones se pueden representar una gran variedad de fallas que de otra manera sería difícil poder ver en el campo.

### ➤ **Trabajos de investigación (Papers)**

- *Detección de fallas en los equipos eléctricos del sistema artificial, utilizado para la producción de petróleo en plataformas marinas.*

- Problemáticas que implica un sistema de bombeo electrocentrífugo.
- Esquema eléctrico y equipos principales de un sistema BEC.
- Diagnóstico de un sistema de bombeo artificial.
- Evaluación del sistema BEC mediante le técnica de la reflectometría

- *Bombeo electrosomergible. “Descripción, diseño, análisis de fallas y trouble shooting”*

- Análisis de fallas y trouble shooting.
- Métodos de levantamiento.
- Principios básicos de electricidad.
- Procesos relacionados con el sistema BEC

- *Técnica de reflectometría para el diagnóstico del equipo de fondo del sistema de bombeo electrocentrífugo de petróleo crudo.*

- Causas de deterioro del sistema de bombeo electrocentrífugo.
- Técnicas de diagnóstico del equipo de fondo del sistema de bombeo electrocentrífugo.

➤ **Libros de procesamiento de señales: Técnica de la reflectometría en el dominio del tiempo.**

- Gunnar Englund. “Descripción, Diseño, Análisis de fallas y Trouble Shooting.
- Wong, N. “*Electrical submersible pumps for oil well applications*”. Vol. 17, July 1989

➤ **Cuadro comparativo de las características de los cables de potencia de categoría 1.**



Número de producto	Tensión de Operación (V)	Calibre (AWG-kcmil)	Área de la sección transversal (mm <sup>2</sup> )	Número de alambres del conductor	Díametro del conductor (mm)	Espesor nominal del aislamiento (mm)	Díametro nominal sobre aislamiento (mm)	Número de alambres de la pantalla metálica	Calibre de los alambres de la pantalla metálica (swg)	Área de la sección transversal de la pantalla metálica (mm <sup>2</sup> )	Número de conductores de tierra	Calibre del conductor de tierra (AWG-kcmil)	Díametro del conductor de tierra (mm)	Díametro exterior nominal (mm)	Peso nominal del cable (kg/km)	Empaque	Color exterior
160E000YHA	5 000	4	21.15	7	5.36	2.30	11.13	7	22	2.27	1	6	4.64	35.37	1 562	CARRETE	ROJO
160E000YIA	5 000	2	33.62	7	6.74	2.30	12.51	7	20	3.63	1	6	4.64	39.08	2 055	CARRETE	ROJO
160E000YKA	5 000	1/0	53.50	19	8.46	2.30	14.24	7	20	3.63	1	4	5.86	44.45	2 969	CARRETE	ROJO
160E000YLA	5 000	2/0	67.40	19	9.47	2.30	15.25	7	20	3.63	1	4	5.86	46.63	3 426	CARRETE	ROJO
160E000YMA	5 000	3/0	85.00	19	10.69	2.30	16.45	7	20	3.63	1	2	7.38	49.25	4 129	CARRETE	ROJO
160E000YNA	5 000	4/0	107.00	19	11.98	2.30	17.75	7	20	3.63	1	2	7.38	52.02	4 930	CARRETE	ROJO
160E000YOA	5 000	250	127.00	37	13.07	2.30	19.09	9	20	4.67	1	2	7.38	54.92	5 539	CARRETE	ROJO
160E000YPA	5 000	300	152.00	37	14.35	2.30	20.38	9	20	4.67	1	2	7.38	57.69	6 336	CARRETE	ROJO
160E000YQA	5 000	350	177.00	37	15.54	2.30	21.87	9	20	4.67	1	2	7.38	60.25	7 151	CARRETE	ROJO
160E000YRA	5 000	400	203.00	37	16.63	2.30	22.36	9	20	4.67	1	2	7.38	62.39	7 936	CARRETE	ROJO
160E000YTA	5 000	500	253.00	37	18.51	2.30	24.54	9	20	4.67	1	1	8.39	66.65	9 552	CARRETE	ROJO
160E000YUA	5 000	600	304.00	61	20.39	2.30	26.67	12	20	6.23	1	1	8.39	74.21	11 561	CARRETE	ROJO
160E000YVA	5 000	750	380.00	61	22.77	2.30	29.05	12	20	6.23	1	1/0	9.42	79.33	14 070	CARRETE	ROJO
160E000YYA	5 000	1000	507.00	61	26.63	2.30	32.91	12	20	6.23	1	1/0	9.42	87.65	17 934	CARRETE	ROJO
160E000YZA	8 000	4	21.15	7	5.36	2.90	12.34	7	22	2.27	1	6	4.64	37.99	1 684	CARRETE	ROJO
160E000Z0A	8 000	2	33.62	7	6.74	2.90	13.73	7	20	3.63	1	6	4.64	41.71	2 187	CARRETE	ROJO
160E000Z1A	8 000	1/0	53.50	19	8.46	2.90	15.45	7	20	3.63	1	4	5.86	47.08	3 123	CARRETE	ROJO
160E000Z2A	8 000	2/0	67.40	19	9.47	2.90	16.46	7	20	3.63	1	4	5.86	49.25	3 586	CARRETE	ROJO
160E000Z3A	8 000	3/0	85.00	19	10.69	2.90	17.68	7	20	3.63	1	2	7.38	51.87	4 297	CARRETE	ROJO
160E000Z4A	8 000	4/0	107.00	19	11.98	2.90	18.97	7	20	3.63	1	2	7.38	54.65	5 006	CARRETE	ROJO
160E000Z5A	8 000	250	127.00	37	13.07	2.90	20.31	9	20	4.67	1	2	7.38	57.54	5 724	CARRETE	ROJO
160E000Z6A	8 000	300	152.00	37	14.35	2.90	21.60	9	20	4.67	1	2	7.38	60.32	6 530	CARRETE	ROJO
160E000Z7A	8 000	350	177.00	37	15.54	2.90	22.79	9	20	4.67	1	2	7.38	62.88	7 353	CARRETE	ROJO

Tabla 2.1. Cuadro comparativo de las características del cable de potencia

Fuente: Schlumberger del Perú

➤ **Software de simulación de parámetros eléctricos.**

- El PSCAD (Power System CAD) Diseño Asistido por computadora de sistemas de potencia.

## II.2. Procedimientos:

- Se analiza el sistema de bombeo electrocentrífugo de petróleo y sus diferentes equipos que lo conforman (ver figura 2.1) y se registrará las causas y motivos por el cual fallan los equipos de fondo para poder estudiarlas, en específico se tomará datos de las causas de las fallas en el cable de potencia.

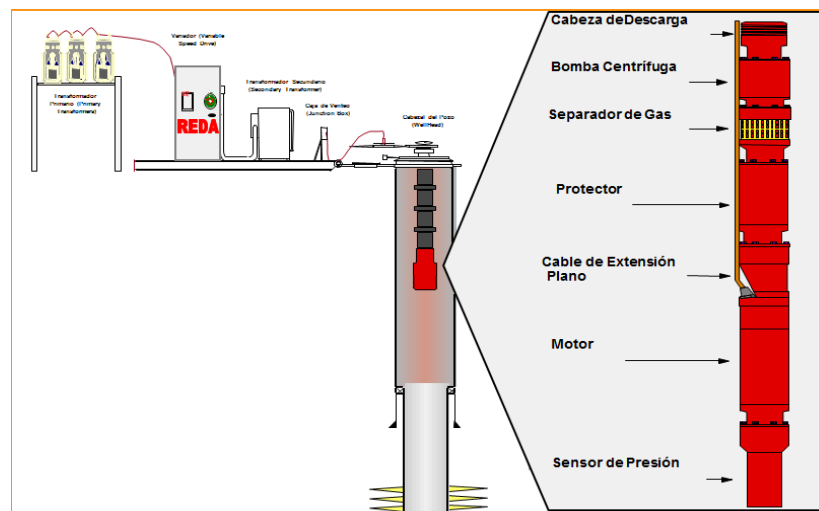


Figura 2.1. Sistema de bombeo electrocentrífugo

Fuente: Schlumberger Del Perú

- Consideramos las características del cable de potencia (categoría 1) y se realiza un análisis de sus propiedades.

**Los principales componentes del cable de potencia incluyen:**

- ✓ **Conductor** – propiedades eléctricas.
- ✓ **Material de Aislamiento** - protege y cubre los conductores.
- ✓ **Chaqueta de Barrera** - protege y cubre el aislamiento.
- ✓ **Material de la Chaqueta** – elastómero diseñado considerando temperatura, químicos y gas.
- ✓ **Armadura Externa** – la protección externa que sostiene todo junto.

20 Initials **Schlumberger**

Figura 2.2. Características del cable de potencia

Fuente: Schlumberger Del Perú

- Analizamos la técnica de la reflectometría en el dominio del tiempo y su aplicación a la detección de cambios de impedancia.

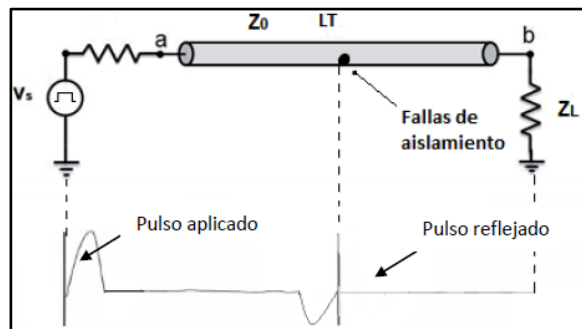


Figura 2.3. Principios de la técnica de la reflectometría

Fuente: Electronic design

- Se realiza inyecciones de señales de alta frecuencia en el cableado bajo prueba.

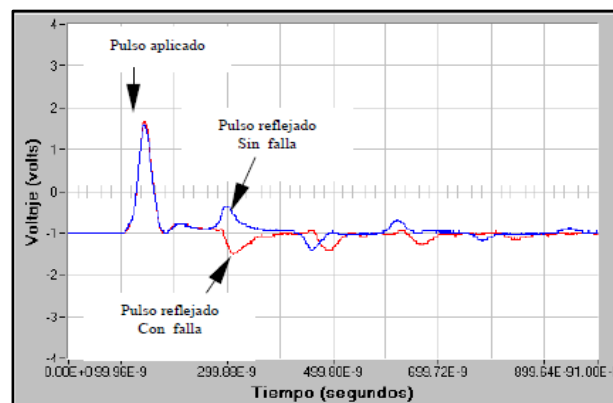


Figura 2.4. Pulso aplicado

- Procedemos a la forma como se hace la medición:
  - Se recopila datos de la velocidad de propagación de la onda en el cable.
  - Se mide el tiempo entre el envío de la onda electromagnética y la detección de la señal.
  - Se mide la amplitud de la reflexión.
  - Se determina la dirección de la reflexión
  - Se establece la longitud a la que ocurrió la falla.
- Se procesa los resultados de prueba.
- Se determina cambios de la impedancia característica de la línea de transmisión (discontinuidades).

## **II.2.1. Familiarización con el software PSCAD.**

### **Definición**

¿Qué es el PSCAD?

El PSCAD (Power System CAD) por sus siglas en inglés, significa “Diseño Asistido por computadora de sistemas de potencia”. Es una herramienta que sirve para la simulación del comportamiento de sistemas de potencia eléctricos, por medio del diseño de un circuito eléctrico.

Cuenta con varios elementos de sistema, para poder crear un circuito tales como herramientas de representación de variables, medidores, elementos de control y elementos eléctricos.

Una de las ventajas de este software en su librería de componentes, pues es una de las más amplias y completas del mercado, abarcando desde elementos pasivos, hasta módulos con circuitos muy complejos

Éste programa esta accesible en su versión de estudiante, así como sus manuales y ejemplos en la página web: [www.pscad.com](http://www.pscad.com) .

La última versión disponible es la X4, compatible con Windows 7.

En cuanto a la librería, como ya se mencionó, es una de las más extensas, está compuesta por las siguientes grupos, como se muestra en la figura 3.1:

- Elementos pasivos
- Fuentes
- Misceláneos
- Dispositivos I/O
- Interruptores y fallas
- Electrónica de potencia
- Etiquetas de importaciones y exportaciones
- Transformadores
- Maquinas
- Funciones continuas en un sistema modelado
- Líneas de transmisión.
- Cables
- Medidores
- Protecciones
- Grabador de datos

- Secuenciales
- Lógicos
- Secciones PI

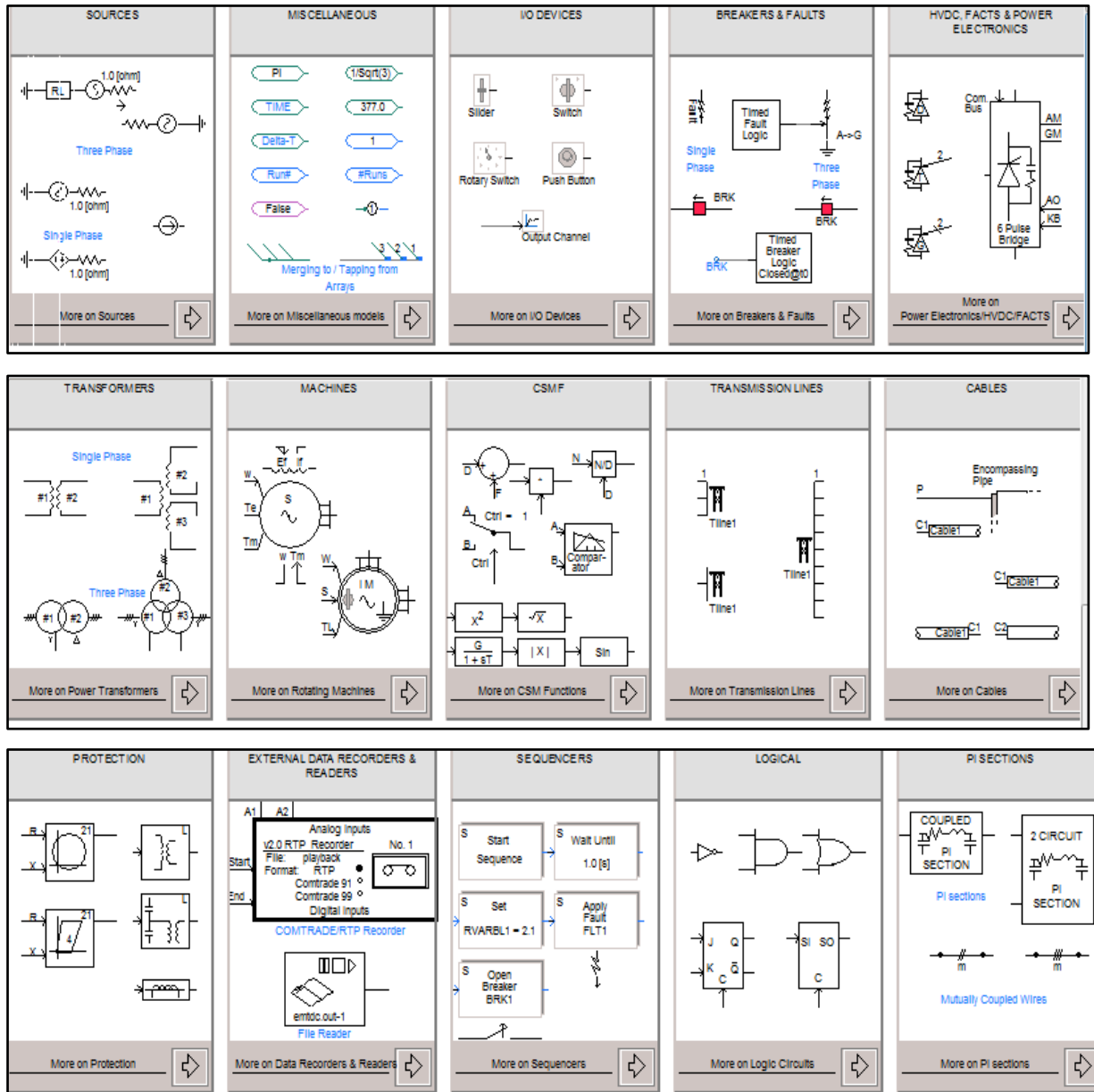


Figura 3.1: Librerías del PSCAD

Fuente: Manual PSCAD



## II.2.2. Descripción del entorno de trabajo:

El PSCAD/EMTDC está diseñado para trabajar en un ambiente de Windows, de forma que al ejecutar el PSCAD abre una ventana principal como se muestra en la Figura 3.2:

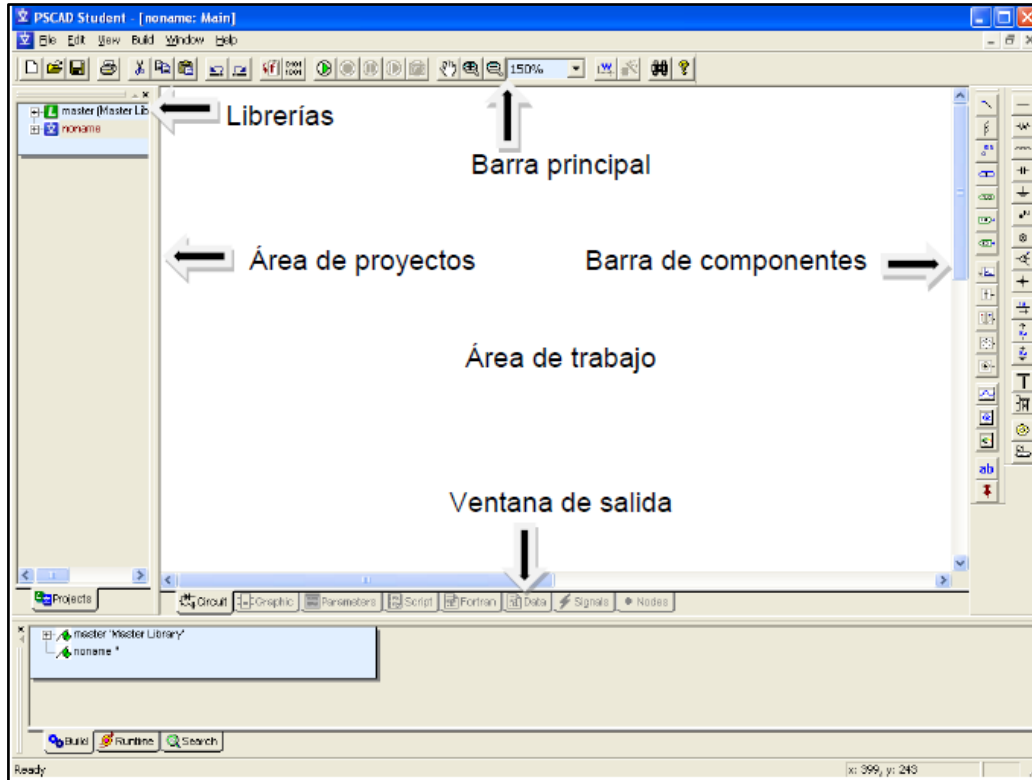


Figura 3.2: entorno grafico del PSCAD

Fuente: Manual PSCAD

- Área de trabajo: es la parte central donde se generan los diagramas de los sistemas eléctricos.
- Área de proyectos: es la ventana donde se muestran los proyectos que se están utilizando.
- Barra de componentes: es donde se sitúan botones con aquellos elementos más utilizados, tanto eléctricos como de control.
- Ventana de salida: en esta ventana es donde se nos informa del estado de la simulación y errores que pueda tener el circuito.
- Barra principal: en esta barra se accede a las funciones cerrar y abrir proyectos, zoom, inicio de la simulación, copiar, pegar, etc.
- Librerías: en esta pestaña se encuentran todos los elementos eléctricos, de control, entre otros, para la realización de los diagramas.

### II.2.3. Diseño de un sistema trifásico en PSCAD.

- Se selecciona el bloque de cables, en este se puede elegir: diagrama, modelo que se utilizará y la configuración de los cables, como se observa en las figuras 3.3, 3.4 y 3.5 respectivamente:

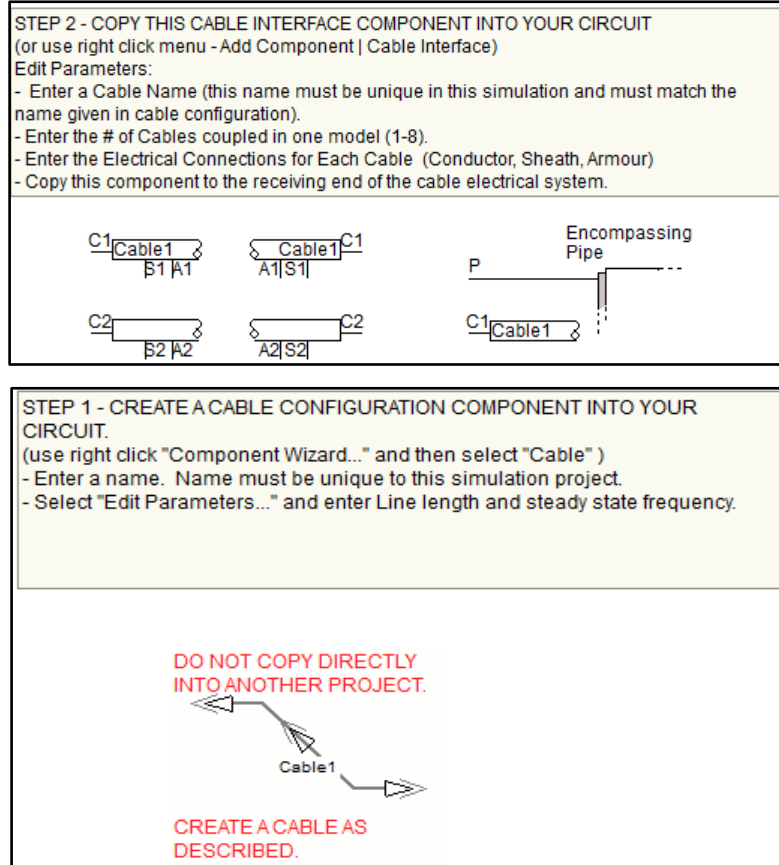


Figura 3.3 Diagrama de los cables

Fuente: Manual PSCAD

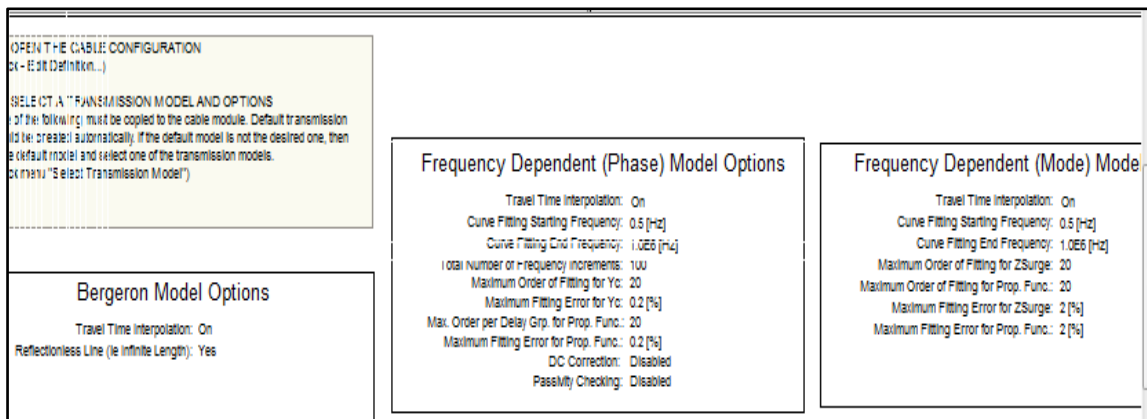


Figura 3.4. Modelos de cables que maneja PSCAD

Fuente: Manual PSCAD

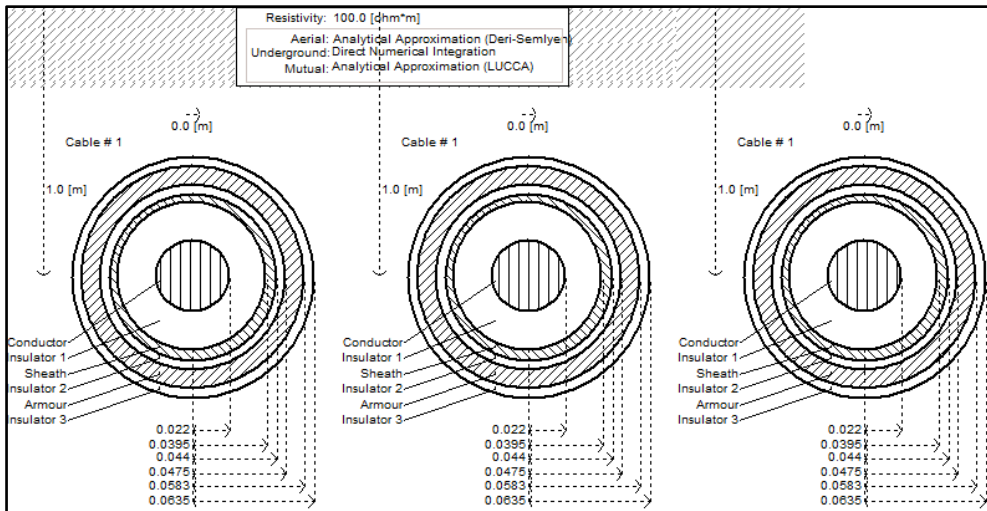


Figura 3.5. Configuración de los cables

Fuente: Manual PSCAD

En este caso se utiliza el modelo universal o en el dominio de fases debido a que es el modelo más preciso con que cuenta el programa.

- Se colocan dos tramos de cables para simular una falla a la mitad del cable, como se muestra en la figura 3.6

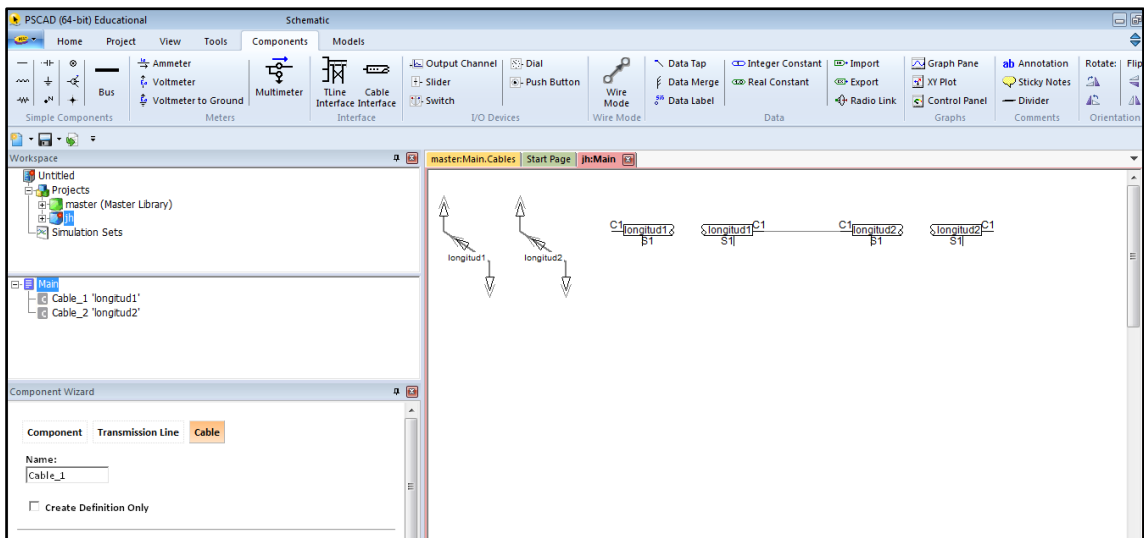


Figura 3.6. Cable monofásico en el área de trabajo PSCAD

Para obtener un sistema trifásico se da doble clic sobre el primer cable y aparece una ventana como la figura 3.7. En ella se define el número de fases y cuál será su conexión; con pantalla, armadura, etc.

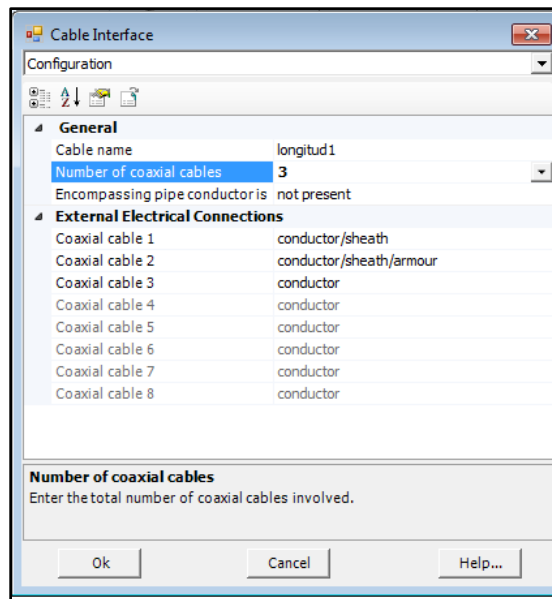


Figura 3.7. Diseño de la fase

Fuente: Manual PSCAD

De igual forma se debe elegir la longitud del cable y la frecuencia; para ello se da doble clic sobre la interconexión del cable (segmento de recta con dos puntas de flecha) lo cual despliega un recuadro como el de la figura 3.8

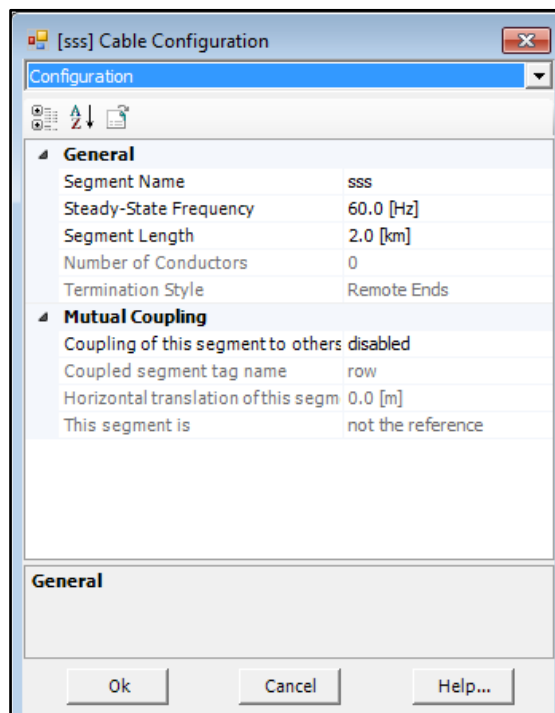


Figura 3.8. Configuración del cable

Fuente: Manual PSCAD

En la ventana de la figura 3.8 tiene una opción de editar la sección transversal del cable; para ello se da un clic en “Edit” y muestra una ventana como en la figura 3.9.

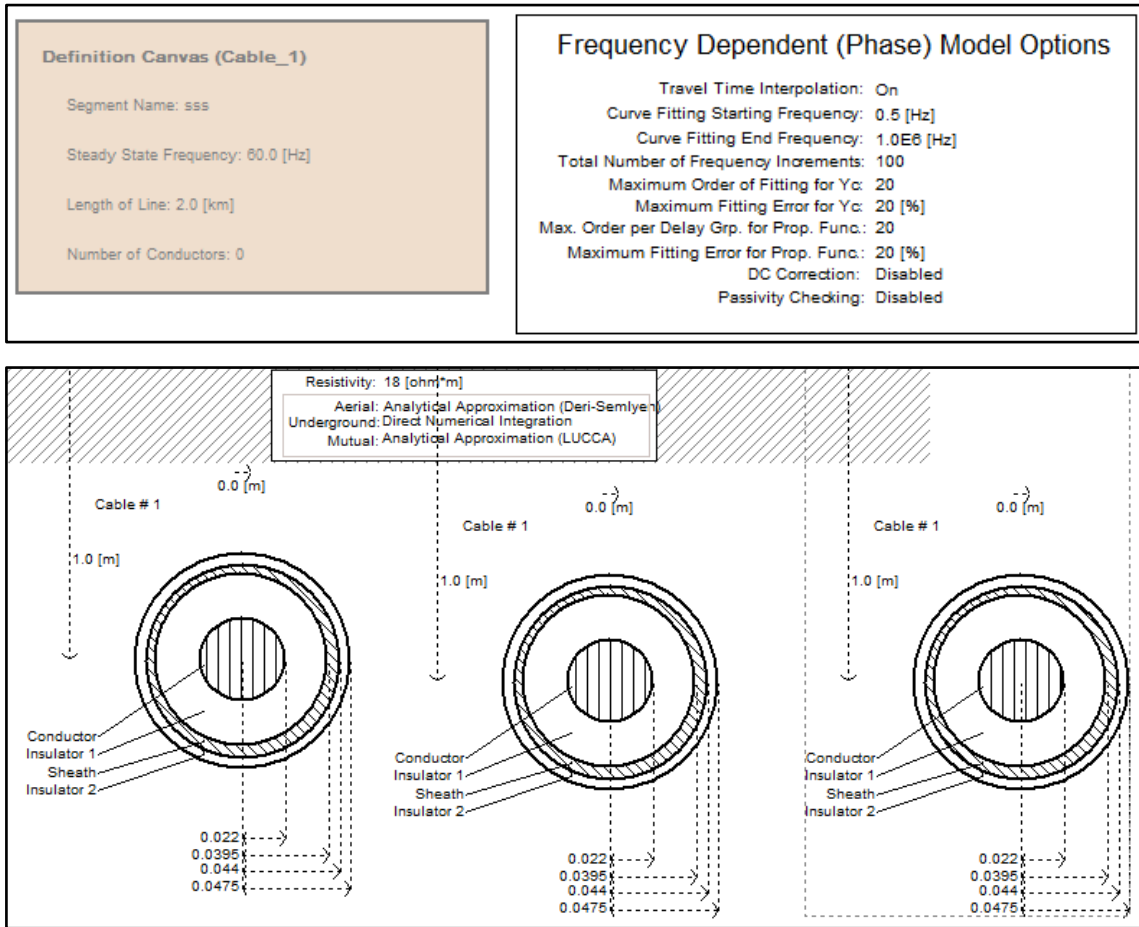


Figura 3.9. Editor de sección transversal del cable

Fuente: Manual PSCAD

En la ventana de la figura 3.9. Se observa el modelo elegido para el cable, en este caso modelo universal o en el dominio de fases. Puede definirse el espaciamiento entre conductores, resistividad, permitividad, entre otros. Para modificar estos valores se le da un clic en el cable a modificar y despliega una ventana como la que se muestra en la figura 3.10. Estos valores se tendrán que modificar por cada uno de los cables que se tengan en el sistema. Una vez configurado lo anterior queda el sistema que se muestra en la figura 3.11.

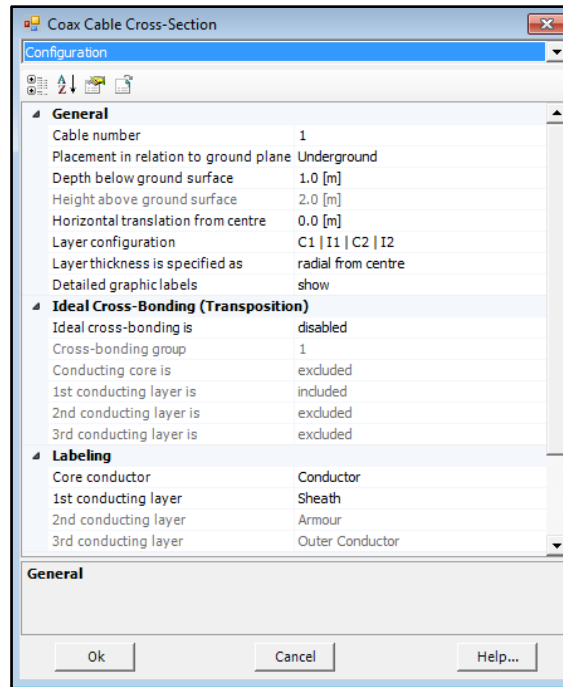


Figura 3.10. Constantes y datos del cable

Fuente: Manual PSCAD

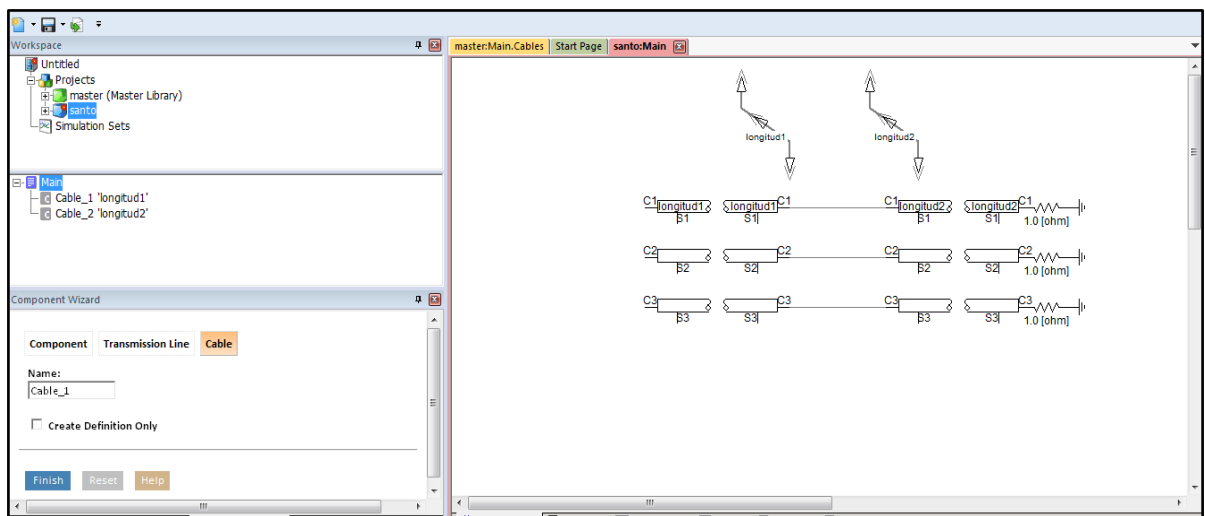


Figura 3.11. Diagrama de un sistema de cable trifásico en PSCAD

- Ya que se tiene definido el sistema, el siguiente paso es la creación de la fuente generadora del pulso cuadrado, para lo cual hay que dirigirse a la biblioteca de componentes, en el bloque CSMF (sistemas de control de funciones de modelado) Se selecciona el componente con el nombre de “Non-Linear Transfer Characteristic”. Este dispositivo sirve para dar forma a la señal que se quiere tener por medio de coordenadas, como se ilustra en la figura 3.12

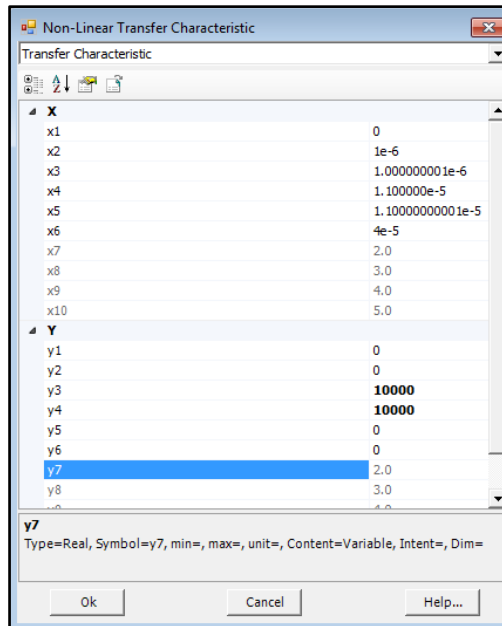


Figura 3.12. Tabla para modelar la forma de la señal en PSCAD

Fuente: Manual PSCAD

- Para terminar de definir la fuente generadora del pulso, se coloca a la entrada una señal variable de tiempo, ya que la señal generadora es dependiente de un tiempo. La salida de la señal se conecta a una fuente de tensión que se localiza en el módulo de “sources”. Esta fuente se inyecta en el sistema como se muestra en la figura 3.13.

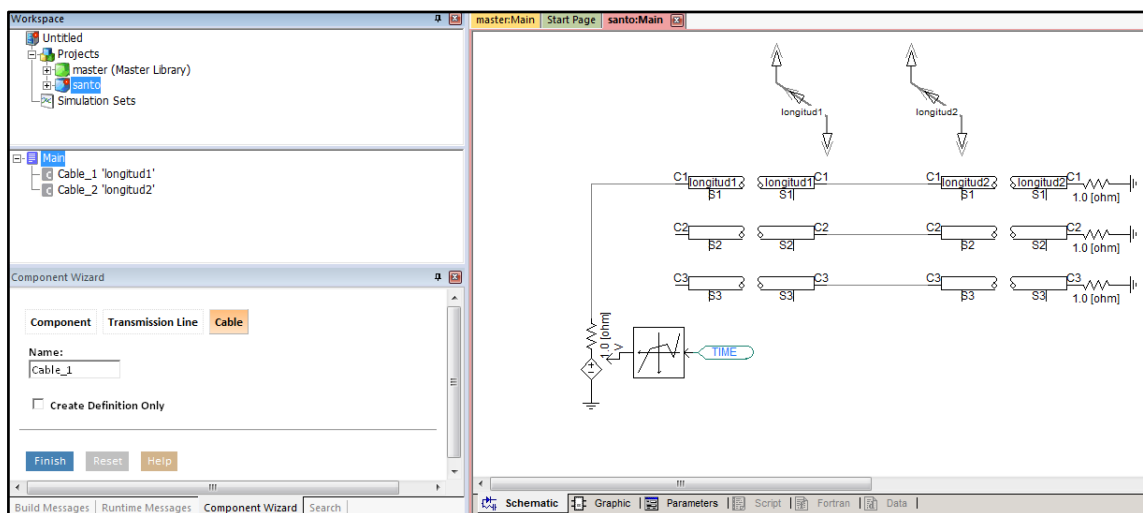


Figura 3.13. Diagrama de un sistema trifásico y la fuente generadora de un pulso cuadrado en PSCAD

Fuente: Manual PSCAD

- Por último, se deben incluir elementos de medición para tomar lectura de las señales que arroja el sistema. Para ello se copian de la librería y módulo con el nombre de “I/O Devices” los elementos “Output Channel” y “GraphFrames”. Finalmente se coloca un voltímetro monofásico que se encuentra en la barra de componentes. Ver figura 3.14.

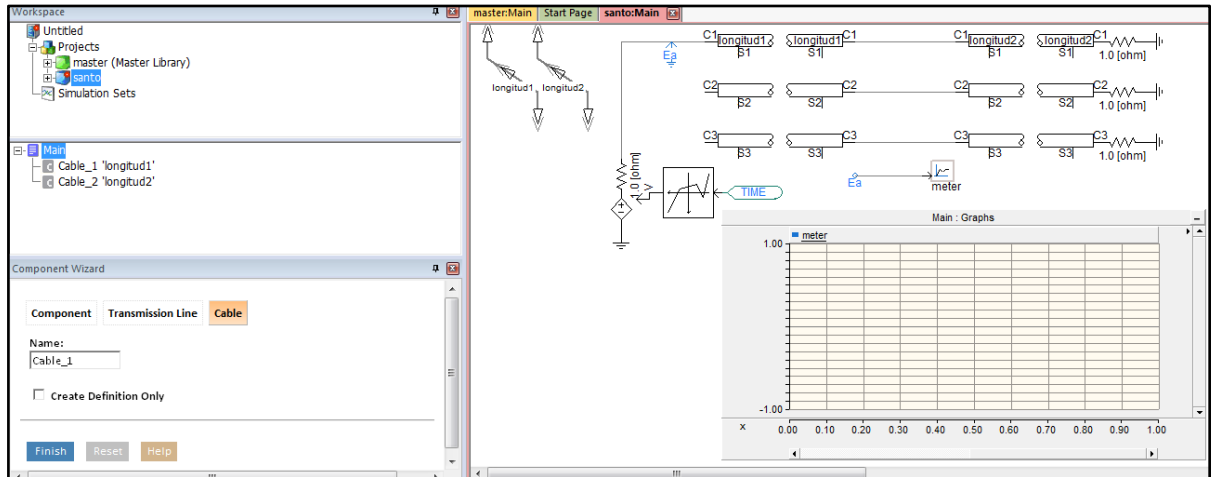


Figura 3.14. Sistema eléctrico para el caso de estudio en PSCAD

- Ya que se tiene concluido el modelado del caso de sistema de aplicación de reflectometría, sólo se tiene que ajustar el tiempo de simulación y los pasos de integración que se requieran. Para ello se le da un clic derecho sobre el proyecto que se está trabajando y se selecciona la opción de projectsettings; aparecerá un cuadro como el de la figura 3.15

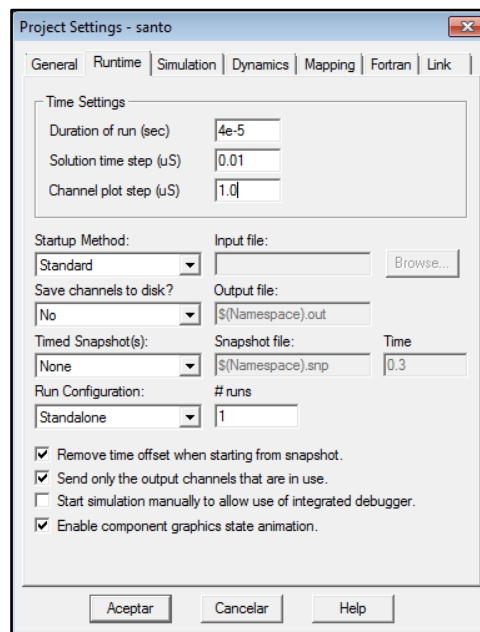


Figura 3.15. Cuadro de configuración del tiempo de duración de la simulación.



En la figura 4.15. Se modifican los ajustes de tiempo que son:

- **Duration of run (sec):** se refiere al tiempo de duración de la simulación del sistema creado.
- **Solution time step (us):** en esta opción se ajusta el paso de integración en el tiempo.
- **Cannel plop step (us):** es el intervalo de tiempo en segundos para arrojar datos de salida.

Por último, para realizar la corrida del programa se da clic al botón RUN que se localiza en la barra principal, como se indica en la figura 4.16

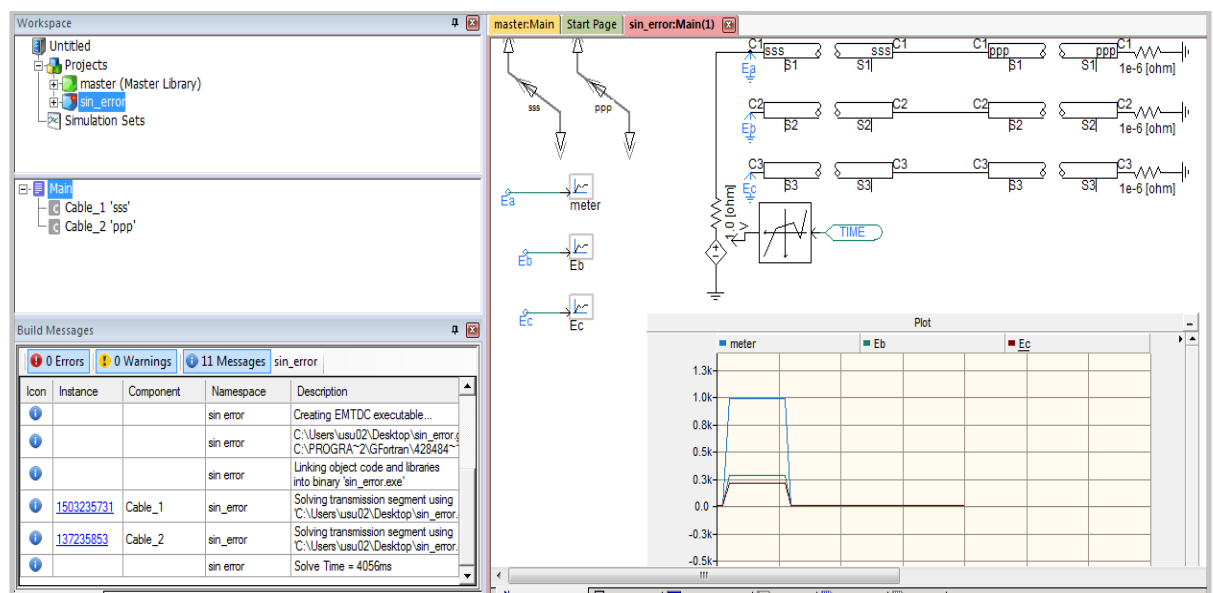


Figura 3.16. Corrida del sistema modelado en PSCAD

Fuente: Manual PSCAD

## **CAPITULO III**

### III. DESARROLLO DEL TRABAJO DE TESIS

#### Recolección de datos.

3.1. Simulación de fallas en cables de potencia y localización de las mismas empleando PSCAD.

Como se mencionó en el marco teórico, en los cables de potencia existen diferentes tipos de fallas, tales como: corto circuito, falla a tierra y circuito abierto. Para dar una explicación del comportamiento de dichas fallas en cables de potencia se utiliza el software PSCAD/EMTDC, con el cual se simula un cable de potencia con una longitud de 4 km, una impedancia característica  $Z_c = 50 \Omega$ , en el cual está conectado a un generador de impulso que arroja un pulso de 1kv. Para fines de simulación y poder colocar la falla se consideran fallas a 2000, 3000 y 4000 metros del cable de potencia.

#### Caso 1. Falla por aislamiento deteriorado (pequeñas corrientes de fuga a tierra)

a. Falla a 2000 metros

- Longitud 1 = 2000 metros
- Longitud 2 = 1000 metros

En este caso se tiene una falla en el aislamiento del cable de potencia donde existen pequeñas corrientes de fuga; dicha falla se simula colocando en paralelo una resistencia ligeramente mayor a la impedancia característica del cable de potencia bajo prueba; y se encuentra a 2000 metros, como se muestra en la figura 3.17. En la figura 3.18, se muestra la respuesta de dicho sistema.

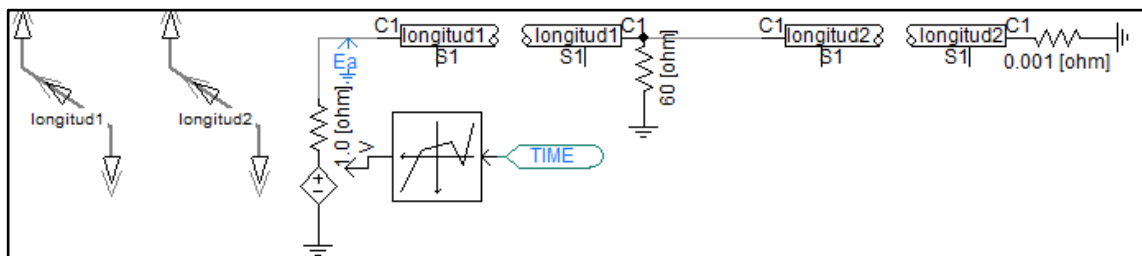


Figura 3.17. Arreglo de una falla por aislamiento deteriorado a 2000 m en PSCAD

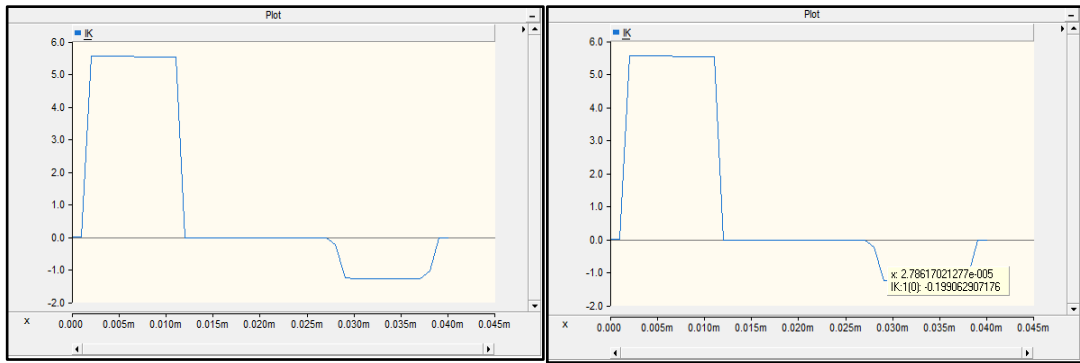


Figura 3.18 Respuesta de una falla por aislamiento deteriorado a 2000 m

b. Falla a 3000 metros

- Longitud 1 = 2000 metros
- Longitud 2 = 1000 metros
- Longitud 3 = 1000 metros

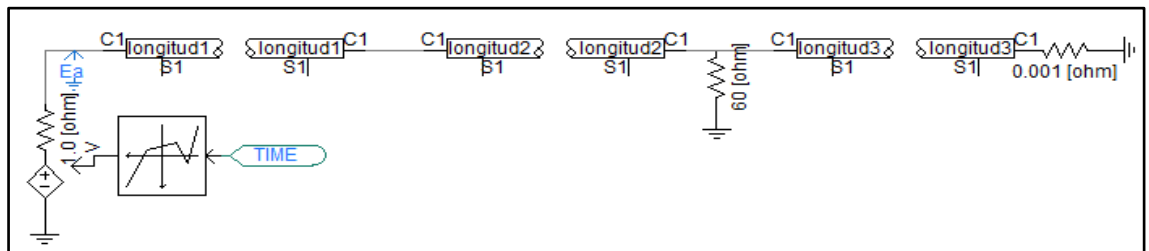


Figura 3.19. Arreglo de una falla por aislamiento deteriorado a 3000 m en PSCAD

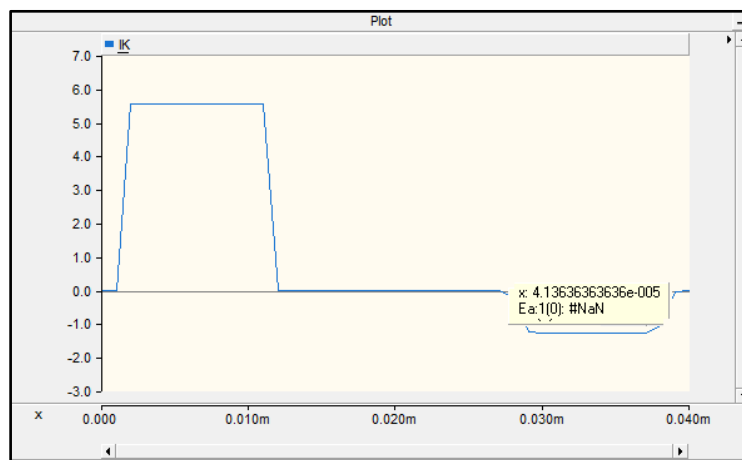


Figura 3.20. Respuesta de una falla por aislamiento deteriorado a 3000 m

- c. Falla a 4000 metros
- Longitud 1 = 2000 metros
  - Longitud 2 = 2000 metros
  - Longitud 3 = 1000 metros

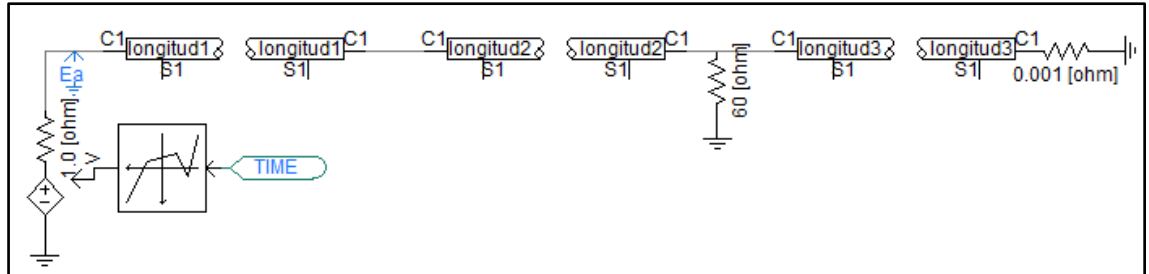


Figura 3.21 Arreglo de una falla por aislamiento deteriorado a 4000 m en PSCAD

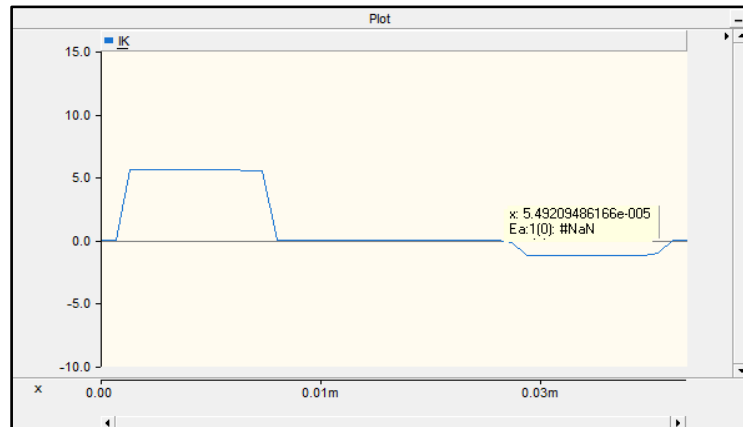


Figura 3.22 Respuesta de una falla por aislamiento deteriorado a 4000 m

**Caso 2. Falla de cable Parcialmente abierto.**

En este caso se considera una resistencia en serie entre los 2 tramos del cable, esto con el objetivo de simular una falla de cable parcialmente abierto. Para ello se utiliza una resistencia ligeramente menor a la  $Z_c$  del cable de potencia, como se muestra en la figura 3.23. En la figura 3.24 se muestra la respuesta del sistema al aplicarle el pulso.

- a. Falla a 2000 metros
- Longitud 1 = 2000 metros
  - Longitud 2 = 1000 metros

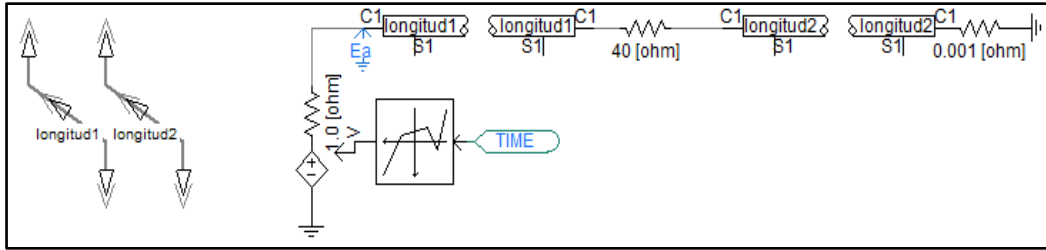


Figura 3.23 Arreglo en PSCAD de una falla parcialmente abierto a 2000 m

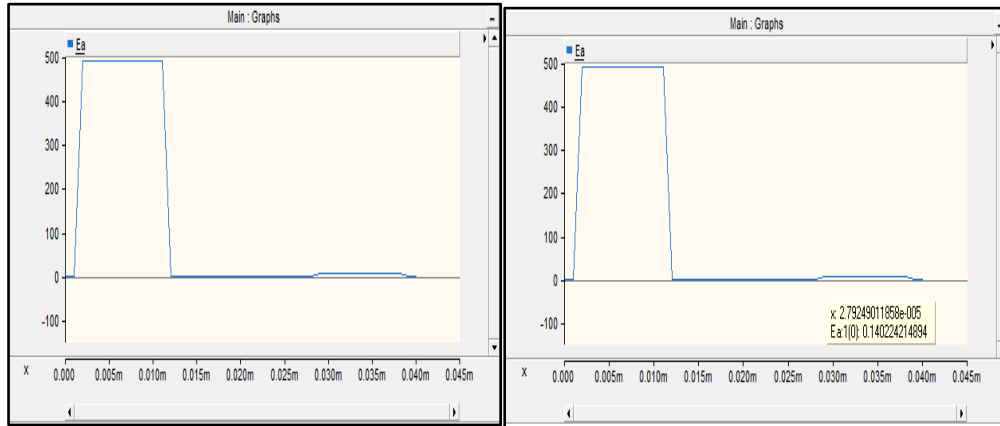


Figura 3.24 Respuesta de una falla parcialmente abierto a 2000 m

b. Falla a 3000 metros

- Longitud 1 = 2000 metros
- Longitud 2 = 1000 metros
- Longitud 3 = 1000 metros

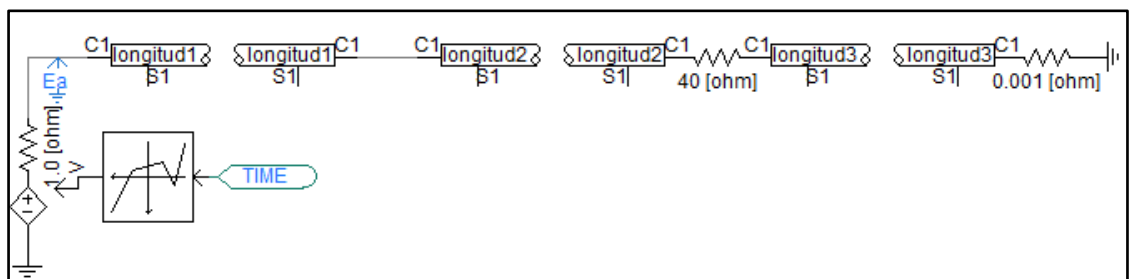


Figura 3.25 Arreglo en PSCAD de una falla parcialmente abierto a 3000 m

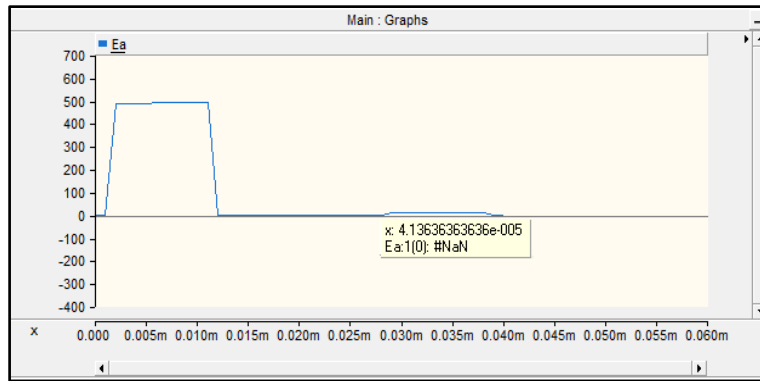


Figura 3.26 Respuesta de una falla parcialmente abierto a 3000 m

c. Falla a 4000 metros

- Longitud 1 = 2000 metros
- Longitud 2 = 2000 metros
- Longitud 3 = 1000 metros

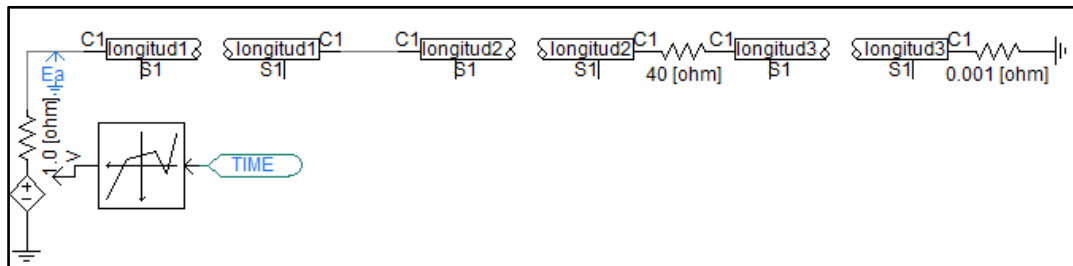


Figura 3.27. Arreglo en PSCAD de una falla parcialmente abierto a 4000 m

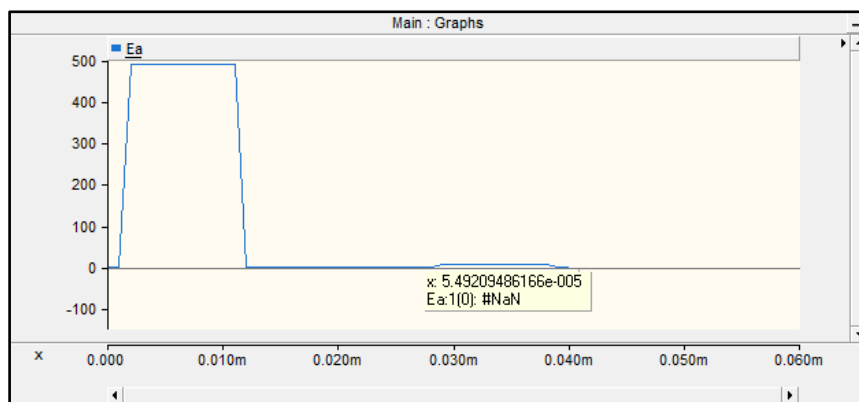


Figura 3.28. Respuesta de una falla parcialmente abierto a 4000 m

### Caso 3. Falla sólida a tierra

En este caso se utiliza una resistencia en paralelo de  $1\mu\Omega$  para simular la falla a la mitad de la línea. Esto se debe a que el software no permite conectar directamente a tierra para que la falla sea sólida, por lo cual se utiliza una resistencia suficientemente pequeña, como se observa en la figura 3.29

a. Falla a 2000 metros.

- Longitud 1 = 2000 metros
- Longitud 2 = 1000 metros

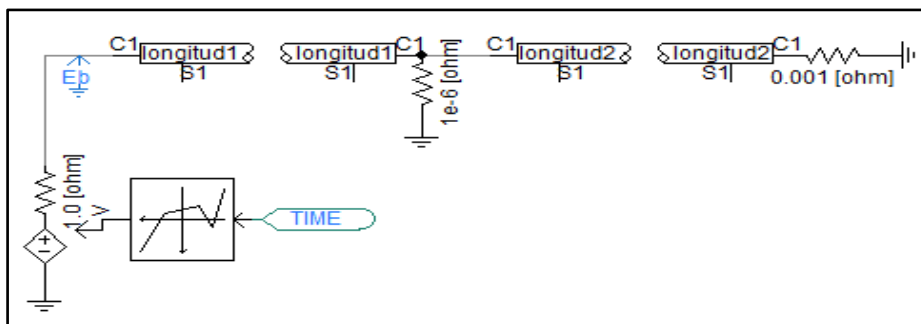


Figura 3.29 Arreglo de una falla sólida a 2000 m en PSCAD

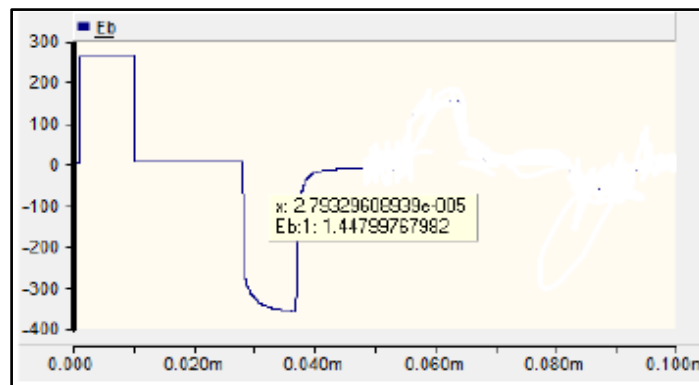


Figura 3.30 Respuesta de una falla sólida a 2000 m en PSCAD

b. Falla a 3000 metros

- Longitud 1 = 2000 metros
- Longitud 2 = 1000 metros
- Longitud 3 = 1000 metros



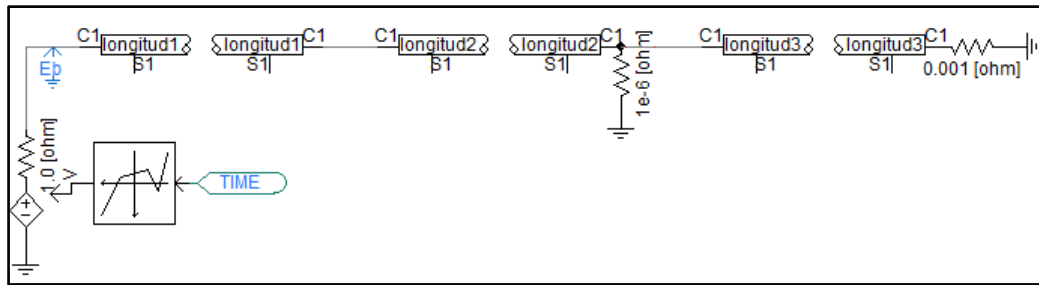


Figura 3.31 Arreglo de una falla sólida a 3000 m en PSCAD

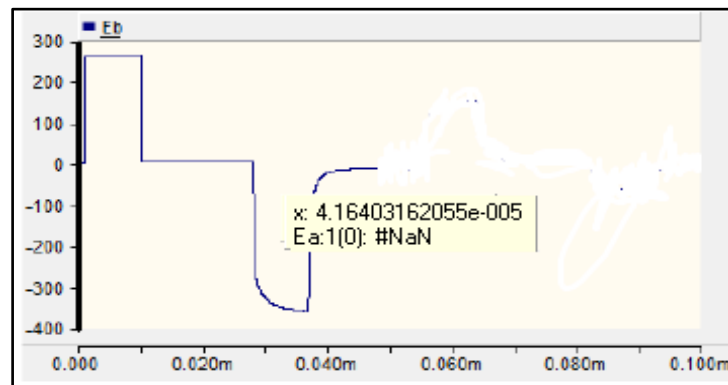


Figura 3.32 Respuesta de una falla sólida a 3000 m en PSCAD

c. Falla a 4000 metros

- Longitud 1 = 2000 metros
- Longitud 2 = 2000 metros
- Longitud 3 = 1000 metros

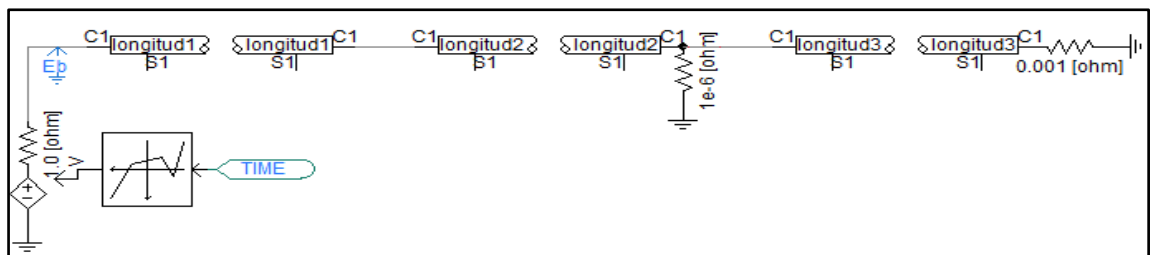


Figura 3.33. Arreglo de una falla sólida a 4000 m en PSCAD

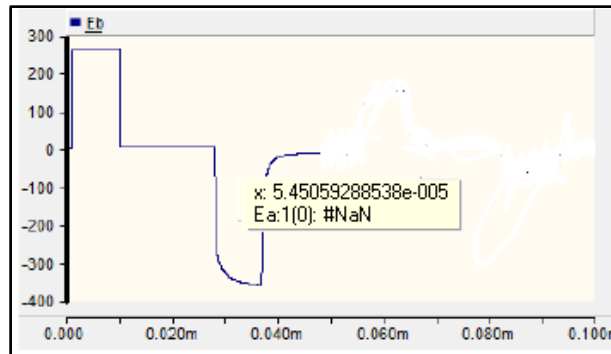


Figura 3.34. Respuesta de una falla sólida a 4000 m en PSCAD

#### Caso 4. Falla de circuito abierto (cable cortado)

Una falla de circuito abierto se considera una falla de alta resistencia que se simula mediante una resistencia serie con un valor mucho mayor a la  $Z_c$  del cable de potencia, situada a la mitad de la línea, como se muestra en la figura 3.35

En la figura 3.36 se muestra la respuesta a dicho arreglo.

a. Falla a 2000 metros

- Longitud 1 = 2000 metros
- Longitud 2 = 1000 metros

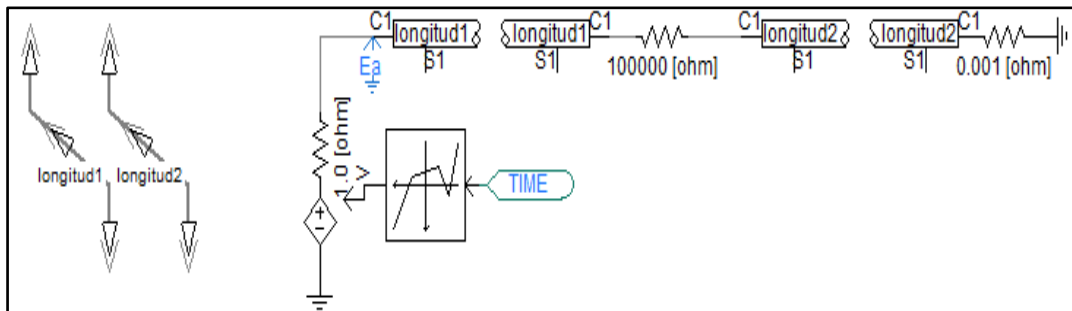


Figura 3.35. Arreglo de una falla por cable cortado a 2000 m en PSCAD

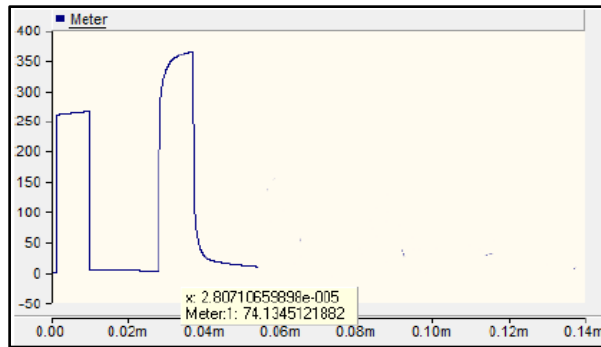


Figura 3.36. Respuesta de una falla por cable cortado a 2000 m

b. Falla a 3000 metros

- Longitud 1 = 2000 metros
- Longitud 2 = 1000 metros
- Longitud 3 = 1000 metros

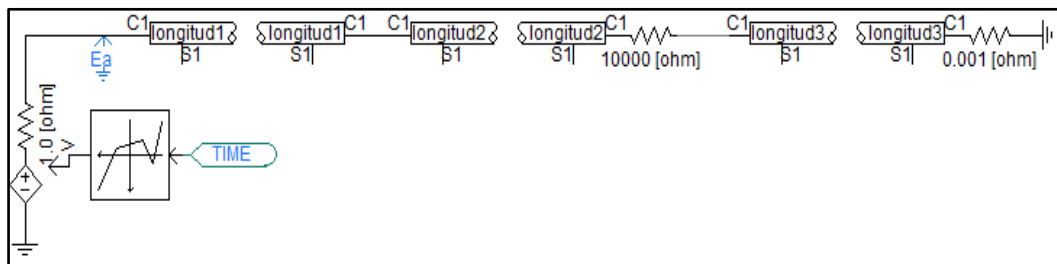


Figura 3.37. Arreglo de una falla por cable cortado a 3000 m en PSCAD

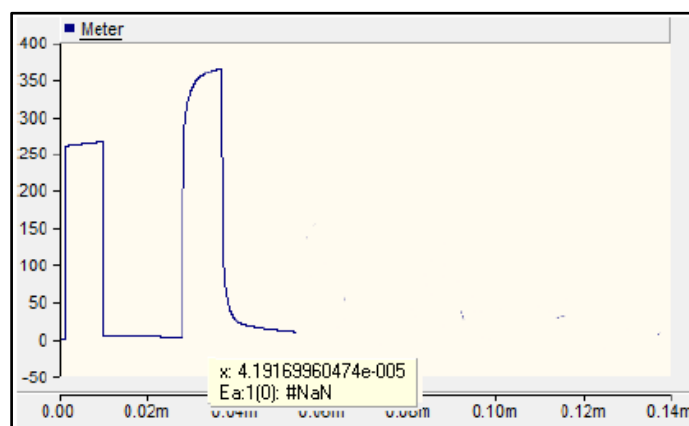


Figura 3.38. Respuesta de una falla por cable cortado a 3000 m

- c. Falla a 4000 metros.
- Longitud 1 = 2000 metros
  - Longitud 2 = 2000 metros
  - Longitud 3 = 1000 metros

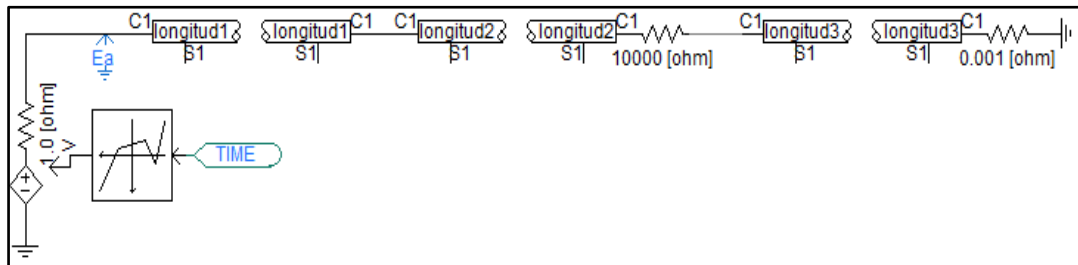


Figura 3.39. Arreglo de una falla por cable cortado a 4000 m en PSCAD

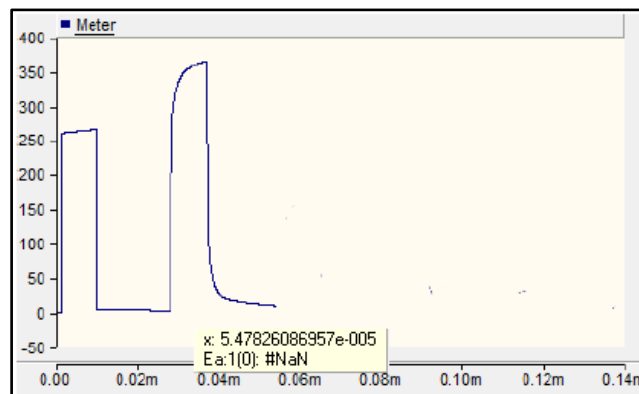


Figura 3.40. Respuesta de una falla de circuito abierto a 4000 m en PSCAD

### 3.2. Casos en un sistema trifásico

En un circuito trifásico el pulso de alta tensión aplicado en uno de los cables afecta indirectamente a los cables adyacentes en mayor o menor medida dependiendo del arreglo que se tenga. Esto se debe al acoplamiento entre las fases. Al aplicar el pulso en un cable cualquiera del sistema, la tensión inducida en los cables adyacentes es baja y distorsionada; es por ello que se tendrá que analizar cada uno de los cables aplicando el pulso y realizar su respectivo cálculo para poder localizar el cable fallado y la ubicación del punto de falla.

Como en los casos anteriores se tienen fallas de corto circuito y circuito abierto completas y parciales. Además, en el caso de un sistema trifásico también se presentan fallas bifásicas, trifásicas y bifásicas a tierra. Para ejemplificar el comportamiento de cada una de las fallas mencionadas en un sistema trifásico, se realizan simulaciones aplicando un pulso de 10kv

**Caso 1. Equipo de fondo sin falla en el cable de potencia.**

Para hacer una evaluación del estado del equipo de fondo fuera de servicio, se efectúan mediciones de resistencia de aislamiento y de resistencia óhmica. Los resultados se muestran en la tabla 6.1.

En un principio se midieron valores de cero MΩ, pero se repitieron las mediciones con un voltaje de prueba menor, para obtener lecturas del orden de 40 kΩ. Estos valores, aunque son bajos para un material aislante, no son indicativos de que el aislamiento haya sufrido falla a tierra.

Medición	Fase		
	1	2	3
Resistencia aislamiento Fase vs Tierra (kΩ)	40	40	40
Resistencia Óhmica Entre fases (Ω)	1 - 2	2 - 3	3 - 1
	5.2	5.3	5.2

Tabla 3.1 Resultados obtenidos en la medición de resistencia de aislamiento y óhmica

En cuanto a resistencia óhmica, los valores obtenidos no reflejan deterioro o falla por corto circuito en el conductor del cable de potencia.

Para verificar la existencia o no de falla a tierra, se llevó a cabo la prueba de la reflectometría. Los resultados se muestran en la figura 6.1

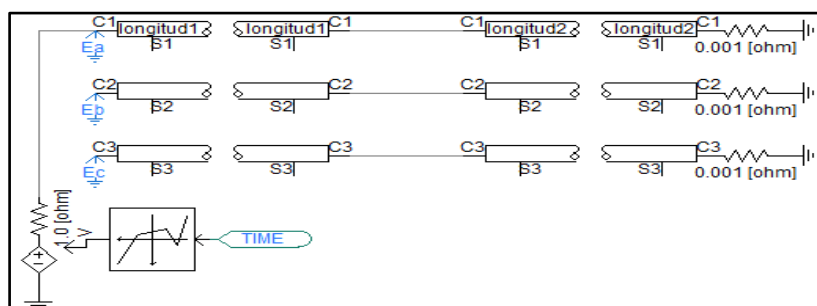


Figura 3.41. Arreglo de un sistema trifásico en PSCAD

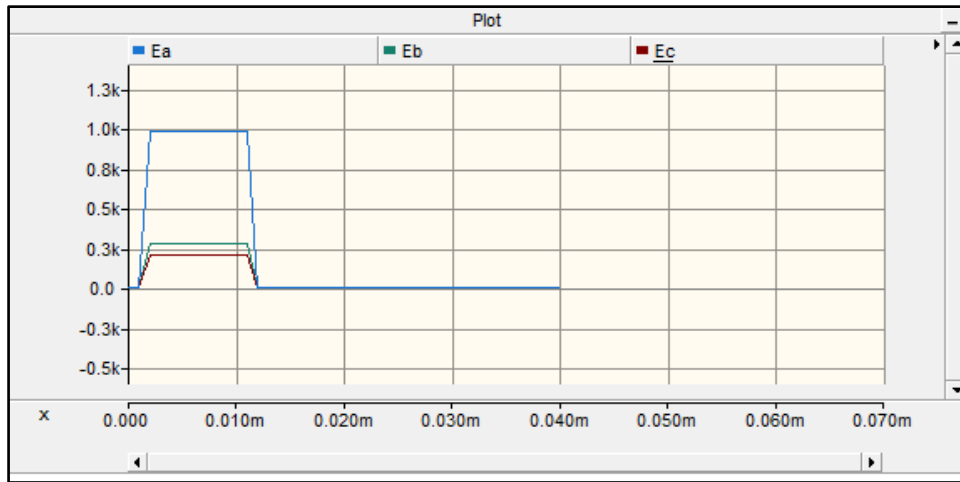


Figura 3.42. Respuesta de un sistema trifásico sin falla

### Caso 2. **Falla Monofásica**

La evaluación previa mediante la medición de resistencia de aislamiento y resistencia óhmica, mostró que el equipo de fondo presentaba una falla a tierra en el aislamiento. La resistencia de aislamiento, inicialmente se midió con un voltaje de prueba de 1kv y posteriormente con voltajes menores, resultando en ambos casos valores de cero ohms, lo cual es un indicio de falla a tierra (ver tabla 6.2)

Medición	Fase		
	1	2	3
Resistencia aislamiento Fase vs Tierra (k $\Omega$ )	0	0	0
Resistencia Óhmica Entre fases ( $\Omega$ )	1 - 2	2 - 3	3 - 1
	2.2	2.3	2.2

Tabla 3.2. Resultados obtenidos en la medición de resistencia de aislamiento y óhmica

Los valores resultantes de resistencia óhmica son iguales, por lo que no mostraban indicios de corto circuito o deterioro de los conductores de cobre que conforman el equipo de fondo.

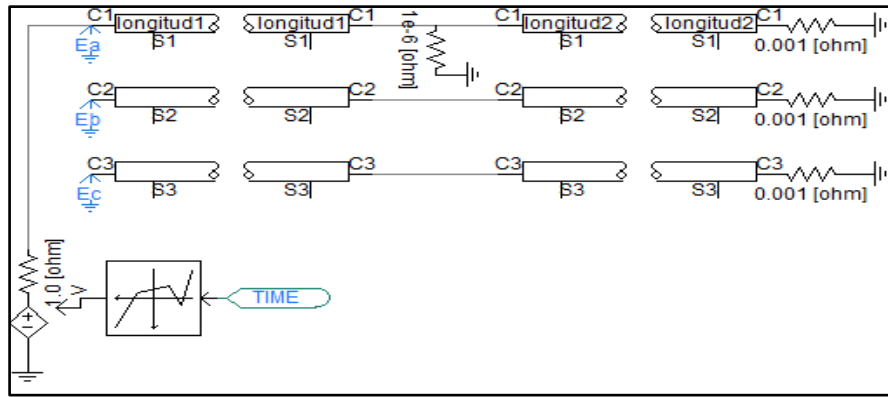


Figura 3.43 Arreglo de un sistema trifásico con falla en PSCAD

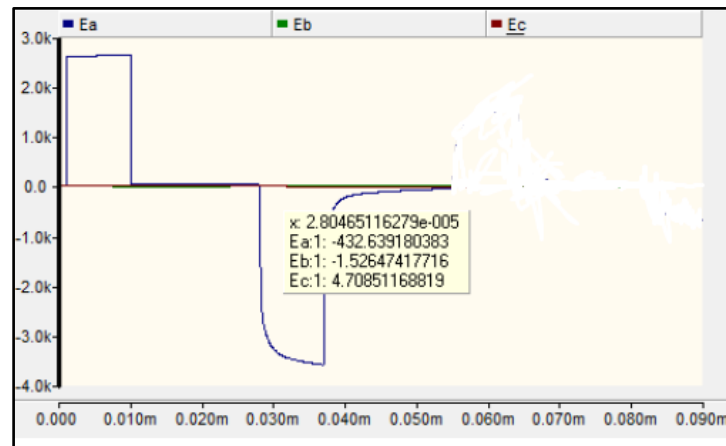


Figura 3.44. Respuesta de un sistema trifásico con falla.

### Caso 3. Falla bifásica

Falla bifásica entre “a y b” aplicando el pulso en la fase “a”

Con la medición de resistencia de aislamiento y resistencia óhmica, previa a la aplicación de la técnica de la reflectometría, se determinó que el equipo de fondo instalado en un pozo de producción de crudo, presentaba la falla en el aislamiento y corto circuito o deterioro del conductor de cobre. Los resultados de la medición de resistencia de aislamiento y óhmica se muestran en la tabla 6.3.

Medición	Fase		
	1	2	3
Resistencia aislamiento	1	2	3
Fase vs Tierra (kΩ)	0	0	0
Resistencia Óhmica	1 - 2	2 - 3	3 - 1
Entre fases (Ω)	1.2	3.3	2.8

Tabla 3.3. Resultados obtenidos en la medición de resistencia de aislamiento y óhmica

Los registros de la respuesta del equipo de fondo a la aplicación de la técnica de la reflectometría, mostraron la existencia de la falla del aislamiento de dos de las fases (ver figura 6.4)

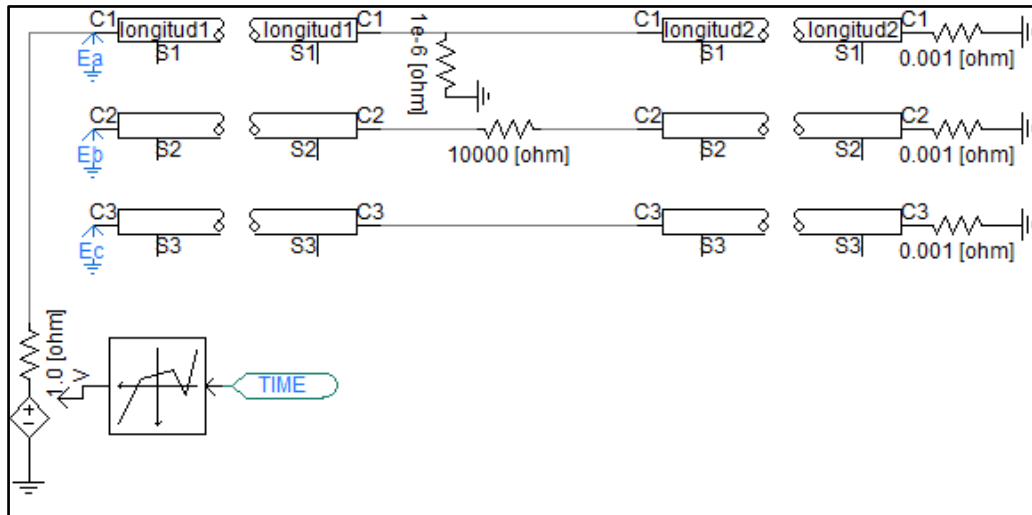


Figura 3.45. Arreglo en PSCAD de una falla bifásica entre “a y b” aplicando un pulso en “a”

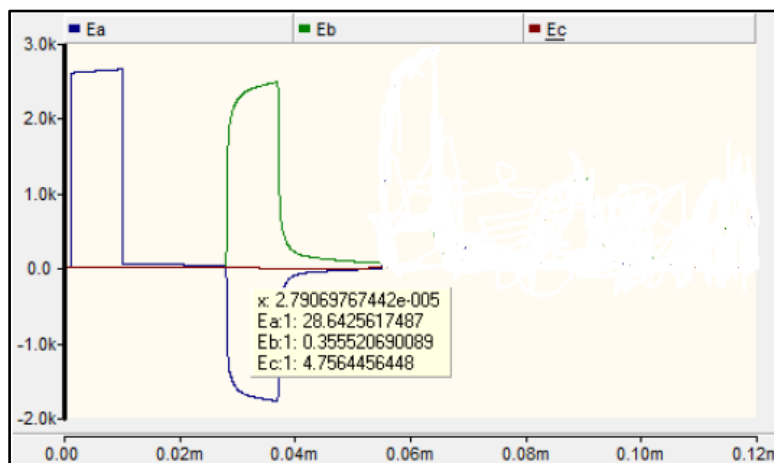


Figura 3.46 respuesta de un circuito con falla bifásica en PSCAD



## Resultados Obtenidos

Tipo de falla	Tiempo a la que ocurre la reflexión			Característica de la reflexión
	2000 m	3000 m	4000 m	
Falla por aislamiento deteriorado (pequeñas corrientes de fuga a tierra)	27.85 $\mu$ s	41.36 $\mu$ s	54.92 $\mu$ s	Reflexión de sentido negativo y pequeña.
Falla de cable parcialmente abierto	27.92 $\mu$ s	41.37 $\mu$ s	54.92 $\mu$ s	Reflexión de sentido positivo y de menor magnitud
Falla sólida a tierra	27.93 $\mu$ s	41.64 $\mu$ s	54.50 $\mu$ s	Reflexión de sentido negativo y reflexión de mayor magnitud que el pulso emitido.
Falla por circuito abierto	28.07 $\mu$ s	41.91 $\mu$ s	54.78 $\mu$ s	Reflexión de sentido positivo y de mayor magnitud que el pulso emitido

Tabla 3.4. Cuadro de los resultados obtenidos con el software PSCAD.

## CAPITULO IV

## IV. RESULTADOS

### 4.1. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.

Para localizar la falla por medio del método de la reflectometría, el primer paso es identificar el sentido de la reflexión, ya que dependiendo de éste, se puede determinar el tipo de falla que se tiene.

El segundo paso es identificar el tiempo en que se presenta la reflexión, teniendo en cuenta que el responsable de este análisis debe tener conocimiento previo de la longitud y empalmes que conforman el sistema de cable de potencia.

#### Caso 1. Falla por aislamiento deteriorado (pequeñas corrientes de fuga a tierra)

- **Falla a 2000 metros.**

Como se observa en la figura 3.18. La reflexión se presenta con sentido negativo, por lo tanto se considera que existe una falla a tierra.

El tiempo de la reflexión tomada de la simulación es de 27.85  $\mu\text{s}$ . como se puede observar en la figura 3.18, el pulso no parte totalmente del cero. Esto se debe a que la fuente generadora tiene un retardo de 1  $\mu\text{s}$ . Por lo tanto, la lectura arrojada por la gráfica se le resta dicho retardo. Este criterio se aplica a todos los ejemplos siguientes.

Por lo tanto el tiempo de la reflexión es:

$$\text{Tiempo en que se refleja el pulso: } 27.85 \mu\text{s} - 1 \mu\text{s} = 26.85 \mu\text{s}$$

Para determinar a qué distancia se presenta la reflexión, se emplea la siguiente metodología:

Se determina la velocidad de propagación ( $v$ ) en el cable de potencia, considerando la permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) específica del cable de potencia. En este caso se tiene una  $\epsilon_r$  de 4.1, por lo tanto:

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{4.1}} = 148,159,439.5 \text{ m/s}$$

Después de calcular la velocidad de propagación del cable se procede a calcular la longitud de la reflexión (punto de falla)

$$l = v \frac{\Gamma}{2} = \frac{(148,159,439.5)(26.85 \mu s)}{2} = 1989.04 \text{ m}$$

Se calcula el error relativo:

$$\% \text{Error} = \frac{(2000 \text{ m} - |1984.04 \text{ m}|)}{2000 \text{ m}} \times 100 = \pm 0.54 \%$$

- **Falla a 3000 metros**

Tiempo en que se refleja el pulso:  $41.36 \mu s - 1 \mu s = 40.36 \mu s$

Se determina la velocidad de propagación (v). En este caso se tiene una  $\epsilon_r$  de 4.1, por lo tanto:

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{4.1}} = 148,159,439.5 \text{ m/s}$$

Después de calcular la velocidad de propagación del cable se procede a calcular la longitud de la reflexión (punto de falla)

$$l = v \frac{\Gamma}{2} = \frac{(148,159,439.5)(40.36 \mu s)}{2} = 2989.85 \text{ m}$$

Se calcula el error relativo:

$$\% \text{Error} = \frac{(3000 \text{ m} - |2989.85 \text{ m}|)}{3000 \text{ m}} \times 100 = \pm 0.34 \%$$

- **Falla a 4000 metros**

Tiempo en que se refleja el pulso:  $54.92 \mu\text{s} - 1 \mu\text{s} = 53.92 \mu\text{s}$

Se determina la velocidad de propagación (v)

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{4.1}} = 148,159,439.5 \text{ m/s}$$

Después de calcular la velocidad de propagación del cable se procede a calcular la longitud de la reflexión (punto de falla)

$$l = v \frac{\Gamma}{2} = \frac{(148,159,439.5)(53.92 \mu\text{s})}{2} = 3994.37 \text{ m}$$

Se calcula el error relativo:

$$\% \text{Error} = \frac{(4000 \text{ m} - |3994.37 \text{ m}|)}{4000 \text{ m}} \times 100 = \pm 0.14 \%$$

## Caso 2. **Falla de cable Parcialmente abierto.**

- **Falla a 2000 metros**

Como se observa en la figura 3.24. La reflexión se presenta con sentido positivo y de menor magnitud, por lo tanto se considera que existe una falla de cable parcialmente abierto.

El tiempo de la reflexión tomada de la simulación es de  $27.92 \mu\text{s}$ . como se puede observar en la figura 3.24, el pulso no parte totalmente del cero. Esto se debe a que la fuente generadora tiene un retardo de  $1 \mu\text{s}$ . Por lo tanto, la lectura arrojada por la gráfica se le resta dicho retardo. Este criterio se aplica a todos los ejemplos siguientes.

Por lo tanto el tiempo de la reflexión es:

Tiempo en que se refleja el pulso:  $27.92 \mu\text{s} - 1 \mu\text{s} = 26.92 \mu\text{s}$

Para determinar a qué distancia se presenta la reflexión, se emplea la siguiente metodología:

Se determina la velocidad de propagación ( $v$ ) en el cable de potencia, considerando la permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) específica del cable de potencia. En este caso se tiene una  $\epsilon_r$  de 4.1, por lo tanto:

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{4.1}} = 148,159,439.5 \text{ m/s}$$

Después de calcular la velocidad de propagación del cable se procede a calcular la longitud de la reflexión (punto de falla)

$$l = v \frac{\Gamma}{2} = \frac{(148,159,439.5)(26.92 \mu\text{s})}{2} = 1994.22 \text{ m}$$

Se calcula el error relativo:

$$\% \text{Error} = \frac{(2000 \text{ m} - |1994.22 \text{ m}|)}{2000 \text{ m}} \times 100 = \pm 0.28 \%$$

- **Falla a 3000 metros**

Tiempo en que se refleja el pulso:  $41.37 \mu\text{s} - 1 \mu\text{s} = 40.37 \mu\text{s}$

Se determina la velocidad de propagación ( $v$ )

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{4.1}} = 148,159,439.5 \text{ m/s}$$

Después de calcular la velocidad de propagación del cable se procede a calcular la longitud de la reflexión (punto de falla)

$$l = v \frac{\Gamma}{2} = \frac{(148,159,439.5)(40.37 \mu\text{s})}{2} = 2990.59 \text{ m}$$

Se calcula el error relativo:

$$\% \text{Error} = \frac{(3000 \text{ m} - |2990.59 \text{ m}|)}{3000 \text{ m}} \times 100 = \pm 0.31 \%$$

- **Falla a 4000 metros**

Tiempo en que se refleja el pulso:  $54.92 \mu\text{s} - 1 \mu\text{s} = 53.92 \mu\text{s}$

Se determina la velocidad de propagación (v)

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{4.1}} = 148,159,439.5 \text{ m/s}$$

Después de calcular la velocidad de propagación del cable se procede a calcular la longitud de la reflexión (punto de falla)

$$l = v \frac{\Gamma}{2} = \frac{(148,159,439.5)(53.92 \mu\text{s})}{2} = 3994.37 \text{ m}$$

Se calcula el error relativo:

$$\% \text{Error} = \frac{(4000 \text{ m} - |3994.37 \text{ m}|)}{4000 \text{ m}} \times 100 = \pm 0.14 \%$$

### Caso 3. Falla sólida a tierra

- **Falla a 2000 metros**

Como se observa en la figura 3.30. La reflexión se presenta con sentido negativo y es mayor que el pulso emitido, por lo tanto se considera que existe una falla sólida a tierra.

El tiempo de la reflexión tomada de la simulación es de  $27.93 \mu\text{s}$ . como se puede observar en la figura 3.30, el pulso no parte totalmente del cero. Esto se debe a que la fuente generadora tiene un retardo de  $1 \mu\text{s}$ . Por lo tanto, la lectura arrojada por la gráfica se le resta dicho retardo. Este criterio se aplica a todos los ejemplos siguientes.

Por lo tanto el tiempo de la reflexión es:

Tiempo en que se refleja el pulso:  $27.93 \mu\text{s} - 1 \mu\text{s} = 26.93 \mu\text{s}$

Para determinar a qué distancia se presenta la reflexión, se emplea la siguiente metodología:

Se determina la velocidad de propagación ( $v$ ) en el cable de potencia, considerando la permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) específica del cable de potencia. En este caso se tiene una  $\epsilon_r$  de 4.1, por lo tanto:

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{4.1}} = 148,159,439.5 \text{ m/s}$$

Después de calcular la velocidad de propagación del cable se procede a calcular la longitud de la reflexión (punto de falla)

$$l = v \frac{\Gamma}{2} = \frac{(148,159,439.5)(26.93 \mu\text{s})}{2} = 1994.96 \text{ m}$$

Se calcula el error relativo

$$\% \text{Error} = \frac{(2000 \text{ m} - |1994.22 \text{ m}|)}{2000 \text{ m}} \times 100 = \pm 0.25 \%$$

- **Falla a 3000 metros**

Tiempo en que se refleja el pulso:  $41.64 \mu\text{s} - 1 \mu\text{s} = 40.64 \mu\text{s}$

Se determina la velocidad de propagación ( $v$ )

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{4.1}} = 148,159,439.5 \text{ m/s}$$

Después de calcular la velocidad de propagación del cable se procede a calcular la longitud de la reflexión (punto de falla)

$$l = v \frac{\Gamma}{2} = \frac{(148,159,439.5)(40.64 \mu\text{s})}{2} = 3010.59 \text{ m}$$



Se calcula el error relativo:

$$\% \text{Error} = \frac{(3000 \text{ m} - |3010.59 \text{ m}|)}{3000 \text{ m}} \times 100 = \pm 0.35 \%$$

- **Falla a 4000 metros**

Tiempo en que se refleja el pulso:  $54.50 \mu\text{s} - 1 \mu\text{s} = 53.50 \mu\text{s}$

Se determina la velocidad de propagación (v)

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{4.1}} = 148,159,439.5 \text{ m/s}$$

Después de calcular la velocidad de propagación del cable se procede a calcular la longitud de la reflexión (punto de falla)

$$l = v \frac{\Gamma}{2} = \frac{(148,159,439.5)(53.50 \mu\text{s})}{2} = 3973.26 \text{ m}$$

Se calcula el error relativo:

$$\% \text{Error} = \frac{(4000 \text{ m} - |3973.26 \text{ m}|)}{4000 \text{ m}} \times 100 = \pm 0.59 \%$$

#### Caso 4. **Falla de circuito abierto (cable cortado)**

- **Falla a 2000 metros**

Como se observa en la figura 3.36. La reflexión se presenta con sentido positivo y es mayor que el pulso emitido, por lo tanto se considera que existe una falla por cable cortado.

El tiempo de la reflexión tomada de la simulación es de 28.07  $\mu\text{s}$ . como se puede observar en la figura 3.36, el pulso no parte totalmente del cero. Esto se debe a que la fuente generadora tiene un retardo de 1  $\mu\text{s}$ . Por lo tanto el tiempo de la reflexión es:

Tiempo en que se refleja el pulso:  $28.07 \mu\text{s} - 1 \mu\text{s} = 27.07 \mu\text{s}$

Para determinar a qué distancia se presenta la reflexión, se emplea la siguiente metodología:

Se determina la velocidad de propagación ( $v$ ) en el cable de potencia, considerando la permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) específica del cable de potencia. En este caso se tiene una  $\epsilon_r$  de 4.1, por lo tanto:

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{4.1}} = 148,159,439.5 \text{ m/s}$$

Después de calcular la velocidad de propagación del cable se procede a calcular la longitud de la reflexión (punto de falla)

$$l = v \frac{\Gamma}{2} = \frac{(148,159,439.5)(27.07 \mu\text{s})}{2} = 2005.33 \text{ m}$$

Se calcula el error relativo:

$$\% \text{Error} = \frac{(2000 \text{ m} - |2005.33 \text{ m}|)}{2000 \text{ m}} \times 100 = \pm 0.26 \%$$

- **Falla a 3000 metros**

Tiempo en que se refleja el pulso:  $41.91 \mu\text{s} - 1 \mu\text{s} = 40.91 \mu\text{s}$

Se determina la velocidad de propagación ( $v$ )

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{4.1}} = 148,159,439.5 \text{ m/s}$$

Después de calcular la velocidad de propagación del cable se procede a calcular la longitud de la reflexión (punto de falla)

$$l = v \frac{\Gamma}{2} = \frac{(148,159,439.5)(40.91 \mu s)}{2} = 3010.60 \text{ m}$$

Se calcula el error relativo:

$$\% \text{Error} = \frac{(3000 \text{ m} - |3010.60 \text{ m}|)}{3000 \text{ m}} \times 100 = \pm 0.35 \%$$

- **Falla a 4000 metros**

Tiempo en que se refleja el pulso:  $54.78 \mu s - 1 \mu s = 53.78 \mu s$

Se determina la velocidad de propagación (v)

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{4.1}} = 148,159,439.5 \text{ m/s}$$

Después de calcular la velocidad de propagación del cable se procede a calcular la longitud de la reflexión (punto de falla)

$$l = v \frac{\Gamma}{2} = \frac{(148,159,439.5)(53.78 \mu s)}{2} = 3984.67 \text{ m}$$

Se calcula el error relativo:

$$\% \text{Error} = \frac{(4000 \text{ m} - |3984.67 \text{ m}|)}{4000 \text{ m}} \times 100 = \pm 0.38 \%$$

#### 4.1.2. Casos en sistemas trifásicos:

- **Caso 2: Falla monofásica.**

Mediante la aplicación de la técnica de la reflectometría, se verificó la existencia de falla a tierra de aislamiento de una de las fases del equipo eléctrico de fondo. Las otras dos fases del cable de potencia no mostraron falla y su respuesta a la aplicación de pulso son similares.

- Para localizar la falla por medio del método de la reflectometría, el primer paso es identificar el sentido de la reflexión, ya que dependiendo de éste, se puede determinar el tipo de falla que se tiene.
- El segundo paso es identificar el tiempo en que se presenta la reflexión, teniendo en cuenta que el responsable de este análisis debe tener conocimiento previo de la longitud y empalmes que conforman el sistema de cable de potencia.

Como se observa en la figura 3.44. La reflexión se presenta con sentido negativo, por lo tanto se considera que existe una falla a tierra.

El tiempo de la reflexión tomada de la simulación es de 28.00  $\mu\text{s}$ . como se puede observar en la figura 3.44, el pulso no parte totalmente del cero. Esto se debe a que la fuente generadora tiene un retardo de 1  $\mu\text{s}$ . Por lo tanto, la lectura arrojada por la gráfica se le resta dicho retardo. Este criterio se aplica a todos los ejemplos siguientes.

Por lo tanto el tiempo de la reflexión es:

Tiempo en que se refleja el pulso:  $28 \mu\text{s} - 1 \mu\text{s} = 27 \mu\text{s}$

Para determinar a qué distancia se presenta la reflexión, se emplea la siguiente metodología:

Se determina la velocidad de propagación ( $v$ ) en el cable de potencia, considerando la permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) específica del cable de potencia. En este caso se tiene una  $\epsilon_r$  de 4.1, por lo tanto:

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{4.1}} = 148,159,439.5 \text{ m/s}$$

Después de calcular la velocidad de propagación del cable se procede a calcular la longitud de la reflexión (punto de falla)

$$l = v \frac{\Gamma}{2} = \frac{(148,159,439.5)(27 \mu\text{s})}{2} = 2000.56 \text{ m}$$

Por lo tanto el método aproxima la falla a 1994.75 m , esto es muy cercano a la localización real de 2 km. El error relativo se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{Error} = \frac{(2000 \text{ m} - 2000.56 \text{ m})}{2000 \text{ m}} \times 100 = 0.028 \%$$

- **Caso 3. Falla bifásica:**

En este caso el pulso se aplica nuevamente en la fase “a” pero se tiene una falla bifásica entre “a y b”. Se puede observar en la figura 3.46, que en la fase “a” nuevamente la reflexión es negativa debido a que el pulso aplicado ve la baja impedancia de la falla y en la fase “b” es positivo, lo cual indica una falla de alta impedancia.

El tiempo de la reflexión tomada de la simulación es de 27.90  $\mu\text{s}$ . como se puede observar en la figura 3.46, el pulso no parte totalmente del cero. Esto se debe a que la fuente generadora tiene un retardo de 1  $\mu\text{s}$ . Por lo tanto, la lectura arrojada por la gráfica se le resta dicho retardo. Este criterio se aplica a todos los ejemplos siguientes.

Por lo tanto el tiempo de la reflexión es:

$$\text{Tiempo en que se refleja el pulso: } 27.90 \mu\text{s} - 1 \mu\text{s} = 26.90 \mu\text{s}$$

Para determinar a qué distancia se presenta la reflexión, se emplea la siguiente metodología:

Se determina la velocidad de propagación ( $v$ ) en el cable de potencia, considerando la permitividad relativa ( $\epsilon_r$ ) específica del cable de potencia. En este caso se tiene una  $\epsilon_r$  de 4.1, por lo tanto:

$$v = \frac{v_0}{\sqrt{\epsilon_r}} = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{4.1}} = 148,159,439.5 \text{ m/s}$$

Después de calcular la velocidad de propagación del cable se procede a calcular la longitud de la reflexión (punto de falla)

$$l = v \frac{\Gamma}{2} = \frac{(148,159,439.5)(26.90 \mu\text{s})}{2} = 1992.74 \text{ m}$$

Por lo tanto el método aproxima la falla a 1992.74 m , esto es muy cercano a la localización real de 2 km. El error relativo se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{Error} = \frac{(2000 \text{ m} - 1992.74 \text{ m})}{2000 \text{ m}} \times 100 = 0.36 \%$$

## CAPITULO V

## V. Discusión de los resultados:

### Caso 1. Falla por aislamiento deteriorado (pequeñas corrientes de fuga a tierra)

a. Falla a 2000 metros:

El método aproxima la falla a 1989.04 m, esto es muy cercano a la localización del dato de la falla simulada que es de 2 km. Por lo tanto el error relativo de 0.54% nos arroja un margen de error de  $\pm 10.8$  m.

b. Falla a 3000 metros:

El método aproxima la falla a 2989.85 m, esto es muy cercano a la localización del dato de la falla simulada que es de 3 km. Por lo tanto el error relativo de 0.34% nos arroja un margen de error de  $\pm 10.2$  m.

c. Falla a 4000 metros:

El método aproxima la falla a 3994.85 m, esto es muy cercano a la localización del dato de la falla simulada que es de 4 km. Por lo tanto el error relativo de 0.14% nos arroja un margen de error de  $\pm 5.6$  m.

2000 metros	3000 metros	4000 metros
0.54%	0.34%	0.14%
Promedio del error relativo:	$P\% = \frac{0.54\% + 0.34\% + 0.14\%}{3} = 0.34\%$	

### Caso 2. Falla de cable parcialmente abierto.

a. Falla a 2000 metros:

El método aproxima la falla a 1994.22 m, esto es muy cercano a la localización del dato de la falla simulada que es de 2 km. Por lo tanto el error relativo de 0.28% nos arroja un margen de error de  $\pm 5.6$  m.

b. Falla a 3000 metros:

El método aproxima la falla a 2990.59 m, esto es muy cercano a la localización del dato de la falla simulada que es de 3 km. Por lo tanto el error relativo de 0.31% nos arroja un margen de error de  $\pm 9.3$  m.



c . Falla a 4000 metros:

El método aproxima la falla a 3994.22 m, esto es muy cercano a la localización del dato de la falla simulada que es de 4 km. Por lo tanto el error relativo de 0.14% nos arroja un margen de error de  $\pm 5.6$  m.

2000 metros	3000 metros	4000 metros
0.54%	0.31%	0.14%
Promedio del error relativo:	$P\% = \frac{0.28\% + 0.31\% + 0.14\%}{3} = 0.24 \%$	

### Caso 3. Falla sólida a tierra.

a. Falla a 2000 metros:

El método aproxima la falla a 1994.22 m, esto es muy cercano a la localización del dato de la falla simulada que es de 2 km. Por lo tanto el error relativo de 0.25% nos arroja un margen de error de  $\pm 5$  m.

b. Falla a 3000 metros:

El método aproxima la falla a 3010.59 m, esto es muy cercano a la localización del dato de la falla simulada que es de 3 km. Por lo tanto el error relativo de 0.35% nos arroja un margen de error de  $\pm 10.5$  m.

c . Falla a 4000 metros:

El método aproxima la falla a 3973.26 m, esto es muy cercano a la localización del dato de la falla simulada que es de 4 km. Por lo tanto el error relativo de 0.59% nos arroja un margen de error de  $\pm 16.6$  m.

2000 metros	3000 metros	4000 metros
0.25%	0.35%	0.59%
Promedio del error relativo:	$P\% = \frac{0.25\% + 0.35\% + 0.59\%}{3} = 0.39 \%$	

#### Caso 4. Falla de circuito abierto (cable cortado)

a. Falla a 2000 metros:

El método aproxima la falla a 2005.33 m, esto es muy cercano a la localización del dato de la falla simulada que es de 2 km. Por lo tanto el error relativo de 0.26% nos arroja un margen de error de  $\pm 5.2$  m.

b. Falla a 3000 metros:

El método aproxima la falla a 3010.60 m, esto es muy cercano a la localización del dato de la falla simulada que es de 3 km. Por lo tanto el error relativo de 0.35% nos arroja un margen de error de  $\pm 10.5$  m.

c . Falla a 4000 metros:

El método aproxima la falla a 3984.67 m, esto es muy cercano a la localización del dato de la falla simulada que es de 4 km. Por lo tanto el error relativo de 0.38% nos arroja un margen de error de  $\pm 15.2$  m.

2000 metros	3000 metros	4000 metros
0.26%	0.35%	0.38%
Promedio del error relativo:	$P\% = \frac{0.26\% + 0.35\% + 0.38\%}{3} = 0.343\%$	

## CAPITULO VI

## VI. CONCLUSIONES:

- ✚ La reflectometría en el dominio del tiempo permite verificar el estado de un cable a lo largo de todo su recorrido para localizar averías; como se verificó en el capítulo de recolección de datos, que por medio de la interpretación de gráficas se detectan fallas en el cable de potencia.
- ✚ La técnica de TDR es adecuada para localizar averías de baja resistencia; tal es el caso de aislamientos deteriorados, corrosión , empalmes separados, etc. También se puede utilizar para localizar fallas de alta resistencia en las derivaciones del cable con valores de impedancia muchos menores a los de la impedancia característica. Éste método arroja un resultado del estado del cable, que se representa mediante gráficas las cuales tendrán que ser interpretadas.
- ✚ El análisis del método de la reflectometría por medio de paquetes computacionales ( en este caso EMTDC/PSCAD) es muy útil, ya que mediante su uso, se podrá confirmar y descubrir comportamientos para cada una de las fallas que puedan presentar los cables de potencia.
- ✚ El método de la reflectometría es un método eficaz, ya que los resultados de localización de la falla que se obtienen, como se observó en el capítulo de discusión de resultados, son bastantes próximos a los datos de simulación real.

## **VII. RECOMENDACIONES**

- Se recomienda en los próximos trabajos incluir la técnica de un cuarto de longitud de onda, como complementaria en la detección de fallas, ya que su uso no está difundido, y su estudio es relativamente nuevo.
- También es recomendable realizar pruebas exhaustivas del trabajo desarrollado y su implementación en un ambiente de trabajo real.
- Se recomienda incursionar en otros campos de aplicación de la RTD, especialmente en aquellos de capital importancia para el país, como en la industria del petróleo. Todo esto actualmente está siendo desarrollado por distintos sectores del país, sin embargo es un campo sumamente amplio y con grandes posibilidades.

## VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### LIBROS

[1] Joan Josep Escobar. – Xavier Marti. (2002), “El Petróleo, el recorrido de la energía, editorial Comunidad de Madrid.

[2] Gunnar Englund. “Descripción, Diseño, Análisis de fallas y Trouble Shooting”. (EN: *Electronic Design*, October 1 de 2004) pp. 15 – 16.

[3] Wong, N. “*Electrical submersible pumps for oil well applications*”. Vol. 17, July 1989

[4] Josep R. Kinsley. “*Why testing Cat. 1 cable in the home makes sense*” (octubre 2000)

[5] Rojey, A. – Jaffret, C. (1994), *Natural Gas: Producción, Procesamiento, Transporte*, editorial TECHNIP.

[6] ALASTAIR CLUNIE. “*Propagation Velocity factor (PVF)*”, Technical Bulletin by Bicotest. September 1997

### TESIS

- CAHUE DÍAZ, Guillermo (2009). “*Reflectometría en el dominio del tiempo y su aplicación a la detección de fallas y a la medición de parámetros en redes de comunicación*”. Centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico-Ecuador.
- CAMARGO PIÑA, Daniel (2011). “*Localización de fallas en cables subterráneos, mediante el método de la reflectometría en el dominio del tiempo (TDR)*”. Universidad Industrial de Santander- Mexico

## DOCUMENTOS

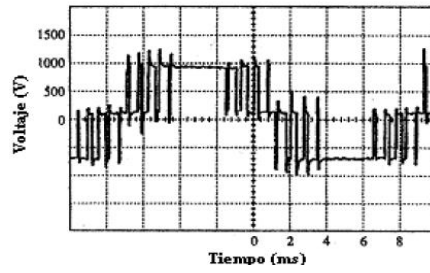
- (DOC01) Informe N°122 quincenal de la SNMPE (Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía) – Sistemas de Transporte de Gas Natural. Pag.01
- Gerencia de equipos eléctricos, Instituto de investigaciones Eléctricas IIE/03/32/RP-02/2002 (Schlumberger Del Perú)

## INTERNET

- Portal del Activo Integral Canterrel Pemex Exploración y Producción  
<http://www.pemex.com/Paginas/default.aspx#.UzDinv15PeI>  
Último acceso: 24 de Marzo del 2014.
- Pagina web de Petrogroup Training and Consulting Company  
<http://petrogroupcompany.com/>  
Último acceso: 25 de Marzo del 2014
- Página web del organismo supervisor de la inversión de energía y minas  
<http://www.osinergmin.gob.pe/newweb/pages/Publico/1.htm?2871>  
Último acceso: 25 de Marzo del 2014

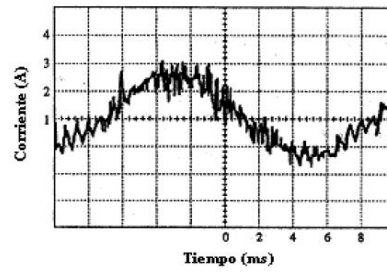
# **ANEXOS**





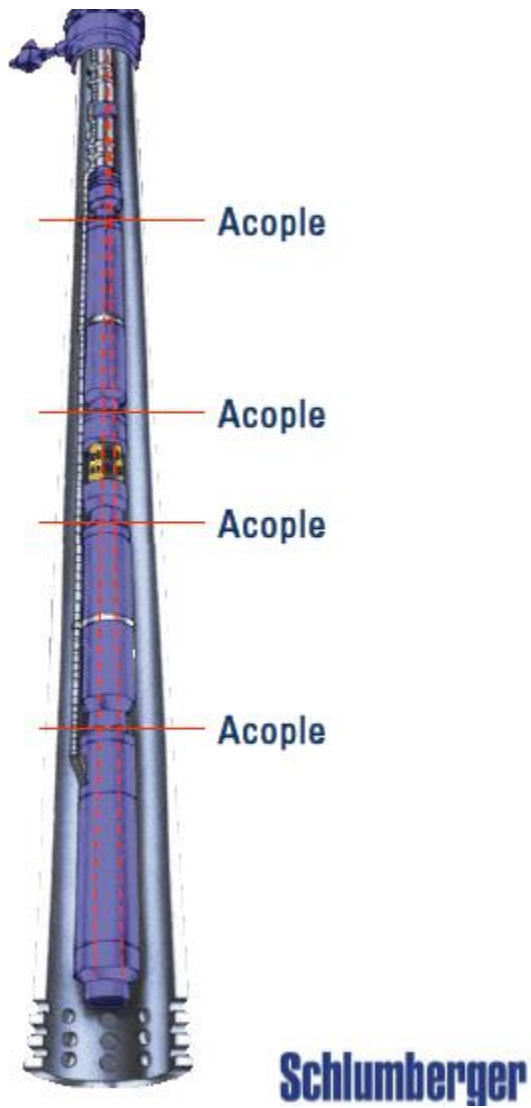
Anexo 1. Onda de voltaje típica generada por un variador de velocidad

Fuente: Portal del Activo Integral Canterrel Pemex Exploración y Producción.



Anexo 2. Onda de corriente típica generada por un variador de velocidad.

Fuente: Portal del Activo Integral Canterrel Pemex Exploración y Producción.



Anexo 3: Estructura del cable de potencia

Fuente: Schlumberger Del Perú