UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ

Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura

PROYECTO INVESTIGATIVO

Previo a la obtención del Título de Ingeniería en Electricidad

ELABORACIÓN DE UNA GUÍA PRÁCTICA PARA LA SIMULACIÓN Y ANÁLISIS DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Autores:

Víctor Alexander Basantes Hidalgo

Israel Geremías Holguín García

Tutor de Titulación:

Ing. Iván Patricio Pazmiño Ordóñez, MSc, MBA.

Manta - Manabí - Ecuador

2026

Certificación del Tutor

CERTIFICACIÓN

En calidad de docente tutor(a) de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, CERTIFICO:

Haber dirigido, revisado y aprobado preliminarmente el Trabajo de Integración Curricular bajo la autoría de los estudiantes Holguín García Israel Geremías y Basantes Hidalgo Víctor Alexander, legalmente matriculados en la carrera de Electricidad, período académico 2025-2026, cumpliendo el total de 384 horas, cuyo tema del proyecto es “Elaboración de una Guía Práctica para la Simulación y Análisis de Sistemas Eléctricos De Potencia”.

La presente investigación ha sido desarrollada en apego al cumplimiento de los requisitos académicos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico y en concordancia con los lineamientos internos de la opción de titulación en mención, reuniendo y cumpliendo con los méritos académicos, científicos y formales, y la originalidad del mismo, requisitos suficientes para ser sometida a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, 11 de febrero del 2026.

Lo certifico,

Ing. Iván Patricio Pazmiño Ordóñez, MSc, MBA.
Docente Tutor
Área: Ingeniería

Declaración de auditoría

Nosotros, Víctor Alexander Basantes Hidalgo con C.I.: 131146145-1 e Israel Geremías Holguín García con C.I.: 131284975-3, declaramos que el presente trabajo de titulación "Elaboración de una Guía Práctica para la Simulación y Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia" es de nuestra exclusiva autoría. El contenido desarrollado es original y no ha sido previamente presentado en la obtención de un título académico o cualquier otro tipo de trabajo similar. Eximimos a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, y sus representantes legales, de posibles reclamos o acciones legales. Certificamos que tanto las tareas realizadas, como los resultados y conclusiones de este trabajo de titulación, son exclusivamente de los autores.

Además, hacemos entrega de los derechos de este trabajo de titulación a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, para su uso en trabajos, investigaciones y proyectos científicos o técnicos, dado que ha sido desarrollado con fines académicos para la facultad de Ingeniería Eléctrica.

Manta, 10 de febrero del 2026

Víctor Alexander Basantes Hidalgo
C.I.: 131146145-1
Autor

Israel Geremías Holguín García
C.I.: 131284975-3
Autor

Dedicatoria

Esta dedicatoria va dirigida a:

A todas las personas que han estado conmigo y he conocido a lo largo de mi vida. Dedico este trabajo a mi familia, a mis padres Víctor Basantes y Enedina Hidalgo, a mi hermana Nina Basantes que estuvieron ahí a lo largo de mi vida, que me apoyaron económicamente, emocional y mentalmente. Ya que también es esfuerzo de ellos al apoyarme en todo y que a pesar de mis dificultades personales y familiares han estado en todo momento.

A esos pocos amigos y compañeros que conocí desde la nivelación que han llegado hasta el final conmigo, me han apoyado y ayudado en todas las materias que hemos estado, como a Daniel García, Orley Mera e Isabel Montesdeoca. Esos amigos que te ayudan a entender lo que es difícil para ti captar, donde hubo momentos buenos, malos, divertidos y no tan agradables.

A mis mascotas que al igual han estado ahí conmigo de manera emocional, y una razón de seguir adelante a pesar de las adversidades.

Basantes Hidalgo Víctor Alexander

Dedicatoria

Esta dedicatoria va dirigida a las personas que me han apoyado a lo largo de mi carrera y han sido importantes en el proceso:

Primeramente, quisiera agradecer a Dios por ser mi fortaleza en cada paso de este largo camino académico. Sin su misericordia y dirección, nada de esto habría sido posible.

A mis padres Víctor Holguín, Gisella García y hermanos David y Abigail Holguín, quienes con su amor incondicional, sabios consejos y constante apoyo económico hicieron posible que hoy culmine esta etapa tan importante de mi vida. Ellos han sido mi ejemplo de esfuerzo y perseverancia, y me han enseñado que los sueños se alcanzan con disciplina y fe.

A mi novia Nohelia García, por su paciencia, comprensión y motivación en los momentos en que el cansancio parecía vencerme. Además de sus padres y hermanos quienes me han acompañado en este proceso, brindándome su ayuda, palabras de aliento y compañía en los momentos difíciles.

La carrera, a lo largo de los años no ha sido fácil, estuvo llena de retos y sacrificios, pero hoy puedo decir que el objetivo se ha cumplido gracias a Dios, a mis padres y al valioso apoyo de quienes caminaron junto a mí.

Holguín García Israel Geremías

Agradecimiento

En primer lugar, agradecemos a Dios por habernos dado la vida, la salud y la fortaleza necesarias para culminar con éxito este proyecto. Por guiarnos en cada decisión, darnos sabiduría en los momentos de dificultad y motivarnos a superar cada obstáculo hasta lograr esta gran meta.

Nuestro más sincero agradecimiento al Ing. Iván Patricio Pazmiño Ordoñez, MSc, MBA, por su guía y dedicación como tutor de este trabajo. Su compromiso, paciencia y conocimientos han sido un pilar fundamental para el desarrollo de esta investigación, así como su constante disposición para orientarnos y corregirnos con profesionalismo y respeto.

A nuestras familias, por ser el motor que nos impulsó en todo momento. Gracias por su apoyo incondicional, por creer en nosotros incluso en los días más difíciles, por sus palabras de ánimo, su comprensión ante nuestras ausencias y sacrificios, y por enseñarnos que el esfuerzo siempre vale la pena.

Finalmente, extendemos nuestro agradecimiento a nuestros amigos y compañeros de la universidad, quienes, con sus consejos, ayuda y motivación hicieron más llevadero este camino. Compartir con ustedes cada experiencia, desafío y logro ha sido parte esencial de nuestra formación personal y profesional.

Basantes Hidalgo Víctor Alexander y Holguín García Israel Geremías

Resumen

Un sistema eléctrico está compuesto por diversos dispositivos encargados de transformar fuentes de energía primaria en electricidad, permitiendo su posterior traslado y entrega a los usuarios finales. Este conjunto funcional se organiza en tres etapas esenciales: generación, transmisión y distribución. En este contexto, la presente investigación tiene como finalidad desarrollar una guía práctica orientada a facilitar la simulación y análisis de sistemas eléctricos de potencia mediante el uso de un software especializado. La propuesta se plantea como un recurso pedagógico dirigido a estudiantes y profesionales de la ingeniería eléctrica, enfocado en el aprendizaje del modelado y la comprensión del comportamiento de los sistemas eléctricos. La elección del software de simulación se basó en una comparación entre diferentes programas comerciales, priorizando aquel que se ajusta a los requerimientos académicos de docentes y estudiantes. En este contexto, el manual técnico busca reforzar las competencias prácticas en simulación y su aplicación en entornos formativos y profesionales.

La guía combina fundamentos teóricos, esquemas y una secuencia de instrucciones que orientan el desarrollo progresivo de las simulaciones. Además, incorpora ejemplos vinculados a situaciones reales del ámbito educativo e industrial, facilitando la comprensión de los sistemas eléctricos.

El objetivo general se centra en contribuir al mejoramiento del proceso de enseñanza en ingeniería eléctrica, mediante herramientas que apoyen la preparación técnica frente a las demandas actuales del sector.

Palabras clave: guía práctica, sistemas eléctricos de potencia, software especializado, modelado, simulación.

Abstract

An electrical system is composed of various devices responsible for transforming primary energy sources into electricity, enabling its subsequent transfer and delivery to end users. This functional set is organized into three essential stages: generation, transmission, and distribution. In this context, this research aims to develop a practical guide aimed at facilitating the simulation and analysis of electrical power systems using specialized software. This proposal is designed as a pedagogical resource for electrical engineering students and professionals, focused on learning modeling and understanding the behavior of electrical systems. The simulation software was selected based on a comparison of different commercial programs, prioritizing the one that best meets the academic requirements of both faculty and students. In this context, the technical manual aims to strengthen practical simulation skills and their application in educational and professional settings.

The guide combines theoretical foundations, diagrams, and a sequence of instructions that guide the progressive development of the simulations. It also incorporates examples linked to real-world situations in the educational and industrial sectors, facilitating the understanding of electrical systems.

The overall objective is to contribute to improving the teaching process in electrical engineering by providing tools that support technical preparation to meet the current demands of the industry.

Keywords: practical guide, electrical power systems, specialized software, modeling, simulation.

Índice

Certificación del Tutor 2

Declaración de auditoría 3

Dedicatoria 4

Agradecimiento 6

Resumen 7

Abstract 8

1 Capítulo I: Introducción y Generalidades 20

1.1 Introducción 20

1.2 Planteamiento del Problema 22

1.3 Árbol de problemas 24

1.4 Formulación del Problema 25

1.4.1 Delimitación del Problema 25

1.5 Objetivos 25

1.5.1 Objetivo General 25

1.5.2 Objetivos Específicos 25

1.6 Hipótesis 26

1.7 Justificación 26

2 Capítulo II: Marco Teórico 28

2.1 Máquinas Eléctricas 28

2.1.1 Transformador Eléctrico 29

2.1.1.1 Principio de Funcionamiento 30

2.1.1.2 Tipos de Transformadores 31

2.1.1.3 Aplicaciones de los Transformadores 33

2.1.2 Máquinas Síncronas 34

2.1.2.1 Principio de Operación y Fundamentos 36

2.1.3 Máquinas Asíncronas 37

2.1.3.1 Principio de Funcionamiento 37

2.1.3.2 Par y Potencia en el Motor Asíncrono 39

2.2 Etapas del Sistema Eléctricos de Potencia 40

2.2.1 Generación 42

2.2.1.1 Tipos de Centrales Eléctricas 42

2.2.2 Transmisión 45

2.2.2.1 Elementos de una Línea de Transmisión 47

2.2.2.2 Modelamientos y Tipos de Líneas de Transmisión 49

2.2.3 Distribución 51

2.2.3.1 Tipos de Redes 52

2.3 Flujo de Potencia 54

2.3.1 Tipos de Barras 56

2.3.1.1 Barra Tipo P-V o Barra de Generación 56

2.3.1.2 Barra tipo P-Q o Barra de Carga 57

2.3.1.3 Barra Tipo Slack, Oscilante o de Compensación 58

2.3.2 Método de Newton Raphson 58

2.4 DIgSILENT PowerFactory 61

2.4.1 Aplicaciones y ventajas en la simulación de sistemas eléctricos 63

2.4.2 ¿Por qué Usar esta Herramienta? 64

2.4.3 Comparación de PowerFactory con otros Programas de Simulación 66

2.4.4 Interfaz de Usuario y Herramientas Básicas 68

2.4.4.1 Características Clave de la Interfaz de Usuario 70

2.4.4.2 Barra de Menú 72

2.4.4.3 La Barra de Herramientas 73

2.4.4.4 La Estructura General 75

2.4.4.5 La Ventana Gráfica 76

2.4.4.6 Propiedades y Configuración de Equipos 77

2.4.4.7 Modos de Operación y Estudios 78

2.4.4.8 Ventana de Resultados 79

2.4.5 Modelado de Componentes 80

2.4.6 Tipos de Estudios Eléctricos 83

2.4.7 Limitaciones y Consideraciones 84

3 Capítulo III: Metodología 86

3.1 Diseño Metodológico 86

3.2 Materiales y Recursos Utilizados 87

3.3 Plan de Acción Metodológico 87

3.4 Procedimiento de las Prácticas 89

3.4.1 Práctica 1 – Modelado Inicial del Sistema en PowerFactory 89

3.4.2 Práctica 2 – Modelado Analítico de los Parámetros RLC de la Línea 89

3.4.3 Práctica 3, 4 y 5 – Modelado de Línea Corta, Media y Larga 90

3.4.4 Práctica 6 – Modelado del Sistema Basado en los datos del Módulo AEL-MPSS-10 del laboratorio de Potencia 91

4 Capítulo IV: Resultados 92

4.1 Sistema Eléctrico de Potencia 92

4.1.1 Guía de Práctica N° 01 – Modelado de Generador, Barra y Carga 92

4.1.2 Guía de Práctica N° 02 – Modelado de Parámetros de la Línea de Transmisión 102

4.1.3 Guía de Práctica N° 03 – Modelado de Línea Corta – Generación, Línea y Carga (50 km) 118

4.1.4 Guía de Práctica N° 04 – Modelado de Línea Media (150 km) 129

4.1.5 Guía de Práctica N° 05 – Modelado de Línea Larga (250 km) 142

4.1.6 Guía de Práctica N° 06 – Modelado del Sistema con datos del módulo AEL-MPSS-10 del laboratorio de potencia 157

5 Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones 186

5.1 Conclusiones Generales 186

5.2 Recomendaciones Generales 187

6 Referencias Bibliográficas 188

7 Anexos 195

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Constitución general de una máquina de rotor cilíndrico 28

Ilustración 2 Configuración básica de un transformador 29

Ilustración 3 El primer transformador moderno práctico 30

Ilustración 4 Transformador con sus devanados a) conectados de manera convencional y b) reconectados como autotransformador 32

Ilustración 5 Transformador en una Subestación Eléctrica 34

Ilustración 6 Estator de un alternador trifásico 35

Ilustración 7 Circuito equivalente por fase de un motor síncrono 36

Ilustración 8 Estator de un motor de inducción típico que muestra los devanados del estator ... 37

Ilustración 9 Curva de par-velocidad de un motor de inducción 39

Ilustración 10 Diagrama unifilar de Sistema Eléctrico de Potencia 40

Ilustración 11 Central Hidroeléctrica Ullum 43

Ilustración 12 Parque Eólico – Galicia 44

Ilustración 13 Planta de energía solar Nellis 45

Ilustración 14 Componentes fundamentales de un sistema eléctrico 46

Ilustración 15 Aislador tipo campana 48

Ilustración 16 Modelo Línea Corta para longitudes menores a 80 km 49

Ilustración 17 Modelo Línea Media para longitudes entre 80 km y 250 km 50

Ilustración 18 Modelo Línea Larga para longitudes mayores a 250 km 51

Ilustración 19 Red radial 53

Ilustración 20 Bucle abierto 53

Ilustración 21 Red mallada 54

Ilustración 22 Barra Tipo P-V 57

Ilustración 23 Barra tipo P-Q 57

Ilustración 24 Ventana principal de PowerFactory 62

Ilustración 25 Acoplar una ventana de herramientas 69

Ilustración 26 Interfaz de usuario de PowerFactory 71

Ilustración 27 El menú de ayuda en la barra 72

Ilustración 28 Barra de herramientas 74

Ilustración 29 Cambiar la selección de la caja de herramientas 75

Ilustración 30 Modelos de los principales elementos de un sistema eléctrico en el software..... 76

Ilustración 31 Funciones y herramientas del software DIgSILENT PowerFactory 77

Ilustración 32 Modelos y análisis de flujo de carga en sistemas eléctricos 78

Ilustración 33 Modelo y análisis de flujo de cortocircuito en sistemas eléctricos 79

Ilustración 34 Ventana de resultados 79

Ilustración 35 Edición de una línea de transmisión 81

Ilustración 36 Creación de una biblioteca global definida por el usuario 84

Ilustración 37 Creación de un nuevo proyecto 93

Ilustración 38 Ventana para la inserción de datos de la barra de 20 kV 94

Ilustración 39 Sección para la creación de un tipo de generador 95

Ilustración 40 Datos Básicos a ingresar al generador..... 96

Ilustración 41 Datos para Flujo de Carga del Generador 97

Ilustración 42 Cálculo de Flujo de Carga 99

Ilustración 43 Modelado de Generador Síncrono..... 99

Ilustración 44 Ventana de Reporte de Flujo de Carga..... 100

Ilustración 45 Reporte de resultados en la ventana de salida 100

Ilustración 46 Esquema general de los componentes eléctricos R, L y C de una línea de transmisión..... 109

Ilustración 47 Disposición y distancia de los conductores a utilizar..... 111

Ilustración 48 Circuito equivalente del modelo de línea corta 119

Ilustración 49 Configuración de los conductores 121

Ilustración 50 Sistema de Referencia 121

Ilustración 51 Modelamiento de una Línea de Transmisión de 50 km 124

Ilustración 52 Flujo de Carga línea de 50 km 126

Ilustración 53 Reporte de Resultados de nuestras Barras/Terminales 127

Ilustración 54 Circuito nominal π de una línea de transmisión de longitud media. 131

Ilustración 55 Distancia entre fases y líneas 133

Ilustración 56 Sistema de Referencia 133

Ilustración 57 Circuito de corrientes de entrada y salida 137

Ilustración 58 Sistema a replicar 138

Ilustración 59 Modelado de Línea de 150 km..... 140

Ilustración 60 Circuito equivalente π de una línea de transmisión de longitud larga. 144

Ilustración 61 Distancia de los conductores 147

Ilustración 62 Sistema de Referencia 147

Ilustración 63 Circuito de corrientes de entrada y salida 151

Ilustración 64 Sistema de Referencia 153

Ilustración 65 Referencia de cambio de longitud de la línea 153

Ilustración 66 Flujo de Carga de nuestro sistema de 250 km..... 154

Ilustración 67 Módulo EDIBON AEL-MPSS-10 158

Ilustración 68 Módulo de Generación AEL-MPSS-10 159

Ilustración 69 Módulo de Transmisión AEL-MPSS-10..... 160

Ilustración 70 Módulo de Distribución AEL-MPSS-10..... 160

Ilustración 71 Sistema de Referencia para modelo del sistema 162

Ilustración 72 Configuración Simplex 162

Ilustración 73 Sistema sin cargas y sin capacitancias shunt..... 164

Ilustración 74 Diagrama unifilar del sistema sin carga conectada 165

Ilustración 75 Sistema sin carga y con cierre de S1 y S2..... 165

Ilustración 76 Circuito a simplificar..... 166

Ilustración 77 Reducción a Zeq1 167

Ilustración 78 Circuito equivalente 167

Ilustración 79 Corriente circulando por Zeq1 168

Ilustración 80 Cálculo de la tensión en $XC2$ 169

Ilustración 81 Sistema con S1 y S2 abiertos y con carga..... 170

Ilustración 82 Circuito a simplificar..... 170

Ilustración 83 Reducción a resistencia y reactancia equivalente 171

Ilustración 84 Impedancia Total de la Carga ($ZCeq$)..... 172

Ilustración 85 Reducción a impedancia total del sistema..... 172

Ilustración 86 Impedancia Total del sistema..... 173

Ilustración 87 Diagrama Fasorial - Sistema con carga y sin incorporación de capacitancias shunt 174

Ilustración 88 Sistema con carga y con cierre de S1 y S2..... 175

Ilustración 89 Circuito a simplificar..... 175

Ilustración 90 Reducción a Zeq2..... 176

Ilustración 91 Reducción a Zeq3..... 177

Ilustración 92 Reducción a Zeq4..... 177

Ilustración 93 Circuito Equivalente..... 178

Ilustración 94 Misma tensión tanto en Xc1 y Zeq3..... 178

Ilustración 95 Tensión en Zeq2..... 179

Ilustración 96 Cálculo de corriente en Zeq1 179

Ilustración 97 Tensión y corriente de recepción 180

Ilustración 98 Diagrama Fasorial - Modelo de Línea Corta con carga e incorporación de capacitancias shunt..... 181

Ilustración 99 Módulo AEL-MPSS-10 - "Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia – ULEAM"..... 195

Ilustración 100 Módulo de Línea de Transmisión "Mo-2-TRA-19"..... 195

Ilustración 101 Módulo de Cargas Resistivas "Mo-3-DIS-31"..... 196

Ilustración 102 Módulo de Cargas Inductivas "Mo-3-DIS-29" 196

Ilustración 103 Valores de tensiones de entrada mediante el Analizador..... 197

Ilustración 104 Valores de corrientes de entrada mediante el Analizador..... 197

Ilustración 105 Valores de tensiones de salida mediante el Analizador 198

Ilustración 106 Valores de corrientes de salida mediante el Analizador 198

Ilustración 107 Valores de tensiones de entrada mediante el Analizador 199

Ilustración 108 Valores de corrientes de entrada mediante el Analizador 199

Ilustración 109 Valores de tensiones de salida mediante el Analizador 200

Ilustración 110 Valores de corrientes de salida mediante el Analizador 200

Ilustración 111 Valores de tensiones de entrada mediante el Analizador 201

Ilustración 112 Valores de corrientes de entrada mediante el Analizador 201

Ilustración 113 Valores de tensiones de salida mediante el Analizador 202

Ilustración 114 Valores de corrientes de salida mediante el Analizador 202

Ilustración 115 Valores de tensiones de entrada mediante el Analizador 203

Ilustración 116 Valores de corrientes de entrada mediante el Analizador 203

Ilustración 117 Valores de tensiones de salida mediante el Analizador 204

Ilustración 118 Valores de corrientes de salida mediante el Analizador 204

Índice de Tablas

Tabla 1 Comparativa de PowerFactory con otros programas 67

Tabla 2 Materiales y recursos utilizados en la guía práctica..... 87

Tabla 3 Plan de acción metodológico 88

Tabla 4 Características eléctricas de conductores ACSR 109

Tabla 5 Comparación de resultados de la Resistencia AC a 20°C entre el valor analítico y el dado por el fabricante indicado en la Tabla 4 114

Tabla 6 Resultados unitarios de la Resistencia, Inductancia y Susceptancia Capacitiva 116

Tabla 7 Comparación entre resultados de barras analítico y de software en el modelado de línea corta (50 km) 127

Tabla 8 Comparación entre resultados finales analíticos y de software en el modelado de línea corta (50 km) 128

Tabla 9 Comparación entre resultados de barras analítico y de software en el modelado de línea media (150 km) 140

Tabla 10 Comparación entre resultados finales analíticos y de software en el modelado de línea media (150 km) 141

Tabla 11 Comparación entre resultados de barras analítico y de software en el modelado de línea larga (250 km) 155

Tabla 12 Comparación entre resultados finales analíticos y de software en el modelado de línea larga (250 km) 155

Tabla 13 Datos de Red Externa (Transformador) 158

Tabla 14 Datos de Equivalentes para la Línea de Transmisión 158

Tabla 15 Datos de Potencias por cada Banco del Módulo de Cargas (Conexión Estrella) 159

Tabla 16 Sistema sin carga y con apertura de S1 y S2 de las capacitancias shunt. 181

Tabla 17 Sistema sin carga y con cierre de S1 y S2 de las capacitancias shunt 182

Tabla 18 Sistema con carga y con apertura de S1 y S2 de las capacitancias shunt 182

Tabla 19 Sistema con carga y con cierre de S1 y S2 de las capacitancias shunt 183

1 Capítulo I: Introducción y Generalidades

1.1 Introducción

En el ámbito de la Ingeniería Eléctrica, los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) son una parte fundamental para garantizar un suministro energético eficiente y seguro. Estos sistemas abarcan desde la generación, transmisión y distribución de energía hasta su consumo final, por lo que su estudio resulta esencial para los ingenieros eléctricos que trabajan en el desarrollo y optimización de redes eléctricas. (Venturini et al., 2025)

No obstante, los SEP presentan una complejidad inherente debido a la cantidad de variables y elementos interconectados que deben ser analizados. El estudio, modelamiento, simulación y análisis de estos sistemas requiere de conocimientos sólidos y del uso de herramientas avanzadas, ya que los comportamientos dinámicos, las interacciones no lineales y los eventos transitorios presentan una complejidad técnica considerable debido a su naturaleza dinámica y de rápida evolución. En este contexto, los programas de simulación de uso comercial ofrecen soluciones prácticas para realizar estos análisis. Sin embargo, la curva de aprendizaje para utilizar estas herramientas de manera eficiente sigue siendo un desafío para estudiantes y profesionales.

Este trabajo tiene como objetivo desarrollar una guía práctica que facilite la simulación y análisis de sistemas eléctricos de potencia utilizando un software de simulación. Bajo un enfoque académico orientado a la enseñanza, la propuesta ofrece herramientas que facilitan el modelamiento y el análisis de los Sistemas Eléctricos de Potencia, permitiendo reducir la distancia entre los conceptos teóricos y su aplicación práctica. La guía incorpora ejercicios seleccionados que abordan temas relacionados con el modelamiento de una línea de transmisión, con el fin de que los usuarios desarrollen competencias técnicas vinculadas a escenarios reales del sistema energético, caracterizado por su evolución constante.

El Capítulo I expone la problemática que origina el desarrollo de este trabajo, asociada a las dificultades que presentan los estudiantes de ingeniería eléctrica en el dominio del análisis y la simulación de Sistemas Eléctricos de Potencia, como consecuencia de la limitada disponibilidad de recursos prácticos accesibles. Se analiza cómo la ausencia de guías que articulen teoría con ejercicios aplicados en software especializado restringe el fortalecimiento de habilidades técnicas. En este capítulo se define el objetivo general, centrado en la elaboración de una guía práctica basada en un software comercial, orientada a facilitar la comprensión y aplicación de estudios de flujo de potencia y cortocircuito. Además, se presentan la hipótesis, los objetivos específicos y la justificación del proyecto, resaltando su aporte pedagógico al proceso formativo.

El Capítulo II desarrolla el marco teórico que sustenta la propuesta, mediante la revisión de conceptos fundamentales de los Sistemas Eléctricos de Potencia. Se abordan el funcionamiento de las máquinas eléctricas, las etapas del sistema eléctrico y los principios del análisis de flujo de potencia. También se incluye una descripción técnica del software DIgSILENT PowerFactory, junto con el análisis de sus funcionalidades y su comparación con otras herramientas de simulación. Este apartado proporciona el respaldo conceptual necesario para la correcta interpretación de las prácticas planteadas.

En el Capítulo III se detalla la metodología aplicada en el diseño de las guías prácticas, describiendo el enfoque seguido, las herramientas empleadas y los criterios utilizados durante el desarrollo. Se explica la forma en que se estructuraron las actividades, se organizaron los contenidos y se seleccionaron los casos de estudio. La elección de DIgSILENT PowerFactory como plataforma principal se justifica por su uso extendido en contextos académicos e industriales. Asimismo, se expone el diseño de las prácticas de simulación, considerando criterios técnicos y

pedagógicos que permiten una experiencia de aprendizaje progresiva y coherente con situaciones reales.

En el Capítulo IV se presenta el desarrollo y análisis de los resultados obtenidos a partir de las prácticas implementadas en la guía. Las simulaciones están distribuidas en modelamientos de elementos del SEP, sus parámetros de línea y modelamientos de línea corta, media y larga. En la cual, las prácticas se resolvieron de manera detallada con esquemas, datos técnicos, simulaciones y resultados obtenidos mediante el Software PowerFactory. El análisis busca demostrar cómo estas prácticas contribuyen al fortalecimiento de habilidades técnicas, facilitando la comprensión de fenómenos complejos del sistema eléctrico. El capítulo también permite evidenciar la efectividad del enfoque pedagógico propuesto y su aplicabilidad tanto en entornos educativos como en el campo profesional.

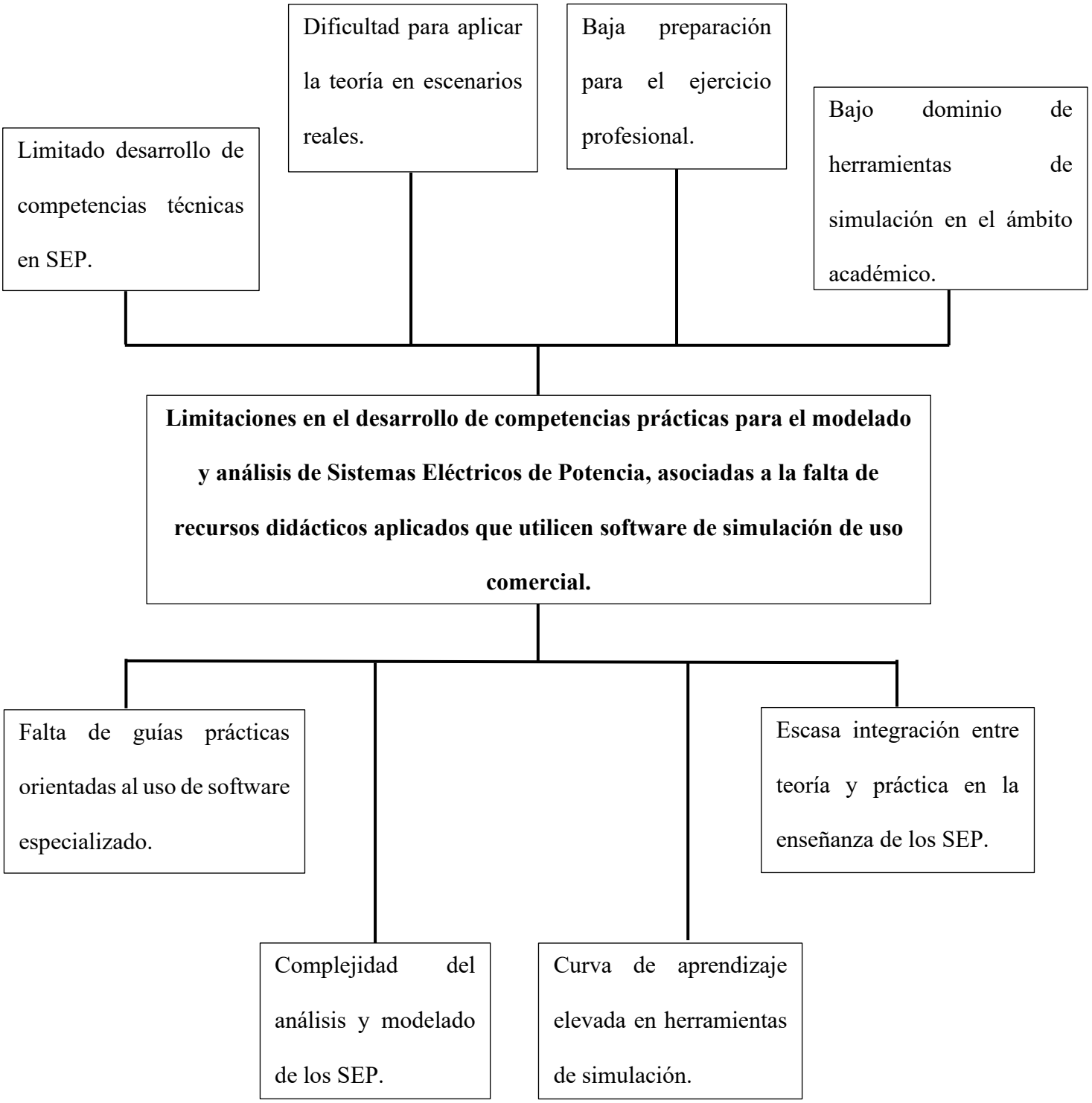
1.2 Planteamiento del Problema

En la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, aprender los conceptos de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) es fundamental para comprender cómo funciona la generación, transmisión y distribución de energía. La complejidad inherente al análisis, modelado y simulación de los Sistemas Eléctricos de Potencia constituye una dificultad recurrente para estudiantes y docentes, acentuada por la limitada disponibilidad de recursos didácticos accesibles que faciliten la familiarización con herramientas tecnológicas empleadas de forma habitual en el ejercicio profesional, particularmente, los programas de simulación especializados. Dentro del proceso de formación en ingeniería eléctrica, la incorporación de recursos educativos interactivos resulta indispensable. La escasez de materiales que articulen fundamentos teóricos con ejercicios prácticos y simulaciones computacionales restringe el desarrollo de competencias técnicas esenciales, ralentiza el dominio de plataformas de

simulación y reduce la capacidad de aplicar los conocimientos adquiridos en escenarios reales. Frente a este contexto, surge la necesidad de disponer de herramientas formativas que integren tecnología y promuevan el aprendizaje autónomo de los Sistemas Eléctricos de Potencia. Esto permite una comprensión gradual mediante enfoques didácticos efectivos.

Por lo tanto, esta carencia dificulta la adquisición de habilidades prácticas necesarias para interpretar y solucionar problemas reales, ampliando la brecha entre la teoría y la práctica profesional. Por ello, surge la necesidad de elaborar una guía práctica que permita simplificar el aprendizaje y reforzar las habilidades técnicas en el modelado y análisis de SEP. Esta guía práctica beneficiará tanto a estudiantes como a docentes, promoviendo un aprendizaje más eficiente y una mejor preparación para la simulación de los Sistemas Eléctricos de Potencia por computador.

1.3 Árbol de problemas



1.4 Formulación del Problema

¿Qué debe contener una guía práctica basada en un software de simulación de uso comercial para mejorar las habilidades y capacidades tanto de los estudiantes como de los profesionales en el modelado y análisis de sistemas eléctricos de potencia?

1.4.1 Delimitación del Problema

Esta guía práctica estará orientada a fines académicos y diseñada para beneficiar a estudiantes y/o docentes de la carrera de Ingeniería Eléctrica interesados en adquirir o reforzar sus habilidades en simulación y análisis de sistemas eléctricos de potencia. El desarrollo se realizará en un software de simulación, con un enfoque en estudios de casos prácticos. Su aplicación estará enfocada a escenarios típicos en el ámbito educativo, asegurando una accesibilidad técnica para facilitar el aprendizaje en el uso de herramientas de simulación.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Desarrollar un manual de prácticas para el modelado y análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) utilizando un software de simulación, que permita a los estudiantes y futuros especialistas perfeccionar sus capacidades en el diseño, simulación y evaluación de sistemas eléctricos de potencia.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar prácticas de laboratorio que permitan corroborar mediante el uso de un software de simulación especializado, los resultados del desarrollo analítico en diferentes casos de estudio.
- Emplear el módulo de EDIBON AEL-MPSS-10, disponible en el laboratorio de SEP de la Carrera en Electricidad, para el desarrollo de una práctica de laboratorio ajustada al

compendio de estudio de la asignatura de SEP 1 que permita corroborar los resultados obtenidos mediante el desarrollo analítico.

1.6 Hipótesis

La elaboración de una guía práctica apoyada en un software de simulación contribuirá de manera notable al fortalecimiento de las competencias en modelado y análisis de sistemas eléctricos de potencia, tanto en estudiantes como en profesionales, favoreciendo su aplicación efectiva en contextos reales.

1.7 Justificación

Según (Venturini et al., 2025), el constante progreso de los sistemas eléctricos de potencia, motivado por el aumento continuo en el consumo de energía y la expansión de las interconexiones entre redes, ha generado la necesidad de integrar tecnologías digitales avanzadas que permitan llevar a cabo análisis técnicos más detallados. En este contexto, las plataformas de simulación digital adquieren un papel central en la formación académica y en el ejercicio profesional de la ingeniería eléctrica, al permitir la reproducción de condiciones operativas cercanas a las que se presentan en sistemas reales. Bajo esta premisa, el desarrollo de una guía práctica orientada al modelado y análisis de estos sistemas representa un aporte directo al fortalecimiento de habilidades técnicas aplicadas.

La propuesta se fundamenta en el uso de entornos simulados que representan escenarios habituales del sistema eléctrico, lo que facilita la vinculación entre los fundamentos teóricos y su aplicación práctica. Los casos planteados corresponden a situaciones comunes en redes interconectadas, tales como el análisis ante fallas, la evaluación del comportamiento dinámico de los elementos del sistema y el estudio de condiciones operativas críticas. Este planteamiento

promueve una experiencia formativa activa, en la que el estudiante desarrolla criterios técnicos para enfrentar problemas propios de la operación real de los sistemas eléctricos.

La aplicación de metodologías basadas en simulación favorece el análisis de sistemas complejos, permitiendo identificar comportamientos recurrentes, anticipar posibles contingencias y plantear soluciones coherentes desde el punto de vista técnico. De este modo, la simulación se convierte en una herramienta formativa que trasciende el cálculo teórico y refuerza la toma de decisiones fundamentadas.

La incorporación de recursos didácticos apoyados en software de uso profesional contribuye a reducir la distancia entre la formación universitaria y las demandas del entorno laboral. Esta integración fortalece la preparación técnica de los futuros ingenieros eléctricos y estimula una actitud orientada al aprendizaje continuo y a la adaptación tecnológica.

Finalmente, la propuesta responde a la necesidad de mejorar las competencias técnicas en el ámbito energético mediante un recurso educativo enfocado en el autoaprendizaje. El empleo de un software de simulación comercial incentiva tanto a estudiantes como a docentes a profundizar sus conocimientos de forma autónoma, consolidando una base sólida para el análisis y modelado de Sistemas Eléctricos de Potencia. De esta forma, se promueve el desarrollo de habilidades clave para analizar problemas complejos, interpretar datos y tomar decisiones fundamentadas en el contexto actual de los sistemas eléctricos.

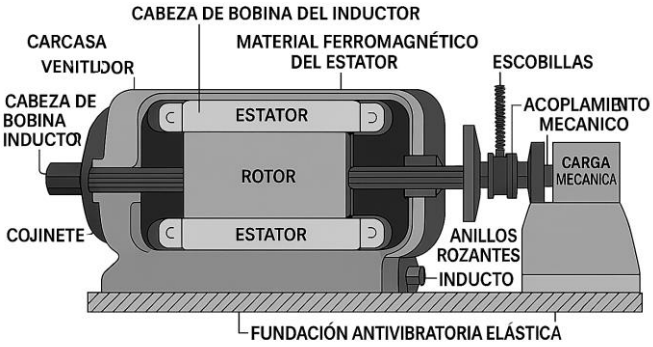
2 Capítulo II: Marco Teórico

2.1 Máquinas Eléctricas

(Romano et al., 2025), indican que las máquinas eléctricas desempeñan una función crucial al permitir la transformación bidireccional entre energía eléctrica y mecánica. Cuando se genera electricidad a partir de movimiento mecánico, el dispositivo funciona como generador; si, por el contrario, se utiliza electricidad para producir movimiento, actúa como motor. Esta conversión se basa en la interacción entre campos magnéticos y circuitos eléctricos. Gracias a esta capacidad reversible, las máquinas eléctricas se consideran elementos estratégicos en la operación de los sistemas de energía.

Ilustración 1

Constitución general de una máquina de rotor cilíndrico



Fuente: (Romano, 2025)

Según (Romano et al., 2025), la ingeniería orientada al diseño y análisis de máquinas eléctricas y sistemas de potencia forma parte del núcleo histórico de la ingeniería eléctrica. Fue hacia fines del siglo XIX cuando comenzaron a formalizarse los marcos de referencia para medir fenómenos eléctricos, introduciendo así los primeros sistemas de unidades. A partir de ese momento, conceptos fundamentales como el voltaje, la intensidad de corriente, la resistencia y la

potencia fueron cuantificados a través de unidades como el volt, el amperio, el ohm y el watt, las cuales siguen siendo estándar en la industria eléctrica global.

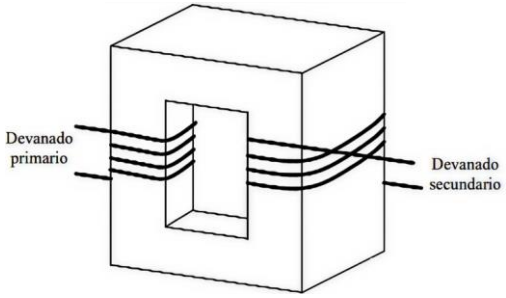
2.1.1 Transformador Eléctrico

Desde el punto de vista técnico, el transformador se considera un equipo estático que permite el traspaso de energía eléctrica entre dos sistemas mediante un enlace magnético, sin que exista transformación mecánica directa. Este mecanismo opera sobre la base de la inducción mutua que se genera por variaciones temporales en los campos magnéticos, lo que hace posible la transmisión de energía sin conexión eléctrica entre los devanados primario y secundario salvo en configuraciones particulares como el autotransformador, donde ambos devanados comparten una parte del circuito. (Zahernia & Rahbarimagham, 2021)

En la Ilustración 2 se ilustra un esquema constructivo común, donde dos bobinas aisladas eléctricamente interactúan a través de un núcleo ferromagnético conformado por láminas delgadas, diseñado para guiar el flujo magnético compartido con la menor pérdida posible. La forma física del núcleo, junto con las propiedades del material con que está fabricado, influye de manera decisiva en el desempeño del proceso de conversión de parámetros eléctricos entre los circuitos involucrados. (Zahernia & Rahbarimagham, 2021)

Ilustración 2

Configuración básica de un transformador



Fuente: (Zahernia & Rahbarimagham, 2021)

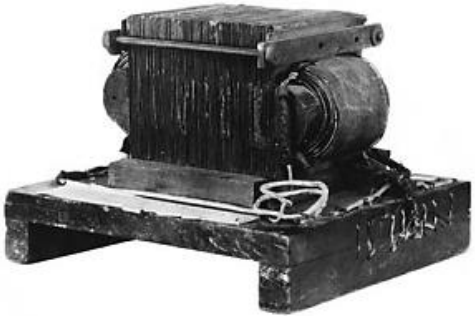
2.1.1.1 Principio de Funcionamiento

El diseño interno de un transformador implica la incorporación de múltiples bobinados eléctricos, cada uno de ellos recubierto con material aislante para impedir la interacción directa entre conductores. Estos arrollamientos se disponen de manera envolvente alrededor de un núcleo ensamblado con delgadas chapas de un material ferromagnético, cuya finalidad es facilitar la interacción magnética entre los circuitos implicados. Esta arquitectura no solo favorece la eficiencia energética, sino que también refuerza la seguridad del dispositivo al evitar contacto eléctrico entre los elementos activos. (Thango et al., 2020)

Su operación se basa en el fenómeno de la inducción, en el cual un campo magnético oscilante dentro del núcleo permite que se transfiera energía entre los devanados. En este proceso, el bobinado principal, conectado a una fuente de corriente alterna, produce una tensión inducida sobre los secundarios, e incluso sobre un tercer devanado si el diseño así lo contempla. Mientras que el secundario entrega energía a las cargas conectadas, el terciario puede ser utilizado para alimentar equipos auxiliares o para propósitos de regulación dentro del sistema. (Thango et al., 2020)

Ilustración 3

El primer transformador moderno práctico



Fuente: (Thango, 2020)

2.1.1.2 Tipos de Transformadores

Pese a que todos los transformadores funcionan con base en los mismos principios de inducción electromagnética, existen múltiples variantes estructurales que responden a distintas necesidades operativas y contextos de uso. (Zahernia & Rahbarimagham, 2021)

A continuación, se describen las más relevantes:

- **Transformadores de Potencia**

Este tipo de transformador tiene como función principal adaptar los niveles de tensión en los sistemas de corriente alterna sin modificar la cantidad total de potencia transmitida. Opera mediante inducción entre dos bobinados, permitiendo el traspaso eficiente de energía entre ellos sin pérdidas considerables. (Zahernia & Rahbarimagham, 2021)

- **Transformadores Elevadores**

Son dispositivos destinados a aumentar la tensión de salida en relación con la de entrada. Este efecto se logra al contar con un número mayor de espiras en el devanado secundario que en el primario, lo que permite obtener una mayor diferencia de potencial al otro extremo del transformador. (Zahernia & Rahbarimagham, 2021)

- **Transformadores Reductores**

En contraposición al modelo anterior, los reductores disminuyen la tensión de salida. Para ello, el devanado primario contiene más espiras que el secundario. Un aspecto importante es su capacidad reversible: al invertir la conexión, un transformador reductor puede operar como elevador, y viceversa. (Lagoeiro et al., 2023)

- **Autotransformadores**

Los autotransformadores son empleados cuando se requiere un ajuste de voltaje, pero con variaciones relativamente pequeñas. En estos transformadores, las bobinas se disponen de forma

que comparten parte de su devanado, permitiendo que la tensión no pase completamente a través de un devanado primario y secundario separados, sino que entre y salga por un punto intermedio dentro de la misma bobina, lo que facilita un ajuste preciso de la tensión. (Lagoeiro et al., 2023)

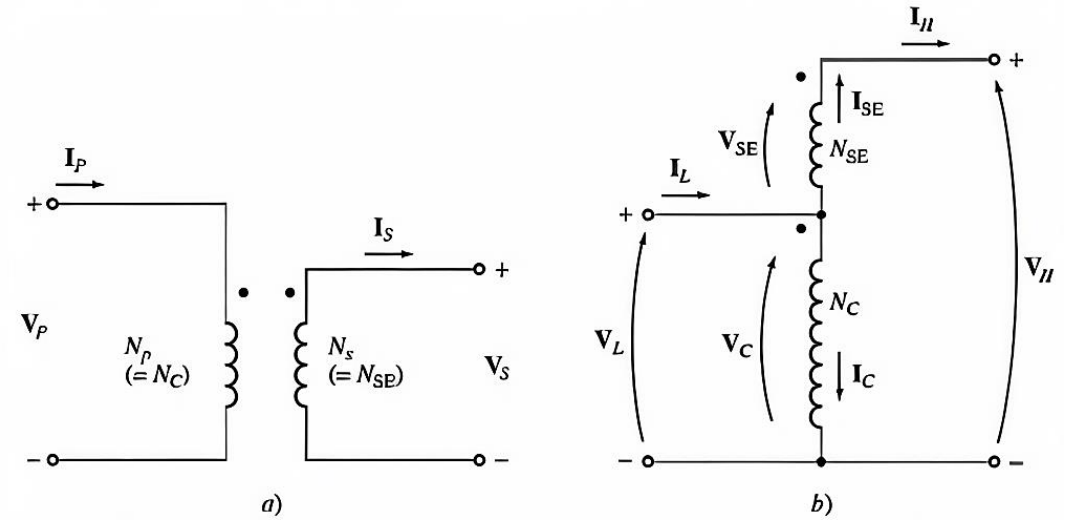
- **Transformadores Trifásicos**

Dado que en los sistemas eléctricos industriales la generación y distribución se realiza comúnmente en corriente trifásica, estos transformadores se diseñan para esa finalidad específica. Su implementación puede llevarse a cabo mediante tres transformadores monofásicos conectados entre sí o utilizando un solo núcleo con tres bobinas, lo que proporciona una solución más integrada y eficiente. (Lagoeiro et al., 2023)

Las configuraciones más frecuentes en este tipo de conexiones incluyen Y-Y, Y-Δ, Δ-Y y Δ-Δ, siendo estas combinaciones empleadas según los requerimientos del sistema. (Lagoeiro et al., 2023)

Ilustración 4

Transformador con sus devanados a) conectados de manera convencional y b) reconectados como autotransformador



Fuente: (Lagoeiro, 2023)

2.1.1.3 Aplicaciones de los Transformadores

Los transformadores representan componentes esenciales en la arquitectura de los sistemas eléctricos, ya que permiten la transferencia de energía desde los generadores hasta los usuarios finales. En el ámbito de la generación, su uso permite aumentar la tensión eléctrica con el propósito de transportar la energía de manera más eficiente a lo largo de grandes distancias. Esta elevación de voltaje es fundamental para reducir pérdidas energéticas en las líneas de transmisión, optimizando así la operación del sistema interconectado y su sostenibilidad a largo plazo. (Rafael Núñez et al., 2023)

Durante la etapa de distribución, dichos niveles elevados de tensión deben ser reducidos para que puedan ser utilizados con seguridad por distintos tipos de consumidores, desde industrias hasta hogares. (Rafael Núñez et al., 2023)

Otros autores han mencionado lo siguiente:

> Además de su papel en la infraestructura eléctrica a gran escala, los transformadores también están presentes en múltiples aplicaciones cotidianas. En dispositivos electrónicos y aparatos domésticos, se utilizan versiones compactas que permiten adaptar la tensión a valores seguros para cada circuito. Esta tecnología es igualmente empleada en sistemas de protección, como los interruptores diferenciales, donde pequeños transformadores detectan desbalances en la corriente que podrían indicar un fallo. (Cai et al., 2024)
>
> En síntesis, tanto por su eficiencia como por su versatilidad, los transformadores constituyen una pieza clave en la ingeniería eléctrica moderna, respondiendo a necesidades que van desde la macro distribución hasta la protección de equipos individuales. (Rafael Núñez et al., 2023)

Ilustración 5

Transformador en una Subestación Eléctrica

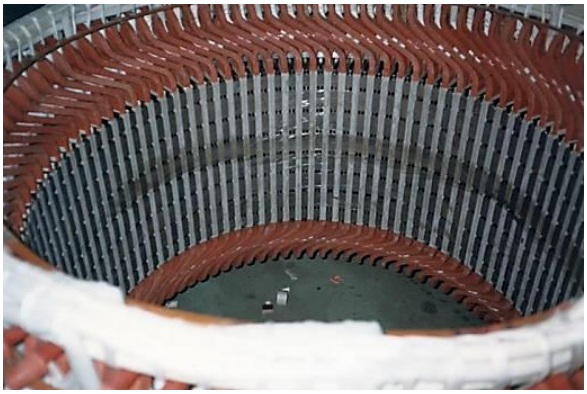
Fuente: (Cai, 2024)

2.1.2 Máquinas Síncronas

Como indican (Garcia-Calva et al., 2025), las máquinas síncronas están diseñadas para funcionar dentro de redes de corriente alterna, donde la dirección del flujo eléctrico varía de forma cíclica. Estas máquinas poseen dos devanados: uno conectado a la red alterna, responsable de entregar o recibir potencia, y otro que recibe corriente continua para mantener estable el campo magnético requerido. En la mayoría de los diseños, el campo se genera desde el rotor, mientras que el devanado conectado a la red se encuentra en el estator. Esta disposición estructural busca reducir los niveles de tensión en el rotor y facilitar el paso de energía con mecanismos como los contactos deslizantes.

Ilustración 6

Estator de un alternador trifásico



Fuente: (Garcia-Calva, 2025)

En ciertos diseños de máquinas eléctricas, se utilizan únicamente dos colectores deslizantes para favorecer una operación más eficiente y minimizar las pérdidas energéticas. En modelos más básicos, este sistema puede ser reemplazado por el uso de imanes permanentes en lugar del devanado de excitación, lo cual elimina por completo la necesidad de colectores. Estas variantes, aunque más simples, suelen requerir una mayor separación entre el rotor y el estator en comparación con otras configuraciones tradicionales. (Garcia-Calva et al., 2025)

Cuando una máquina síncrona se utiliza como generador de corriente alterna, su rotor es movido por una fuente externa de energía mecánica. Este movimiento genera un campo magnético que atraviesa los devanados del estator, produciendo un flujo cambiante que induce tensiones alternas en sus terminales. Para asegurar que la corriente generada mantenga una frecuencia constante, la velocidad de rotación del rotor debe estar sincronizada exactamente con la frecuencia deseada del sistema. (Garcia-Calva et al., 2025)

$$f = \frac{n.p}{60} \tag{1}$$

Donde:

f: Frecuencia eléctrica.

n: Velocidad mecánica de rotación del rotor.

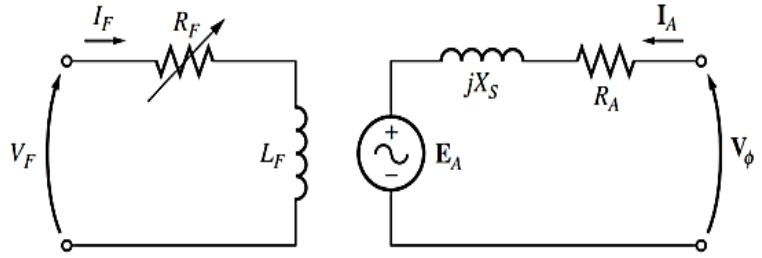
p: Número de pares de polos del generador.

2.1.2.1 Principio de Operación y Fundamentos

Las máquinas síncronas poseen la particularidad de aportar o absorber potencia activa dentro de un sistema eléctrico, al mismo tiempo que permiten el intercambio de potencia reactiva, ya sea entregándola o tomándola del sistema. En su funcionamiento, la corriente de excitación aplicada al rotor genera un campo magnético estacionario conocido como BR. Simultáneamente, al aplicarse tensiones trifásicas al estator, se induce una corriente trifásica que circula por sus devanados. El funcionamiento del motor síncrono se basa en que el rotor sigue constantemente el campo magnético giratorio generado en el estator, aunque sin sincronizarse completamente con él en ningún momento. (F. Yang et al., 2022)

Ilustración 7

Circuito equivalente por fase de un motor síncrono



Fuente: (F. Yang, 2022)

2.1.3 Máquinas Asíncronas

2.1.3.1 Principio de Funcionamiento

En el ámbito de las máquinas eléctricas, los motores de inducción comparten ciertos fundamentos operativos con aquellos motores síncronos que incluyen mecanismos de amortiguación de oscilaciones. No obstante, la verdadera diferencia entre ambos reside en la arquitectura del rotor. Aunque el estator presenta un diseño externo comparable, donde se muestra un estator de dos polos típico, los tipos de rotores que se incorporan varían considerablemente. En general, pueden encontrarse dos configuraciones principales: una basada en barras conductoras cerradas en cortocircuito, conocida como jaula de ardilla, y otra conformada por devanados, cada cual con propiedades constructivas específicas. (J. M. Yang & Kwak, 2024)

Ilustración 8

Estator de un motor de inducción típico que muestra los devanados del estator

Fuente: (J. M. Yang & Kwak, 2024)

Los motores de inducción pueden emplear rotores devanados, los cuales se caracterizan por incorporar un sistema trifásico de bobinas similar al del estator, pero dispuesto en la sección giratoria de la máquina. En esta configuración, los devanados del rotor suelen conectarse en estrella, y sus terminales se acoplan a anillos colectores montados sobre el eje. A través de

escobillas que hacen contacto con estos anillos, los circuitos rotóricos se cierran en cortocircuito, permitiendo el flujo de corrientes inducidas. (J. M. Yang & Kwak, 2024)

Este diseño proporciona acceso a las corrientes del rotor mediante las escobillas, lo que no solo facilita su medición, sino también la manipulación de las características operativas del motor. La capacidad de supervisar y modificar estos parámetros constituye una ventaja técnica relevante, dado que posibilita la adecuación de la curva par-velocidad a los requerimientos particulares de cada proceso. Este nivel de ajuste permite un control más preciso del comportamiento operativo del motor, favoreciendo un desempeño eficiente frente a variaciones en la carga. El diseño asociado a esta característica resulta apropiado para condiciones de arranque que demandan pares elevados y, al mismo tiempo, contribuye a la disminución de las corrientes de arranque, aspectos determinantes en aplicaciones industriales de elevada exigencia. (J. M. Yang & Kwak, 2024)

Otro autor ha afirmado lo siguiente:

> En los motores asíncronos, existe una relación fundamental entre los parámetros de potencia mecánica y torque electromagnético, factores clave para la evaluación de su eficiencia operativa. La potencia activa en estos dispositivos mide la capacidad de conversión energética por unidad de tiempo, representando la energía eléctrica transformada en trabajo mecánico útil. (El Idrissi et al., 2025)
>
> Desde un enfoque dinámico, el torque electromagnético es el efecto rotacional generado por la interacción entre los campos magnéticos del estator y el rotor. Aunque este par teóricamente proviene de la conversión directa de la potencia eléctrica interna, el torque neto disponible en el eje no coincide con el valor teórico debido a diversas pérdidas disipativas. Entre estas pérdidas se incluyen la fricción en los cojinetes, la resistencia

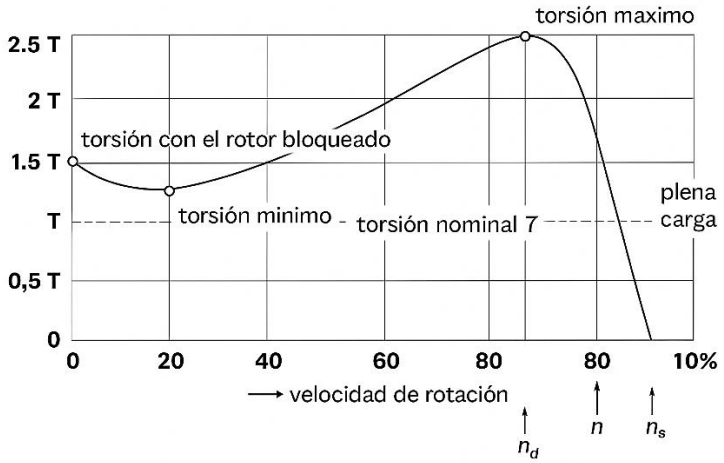
aerodinámica de las partes rotatorias y las pérdidas por ventilación, las cuales en conjunto disminuyen el torque de salida efectivo. (El Idrissi et al., 2025)

2.1.3.2 Par y Potencia en el Motor Asíncrono

La relación entre el torque electromagnético y la velocidad de rotación en los motores asíncronos presenta un comportamiento no lineal, lo cual exige su análisis mediante representaciones gráficas, ya que no puede expresarse mediante una fórmula algebraica sencilla. Según lo mostrado en la curva característica (Ilustración 9), se identifican tres zonas operativas principales: el torque nominal (T) correspondiente al funcionamiento a plena carga, un torque de arranque elevado (1.5T) que permite vencer la inercia inicial del sistema, y un torque máximo (2.5T) que define el límite de estabilidad antes de alcanzar el punto de deslizamiento crítico. Esta descripción resulta fundamental para el correcto dimensionamiento de sistemas de accionamiento eléctrico, ya que conocer los extremos del comportamiento dinámico permite optimizar el diseño y proteger el motor frente a situaciones de sobrecarga. (El Idrissi et al., 2025)

Ilustración 9

Curva de par-velocidad de un motor de inducción



Fuente: (El Idrissi, 2025)

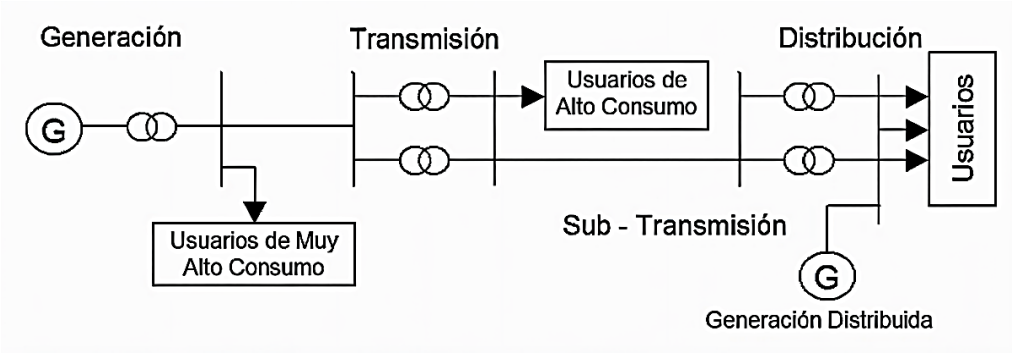
2.2 Etapas del Sistema Eléctricos de Potencia

Los sistemas de potencia están formados por diversos dispositivos que convierten la energía primaria en electricidad utilizable, la cual luego es transportada y distribuida a los consumidores. Con el tiempo, la corriente alterna se consolidó como la opción más utilizada, tanto por su eficacia operativa como por decisiones técnicas e históricas. (Venturini et al., 2025)

Según (Cevallos et al., 2025), los sistemas eléctricos funcionan como redes complejas de gran alcance que cubren regiones enteras y dependen de la coordinación entre miles de dispositivos conectados. Una de las claves para su operación adecuada es conservar la frecuencia eléctrica uniforme en todo el sistema, ya que incluso ligeras variaciones pueden provocar interrupciones severas. No obstante, a pesar de estas exigencias técnicas, las redes actuales mantienen altos estándares de estabilidad y seguridad.

Ilustración 10

Diagrama unifilar de Sistema Eléctrico de Potencia



Fuente: (Cevallos et al., 2025)

La energía eléctrica se transporta habitualmente mediante corriente alterna, un tipo de señal cuya forma cambia cíclicamente con el tiempo. Este comportamiento sigue curvo que se pueden describir con funciones matemáticas como la onda seno. Debido a que este tipo de señales es fácil

de generar y coincide con ciertos procesos naturales, se ha convertido en la base de los sistemas eléctricos modernos. (Bui et al., 2021)

$$V_g(t) = V_m \, . sen \, (\omega t + \varphi) \tag{2}$$

Donde:

$V_g(t)$: Tensión instantánea generada en voltios en un momento t.

V_m: Amplitud máxima de la tensión o valor pico en voltios.

ω: Frecuencia angular en rad/s.

t: Tiempo en segundos.

φ: Ángulo de fase.

Además, destacan que la estabilidad en el suministro eléctrico es esencial para asegurar el buen desempeño de la red y prevenir fallas inesperadas. La estabilidad del sistema requiere que la potencia generada se regule de forma continua en función de la demanda, incluso ante eventos imprevistos como la salida repentina de unidades generadoras. Cuando este equilibrio se ve afectado, variables fundamentales como la frecuencia y el nivel de tensión presentan desviaciones que pueden derivar en fallas técnicas o interrupciones del suministro. Una red de distribución confiable cumple además un papel determinante en la protección de los equipos conectados y en la continuidad operativa del sistema, sino que también favorece una gestión energética eficiente y reduce posibles pérdidas económicas en diversos sectores. (Bui et al., 2021). Un sistema eléctrico de potencia se compone de tres etapas esenciales: primero se produce la energía, luego se transmite a través de largas distancias, y finalmente se distribuye localmente a los usuarios que la requieren. (Gharehpetian et al., 2025)

2.2.1 Generación

La generación de energía eléctrica comienza con el aprovechamiento de recursos naturales disponibles, que pueden ser renovables o no renovables. Estos recursos permiten producir energía mecánica, usualmente mediante turbinas o motores, que luego es transformada en electricidad por medio de generadores. Este procedimiento está basado en leyes fundamentales del electromagnetismo, en las que el desplazamiento de un conductor en un campo magnético induce corriente eléctrica. (Barajas-Villarruel et al., 2022)

2.2.1.1 Tipos de Centrales Eléctricas

Una instalación generadora de electricidad es un sistema que transforma diferentes formas de energía en corriente eléctrica utilizable. Estas infraestructuras suelen estar ubicadas estratégicamente, ya sea próximas a fuentes naturales de energía como ríos o yacimientos minerales, o cerca de centros urbanos e industriales con alta demanda energética. El proceso de generación se basa en el uso de un motor que convierte la energía primaria en movimiento mecánico, el cual acciona un generador encargado de producir electricidad. Este conjunto se conoce como grupo generador. (Lim et al., 2024)

- **Hidroeléctrica**

Las centrales hidroeléctricas generan electricidad aprovechando la fuerza gravitacional del agua almacenada en embalses. Cuando esta masa de agua desciende desde una cierta altura, libera una cantidad de energía que es aprovechada para accionar las turbinas. La capacidad de generación depende directamente del desnivel entre el reservorio y el punto donde el agua ingresa al sistema hidráulico, ya que este factor determina la presión disponible para poner en marcha los generadores eléctricos. (Lim et al., 2024)

Ilustración 11

Central Hidroeléctrica Ullum

Fuente: (Lim, 2024)

- **Térmica**

Las plantas termoeléctricas son infraestructuras diseñadas para convertir la energía calorífica en energía eléctrica mediante diversos procesos de conversión. Esta energía térmica se transfiere a un fluido de trabajo, como agua, aire o compuestos orgánicos, el cual se utiliza para accionar un equipo mecánico adecuado, generalmente una turbina. Al estar conectada al generador eléctrico, la rotación de la turbina permite transformar la energía mecánica en energía eléctrica utilizable. (Kundacina et al., 2025)

- **Nuclear**

Una central nuclear genera electricidad mediante la liberación de energía térmica originada en reacciones nucleares controladas, específicamente por la fisión de átomos pesados como el uranio y el plutonio. El calor producido durante este proceso se emplea para calentar agua y transformarla en vapor a alta presión. Este vapor impulsa una turbina conectada a un generador, donde la energía mecánica se convierte finalmente en energía eléctrica. (Lim et al., 2024)

- **Eólica**

La generación de energía eléctrica en las centrales eólicas se basa en la transformación de la energía del viento en energía mecánica a través de aerogeneradores. Estos consisten en turbinas que convierten el movimiento generado por el viento en rotación, la cual se transmite a un alternador que convierte dicha energía mecánica en electricidad. (Kundacina et al., 2025)

Ilustración 12

Parque Eólico – Galicia

Fuente: (Kundacina, 2025)

- **Solar**

Las centrales solares consisten en sistemas diseñados para captar la energía solar y convertirla en electricidad. Este proceso se puede llevar a cabo a través de dos tecnologías principales: la conversión térmica de la energía solar y la conversión fotovoltaica. (Kundacina et al., 2025)

Ilustración 13

Planta de energía solar Nellis

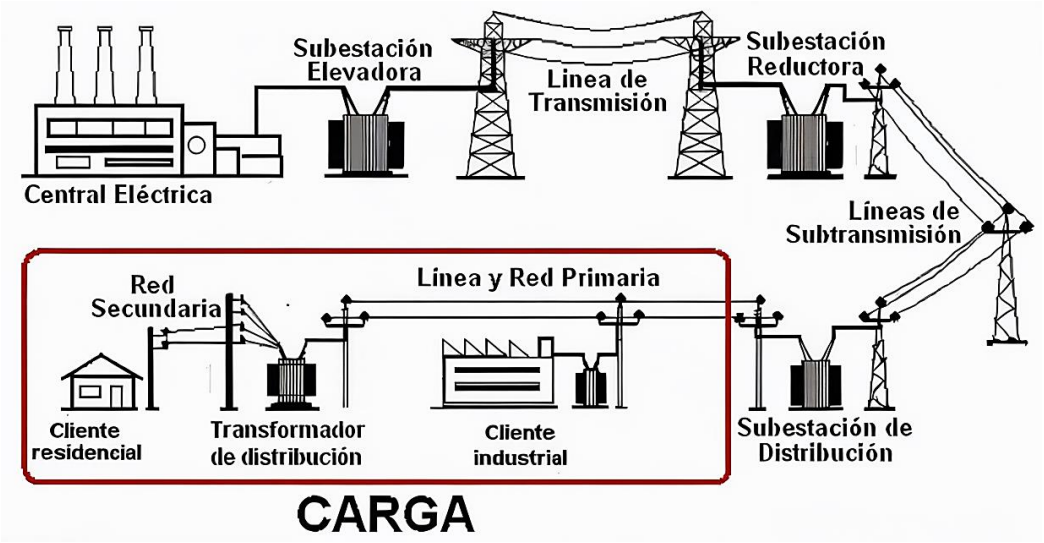
Fuente: (Kundacina, 2025)

2.2.2 Transmisión

(Cardozo et al., 2024) explican que, tras la generación de electricidad, esta debe ser llevada a los centros de consumo mediante sistemas de transmisión. Este proceso implica el traslado de grandes volúmenes de energía a lo largo de extensas redes eléctricas, conocidas como líneas de alta tensión, que conectan las plantas generadoras con zonas urbanas, industriales y comerciales. Para reducir las pérdidas por calentamiento en los conductores, la electricidad se transmite a altos voltajes, los cuales se ajustan mediante transformadores cuando es necesario para su distribución local.

Ilustración 14

Componentes fundamentales de un sistema eléctrico



Fuente: (Cardozo, 2024)

Las líneas de transmisión permiten la conexión entre distintas partes del sistema eléctrico, extendiéndose por grandes distancias. Su diseño puede ser aéreo o subterráneo, dependiendo de factores técnicos como la geografía, el clima y los requisitos de operación. (Cardozo et al., 2024)

Según (Han et al., 2021), indican que una gran mayoría de interrupciones eléctricas, superiores al 80%, se originan en las líneas de transmisión, influenciadas por la creciente complejidad de los equipos conectados a la red. Para mitigar estos efectos, es crucial detectar con precisión las fases implicadas en una falla. En respuesta a este desafío, se han desarrollado múltiples enfoques de diagnóstico, los cuales suelen agruparse en tres categorías:

- Aquellos basados en modelos físicos del sistema
- Los que transforman señales eléctricas para identificar patrones
- Los que aplican técnicas de inteligencia artificial, como el aprendizaje automático.

Además, señalan que uno de los enfoques tradicionales para la detección de fallas en sistemas eléctricos es el uso de modelos físicos, los cuales se construyen a partir de principios teóricos o mediante técnicas de identificación experimental. Estos modelos tienen como finalidad reproducir el comportamiento operativo del sistema, lo que permite comparar los resultados simulados con los valores esperados e identificar posibles desviaciones o fallas. Aunque resultan herramientas eficaces para el análisis, su desarrollo suele orientarse a escenarios de falla particulares, lo que restringe su alcance y exige un esfuerzo considerable en términos de tiempo y configuración. A ello se suma la incorporación gradual de fuentes de generación renovable y la variabilidad de los perfiles de carga, factores que introducen nuevas dinámicas operativas y dificultan la formulación de modelos capaces de representar con precisión todas las condiciones del sistema. (Han et al., 2021)

2.2.2.1 Elementos de una Línea de Transmisión

- **Conductores**

Según lo indicado por (Mitolo, 2024), los materiales más utilizados en la fabricación de conductores eléctricos son el cobre y el aluminio, debido a que combinan una buena conductividad con propiedades mecánicas adecuadas y un peso relativamente bajo, lo que los hace ideales para aplicaciones en redes de transmisión y distribución.

Un aspecto clave de este estudio es la falta de información precisa sobre cómo se reparten las corrientes de desbalance, las cuales pueden seguir dos trayectorias: a través del terreno o mediante el conductor de guarda. Durante la operación normal del sistema, las corrientes que circulan por el cable de guarda presentan valores reducidos, lo que permite que cualquier sección del conductor las soporte sin inconvenientes. Sin embargo, la adecuada selección del tipo de hilo de guarda exige evaluar el comportamiento de estas corrientes bajo condiciones de falla. En tales

escenarios, la corriente se divide entre el conductor de guarda y el terreno, sin que exista una determinación precisa de la fracción que circula por cada uno de estos caminos. Dado que este fenómeno ocurre en situaciones transitorias, las fallas monofásicas resultan útiles para realizar una evaluación más precisa. (Daniela et al., 2020)

En conductores fabricados con acero, un incremento en la corriente genera alteraciones en su permeabilidad magnética, lo que a su vez modifica parámetros eléctricos como la resistencia y la reactancia interna. Esta sensibilidad a la magnitud de la corriente convierte a estos materiales en elementos con comportamiento electromagnético variable. Por este motivo, para estimar de forma precisa su impedancia, es necesario conocer previamente la intensidad de corriente que atravesará el conductor. (Daniela et al., 2020)

- **Aisladores**

Según lo señalado por (Farooq et al., 2025), la función principal de estos dispositivos es mantener los conductores en una posición fija y segura, evitando movimientos que puedan afectar el funcionamiento del sistema. Los aisladores, que se montan sobre estos soportes, garantizan la separación física entre las líneas y las estructuras metálicas, previniendo posibles fugas eléctricas y contribuyendo así a la estabilidad y continuidad del suministro eléctrico.

Ilustración 15

Aislador tipo campana

Fuente: (Farooq, 2025)

2.2.2.2 Modelamientos y Tipos de Líneas de Transmisión

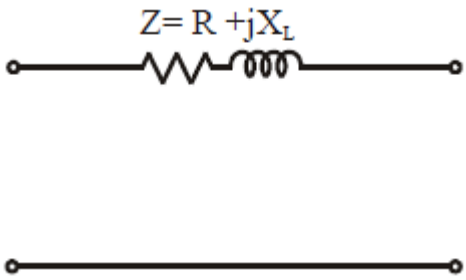
Para llevar a cabo un análisis eléctrico de una línea de transmisión, es indispensable emplear una representación mediante modelos que simulen con precisión su comportamiento ante el flujo de corriente alterna. La selección del modelo más apropiado depende fundamentalmente de la distancia que abarca la línea y de la frecuencia con la que opera el sistema eléctrico. (Alcayde-García et al., 2022)

- **Modelo Serie (líneas cortas)**

En el caso de las líneas de transmisión de corta longitud, los efectos asociados a la capacitancia pueden ser ignorados sin comprometer de manera relevante la exactitud del análisis. Por esta razón, se recurre a un modelo simplificado que incorpora únicamente una impedancia en serie, la cual refleja tanto la resistencia óhmica como la reactancia inductiva del conductor. Por tanto, esta simplificación facilita los cálculos en tramos de extensión limitada. (Xiao et al., 2025)

Ilustración 16

Modelo Línea Corta para longitudes menores a 80 km



Fuente: (Xiao, 2025)

- **Modelo pi (líneas medias)**

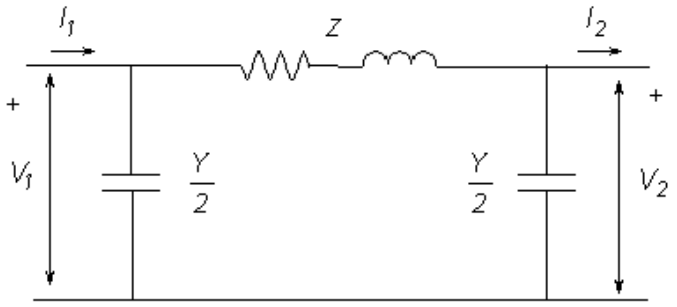
Cuando se trata de líneas de transmisión de extensión media, los efectos capacitivos deben ser considerados, ya que su influencia se vuelve significativa. Para ello, se utiliza el modelo π, el cual incorpora una impedancia en serie que representa las características resistivas e inductivas del

conductor, junto con dos ramas capacitivas ubicadas en los extremos, encargadas de simular la admitancia distribuida entre la línea y el suelo. Este modelo ofrece una representación adecuada para analizar aspectos como la caída de tensión, la regulación del voltaje y el comportamiento del flujo de potencia activa y reactiva en sistemas de longitud intermedia. (Xiao et al., 2025)

El modelo en T constituye otra alternativa válida para representar líneas de transmisión de longitud media. A diferencia del modelo π, en esta configuración la admitancia se coloca en la parte central del circuito, mientras que las impedancias serie se distribuyen equitativamente en ambos extremos. Si bien ambos esquemas proporcionan resultados comparables, la selección entre ellos suele depender de criterios matemáticos o de las particularidades de la herramienta de análisis que se emplee. (Sánchez et al., 2022)

Ilustración 17

Modelo Línea Media para longitudes entre 80 km y 250 km



Fuente: (Xiao, 2025)

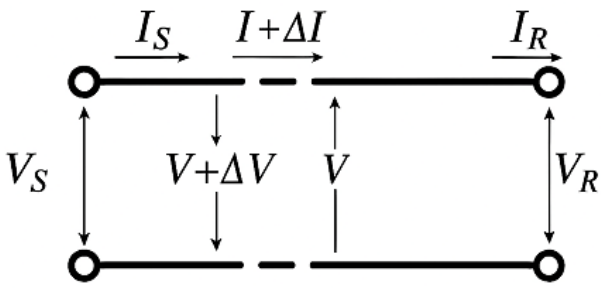
- **Modelo Distribuido (líneas largas)**

Cuando las líneas de transmisión alcanzan longitudes considerablemente extensas, ya no es válido tratar sus parámetros eléctricos como si estuvieran agrupados en puntos específicos. La representación del comportamiento de la línea se realiza mediante el uso de un modelo distribuido, en el que parámetros como la resistencia, la inductancia, la capacitancia y la conductancia se encuentran repartidos a lo largo de toda su longitud. Este enfoque se sustenta en ecuaciones

diferenciales que describen con mayor precisión la propagación de las señales y la aparición de fenómenos transitorios, permitiendo analizar el impacto de estos efectos sobre la calidad de la energía suministrada. Además, mediante el uso de funciones hiperbólicas, es posible establecer relaciones precisas entre las variables eléctricas presentes en ambos extremos de la línea. (Xiao et al., 2025)

Ilustración 18

Modelo Línea Larga para longitudes mayores a 250 km



Fuente: (Xiao, 2025)

2.2.3 Distribución

Según lo planteado por (Widl et al., 2020), la electricidad constituye un recurso clave para el desarrollo social y económico, al estar integrada en casi todas las actividades humanas, desde el entorno doméstico hasta los procesos industriales. La distribución eléctrica constituye el tramo del sistema encargado de transportar la energía desde los centros de generación hasta los puntos de consumo, garantizando un suministro continuo y confiable. Este proceso se desarrolla a lo largo de extensas distancias, lo que exige infraestructuras robustas capaces de adaptarse a las condiciones geográficas propias de cada zona. La dispersión territorial de las poblaciones y la localización alejada de determinadas fuentes de generación convierten a la eficiencia de las redes de distribución en un reto técnico permanente.

En esta fase final del sistema eléctrico, la energía es entregada a los usuarios bajo niveles adecuados de tensión y criterios de seguridad operativa. Para ello, se emplean transformadores y redes de distribución que acondicionan la electricidad para su utilización en ámbitos residenciales, comerciales e industriales. La operación de estas redes demanda además la incorporación de dispositivos de maniobra y protección, como interruptores y seccionadores, que permiten controlar y administrar el flujo de energía de forma segura. Asimismo, se integran mecanismos de protección selectiva que, al detectar una falla, aíslan únicamente la zona afectada, permitiendo que el resto del sistema continúe operando sin interrupciones. (Widl et al., 2020)

2.2.3.1 Tipos de Redes

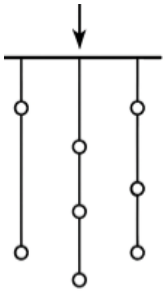
La energía eléctrica se distribuye desde las subestaciones de transformación hacia los usuarios finales a través de la red de distribución, que es gestionada por las compañías responsables de este servicio. Esta red consta de dos etapas principales: primero, la energía se desplaza mediante una red conocida como de reparto, la cual forma anillos alrededor de las zonas de mayor consumo para facilitar su entrega eficiente. Después, la energía circula por la red de media tensión, que normalmente trabaja con niveles de voltaje entre 3 kV y 30 kV y está diseñada en una estructura mallada para asegurar la continuidad del suministro eléctrico. (Noori et al., 2021)

- **Red Radial**

Este tipo de red emplea una única línea de suministro, lo que implica que los consumidores cuentan con una sola ruta posible para recibir la energía. Se utiliza principalmente en zonas rurales, debido a que el costo de suministro es menor al cubrir extensas áreas con cargas dispersas y baja densidad. (Noori et al., 2021)

Ilustración 19

Red radial



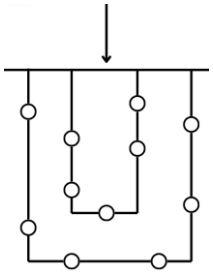
Fuente: (Noori, 2021)

- **Red en Bucle o en Anillo**

Este tipo de red cuenta con dos rutas posibles para el suministro, permitiendo que los consumidores sean alimentados por cualquiera de ellas. Sin embargo, durante la operación habitual, solo una ruta se mantiene activa, mientras que la otra permanece abierta y se utiliza únicamente en caso de falla. (Noori et al., 2021)

Ilustración 20

Bucle abierto



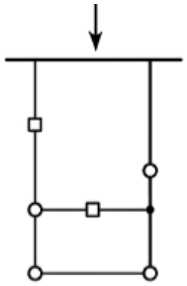
Fuente: (Noori, 2021)

- **Red Mallada**

La red mallada se conforma al entrelazar anillos y líneas radiales que forman una estructura en malla. Entre sus beneficios destacan la mayor seguridad en el servicio, la flexibilidad en la alimentación y la facilidad para realizar tareas de mantenimiento. Las salidas de línea pueden contar con respaldo proveniente de circuitos o ramas primarias adyacentes, aunque generalmente operan en configuración de bucle abierto. (Kumar et al., 2021)

Ilustración 21

Red mallada



Fuente: (Noori, 2021)

2.3 Flujo de Potencia

Los estudios de flujos de potencia son de gran importancia en la planeación y diseño de la expansión futura de los sistemas de potencia, así como también en la determinación de las mejores condiciones de operación de los sistemas existentes. La información principalmente que se obtiene de un estudio de flujos de potencia es la magnitud y el ángulo de fase del voltaje en cada barra y las potencias real y reactiva que fluyen en cada línea. Sin embargo, se puede obtener gran cantidad de información adicional que es valiosa, a través de la salida impresa de los programas de computadora que usan las compañías eléctricas de generación. Uno de los procedimientos

computacionales más comúnmente usados en análisis de sistemas de potencia, es el cálculo de flujo de potencia o flujo de potencia como tradicionalmente es llamado. (Wang et al., 2020)

La planificación, diseño y operación de sistemas de potencia requiere de tales cálculos para analizar el rendimiento en régimen permanente del sistema de potencia bajo variedad de condiciones operativas y a estudiar los efectos de cambios de configuración y equipos. El análisis de flujo de potencia se lleva a cabo mediante programas computacionales especializados que permiten modelar y evaluar redes eléctricas complejas. El objetivo central radica en determinar, a partir de los datos disponibles sobre la demanda eléctrica en cada nodo y la potencia generada por las unidades asociadas, los flujos de energía que circulan por las líneas de transmisión y los transformadores, así como establecer la magnitud y el ángulo de tensión en cada barra del sistema. El análisis de este comportamiento bajo distintas condiciones de operación resulta indispensable para asegurar que el sistema eléctrico mantenga niveles adecuados de desempeño, al tiempo que se reducen los costos vinculados con la inversión y la operación. Entre los principales usos de estos estudios se encuentran los siguientes. (Wang et al., 2020)

- La determinación de las cargas en los circuitos
- La estimación de los voltajes en régimen permanente
- La evaluación del flujo de potencia reactiva
- El cálculo de pérdidas en el sistema
- El ajuste de los niveles de excitación de los generadores y reguladores
- La simulación de su comportamiento ante escenarios de emergencia

Dado que las redes eléctricas presentan configuraciones complejas con múltiples trayectorias conectadas en serie y en paralelo, este tipo de análisis resulta indispensable para comprender y optimizar la distribución de energía en todo el sistema. (Wang et al., 2020)

2.3.1 Tipos de Barras

Desde la aparición de los primeros artículos técnicos, en los que se introdujeron los algoritmos para el análisis de flujo de potencia, se ha desarrollado una amplia variedad de métodos iterativos. Muchas de estas metodologías son adaptaciones o mejoras de dos enfoques fundamentales ampliamente utilizados en la actualidad: el método de Gauss-Seidel y el método de Newton-Raphson. En la mayoría de los programas comerciales dedicados a estudios de flujo de potencia, se emplean variaciones del método de Newton, debido a su eficiencia computacional y robustez. (Li et al., 2025)

Estos algoritmos resuelven el conjunto de ecuaciones nodales expresadas en términos de la matriz de admitancia, lo que ha contribuido a su uso generalizado. Esta formulación resulta especialmente conveniente, tanto por la simplicidad que ofrece en la organización de los datos como por la facilidad con la que puede construirse y modificarse la matriz de admitancia de barra para distintos escenarios. En el contexto de un estudio de flujo de potencia, los principales parámetros considerados son los siguientes. (Li et al., 2025)

$\mathcal{P}$: Potencia activa en la red

$\mathcal{Q}$: Potencia reactiva en la red

$|V|$: Magnitud del voltaje de barra

δ: Ángulo del voltaje de barra a una referencia común

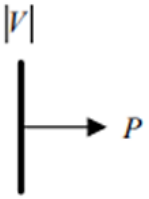
2.3.1.1 Barra Tipo P-V o Barra de Generación

En las barras conocidas como tipo P-V o barras de generación, se fijan normalmente dos variables: la potencia activa y el valor absoluto del voltaje. Estos parámetros son controlables gracias a los sistemas de regulación del generador, específicamente el gobernador para la potencia

activa y el sistema de excitación para el voltaje. Por lo general, se establecen límites para la potencia reactiva, que dependen de las características específicas de cada máquina. (Li et al., 2025)

Ilustración 22

Barra Tipo P-V



Fuente: (Li, 2025)

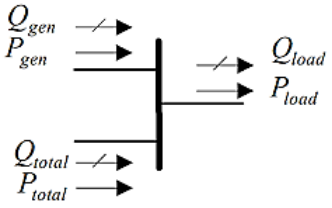
En estas barras, las incógnitas que se deben calcular son el ángulo del voltaje y la potencia reactiva total que se inyecta. (Li et al., 2025)

2.3.1.2 Barra tipo P-Q o Barra de Carga

Estas barras, comúnmente denominadas barras de carga, se caracterizan porque se conocen tanto la potencia activa como la potencia reactiva totales que se inyectan en ellas, es decir, P_{total} , Q_{total}. También es posible especificar la potencia activa junto con el factor de potencia, $S\ y\ cos\ \phi$. (Li et al., 2025)

Ilustración 23

Barra tipo P-Q



Fuente: (Li, 2025)

En el análisis de flujo de carga, las variables desconocidas que se deben calcular para este tipo de barras son la magnitud y el ángulo del voltaje. (Li et al., 2025)

2.3.1.3 Barra Tipo Slack, Oscilante o de Compensación

En los sistemas eléctricos de transmisión, las pérdidas no se conocen de antemano, por lo que se designa una barra especial llamada barra oscilante o swing bus, donde no se especifica la potencia activa P. En esta barra se fijan el voltaje $|V|$ y el ángulo δ, el cual se mantiene constante durante el cálculo, funcionando como referencia angular para todo el sistema. Esta barra también es conocida como barra de referencia, ya que sus valores de potencia activa y reactiva son variables y ajustan las pérdidas totales de la red. La elección de esta barra debe hacerse cuidadosamente, preferiblemente seleccionando una que se comporte como una barra de potencia infinita. Usualmente se asigna el número uno a esta barra, la cual está conectada a la generación principal y es fundamental para resolver el flujo de potencia. (Li et al., 2025)

2.3.2 Método de Newton Raphson

El procedimiento de Newton-Raphson es un algoritmo numérico iterativo que permite encontrar valores aproximados de soluciones para ecuaciones no lineales. Este método comienza con un valor inicial propuesto, que se introduce en una función obtenida de la ecuación a resolver. A partir de este primer cálculo, se genera una nueva estimación que se vuelve a evaluar en el mismo proceso. Con cada repetición, el resultado se acerca más a la solución exacta, siempre que el valor inicial haya sido elegido de forma adecuada. (Ali et al., 2024)

Según (Ali et al., 2024), para aplicar el método de Newton-Raphson a la resolución de las ecuaciones de flujo de carga, es necesario expresar las tensiones nodales y las admitancias de línea en coordenadas polares. De este modo, se pueden obtener las expresiones que describen la potencia activa y reactiva en cada nodo del sistema eléctrico. Estas ecuaciones permiten evaluar los

desbalances de potencia a partir de las magnitudes y ángulos de las tensiones, y son fundamentales para construir el sistema no lineal que se resuelve iterativamente. A continuación, se presentan las ecuaciones de potencia activa y reactiva por nodo:

$$P_i = |V_i|^2 G_{ii} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^{N} |V_i|\,|V_n||Y_{in}| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \tag{3}$$

$$Q_i = -|V_i|^2 B_{ii} + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq i}}^{N} |V_i|\,|V_n||Y_{in}| \sin(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \tag{4}$$

Donde:

P_i: Potencia activa inyectada en el nodo i.

Q_i: Potencia reactiva inyectada en el nodo i.

$|V_i|$, $|V_n|$: Magnitud de la tensión en los nodos i y n.

Y_{in} : Admitancia compleja entre el nodo i y n.

G_{ii}: Parte real de la admitancia (conductancia) en el nodo i.

B_{ii}: Parte imaginaria de la admitancia (susceptancia) en el nodo i.

δ_i , δ_n : ángulos de fase de los voltajes en los nodos i y n.

θ_{in}: Ángulo de la admitancia entre los nodos i y n.

N: Número total de los nodos del sistema.

En estas expresiones, los términos que incluyen G_{ii} y B_{ii} derivan directamente de la definición de la matriz de admitancias del sistema, mientras que los ángulos representan el desfase entre las tensiones nodales y los elementos de la red. Estas ecuaciones constituyen el núcleo del modelo matemático sobre el cual se construye la matriz Jacobiana y se calcula el flujo de carga. (Ali et al., 2024)

A continuación, se presentan las expresiones matemáticas que permiten calcular los errores de potencia activa y reactiva durante el proceso iterativo de solución del flujo de potencia mediante el método de Newton-Raphson. Estas fórmulas permiten evaluar la convergencia del método en cada iteración. (Ali et al., 2024)

$$\Delta P_i = P_{i,prog} - P_{i,cale} \tag{5}$$

$$\Delta Q_i = Q_{i,prog} - Q_{i,cale} \tag{6}$$

Donde:

ΔP_i : Error de potencia activa en la barra i.

ΔQ_i: Error de potencia reactiva en la barra i.

$P_{i,prog}$: Potencia activa especificada en la barra i.

$P_{i,cale}$: Potencia activa calculada de valores estimados de ángulos y voltajes en la iteración.

$Q_{i,prog}$: Potencia reactiva especificada en la barra *i.*

$Q_{i,cale}$: Potencia reactiva calculada en la barra *i.*

Algo importante también para tener en cuenta es que para cada iteración del método de Newton-Raphson aplicado al cálculo del flujo de potencia, los valores de las variables de ángulo y magnitud de voltaje se actualizan mediante las siguientes expresiones. (Ali et al., 2024)

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta_i^{(k)} \tag{7}$$

$$|V_i|^{(k+1)} = |V_i|^{(k)} + \Delta|V_i|^{(k)} = |V_i|^{(k)}(1 + \frac{\Delta|V_i|^{(k)}}{|V_i|^{(k)}}) \tag{8}$$

Donde:

$\delta_i^{(k)}$: Ángulo de voltaje estimado en la barra *i* durante la iteración *k*.

$\Delta\delta_i^{(k)}$: Incremento del ángulo obtenido.

$|V_i|^{(k)}$: Magnitud de voltaje estimada en la iteración k.

$\Delta|V_i|^{(k)}$: Incremento de la magnitud de voltaje.

$\delta_i^{(k+1)} y\ |V_i|^{(k+1)}$: Son los valores actualizados que servirán como punto de partida en la siguiente iteración.

Estas ecuaciones aseguran la progresiva aproximación de las variables de estado a su solución final, de manera que se satisfagan las ecuaciones de equilibrio de potencia en todas las barras del sistema. (Ali et al., 2024)

2.4 DIgSILENT PowerFactory

PowerFactory es un software especializado desarrollado por la empresa DIgSILENT GmbH, orientado al análisis, simulación y planificación de sistemas eléctricos de potencia. Esta herramienta informática ha sido ampliamente adoptada en entornos académicos, industriales y de investigación debido a su precisión en los cálculos y su capacidad para modelar redes eléctricas complejas. En términos generales, PowerFactory permite representar y estudiar el comportamiento de sistemas eléctricos en distintas condiciones de operación, tanto en régimen permanente como en situaciones transitorias. (DIgSILENT GmbH, 2020)

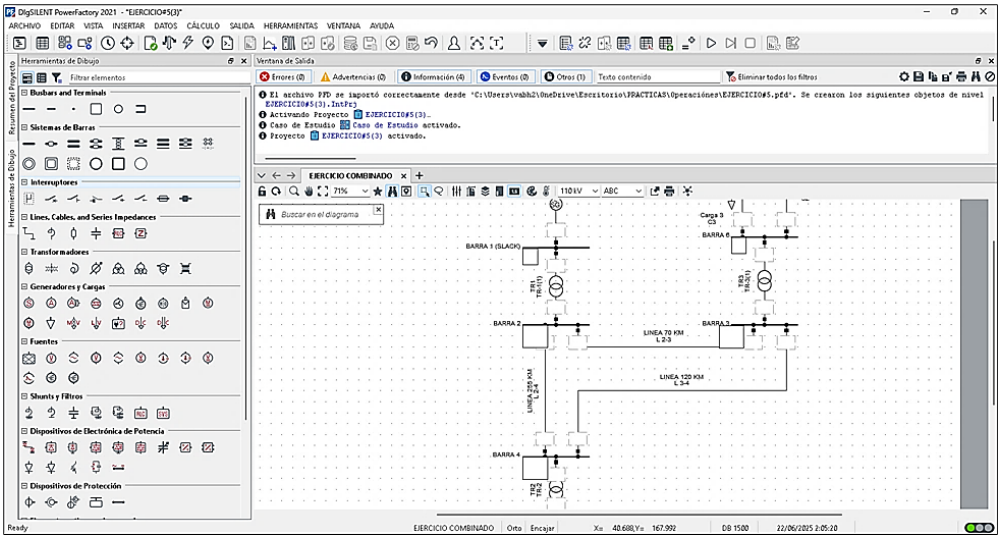
Debido a su arquitectura modular y capacidad de ampliación, la herramienta permite representar desde instalaciones industriales de pequeña escala hasta sistemas eléctricos de potencia complejos, incorporando generación renovable, redes inteligentes, microrredes y configuraciones híbridas. Su desarrollo se apoya en estándares internacionales, entre ellos la norma IEC 60909 para estudios de cortocircuito, lo que asegura resultados consistentes y compatibles con los requerimientos normativos vigentes. De forma adicional, la plataforma dispone de una interfaz gráfica que simplifica la elaboración de diagramas unifilares y el uso de funciones de análisis, sin exigir conocimientos avanzados de programación. Por todo ello, PowerFactory se ha posicionado

como una plataforma robusta y versátil que apoya tanto el proceso de enseñanza-aprendizaje como el desarrollo de estudios técnicos de alto nivel en el campo de la ingeniería eléctrica. (DIgSILENT GmbH, 2020)

Además, es una herramienta desarrollada por la empresa DIgSILENT, cuyo nombre corresponde a las iniciales en inglés de "Simulación Digital de Redes Eléctricas". Desde sus primeras versiones, se distinguió por ofrecer una interfaz visual que permite representar sistemas eléctricos mediante esquemas unifilares, facilitando así la edición y análisis de redes. Este software fue diseñado por un equipo multidisciplinario con experiencia en ingeniería eléctrica y programación, lo que permitió integrar funciones avanzadas para la evaluación tanto en condiciones estables como dinámicas. Actualmente, PowerFactory es empleado por múltiples entidades alrededor del mundo para labores de planificación, operación y análisis de sistemas eléctricos, lo que evidencia su fiabilidad y precisión técnica. (DIgSILENT GmbH, 2020)

Ilustración 24

Ventana principal de PowerFactory



Fuente: (DIgSILENT GmbH, 2020)

2.4.1 Aplicaciones y ventajas en la simulación de sistemas eléctricos

Según (DIgSILENT GmbH, 2020), PowerFactory es una plataforma computacional especializada que permite desarrollar modelos eléctricos complejos, realizar simulaciones detalladas y llevar a cabo análisis precisos sobre el comportamiento de redes de potencia. Este entorno de trabajo ha sido ampliamente adoptado en el ámbito industrial gracias a su diseño intuitivo y a la diversidad de herramientas que proporciona para estudiar diferentes aspectos de los sistemas eléctricos. Entre sus principales funcionalidades se encuentran:

- **Análisis de Flujo de Potencia:** Facilitan el cálculo de tensiones, corrientes y potencias activas/reactivas bajo distintas condiciones operativas.
- **Cálculos de Cortocircuito:** Útil para estudiar el impacto de cortocircuitos y diseñar esquemas de protección adecuados.
- **Análisis Dinámico:** Orientadas a simular la respuesta del sistema ante perturbaciones y a estudiar su estabilidad en el tiempo.
- **Modelado Avanzado:** Permite representar con precisión componentes como generadores, transformadores, líneas de transmisión y sistemas FACTS o HVDC.
- **Estudios de Calidad de Energía:** Enfocado en examinar fenómenos como armónicos, fluctuaciones de voltaje o flicker.
- **Simulación de Transitorios Electromagnéticos:** permiten simular eventos de corta duración con gran nivel de detalle para capturar efectos rápidos en la red.

➢ **Ventajas**

De acuerdo con (DIgSILENT GmbH, 2020), PowerFactory es una herramienta especializada que permite realizar estudios detallados sobre sistemas eléctricos mediante simulaciones precisas. Entre sus principales atributos destacan los siguientes:

- **Alta Precisión en los Cálculos:** Emplea algoritmos sofisticados que permiten obtener resultados confiables en redes de gran complejidad.
- **Adaptabilidad a Distintas Configuraciones:** Es apto para el estudio de sistemas eléctricos trifásicos o monofásicos, tanto en condiciones balanceadas como desbalanceadas.
- **Interfaz Gráfica Eficiente:** Dispone de un entorno visual personalizable que simplifica la representación y análisis de redes eléctricas.
- **Integración de múltiples análisis:** posibilita la ejecución, dentro de una sola plataforma, de estudios de flujo de carga, estabilidad dinámica y análisis de transitorios electromagnéticos.
- **Interoperabilidad:** admite la importación y exportación de información mediante formatos normalizados como CIM e IEC, lo que facilita su intercambio con otras herramientas empleadas en el sector eléctrico.

2.4.2 ¿Por qué Usar esta Herramienta?

Una de las principales fortalezas de PowerFactory radica en su capacidad para poder concentrar múltiples funcionalidades dentro de una misma plataforma, lo cual permite realizar estudios eléctricos sin recurrir a diversos programas complementarios. Esta integración facilita el modelado, análisis y simulación del sistema eléctrico de forma más eficiente, reduciendo el tiempo requerido para el desarrollo de proyectos y disminuyendo la posibilidad de errores. Al permitir ejecutar desde estudios de flujo de carga hasta simulaciones dinámicas o análisis de fuentes renovables en un entorno unificado, se optimizan tanto los procesos técnicos como operativos. (DIgSILENT GmbH, 2020)

Como afirma (DIgSILENT GmbH, 2020), PowerFactory fue concebido como una solución integral orientada al análisis de sistemas eléctricos de potencia, albergando en un solo entorno todas las funcionalidades necesarias para el desarrollo de estudios técnicos. Entre sus capacidades más relevantes se encuentran:

- Organización y edición de escenarios de simulación, incluyendo algoritmos numéricos y opciones de visualización de resultados.
- Implementación de esquemas unifilares interactivos con capacidad de edición directa sobre los elementos de red.
- Almacenamiento centralizado de información técnica mediante una base de datos que incorpora parámetros eléctricos, configuraciones de red y casos de análisis.
- Cálculo automático de parámetros eléctricos a partir de información física o técnica disponible, como la registrada en placas de identificación de los equipos.
- Configura modelos de red que pueden ser supervisados mediante conexión SCADA o administrados de forma local.
- Permite la integración con sistemas geográficos y plataformas de mapeo mediante el uso de interfaces genéricas.

Esta arquitectura integrada permite a los usuarios desarrollar, desde una sola plataforma, distintos estudios eléctricos, entre ellos flujo de carga, análisis de fallas, evaluación de armónicos, estudios de estabilidad y coordinación de protecciones, sin recurrir al uso de aplicaciones externas adicionales. (DIgSILENT GmbH, 2020)

2.4.3 Comparación de PowerFactory con otros Programas de Simulación

La decisión sobre qué software utilizar para simulación eléctrica depende principalmente del tipo de análisis que se requiera, la precisión deseada y la facilidad con que se puedan modelar los sistemas. PowerFactory destaca por su robustez en simulaciones dinámicas, su entorno visual intuitivo y su versatilidad para analizar sistemas interconectados complejos. No obstante, existen otras plataformas que aportan ventajas puntuales según el tipo de estudio requerido. ETAP mantiene una amplia aceptación en el ámbito industrial para estudios de cortocircuito y coordinación de protecciones, aunque su desempeño resulta más restringido cuando se abordan análisis de carácter dinámico. PSCAD destaca por su solidez en la simulación de transitorios electromagnéticos, pero su alcance se reduce al tratar evaluaciones globales del sistema eléctrico. MATLAB/Simulink ofrece un entorno flexible para tareas de modelado y control; sin embargo, exige un mayor nivel de programación y no se orienta específicamente a estudios operativos de redes de potencia. CYME, en particular mediante el módulo CYMFAULT, presenta un buen desempeño en análisis de redes de distribución y fallas, aunque con alcances limitados en estudios dinámicos. Finalmente, PowerWorld resulta adecuado para fines formativos, como flujos de carga y evaluaciones básicas de estabilidad, pero no alcanza el nivel de profundidad técnica que proporciona PowerFactory. La tabla comparativa adjunta facilita la justificación para elegir la herramienta más adecuada según el alcance y nivel de detalle de los estudios. (DIgSILENT GmbH, 2020)

Tabla 1

Comparativa de PowerFactory con otros programas

Software	Aplicaciones principales	Ventajas	Limitaciones
PowerFactory	Flujo de potencia, cortocircuito, EMT, dinámica.	Alta precisión, interfaz amigable, integración de múltiples estudios, modelos avanzados de FACTS y HVDC.	Requiere hardware potente para simulaciones complejas.
ETAP	Flujo de potencia, cortocircuito, dinámica.	Intuitivo, amplio uso en la industria, integración con normativas internacionales.	Limitado en análisis EMT y modelado detallado de transitorios rápidos.
PSCAD	Transitorios electromagnéticos (EMT)	Precisión en análisis de alta frecuencia, adecuado para HVDC, FACTS y convertidores electrónicos.	Menor enfoque en cálculos de flujo de potencia o análisis dinámicos.
MATLAB/Simulink	Simulación de sistemas dinámicos.	Versatilidad, integración con múltiples librerías, adecuado para investigación.	No está especializado en sistemas eléctricos, interfaces menos intuitivas para ingenieros eléctricos.

CYME (CYMFAULT)	Flujo de potencia, cortocircuito.	Especializado en redes de distribución, modelos adaptados para redes secundarias.	Menor uso en estudios de grandes sistemas o redes de transmisión.
PowerWorld	Flujo de potencia, estabilidad.	Interfaz gráfica sencilla, ideal para enseñanza y análisis de grandes sistemas.	Limitado en transitorios electromagnéticos o modelado detallado de componentes electrónicos.

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

2.4.4 Interfaz de Usuario y Herramientas Básicas

Según (DIgSILENT GmbH, 2020), al comenzar a utilizar PowerFactory, lo primero que suele destacarse es su interfaz de usuario. Aunque en un inicio puede percibirse como técnica o incluso compleja, esta ha sido diseñada con el propósito de facilitar y estructurar el trabajo con sistemas eléctricos de potencia. En efecto, su disposición contribuye a una organización eficiente de las tareas, permitiendo que, con el tiempo, el usuario se familiarice progresivamente con las funciones y herramientas del software, dentro de las cuales es posible identificar lo siguiente:

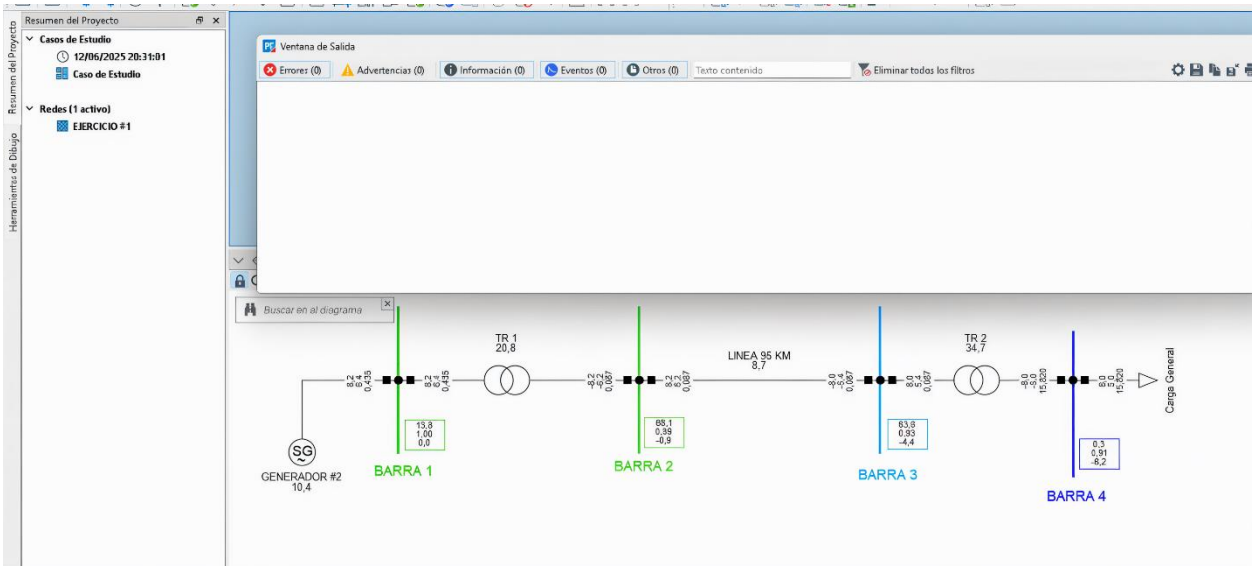
- Descripción del software
- Herramientas de dibujo
- Gráficas de red
- Data Manager
- Casos de estudio, escenarios de operación, variaciones
- Librería de proyectos

- Ventana de salida

Inicialmente, las ventanas del entorno gráfico están fijadas a la interfaz principal, pero el usuario tiene la opción de modificar su tamaño o cambiar su ubicación según sea necesario. Para reposicionarlas, basta con seleccionar la barra superior de la ventana y arrastrarla hacia la nueva ubicación deseada. Si esta acción se realiza cerca de un área que permita su integración, el sistema mostrará una guía visual usualmente de color azul que indica la posibilidad de acoplamiento en ese punto. (DIgSILENT GmbH, 2020)

Ilustración 25

Acoplar una ventana de herramientas



Fuente: (DIgSILENT GmbH, 2020)

Las herramientas visuales del entorno también ofrecen la posibilidad de ser reorganizadas manualmente. Los íconos se agrupan en bloques que pueden identificarse mediante separadores; estos bloques son desplazables al hacer clic sobre dicho separador y arrastrarlo hasta la ubicación deseada. En caso de requerir la configuración original, el usuario puede utilizar la función de

restablecimiento de diseño ubicada en el menú principal “Ventana”, lo cual devuelve los paneles a su disposición por defecto. Cabe señalar que esta acción no modifica los esquemas gráficos internos, ya que forman parte de los parámetros propios del estudio desarrollado. (DIgSILENT GmbH, 2020)

2.4.4.1 Características Clave de la Interfaz de Usuario

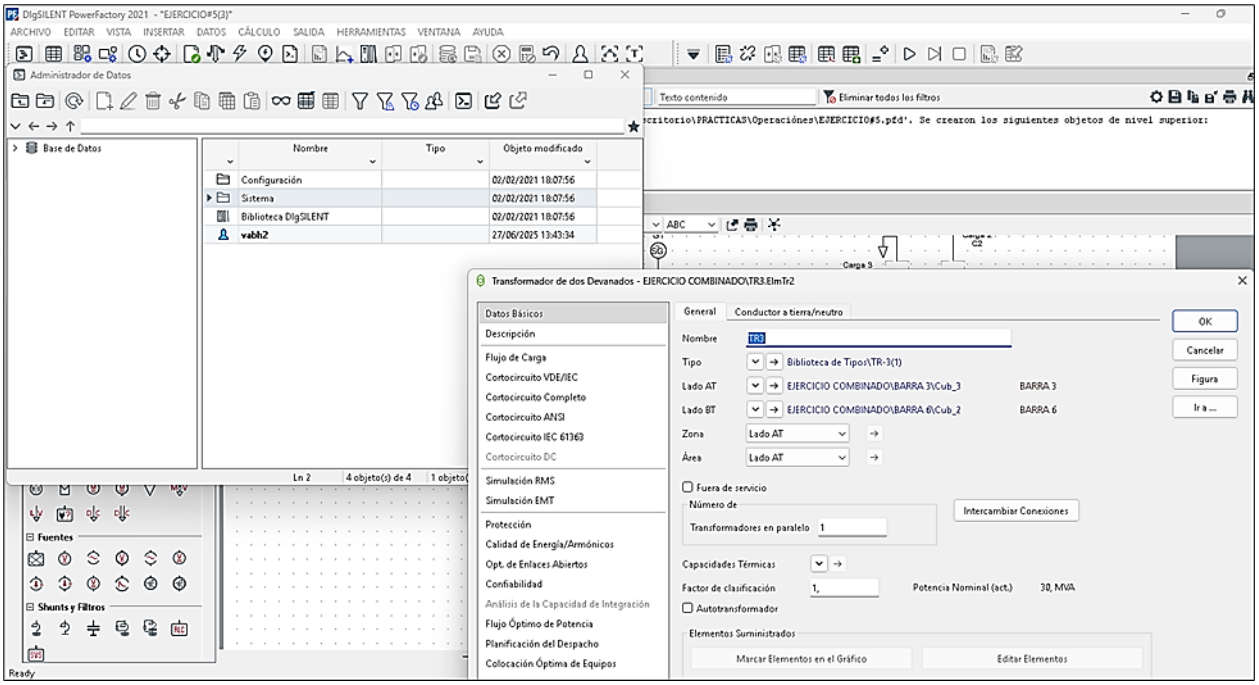
Según (DIgSILENT GmbH, 2020) , las funciones clave de la ventana principal incluyen:

- La ventana principal presenta la versión del software instalada junto con los controles habituales que permiten minimizar, maximizar, restaurar el tamaño, redimensionar la interfaz y cerrar correctamente la aplicación.
- Dispone de una barra de menú desde la cual se accede a distintas opciones desplegables que conducen a los comandos disponibles para la configuración y gestión del entorno de trabajo.
- La barra de herramientas principal incorpora diversos botones y accesos directos que facilitan la ejecución rápida de acciones frecuentes dentro del software.
- El Editor Gráfico permite la visualización y edición de diagramas unifilares, diagramas de bloques y representaciones gráficas asociadas al proyecto activo, habilitando la modificación directa de los modelos implementados.
- Al seleccionar un objeto con el botón derecho del mouse, ya sea en el Editor Gráfico o en el Administrador de Datos, se habilita un menú contextual que muestra las opciones disponibles para dicho elemento.
- Mediante un doble clic sobre un objeto, el sistema abre una ventana de edición estructurada en pestañas, donde los parámetros se organizan según su función específica dentro del modelo.

- El Administrador de Datos opera de forma similar a un explorador de archivos, mostrando en un panel lateral la estructura jerárquica de la base de datos y, en el panel principal, el contenido detallado de la carpeta seleccionada.
- La ventana de salida está situada en la parte inferior de la pantalla principal; esta ventana no puede cerrarse, pero sí puede minimizarse.
- Por defecto, el Resumen del Proyecto aparece en el lado izquierdo de la interfaz, ubicado entre la barra de herramientas y la ventana de resultados.
- Las Herramientas de Dibujo se encuentran también en el lado izquierdo, proporcionando un acceso rápido a funciones gráficas.

Ilustración 26

Interfaz de usuario de PowerFactory



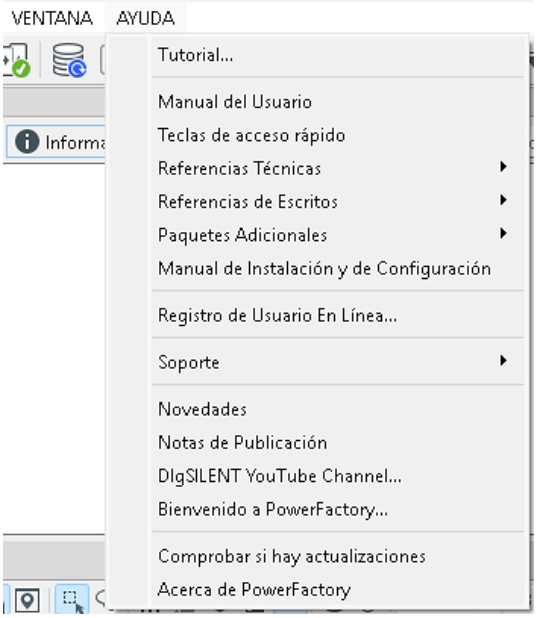
Fuente: (DIgSILENT GmbH, 2020)

2.4.4.2 Barra de Menú

La barra de menús en PowerFactory agrupa las funciones principales del software, cada una desplegando un conjunto de comandos al hacer clic o usar la combinación de teclas Alt con la letra subrayada. Algunas opciones permanecen inactivas (en gris) hasta que se active un proyecto o un modo de cálculo correspondiente. (DIgSILENT GmbH, 2020)

Ilustración 27

El menú de ayuda en la barra



Fuente: (DIgSILENT GmbH, 2020)

Para acceder al tutorial, basta con presionar Alt + H para abrir el menú de ayuda y seleccionar el tutorial con el teclado. Asimismo, el manual del usuario está disponible en ese mismo menú, desde donde se puede abrir su versión electrónica haciendo clic en la opción indicada. (DIgSILENT GmbH, 2020)

2.4.4.3 La Barra de Herramientas

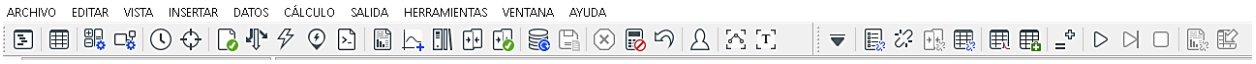
La barra de herramientas principal en PowerFactory permite un acceso ágil a las funciones más utilizadas dentro del programa. Los botones que aparecen atenuados en gris solo se activan cuando su uso es pertinente en el contexto actual. Cada uno de los iconos dispone de una breve descripción que se muestra automáticamente al situar el cursor sobre ellos sin realizar ninguna acción. Para ejecutar una función específica, el usuario debe hacer clic con el botón izquierdo del ratón sobre el icono correspondiente. Los iconos que realizan una acción regresan a su estado inicial tras completar la tarea, aunque algunos, como el botón que maximiza la ventana de resultados, permanecen activos hasta que se desactivan manualmente al presionarlos nuevamente. (DIgSILENT GmbH, 2020)

De acuerdo con (DIgSILENT GmbH, 2020), las funciones más utilizadas durante un análisis están distribuidas de forma que su acceso resulte inmediato para el usuario. En la parte superior de la interfaz se localizan diferentes barras, las cuales están divididas según el tipo de acción que permiten ejecutar:

- Manipulación y ajuste de componentes del sistema
- Ejecución de procesos de simulación
- Configuración de los modos de visualización
- Vínculos rápidos a procedimientos como estudios de carga, fallas eléctricas, análisis de armónicos, evaluación de estabilidad, entre otros

Ilustración 28

Barra de herramientas

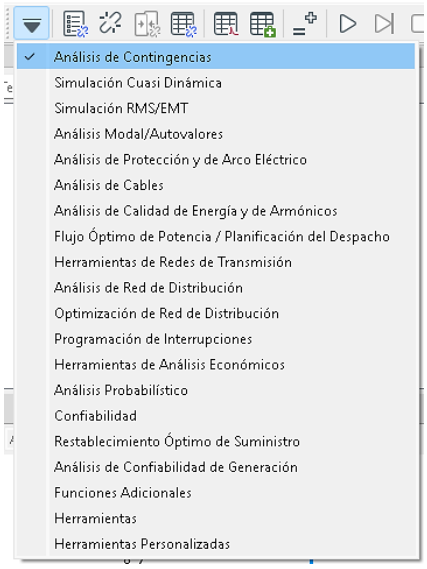


Fuente: (DIgSILENT GmbH, 2020)

Con el fin de reducir la cantidad de iconos visibles en la barra de herramientas, el sistema organiza ciertos comandos en grupos según el tipo de análisis. Estos solo se despliegan al seleccionar una categoría específica desde el icono correspondiente a la Caja de herramientas. En la imagen de referencia, se observa que el usuario ha elegido la opción de Simulación RMS/EMT, lo cual provoca que se muestren únicamente los iconos asociados a ese tipo de estudios, ubicados a la derecha del icono principal. En caso de que se seleccione, por ejemplo, el Análisis de Confiabilidad, los iconos ubicados en esa misma zona se actualizan automáticamente para reflejar las herramientas propias de dicho análisis. (DIgSILENT GmbH, 2020)

Ilustración 29

Cambiar la selección de la caja de herramientas



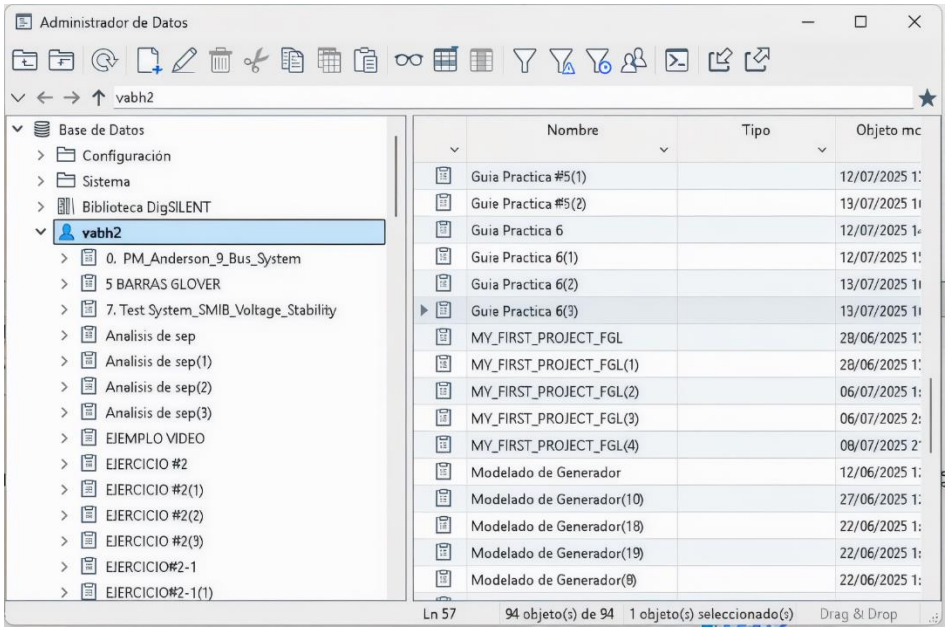
Fuente: (DIgSILENT GmbH, 2020)

2.4.4.4 La Estructura General

DIgSILENT PowerFactory opera bajo una lógica estructural centrada en proyectos, donde cada estudio se guarda dentro de una base de datos identificada como Project. Al iniciar el programa, se presenta una ventana inicial que permite crear un nuevo proyecto, abrir uno ya existente o revisar ejemplos preinstalados. Esta forma de organización facilita el manejo ordenado de los diferentes análisis, especialmente cuando se trabaja con múltiples simulaciones o con diversas variantes de un mismo sistema eléctrico. (DIgSILENT GmbH, 2020)

Ilustración 30

Modelos de los principales elementos de un sistema eléctrico en el software



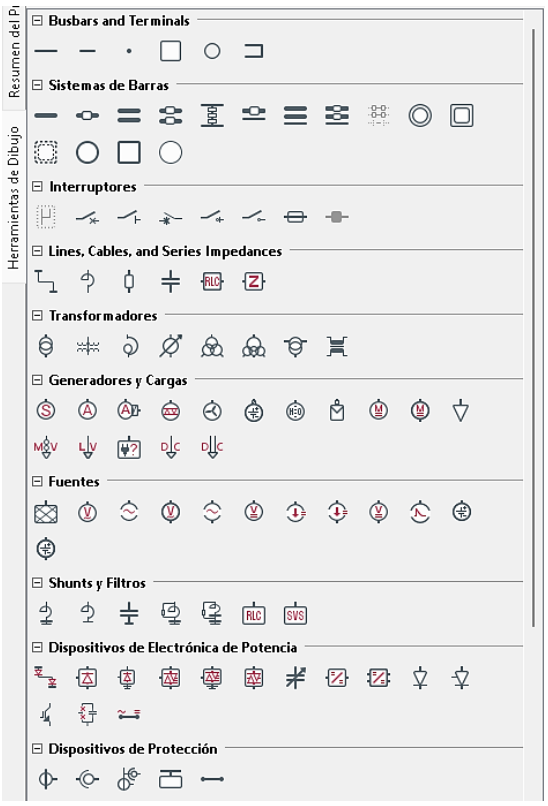
Fuente: (DIgSILENT GmbH, 2020)

2.4.4.5 La Ventana Gráfica

En la parte central de la interfaz se encuentra el editor de redes eléctricas, conocido como Network Editor, el cual permite diseñar gráficamente el sistema a estudiar. Los elementos pueden incorporarse arrastrándolos desde la barra de herramientas o seleccionándolos mediante el menú contextual, lo que facilita su conexión para formar el esquema unifilar. Una vez que se dominan los símbolos utilizados, esta vista se convierte en una herramienta clara y de uso intuitivo. (DIgSILENT GmbH, 2020)

Ilustración 31

Funciones y herramientas del software DIgSILENT PowerFactory



Fuente: (DIgSILENT GmbH, 2020)

Si se requiere visualizar más de un esquema de forma simultánea, el entorno permite dividir la pantalla en sentido vertical u horizontal. Esta funcionalidad puede gestionarse haciendo clic derecho sobre las pestañas de gráficos, lo que permite mover, duplicar o crear nuevas divisiones según las necesidades del análisis. (DIgSILENT GmbH, 2020)

2.4.4.6 Propiedades y Configuración de Equipos

Al hacer doble clic sobre cualquier componente dentro del sistema, por ejemplo, una carga o un transformador, se accede a una ventana donde es posible registrar los datos técnicos esenciales, incluyendo potencias, niveles de tensión, impedancias y parámetros de control, entre

otros aspectos. Esta etapa es vital, ya que la precisión del análisis depende en gran medida de la exactitud de los datos introducidos. (DIgSILENT GmbH, 2020)

2.4.4.7 Modos de Operación y Estudios

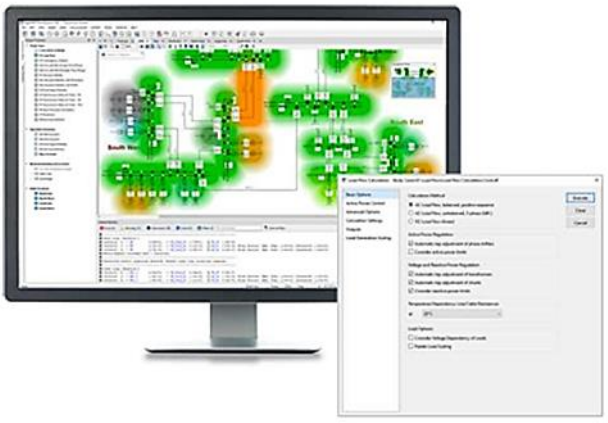
Como afirma (DIgSILENT GmbH, 2020), entre las funcionalidades más relevantes de PowerFactory se encuentra la posibilidad de alternar entre diversos modos de análisis, tales como:

- Estudios de flujo de carga
- Evaluaciones de cortocircuitos
- Análisis armónicos
- Entre otros tipos de estudio

Cada modo se habilita mediante un menú o botón específico, facilitando la realización de investigaciones detalladas sobre el comportamiento del sistema eléctrico bajo distintas condiciones. (DIgSILENT GmbH, 2020)

Ilustración 32

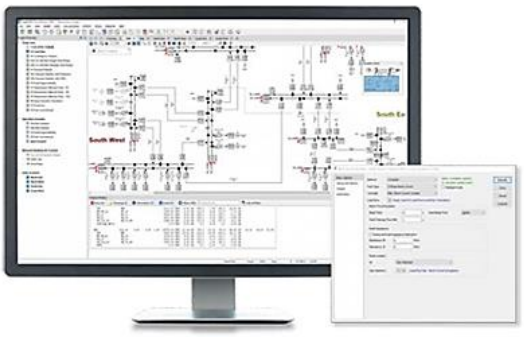
Modelos y análisis de flujo de carga en sistemas eléctricos



Fuente: (DIgSILENT GmbH, 2020)

Ilustración 33

Modelo y análisis de flujo de cortocircuito en sistemas eléctricos



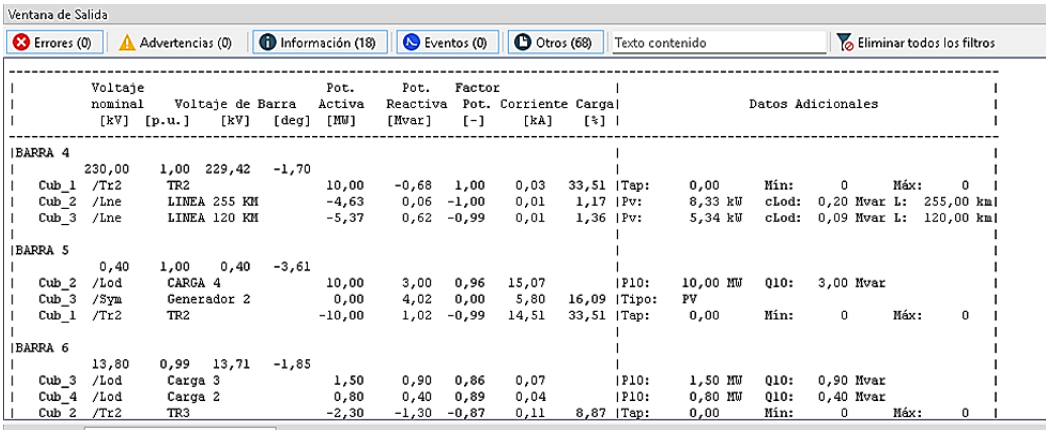
Fuente: (DIgSILENT GmbH, 2020)

2.4.4.8 Ventana de Resultados

Al finalizar la ejecución de una simulación, los resultados se presentan en una ventana dedicada, la cual puede exhibir tablas, informes o incluso notas superpuestas al diagrama unifilar. (DIgSILENT GmbH, 2020)

Ilustración 34

Ventana de resultados



Ventana de Salida

Errores (0) | Advertencias (0) | Información (18) | Eventos (0) | Otros (68) | Texto contenido | Eliminar todos los filtros

```
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
|          Voltaje                          Pot.      Pot.   Factor                |                                          |
|          nominal    Voltaje de Barra   Activa   Reactiva  Pot. Corriente Carga|                Datos Adicionales         |
|           [kV]  [p.u.]    [kV]   [deg]  [MW]    [Mvar]    [-]     [kA]    [%] |                                          |
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------
|BARRA 4                                                                         |                                          |
|         230,00    1,00  229,42   -1,70                                         |                                          |
|   Cub_1  /Tr2      TR2                 10,00    -0,68   1,00    0,03   33,51 |Tap:     0,00      Mín:      0      Máx:     0  |
|   Cub_2  /Lne      LINEA 255 KM        -4,63     0,06  -1,00    0,01    1,17 |Pv:      8,33 kW   cLod:  0,20 Mvar L:  255,00 km|
|   Cub_3  /Lne      LINEA 120 KM        -5,37     0,62  -0,99    0,01    1,36 |Pv:      5,34 kW   cLod:  0,09 Mvar L:  120,00 km|
|                                                                                |                                          |
|BARRA 5                                                                         |                                          |
|           0,40    1,00    0,40   -3,61                                        |                                          |
|   Cub_2  /Lod      CARGA 4             10,00     3,00   0,96   15,07         |P10:    10,00 MW   Q10:   3,00 Mvar              |
|   Cub_3  /Sym      Generador 2          0,00     4,02   0,00    5,80   16,09 |Tipo:   PV                                  |
|   Cub_1  /Tr2      TR2                -10,00     1,02  -0,99   14,51   33,51 |Tap:     0,00      Mín:      0      Máx:     0  |
|                                                                                |                                          |
|BARRA 6                                                                         |                                          |
|          13,80    0,99   13,71   -1,85                                         |                                          |
|   Cub_3  /Lod      Carga 3              1,50     0,90   0,86    0,07         |P10:     1,50 MW   Q10:   0,90 Mvar               |
|   Cub_4  /Lod      Carga 2              0,80     0,40   0,89    0,04         |P10:     0,80 MW   Q10:   0,40 Mvar               |
|   Cub_2  /Tr2      TR3                 -2,30    -1,30  -0,87    0,11    8,87 |Tap:     0,00      Mín:      0      Máx:     0  |
```

Fuente: (DIgSILENT GmbH, 2020)

2.4.5 Modelado de Componentes

El proceso de construcción de sistemas eléctricos en PowerFactory se basa, en gran medida, en la incorporación de componentes como generadores, cargas y líneas de transmisión, los cuales permiten reflejar condiciones operativas reales con precisión. Para ello, el entorno proporciona herramientas gráficas junto con una organización estructurada de datos que posibilitan definir, configurar y enlazar estos elementos dentro de esquemas eléctricos, tanto en configuraciones unifilares como en sistemas con distintos niveles de tensión. (DIgSILENT GmbH, 2020)

- **Generación**

En PowerFactory, el proceso de modelación de generación se lleva a cabo mediante distintos elementos que varían según el tipo de tecnología que se desee representar. El componente denominado ElmSym es utilizado para incorporar máquinas síncronas convencionales, permitiendo configurar aspectos eléctricos como potencia, tensión, impedancia interna, inercia y estrategias de control. Por su parte, tecnologías renovables como la eólica y la solar pueden modelarse a través de objetos como ElmGenstat, diseñado para generación estática, y ElmGenpvsys, enfocado en sistemas fotovoltaicos conectados a red. (DIgSILENT GmbH, 2020)

A estos modelos pueden añadirse módulos de control dinámico, tales como AVR (regulación de voltaje), GOV (gobernadores de velocidad) y PSS (sistemas estabilizadores), fundamentales para evaluar la estabilidad del sistema ante condiciones variables. (DIgSILENT GmbH, 2020)

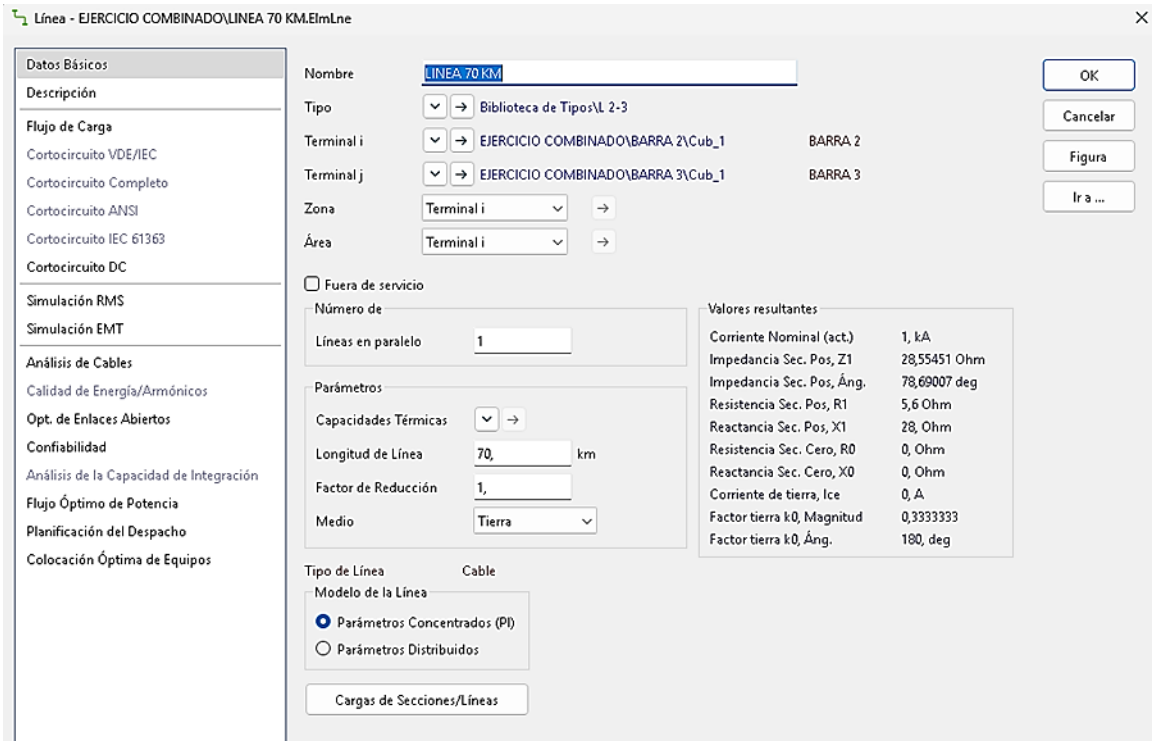
- **Líneas de Transmisión**

El objeto ElmLne en PowerFactory permite la representación de líneas eléctricas, ya sean aéreas o subterráneas, dentro de un sistema de potencia. Este modelo admite la configuración de

características como la longitud del tramo, el tipo de conductor utilizado, parámetros de impedancia longitudinal, susceptancia transversal, límites térmicos, geometría física y el modelo eléctrico correspondiente (como representación en π o distribuida). En la ventana de propiedades del componente se identifican los dos terminales conectados denominados i y j, junto con los cubículos asociados, que constituyen el punto real de vinculación con el nodo eléctrico. (DIgSILENT GmbH, 2020)

Ilustración 35

Edición de una línea de transmisión



Fuente: (DIgSILENT GmbH, 2020)

En dicha interfaz se puede modificar el nombre del cubículo, establecer la conectividad de fases, y agregar o retirar dispositivos como interruptores. Además, la herramienta permite segmentar líneas en varias secciones, definir interacciones entre conductores y asociar curvas

térmicas específicas para evaluar su comportamiento ante sobrecargas. Estas capacidades son esenciales para realizar simulaciones realistas en estudios de flujo de potencia o cortocircuito bajo diversas condiciones operativas. (DIgSILENT GmbH, 2020)

- **Cargas Eléctricas**

Dentro de PowerFactory, el modelado de cargas eléctricas se realiza a través del elemento ElmLod. Este permite incluir tanto cargas monofásicas como trifásicas, las cuales pueden presentar estados equilibrados o desequilibrados. Para cada carga, es posible definir la potencia activa y reactiva, además del factor de potencia correspondiente. Asimismo, se pueden establecer perfiles temporales que reflejan la variación del consumo a lo largo del tiempo. El comportamiento de estas cargas puede configurarse para ser constante o para responder dinámicamente a cambios en parámetros como la tensión o la frecuencia eléctrica. (DIgSILENT GmbH, 2020)

El software facilita la asociación de las cargas con diversos escenarios operativos y estados específicos de carga, lo que resulta útil para realizar estudios de planificación y simulaciones dinámicas. La incorporación de cargas puede realizarse directamente desde la interfaz gráfica del entorno de trabajo, mientras que los ajustes requeridos para análisis más detallados se gestionan mediante el Data Manager. La representación rigurosa de generadores, líneas y cargas conforma el soporte fundamental para el armado de redes eléctricas que reflejen condiciones reales de operación. En este contexto, DIgSILENT PowerFactory ofrece herramientas especializadas para la interconexión de estos componentes, la simulación de distintos escenarios operativos y la ejecución de estudios técnicos como flujo de carga, estabilidad, cortocircuito y calidad de energía. (DIgSILENT GmbH, 2020)

2.4.6 Tipos de Estudios Eléctricos

Según (DIgSILENT GmbH, 2020), PowerFactory ofrece un entorno completo para realizar distintos tipos de análisis eléctricos, los cuales resultan esenciales en la evaluación, planificación y operación segura de sistemas de potencia. Entre los estudios más comunes y relevantes se incluyen:

- **Estudio de Flujo de Carga (Load Flow):** permite determinar cómo se distribuyen las potencias activas y reactiva a lo largo del sistema bajo diversas condiciones de operación. Su aplicación resulta determinante para comprobar que los niveles de tensión y los márgenes de carga permanezcan dentro de los rangos permitidos.
- **Análisis de cortocircuito:** determina las corrientes de falla en distintos puntos de la red, conforme a lineamientos internacionales como la IEC 60909, información necesaria para una selección adecuada de los sistemas de protección.
- **Evaluación de estabilidad:** reproduce la respuesta dinámica del sistema ante perturbaciones, tales como desconexiones de carga o fallas, mediante modelos que describen el comportamiento transitorio del sistema eléctrico.
- **Estudio de armónicos:** examina las distorsiones asociadas a la calidad de la energía, originadas principalmente por cargas no lineales, y contrasta los resultados con criterios establecidos en normas como la IEEE 519.

De forma complementaria, DIgSILENT PowerFactory dispone de herramientas para análisis de confiabilidad, estudios de flujo óptimo de potencia, evaluaciones económicas y simulaciones transitorias de carácter electromagnético. La integración de estos módulos en un único entorno posiciona al software como una plataforma de simulación avanzada, ampliamente utilizada en el análisis de sistemas eléctricos de potencia. (DIgSILENT GmbH, 2020)

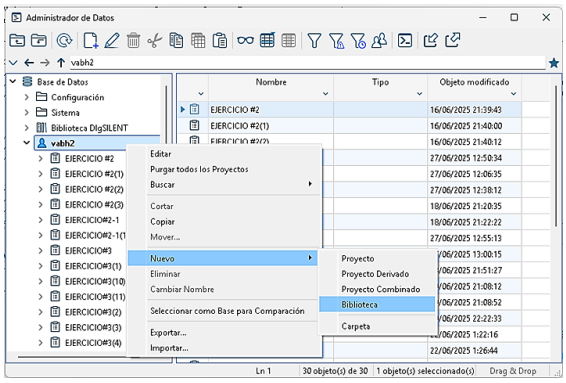
2.4.7 Limitaciones y Consideraciones

Aunque PowerFactory es una herramienta ampliamente reconocida por su capacidad de simulación y análisis en sistemas eléctricos, su implementación no está exenta de ciertas restricciones operativas y técnicas que deben considerarse, especialmente al trabajar con modelos adaptados. El entorno está optimizado para funcionar exclusivamente sobre sistemas Microsoft Windows, y su compatibilidad puede verse comprometida por determinadas políticas de red, software antivirus o configuraciones administrativas. Asimismo, el acceso mediante licencias flotantes requiere una configuración específica del servidor, lo que podría limitar la conexión simultánea desde diferentes equipos si no se gestiona adecuadamente. (DIgSILENT GmbH, 2020)

Por otra parte, desde el punto de vista del modelado, a pesar de contar con una biblioteca extensa de componentes eléctricos, no todos los elementos permiten simulación dinámica. Esta característica impone restricciones en estudios que dependen de representaciones transitorias o análisis de estabilidad, los cuales podrían requerir el uso de estructuras simplificadas o bloques con modelos previamente definidos por el sistema. (DIgSILENT GmbH, 2020)

Ilustración 36

Creación de una biblioteca global definida por el usuario



Fuente: (DIgSILENT GmbH, 2020)

Durante la realización de simulaciones dinámicas, es fundamental ajustar correctamente parámetros como el intervalo total de análisis, el tamaño de los pasos de integración y las condiciones que determinan el fin de la simulación. Una configuración inadecuada puede derivar en resultados numéricamente inestables. (DIgSILENT GmbH, 2020)

En lo que respecta a la gestión de datos, PowerFactory opera sobre una estructura jerárquica en la que se organizan variantes de análisis, configuraciones operativas y modelos dinámicos. Si no se respetan las relaciones de dependencia entre los objetos del proyecto, pueden surgir errores en la ejecución, pérdida de información o incoherencias en los resultados. Asimismo, cuando se emplean scripts desarrollados por el usuario, ya sea en DSL, DPL o Python, es necesario realizar una validación exhaustiva para asegurar que no interfieran con la ejecución del entorno ni generen comportamientos no deseados. (DIgSILENT GmbH, 2020)

Por otro lado, aunque PowerFactory ofrece compatibilidad para la importación de modelos procedentes de plataformas como CIM, PSS/E o PSCAD, este proceso requiere revisión manual, ya que pueden presentarse diferencias en la interpretación de ciertos parámetros o en la representación del comportamiento eléctrico. Si no se realizan los ajustes necesarios, podrían producirse discrepancias sustanciales en los resultados. Por ello, aunque estas limitaciones no imposibilitan el uso eficiente del programa, sí demandan un enfoque riguroso en la validación de modelos y en la aplicación de buenas prácticas de simulación para garantizar la confiabilidad del análisis. (DIgSILENT GmbH, 2020)

3 Capítulo III: Metodología

El presente trabajo se enmarca en una investigación de tipo aplicada, ya que su propósito es desarrollar una guía práctica que permita fortalecer el aprendizaje de los contenidos técnicos abordados en las asignaturas de Sistemas Eléctricos de Potencia. Esta investigación busca aplicar el conocimiento teórico en ejercicios reales simulados mediante el uso de un software comercial especializado, contribuyendo a una formación más integral y práctica para los estudiantes.

Asimismo, se adopta un enfoque cualitativo-descriptivo, ya que no se realiza recolección estadística de datos, sino que se describe el proceso de modelamiento, simulación y análisis de diferentes escenarios eléctricos con base en criterios técnicos y pedagógicos. El desarrollo de las prácticas se sustentó en la interpretación de resultados y la aplicación de conocimientos previos de Ingeniería Eléctrica.

3.1 Diseño Metodológico

El diseño metodológico aplicado en este trabajo fue de carácter documental, experimental y secuencial. El trabajo inició con una revisión bibliográfica enfocada en los fundamentos de los sistemas eléctricos de potencia, sustentada en literatura técnica especializada, el manual de DIgSILENT PowerFactory y fuentes teóricas relacionadas con el modelamiento y análisis de componentes eléctricos. A partir de este soporte conceptual, se diseñaron y ejecutaron seis prácticas de laboratorio con una estructura progresiva, orientadas al estudio sistemático de los elementos esenciales de los SEP.

Cada práctica fue realizada de forma detallada, partiendo del planteamiento del caso, la configuración del modelo en PowerFactory, la ejecución de la simulación y el análisis de los resultados obtenidos.

3.2 Materiales y Recursos Utilizados

Para el desarrollo de las guías prácticas se utilizaron los siguientes materiales y herramientas:

Tabla 2

Materiales y recursos utilizados en la guía práctica

Elemento	Descripción
Software Principal	DIgSILENT PowerFactory/ Módulo AEL-MPSS-10
Recursos Técnicos	Información de bibliografías académicas y el Manual de usuario PowerFactory
Hardware	Ordenador de escritorio o Laptop
Apoyo Documental	Contenido de las asignaturas de SEP I

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

3.3 Plan de Acción Metodológico

Para poder llevar a cabo todo el desarrollo de esta tesis, fue necesario organizar bien cada etapa del trabajo, por lo cual se estableció un plan de acción que ayudó a tener claro qué se debía hacer, en qué orden y con qué objetivo. Este plan incluyó las metas que se buscaban alcanzar, las actividades necesarias para lograrlas, quiénes eran los responsables y el tiempo estimado para cada parte. También se tomaron en cuenta algunos indicadores que permitieron verificar si se estaba cumpliendo con lo propuesto. En la siguiente tabla se muestra un resumen general de este proceso.

Tabla 3

Plan de acción metodológico

Objetivos	Metas	Actividades	Verificación	Responsables
Diseñar una guía práctica aplicable a la carrera de Ingeniería Eléctrica	Contar con seis prácticas desarrolladas y documentadas	Selección de temas, diseño de modelos en PowerFactory, simulación y análisis	Prácticas completas, funcionales y validadas en el software	Autores encargados de la investigación
Aplicar conceptos teóricos en entornos simulados	Simular condiciones de SEP reales mediante ejercicios técnicos	Elaboración de esquemas, carga de datos técnicos y análisis de resultados	Resultados coherentes con la teoría	Autores encargados de la investigación
Validar el enfoque didáctico y técnico de la guía	Garantizar que la guía sea clara y útil para estudiantes	Revisión y organización de las prácticas con instrucciones paso a paso	Redacción estructurada y secuencial	Autores encargados de la investigación
Documentar la metodología y resultados en el trabajo final	Presentar correctamente la información en formato de tesis	Redacción de capítulos metodológicos y edición final del documento	Documento estructurado conforme al reglamento académico	Autores encargados de la investigación

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

3.4 Procedimiento de las Prácticas

Las seis prácticas que se realizaron están enfocadas en el modelado de los elementos fundamentales del SEP: generadores, barras, líneas de transmisión y cargas. Aplicando diferentes tipos de líneas (corta, media y larga distancia), configurando sus respectivos modelos equivalentes. El objetivo fue identificar el impacto de estos elementos en el flujo de potencia y en la distribución del sistema, utilizando como base ejemplos o ejercicios que fueron desarrollados a lo largo de la materia de SEP 1.

3.4.1 Práctica 1 – Modelado Inicial del Sistema en PowerFactory

En la primera práctica se desarrolló el sistema base que serviría como referencia para todas las actividades posteriores. Para ello se creó un proyecto nuevo en PowerFactory y se modelaron los componentes fundamentales: barra slack, generador síncrono y carga general. Esta práctica tuvo como propósito familiarizar al estudiante con la interfaz del software, la inserción de elementos y la configuración de sus parámetros eléctricos. Además, se estableció el procedimiento estándar para ejecutar el flujo de carga y generar reportes, de modo que las siguientes prácticas pudieran basarse en esta misma estructura de modelamiento, garantizando uniformidad en la construcción de los escenarios de simulación.

3.4.2 Práctica 2 – Modelado Analítico de los Parámetros RLC de la Línea

En la segunda práctica se abordó el cálculo analítico de los parámetros eléctricos de la línea de transmisión empleando un conductor ACSR tipo Pheasant. La resistencia, la reactancia inductiva y la susceptancia capacitiva fueron obtenidas a partir de sus formulaciones teóricas, incorporando factores propios de las líneas reales, como el efecto piel, el efecto de proximidad, la geometría de los conductores y la separación entre fases. Estos elementos influyen de manera

directa en el comportamiento eléctrico de la línea y condicionan los valores finales de sus parámetros.

La práctica tuvo como finalidad analizar el procedimiento de obtención de los valores unitarios de R, X_L y B, los cuales posteriormente fueron ingresados en el software de simulación. Este enfoque permitió reforzar la relación entre los fundamentos de la teoría electromagnética y su aplicación práctica en el modelado de líneas de transmisión, facilitando la interpretación de los resultados obtenidos tanto de forma analítica como computacional.

3.4.3 Práctica 3, 4 y 5 – Modelado de Línea Corta, Media y Larga

Estas prácticas aplican los fundamentos adquiridos en el modelamiento analítico de los parámetros RLC, manteniendo los mismos datos base, tipo de conductor, configuración geométrica y criterios de diseño; variando únicamente la longitud de la línea. Dado que la distancia condiciona el comportamiento eléctrico, en cada práctica se emplea el modelo correspondiente según la clasificación de la línea:

- Para la línea corta, se aplicaron las ecuaciones simplificadas propias del modelo de parámetros concentrados.
- Para la línea de media distancia, se utilizó el modelo π, incorporando los efectos de la admitancia transversal.
- Para la línea larga, se implementó el modelo de parámetros distribuidos, considerando la propagación a lo largo de toda la línea.

Esto permitió analizar cómo los parámetros equivalentes varían con la distancia y cómo cada modelo representa de forma más adecuada el comportamiento real del sistema.

3.4.4 Práctica 6 – Modelado del Sistema Basado en los datos del Módulo AEL-MPSS-10 del laboratorio de Potencia

La sexta práctica se ejecutó de forma presencial empleando el módulo AEL-MPSS-10 del laboratorio de potencia, con el propósito de contrastar los resultados teóricos previamente obtenidos con el comportamiento real del sistema. Para ello, se plantearon cuatro escenarios de estudio, los cuales fueron desarrollados inicialmente mediante procedimientos analíticos, utilizando los parámetros característicos del módulo. Una vez determinados los valores teóricos correspondientes a cada caso, se procedió a la implementación experimental en el equipo físico. Esta metodología permitió establecer una comparación directa entre los resultados calculados y los datos registrados durante las pruebas en el módulo, facilitando el análisis de posibles variaciones y la validación del modelo propuesto.

4 Capítulo IV: Resultados

4.1 Sistema Eléctrico de Potencia

4.1.1 Guía de Práctica N° 01 – Modelado de Generador, Barra y Carga

Tema: Modelamiento de Generador, barra y carga.

Objetivo: Modelar y simular un sistema de generación eléctrica compuesto por un generador, barra y carga definiendo sus parámetros y características.

Marco Teórico:

Un sistema eléctrico de potencia está conformado por un conjunto de infraestructuras y dispositivos cuya función es permitir la generación, transformación, transporte, distribución y utilización de la energía eléctrica, buscando siempre optimizar la calidad del servicio al menor costo posible. Este tipo de sistema incluye centrales generadoras, responsables de producir la energía demandada por los usuarios, así como redes de transmisión y distribución. Además, cuenta con equipos auxiliares diseñados para garantizar que el suministro eléctrico cumpla con criterios técnicos como continuidad operativa, regulación adecuada de la tensión y estabilidad en la frecuencia. (Baruwa & Fazeli, 2021)

Por su parte, las cargas dentro del sistema se componen de una variedad de dispositivos de uso residencial, comercial e industrial. Estas unidades de consumo, en términos generales, demandan tanto potencia activa como reactiva, especialmente cuando involucran el uso de equipos electrónicos con componentes de conmutación o tecnología de estado sólido. (Tamayo-Guzmán et al., 2021)

Materiales:

- Computadora de escritorio o Laptop
- Software DIgSILENT POWERFACTORY

Desarrollo:

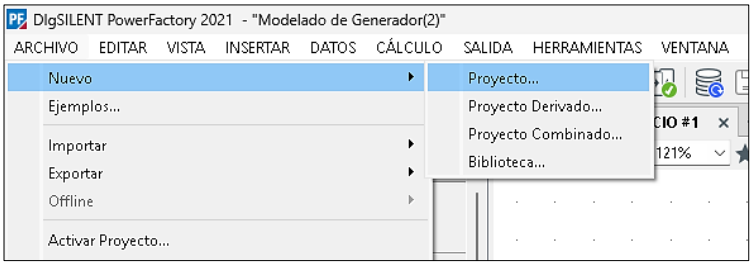
Paso 1:

Se crea un Nuevo Proyecto

1. Se abre PowerFactory → Archivo → Nuevo → Proyecto
2. Se nombra el proyecto (ej.: Modelado_Generador).
3. Se coloca la frecuencia a usar: 60hz.

Ilustración 37

Creación de un nuevo proyecto



Fuente: Elaboración Propia.

Paso 2:

Se define la Barra Slack (BARRA_20kV)

1. **Se agrega una barra**:

    - Se inserta un Busbar o Barra (se hace clic en el ícono de barra que se encuentra en la barra de herramientas en la parte izquierda y se da clic en la ventana gráfica para insertar).

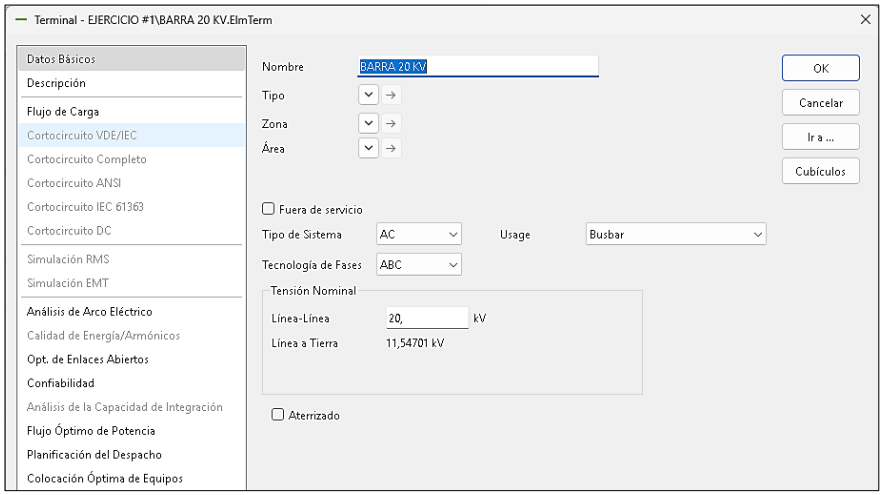
    - **Propiedades de la barra**:

        - Nombre: BARRA_20kV.

        - Voltaje Nominal: 20 kV.

Ilustración 38

Ventana para la inserción de datos de la barra de 20 kV



Fuente: Elaboración Propia.

Nota: ¿Por qué primero agregar una barra y no el generador?, hay que tener en cuenta que para poder conectar o insertar algún elemento diferente a una barra se necesita incluir primero una

barra, ya que PowerFactory trabaja de manera en la que se pueden insertar elementos y conectarlos directamente a una barra para que se pueda visualizar en la ventana gráfica.

Paso 3:

Se crea un Generador

1. **Se inserta el generador:**

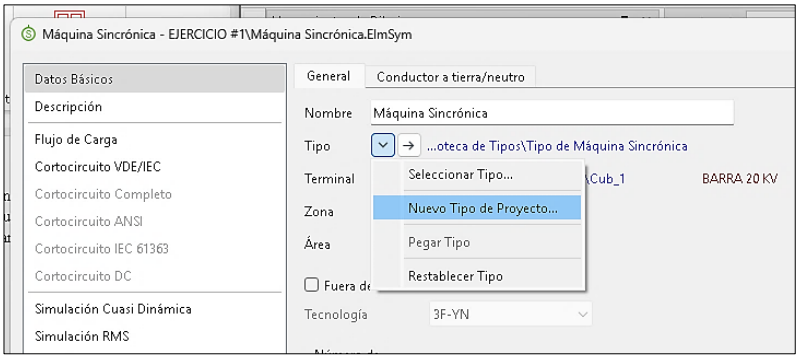
En la barra de herramientas en la sección de Generadores y Cargas, se encuentra la Máquina Síncrona, la cual se selecciona y se agrega a la ventana gráfica para conectar a la Barra de 20 kV.

2. **Se insertan los datos:**

A continuación, se da doble clic en el generador, y en la parte de Datos básicos se encuentra la pestaña llamada "General", la cual sirve para la creación de un nuevo tipo de generador.

Ilustración 39

Sección para la creación de un tipo de generador



Fuente: Elaboración Propia.

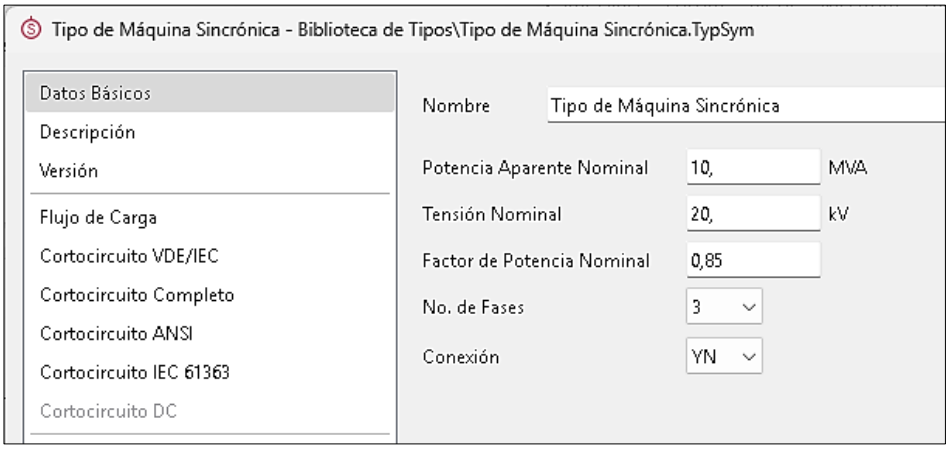
Después de que selecciona “Nuevo tipo de Proyecto” se abrirá la siguiente pestaña (Ilustración 40) en la cual se ingresarán los siguientes datos en “Datos Básicos” y “Flujo de Carga”, como se ve en la imagen.

Datos para ingresar en Datos Básicos:

- Nombre: GEN_10MVA o a su gusto.
- Potencia Aparente Nominal: 10 MVA.
- Tensión Nominal: 20 kV.
- Factor de Potencia Nominal: 0,85.

Ilustración 40

Datos Básicos a ingresar al generador



Fuente: Elaboración Propia.

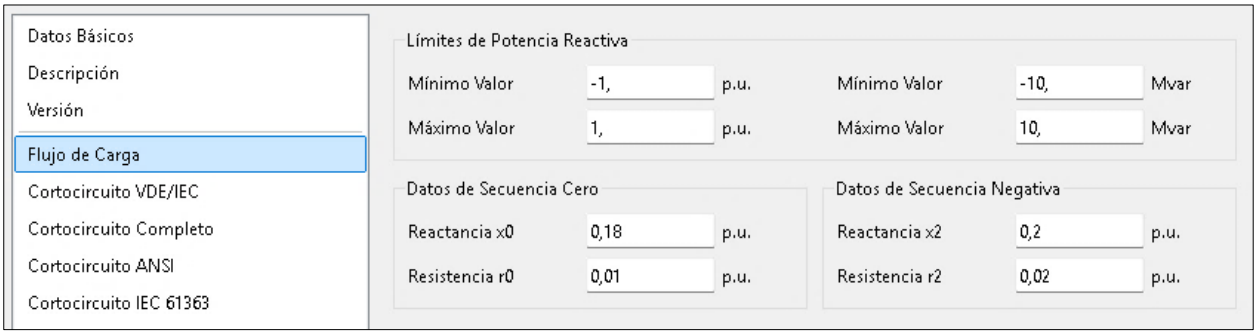
Datos por ingresar en Flujo de Carga:

- En Limites de Potencia Reactiva se deja por default del programa.
- En Secuencia cero y Secuencia negativa:
    - Reactancia x0: 0,18 pu.

- Reactancia r0: 0,01 pu.
- Reactancia x2: 0,2 pu.
- Reactancia r2: 0,02 pu.

Ilustración 41

Datos para Flujo de Carga del Generador



Fuente: Elaboración Propia.

Nota: Luego de haber ingresado los valores en el nuevo tipo de generador, se necesita agregar una carga. Esta permitirá realizar una corrida de flujo del generador, ya que al no incluir algún tipo de carga no se mostrarán valores al realizar el flujo de carga del sistema, debido a que es indispensable colocar uno.

Paso 4:

Se agrega la Carga General

1. **Se inserta la Carga**:

   - Se selecciona, en el apartado de "Generadores y Cargas" de la barra de herramientas, una carga general.
   - Se conecta a la BARRA_20kV.

2. **Propiedades de la carga**:

Se ingresa a los datos de la carga y en el apartado de flujo de carga se colocan los siguientes datos:

- Nombre: CARGA_1.
- Potencia Activa 0.5 MW.
- Potencia Reactiva: 0.1 MVAr.

Paso 5:

Se configura y se ejecuta el Flujo de Carga

1. **Se verifica las conexiones**:

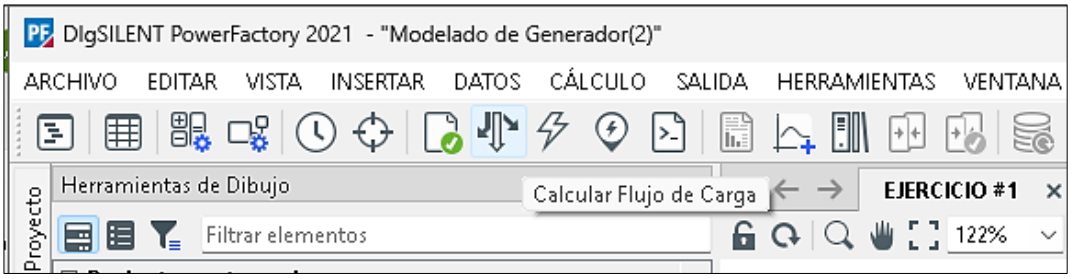
- Se debe asegurar que el generador y la carga estén conectados a la misma barra.

2. **Se ejecuta el flujo de carga**:

- En la parte superior de la caja de herramientas principales, se carga un flujo de carga.
- Aparecerá una ventana y se selecciona “Ejecutar”.

Ilustración 42

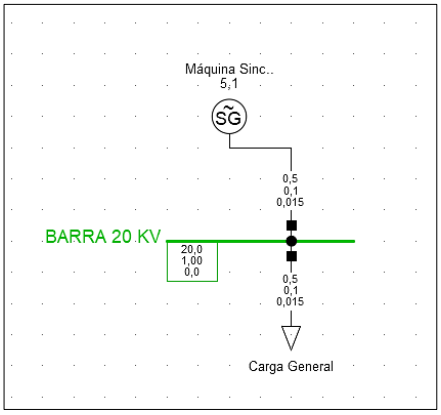
Cálculo de Flujo de Carga



Fuente: Elaboración Propia.

Ilustración 43

Modelado de Generador Síncrono



Fuente: Elaboración Propia.

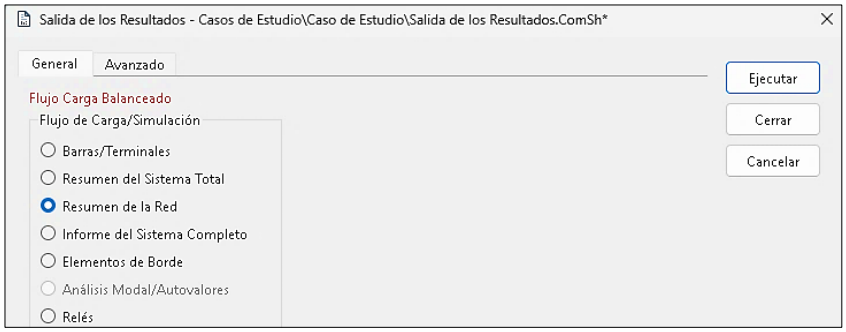
Paso 6:

Se genera el reporte de Flujo de Carga

1. En la parte superior en la pestaña “Salida”, se podrá generar un reporte o datos sobre el sistema. Aparecerá la siguiente ventana, se selecciona “Resumen de la Red”, y se da clic en Ejecutar.

Ilustración 44

Ventana de Reporte de Flujo de Carga

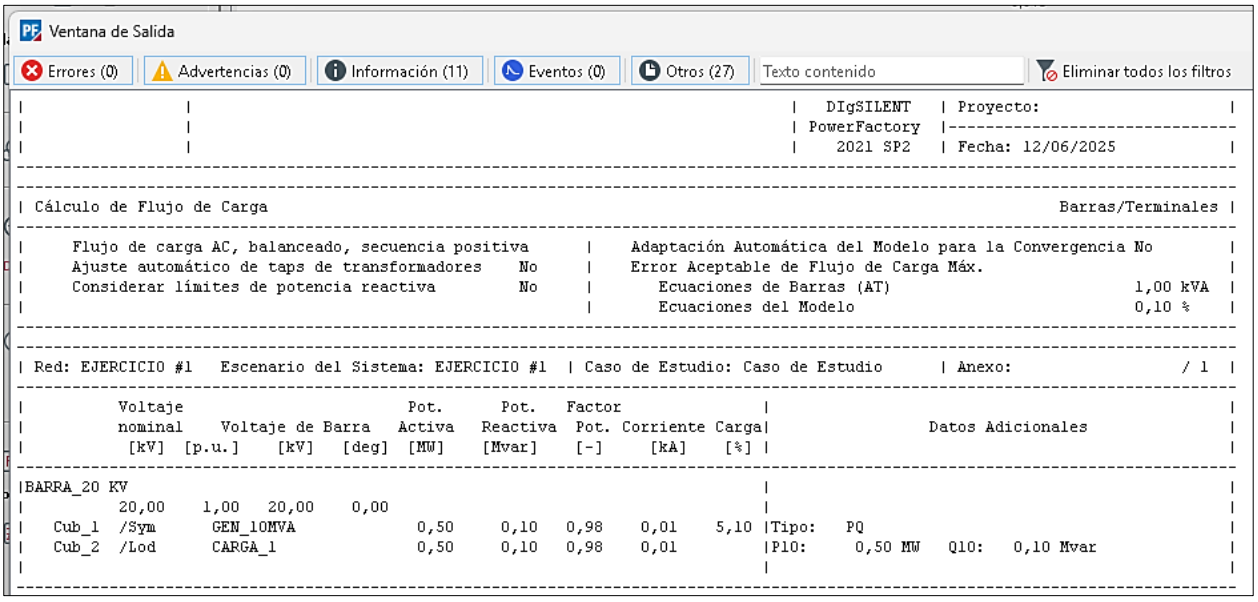


Fuente: Elaboración Propia.

2. Luego en la ventana de salida se muestran los resultados que se obtuvieron al ejecutar un reporte de resumen de la red.

Ilustración 45

Reporte de resultados en la ventana de salida



Fuente: Elaboración Propia.

Conclusión:

Al terminar la práctica se logró armar sin problemas la estructura básica del sistema eléctrico con los elementos principales: el generador, la barra y la carga. Con este modelo fue posible entender cómo funciona el entorno de simulación y comprobar que los valores ingresados coincidían con los resultados obtenidos. Esta práctica sirvió como punto de partida para lo que viene después, ya que permitió tener una base sobre la cual agregar más componentes y trabajar con escenarios más completos del sistema.

4.1.2 Guía de Práctica N° 02 – Modelado de Parámetros de la Línea de Transmisión

Tema: Modelado de Parámetros de la Línea de Transmisión.

Objetivo: Calcular la resistencia AC, reactancia inductiva y susceptancia capacitiva de la línea de transmisión tipo Pheasant.

Marco Teórico:

Cuando una línea de transmisión tiene una gran extensión, no resulta apropiado simplificar sus parámetros eléctricos como si estuvieran concentrados en puntos aislados. Para describir su comportamiento de forma más realista, se recurre al modelo distribuido, el cual considera que la resistencia, la inductancia y la capacitancia estén presentes de manera continua en toda su longitud. Este modelo utiliza ecuaciones diferenciales que ayudan a comprender con mayor precisión la propagación de las señales, la aparición de fenómenos transitorios y su influencia en la calidad del suministro eléctrico. (Xiao et al., 2025)

- **Modelado de la resistencia**

La resistencia eléctrica representa la oposición que ofrece un conductor al paso de corriente. En el modelado de líneas de transmisión se expresa normalmente en ohmios por unidad de longitud (Ω/m o Ω/km), y depende del material, la temperatura y la frecuencia de operación. (Atoccsa et al., 2024)

  - ***Resistencia en corriente continua***

En corriente continua, la densidad de corriente es uniforme en toda la sección transversal del conductor, y su valor depende exclusivamente de las propiedades físicas del material y su geometría. (Atoccsa et al., 2024)

$$R_{DC} = \frac{\rho \cdot l}{A} \; [\Omega/pies] \tag{9}$$

Donde:

ρ: Resistividad del material.

l: Longitud del conductor.

A: Área de la sección transversal.

- ***Resistencia en corriente alterna***

En corriente alterna, la resistencia aumenta respecto a la continua debido a los efectos de piel y proximidad, que modifican la distribución de corriente en el conductor. (Atoccsa et al., 2024)

$$R_{AC} = R_{DC}(1 + y_p + y_s) \; [\Omega/milla] \tag{10}$$

Donde:

y_p: Factor de corrección por efecto proximidad.

y_s: Factor de corrección por efecto piel.

- ***Efecto proximidad***

El llamado efecto de proximidad (y_p) se presenta cuando dos conductores que transportan corriente alterna se encuentran próximos y con flujo de corriente en la misma dirección. En estas condiciones, la densidad de corriente tiende a concentrarse en las zonas externas opuestas de los conductores, mientras que en las partes que están más cerca entre sí disminuye, generando un incremento en la resistencia eléctrica total. (Atoccsa et al., 2024)

$$X_p^2 = \frac{8\pi f K_p \cdot 10^{-7}}{R_{DC}} \tag{11}$$

$$y_p = \left(\frac{X_p^4}{192 + 0.8 \cdot X_p^4}\right) \cdot \left(\frac{D_c}{d_f}\right)^2 \left(0.312\left(\frac{D_c}{d_f}\right)^2 + \frac{1.18}{\left(\frac{X_p^4}{192 + 0.8 \cdot X_p^4}\right)^2 + 0.27}\right) \tag{12}$$

Donde:

f: Frecuencia eléctrica.

K_p: Factor de efecto proximidad basado en la construcción del conductor.

R_{DC}: Resistencia continua del conductor.

y_p: Factor de efecto proximidad.

D_c: Diámetro del conductor.

d_f: Distancia desde el centro del conductor hasta el centro del otro.

- ***Efecto piel***

Por su parte, el efecto piel (y_s) describe la tendencia de la corriente alterna a desplazarse principalmente por la superficie del conductor, provocando que la densidad de corriente sea mucho mayor en el exterior que en el interior de este. (Atoccsa et al., 2024)

$$X_s^2 = \frac{8\pi f K_s \cdot 10^{-7}}{R_{DC}} \tag{13}$$

$$y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0.8 \cdot X_s^4} \tag{14}$$

Donde:

K_s: El factor de efecto piel basado en la construcción del conductor.

y_s: Factor de efecto piel.

- **Modelado de la inductancia**

La inductancia es el parámetro que representa la capacidad de una línea para generar un flujo magnético debido a la corriente que circula por los conductores. Dicho flujo produce una fuerza electromotriz inducida que se opone a la variación de la corriente. En líneas de transmisión, la inductancia se expresa en henrios por metro (H/m) o por kilómetro (H/km) y depende de la geometría de la línea, el espaciamiento entre fases y el tipo de conductor. (Liu et al., 2023)

  - ***Radio medio geométrico para un agrupamiento de dos a cuatro conductores***

Cuando cada fase está formada por varios subconductores (un haz) el parámetro D_s^b representa el radio medio geométrico equivalente del conjunto. Este se determina considerando el radio de cada haz de conductores y la distancia entre ellos. (Liu et al., 2023)

Para un agrupamiento de dos conductores:

$$D_s^b = \sqrt[4]{(D_s \cdot d)^2}\ [m] \tag{15}$$

Donde:

D_s: Radio medio geométrico.

d: Distancia entre subconductores.

Para un agrupamiento de tres conductores:

$$D_s^b = \sqrt[9]{(D_s \cdot d \cdot d)^3}\ [m] \tag{16}$$

Donde:

D_s: Radio medio geométrico.

d: Distancia entre subconductores.

Para un agrupamiento de cuatro conductores:

$$D_s^b = \sqrt[16]{(D_s \cdot d \cdot d \cdot \sqrt{2}\, d)^4} \ [m] \tag{17}$$

Donde:

D_s: Radio medio geométrico

d: Distancia entre subconductores.

- ***Distancia media geométrica entre fases***

Este valor representa la distancia equivalente entre los centros de las fases (o haces) y se usa para calcular la inductancia mutua y la capacitancia de la línea. (Liu et al., 2023)

Para configuraciones simétricas, como una disposición horizontal o vertical, se calcula como:

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot {D_{ca}}^2} \ [m] \tag{18}$$

Donde:

D_{ab}, D_{bc}, D_{ca}: Distancia entre los conductores de las fases.

- ***Inductancia de una línea trifásica transpuesta***

Según (Liu et al., 2023), para líneas trifásicas con espaciamiento uniforme o transposición de fases, la inductancia por fase se calcula como:

$$L = 2\ x\ 10^{-7} ln\left(\frac{D_{eq}}{D_s^b}\right) [H/m] \tag{19}$$

Donde:

D_{eq}: Distancia media geométrica entre fases.

D_s^b: Radio medio geométrico equivalente del haz.

- **Modelado de la capacitancia**

La capacitancia representa la capacidad de una línea eléctrica para almacenar carga eléctrica entre los conductores que la conforman. Se debe al campo eléctrico existente entre los conductores de distintas fases o entre el conductor y tierra. Su unidad es el faradio por metro (F/m) o faradio por kilómetro (F/km). (Liu et al., 2023)

- ***Radio medio geométrico para un agrupamiento de dos a cuatro conductores***

El radio medio geométrico del haz representa el tamaño eléctrico equivalente de un conjunto de subconductores que forman una fase. Este parámetro combina el radio efectivo de cada haz y las distancias entre ellos, permitiendo modelar adecuadamente la distribución del campo eléctrico. Su uso es esencial en el cálculo de capacitancia ($D_{s\,C}^{b}$), porque determina cómo se comporta el potencial eléctrico respecto al entorno. (Liu et al., 2023)

Para un agrupamiento de dos conductores:

$$D_{s\,C}^{b} = \sqrt[4]{(r \cdot d)^2}\ [m] \tag{20}$$

Donde:

r: Radio físico.

d: Distancia entre subconductores.

Para un agrupamiento de tres conductores:

$$D_{s\,C}^{b} = \sqrt[9]{(r \cdot d \cdot d)^3}\ [m] \tag{21}$$

Donde:

r: Radio medio geométrico.

d: Distancia entre subconductores.

Para un agrupamiento de cuatro conductores:

$$D_{s\,C}^{b} = \sqrt[16]{(r \cdot d \cdot d \cdot d \cdot \sqrt{2})^4}\ [m] \tag{22}$$

Donde:

r: Radio medio geométrico.

d: Distancia entre subconductores.

- ***Distancia media geométrica entre fases***

La distancia media geométrica entre fases es una medida equivalente que reemplaza las distancias físicas entre conductores por un único valor promedio. Este parámetro refleja la separación eléctrica efectiva entre las fases para el cálculo de la capacitancia mutua y la distribución del campo eléctrico. Su uso simplifica la modelación de líneas trifásicas, preservando el efecto real de la geometría física sobre el acoplamiento capacitivo. (Liu et al., 2023)

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot {D_{ca}}^2}\ [m] \tag{23}$$

Donde:

D_{ab}, D_{bc}, D_{ca}: Distancia entre los conductores de las fases.

- ***Capacitancia de una línea trifásica transpuesta***

Según (Liu et al., 2023), para una línea trifásica transpuesta, la capacitancia por fase se determina mediante:

$$C = \frac{2\pi \,.\, \varepsilon_0}{ln\left(\frac{D_{eq}}{D_{s\,C}^{b}}\right)}\ [F/m] \tag{24}$$

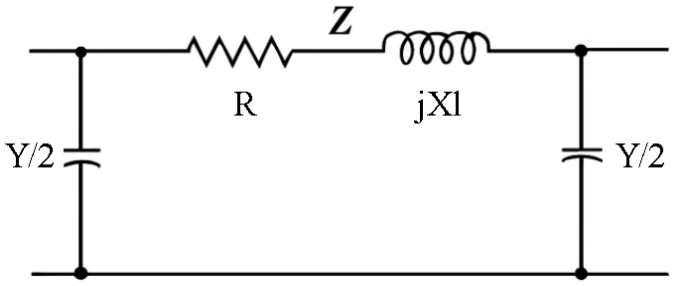
Donde:

D_{eq}: Distancia media geométrica entre fases.

$D_{s\,C}^{b}$: Radio medio geométrico equivalente del haz.

Ilustración 46

Esquema general de los componentes eléctricos R, L y C de una línea de transmisión



Fuente: Adaptación de (Grainger & Stevenson, 1996).

Tabla 4

Características eléctricas de conductores ACSR

Palabra clave	Área de aluminio, cmil	Trenzado Al/St	Capas de Aluminio	Diámetro exterior, pulgadas	Resistencia			RMG Ds, pies	Reactancia por conductor a 1 pie de espaciamiento, 60 Hz	
					Dc, 20°C, Ω/1000 pies	CA, 60 Hz			Xa inductiva, Ω/milla	Xa' capacitiva, MΩ·milla
						20°C, Ω/milla	50°C, Ω/milla			
Waxwing	266,800	18/1	2	0.609	0.0646	0.3488	0.3831	0.0198	0.476	0.1090
Partridge	266,800	26/7	2	0.642	0.0640	0.3452	0.3792	0.0217	0.465	0.1074
Ostrich	300,000	26/7	2	0.680	0.0569	0.3070	0.3372	0.0229	0.458	0.1057
Merlin	336,400	18/1	2	0.684	0.0512	0.2767	0.3037	0.0222	0.462	0.1055
Linnet	336,400	26/7	2	0.721	0.0507	0.2737	0.3006	0.0243	0.451	0.1040
Oriole	336,400	30/7	2	0.74	0.0504	0.2719	0.2987	0.0255	0.445	0.1032
Chickadee	397,500	18/1	2	0.743	0.0433	0.2342	0.2572	0.0241	0.452	0.1031
Ibis	397,500	26/7	2	0.783	0.0430	0.2323	0.2551	0.0264	0.441	0.1015
Pelican	477,000	18/1	2	0.814	0.0361	0.1957	0.2148	0.0264	0.44	0.1004
Flicker	477,000	24/7	2	0.846	0.0359	0.1943	0.2134	0.0284	0.432	0.0992
Hawk	477,000	26/7	2	0.858	0.0357	0.1931	0.2120	0.0289	0.430	0.0988
Hen	477,000	30/7	2	0.883	0.0355	0.1919	0.2107	0.0304	0.424	0.0980
Osprey	556,500	18/1	2	0.879	0.0309	0.1679	0.1843	0.0284	0.432	0.0981
Parakeet	556,500	24/7	2	0.914	0.0308	0.1669	0.1832	0.0306	0.423	0.0969
Dove	556,500	26/7	2	0.927	0.0307	0.1663	0.1826	0.0314	0.420	0.0965
Rook	636,000	24/7	2	0.977	0.0269	0.1461	0.1603	0.0327	0.415	0.0950

Grosbeak	636,000	26/7	2	0.990	0.0268	0.1454	0.1596	0.0335	0.412	0.0946
Drake	795,000	26/7	2	1.108	0.0215	0.1172	0.1284	0.0373	0.399	0.0912
Tern	795,000	45/7	3	1.063	0.0217	0.1188	0.1302	0.0352	0.406	0.0925
Rail	954,000	45/7	3	1.165	0,0181	0.0997	0.1092	0.0386	0.395	0.0897
Cardinal	954,000	54/7	3	1.196	0.0180	0.0988	0.1082	0.0402	0.390	0.0890
Ortolan	1,033,500	45/7	3	1.213	0.0167	0.0924	0.1011	0.0402	0.390	0.0885
Bluejay	1,113,000	45/7	3	1.259	0.0155	0.0861	0.0941	0.0415	0.386	0.0874
Finch	1,113,000	54/19	3	1.293	0.0155	0.0856	0.0937	0.0436	0.380	0.0866
Bittern	1,272,000	45/7	3	1.345	0.0136	0.0762	0.0832	0.0444	0.378	0.0855
Pheasant	1,272,000	54/19	3	1.382	0.0135	0.0751	0.0821	0.0466	0.372	0.0847
Bobolink	1.431,000	45/7	3	1.427	0.0121	0.0684	0.0746	0.0470	0.371	0.0837
Plover	1,431,000	54/19	3	1.465	0.0120	0.0673	0.0735	0.0494	0.365	0.0829
Lapwing	1,590,000	45/7	3	1.502	0.0109	0.0623	0.0678	0.0498	0.364	0.0822
Falcon	1,590,000	54/19	3	1.545	0.0108	0.0612	0.0667	0.0523	0.358	0.0814
Bluebird	2,156,000	84/19	4	1.762	0.0080	0.0476	0.0515	0.0586	0.344	0.0776

Nota. Fuente: (Grainger & Stevenson, 1996)

Materiales:

- Computadora de escritorio o Laptop
- Calculadora

Caso de Estudio:

Modelado de Parámetros de la Línea de Transmisión

Se considera una línea de transmisión aérea trifásica que emplea una configuración dúplex y una disposición horizontal de los conductores, tal como se muestra en la Ilustración 47. Cada fase está compuesta por un haz de dos conductores separados entre sí a una distancia de 45 cm, mientras que la separación entre fases es de 8 metros. La línea utiliza un conductor ACSR tipo *Pheasant*, cuyas principales características se muestran en la Tabla 4 con un área de sección transversal del aluminio de 1,272,000 cmil, un diámetro exterior de 1.382 pulgadas y una frecuencia de operación de 60 Hz. Se solicita:

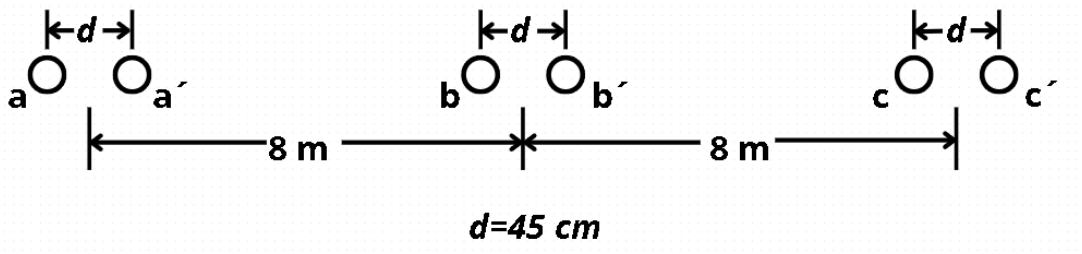
a) Cálculo de Resistencia AC a 20 °C

b) Cálculo de Reactancia Inductiva

c) Cálculo de Susceptancia Capacitiva

Ilustración 47

Disposición y distancia de los conductores a utilizar



Fuente: Adaptación de (Grainger & Stevenson, 1996).

Desarrollo Analítico:

Datos del Conductor:

- **Tipo de Conductor:** Conductor ACSR tipo Pheasant
- **Configuración y Disposición de la Línea de Transmisión:** Disposición horizontal - Configuración dúplex
- **Área de Aluminio:** 1,272,000 cmil
- **Diámetro exterior:** 1,382 pulg
- **Frecuencia:** 60 Hz

a) Cálculo de Resistencia AC a 20 °C

- Calcular Resistencia DC a 20 °C:

$$Resistividad\ (\rho)\ de\ Aluminio \rightarrow 2.83\ x\ 10^{-8}\ \Omega \cdot m = (17{,}00\ \Omega \frac{cmil}{pie})$$

$$l = 1000\ pies$$

$$A = 1272\ kcmil$$

Según la Ecuación (9), se realiza el siguiente cálculo:

$$R_{DC} = \frac{\rho \cdot l}{A} \Omega = \frac{17 \cdot 1000}{1272\ x\ 10^3} \approx 0{,}0134\ \ \Omega/1000\ pies \tag{25}$$

$1\ milla = 5280\ pies$

$$R_{DC\ (\Omega/milla)} = 0{,}0134 \frac{\Omega}{1000\ pies} \cdot \frac{5280\ pies}{1\ milla} \tag{26}$$

$$R_{DC\ (\Omega/milla)} \approx 0{,}070752\ \ \Omega/milla \tag{27}$$

- Calcular Resistencia AC a 20 °C:

  Encuentre el factor de efecto de proximidad (y_p):

  $f = 60\ Hz$

  $Factor\ de\ efecto\ proximidad\ en\ la\ construccion\ del\ conductor\ (K_p) = 0.8$

  $R_{DC\ (\Omega/milla)} = 0{,}070752\ \ \Omega/milla \rightarrow 4.396\ x10^{-5}\ \Omega/m$

  Según la Ecuación (11), se realiza el siguiente cálculo:

$$X_p^2 = \frac{8\pi f K_p \cdot 10^{-7}}{R_{DC}} = \frac{8\ x\ \pi\ x\ 60\ x\ 0.8\ x\ 10^{-7}}{4.396\ x10^{-5}} \approx 2.744 \tag{28}$$

$$X_p = \sqrt{2.744} \approx 1.656 \tag{29}$$

  $Distancia\ desde\ el\ centro\ del\ conductor\ hasta\ el\ centro\ del\ otro\ (d_f) = 0.45$

  $Diametro\ del\ conductor\ (D_c) = 1{,}382\ pulg \rightarrow 0.03510\ m$

  Al obtener X_p reemplazamos en la Ecuación (12), en la cual se obtiene:

$$y_p = \left(\frac{1.656^4}{192 + 0.8 \cdot 1.656^4}\right) \cdot \left(\frac{0.03510}{0.45}\right)^2 \left(0.312\left(\frac{0.03510}{0.45}\right)^2 + \frac{1.18}{\left(\frac{1.656^4}{192 + 0.8 \cdot 1.656^4}\right)^2 + 0.27}\right) \quad (30)$$

$$y_p \approx 0.001005 \quad (31)$$

Encuentre el factor de efecto piel (y_s):

$Factor\ de\ efecto\ piel\ basado\ en\ la\ construccion\ del\ conductor\ (K_s) = 1$

Posteriormente aplique la Ecuación (13), por lo que se obtiene:

$$X_s^2 = \frac{8\pi f K_s \cdot 10^{-7}}{R_{DC}} = \frac{8\ x\ \pi\ x\ 60\ x\ 1\ x\ 10^{-7}}{4.396\ x10^{-5}} \approx 3.430 \quad (32)$$

$$X_s = \sqrt{3.430} \approx 1.852 \quad (33)$$

Al obtener X_s reemplazamos en la Ecuación (14), en la cual se obtiene:

$$y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0.8 \cdot X_s^4} = \frac{(1.852)^4}{192 + 0.8\ (1.852)^4} \approx 0.05843 \quad (34)$$

Encontrar R_{AC}:

Luego de que se obtuvo Y_p y Y_s, utilice la Ecuación (10), donde se obtiene:

$$R_{AC} = R_{DC\ (\Omega/milla)}(1 + y_p + y_s) = 0.070752\ (1 + 0.001005 + 0.05843) \quad (35)$$

$$R_{AC} \approx 0.07495\ \Omega/milla \quad (36)$$

- Convertimos la resistencia de 0.07495 ohm/milla AC a 20°C tipo *Pheasant* a ohm/m:

  $1\ milla$: $1609{,}34\ m$

$$R = \frac{R_{AC}}{1\ milla} = \frac{0.07495}{1609{,}34} \approx 0.0000466\ \Omega/m \quad (37)$$

- Donde la Resistencia Unitaria dúplex es:

$$R_{unitaria-dúplex} = \frac{R}{2} = \frac{0.0000466}{2} \approx 0.0000232\ \Omega/m \tag{38}$$

- Conversión de Resistencia Unitaria dúplex a Ω/km para uso en cálculo analítico y software:

$$R_{dúplex} = 0.0000232 \frac{\Omega}{m} \cdot \frac{1000\ m}{1\ km} = 0.0232\ \Omega/km \tag{39}$$

Tabla 5

Comparación de resultados de la Resistencia AC a 20°C entre el valor analítico y el dado por el fabricante indicado en la Tabla 4

Parámetro	Analítico	Valor de referencia dado por el fabricante	% de Error
Resistencia AC 20°C	0.07495 *Ω/milla*	0.0751 *Ω/milla*	0.1997 %

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

b) Cálculo de Reactancia Inductiva

$D_s = RMG_{Tabla} = 0.0466\ pies \rightarrow 0.0142\ m$

$d = 45\ cm \rightarrow 0.45\ m$

Para obtener el RMG de los conductores agrupados se usa la Ecuación (15), donde se obtiene lo siguiente:

$$D_s^b = \sqrt[4]{(RMG_{Tabla} \cdot d)^2} = \sqrt{0.0142\ x\ 0.45} \approx 0.080\ m \tag{40}$$

Para calcular la distancia equivalente entre cada fase se usa la Ecuación (18) y para el cálculo de la Inductancia la Ecuación (19).

$D = 8\,m$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ca}} = \sqrt[3]{8\ x\ 8\ x\ 16} \approx 10.08\,m \tag{41}$$

$$L = 2\ x\ 10^{-7} ln\left(\frac{D_{eq}}{D_s^b}\right) = L = 2\ x\ 10^{-7} ln\left(\frac{10.08}{0.08}\right) \tag{42}$$

$$L \approx 9.67\ x\ 10^{-7} H/m \tag{43}$$

- Donde la Reactancia Inductiva Unitaria es:

$$X_{L-unitaria} = 2\pi \cdot f \cdot L = 2\pi\ x\ 60\ x\ 9.67\ x\ 10^{-7} = 0.000365\ \Omega/m \tag{44}$$

- Conversión de Reactancia Inductiva Unitaria a Ω/km para uso en cálculo analítico y software:

$$X_L = 0.000365\ \frac{\Omega}{m} \cdot \frac{1000\ m}{1\ km} = 0.365\ \Omega/km \tag{45}$$

c) Cálculo de Susceptancia Capacitiva

$1\ pulgada\ (in) = \ 0.0254\ m$

$Diametro\ exterior\ del\ conductor$: $1.382\ in$

- Diámetro exterior a m:

$$d_{exterior} = 1.382 \times 0.0254 \approx 0.03511\ m \tag{46}$$

- Radio físico:

$$r = \frac{d_{exterior}}{2} = \frac{0.03511}{2} \approx 0.01756\ m \tag{47}$$

- Radio equivalente del haz (para capacitancia):

  Según la Ecuación (20), se realiza el siguiente cálculo:

  $Separación\ en\ el\ haz\ (bundle) \rightarrow d = 0.45\ m$

$$D_{s\,C}^{b} = \sqrt[4]{(r \cdot d)^2} = \sqrt{0.01756 \cdot 0.45} \approx 0.0890\ m \tag{48}$$

- Capacitancia por fase (F/m):

  Para el cálculo de la capacitancia se aplica la Ecuación (24), donde se obtiene:

  $D_{eq} = 10.08\ m$

  $\varepsilon_0 = 8.854 \text{ x } 10^{-12} F/m$

$$C = \frac{2\pi\ .\ \varepsilon_0}{ln\left(\frac{D_{eq}}{D_{s\,C}^{b}}\right)} = \frac{2\pi\ (8.854\ x\ 10^{-12})}{ln\left(\frac{10.08}{0.0890}\right)} = 11.76\ x\ 10^{-12}\ F/m \tag{49}$$

- Donde la Susceptancia Capacitiva Unitaria es:

$$B_{unitaria} = 2\pi \cdot f \cdot C = 2\pi\ x\ 60\ x\ 11.76\ x\ 10^{-12} \approx 4.44\ x\ 10^{-9}\ S/m \tag{50}$$

- Conversión de Susceptancia Capacitiva Unitaria a $\mu S/km$ para uso en cálculo analítico y software:

$$B = 4.44\ x\ 10^{-9} \frac{S}{m} \cdot \frac{1000\ m}{1\ km} = 4.44\ x\ 10^{-6}\ S/km \rightarrow 4.44\ \mu S/km \tag{51}$$

Tabla 6

Resultados unitarios de la Resistencia, Inductancia y Susceptancia Capacitiva

Resistencia dúplex	Inductancia	Susceptancia Capacitiva
$0.0000232\ \Omega/m$	$0.000365\ \Omega/m$	$4.44\ x\ 10^{-9}\ S/m$

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Conclusión:

A partir del cálculo manual de los parámetros RLC se pudo describir de forma clara cómo se comporta la línea de transmisión, tomando en cuenta su geometría, el tipo de conductor y la manera en que está construida. Esta práctica ayudó a comprobar que el procedimiento realizado a mano coincidía con lo planteado en la teoría, lo que permitió tener una base confiable para los modelos eléctricos usados en las siguientes actividades. Con los valores unitarios y equivalentes bien definidos, el resto del trabajo pudo desarrollarse con coherencia en toda la guía.

4.1.3 Guía de Práctica N° 03 – Modelado de Línea Corta – Generación, Línea y Carga (50 km)

Tema: Modelado de Línea Corta – Generación, Línea y Carga (50 km).

Objetivo: Modelar una línea de transmisión de 50 km, y ver cómo se comporta el sistema con los niveles de tensión a lo largo de la línea de transmisión.

Marco Teórico:

- **Modelado de línea corta**

Una línea corta se considera aquella cuya longitud es menor a 80 km. En este tipo de líneas, el efecto de la capacitancia es muy reducido, por lo que se desprecia en el modelado. En consecuencia, solo se consideran los parámetros resistencia e inductancia, que se agrupan en una impedancia serie equivalente. Este modelo se utiliza cuando la longitud del tramo no produce efectos capacitivos significativos sobre la tensión o la corriente, simplificando el análisis del flujo de potencia y la regulación de tensión. (Liu et al., 2023)

$$Z = R' + jX_L{}' \ [\Omega] \tag{52}$$

Donde:

R: Resistencia equivalente de la línea.

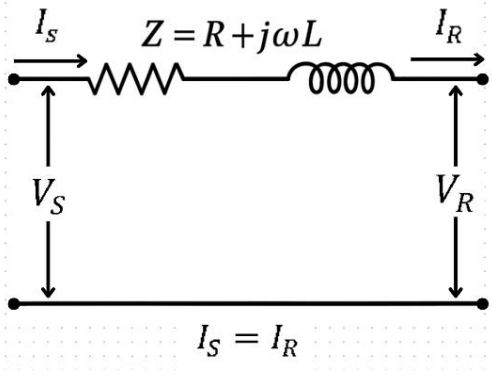
X_L: Reactancia inductiva.

Donde además las corrientes en los extremos son iguales:

$$I_S = I_R \tag{53}$$

Ilustración 48

Circuito equivalente del modelo de línea corta



Fuente: Adaptación de (Grainger & Stevenson, 1996).

- **Ángulo de desfase entre magnitudes fasoriales**

En los sistemas eléctricos de potencia, el análisis fasorial es esencial para relacionar magnitudes alternas en estado estacionario. Cada tensión y corriente se representa mediante un fasor, definido por su magnitud y ángulo. En este contexto, el ángulo de la impedancia de la carga θ_C, define el desfase entre tensión y corriente: si $\theta_C > 0$, la corriente se atrasa respecto a la tensión (carga inductiva); si $\theta_C < 0$, se adelanta (carga capacitiva). Dada la tensión $V \angle \theta_V$, y el ángulo de impedancia θ_C, el ángulo de la corriente se calcula como $\theta_I = \theta_V - \theta_C$. Esta relación fasorial evidencia la influencia directa de la naturaleza de la carga sobre la fase de la corriente frente a la tensión aplicada y constituye un elemento clave en el cálculo de potencias complejas, el análisis de flujos de carga y la evaluación del factor de potencia en sistemas eléctricos. (Ge et al., 2024)

$$\theta_C = \theta_V - \theta_I \tag{54}$$

Donde:

θ_C: Ángulo del factor de potencia de la carga.

θ_V: Ángulo del voltaje.

θ_I: Ángulo de la corriente.

Materiales:

- Computadora de escritorio o Laptop
- Calculadora
- Software DIgSILENT POWERFACTORY

Caso de Estudio:

Modelado de Línea Corta – Generación, Línea y Carga (50 km)

Cada fase de la línea con conductores agrupados mostrada en la Ilustración 49 es un ACSR *Pheasant* de 1272 kcmil configuración dúplex. En cada fase los dos conductores que integran el haz se encuentran separados 45 cm y la distancia entre los ejes de las fases adyacentes es de 8 m. La línea es de 50 km compuesto por un generador trifásico de 150 MVA a 230 kV nominales a un factor de potencia de 0.92 (inductivo) y una carga trifásica de 100 MW y 50 Mvar, donde la tensión en la barra de carga es de $225{,}30\ \text{kV} \angle -1{,}95°$. Se solicita:

a) Calcular la corriente en el receptor (carga)

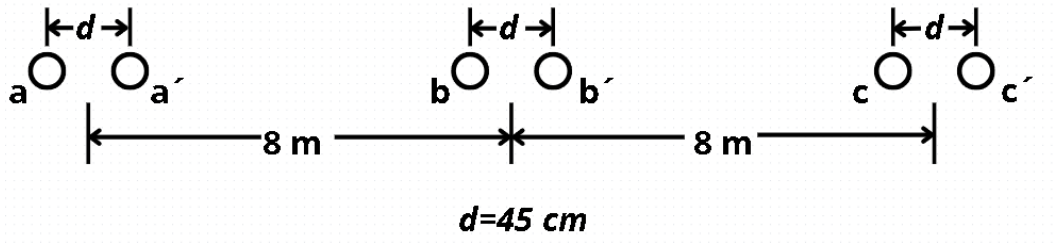
b) Calcular la caída de tensión en la línea

c) Calcular las pérdidas de potencia activa en la línea

d) Calcular los voltajes en Pu de las barras

Ilustración 49

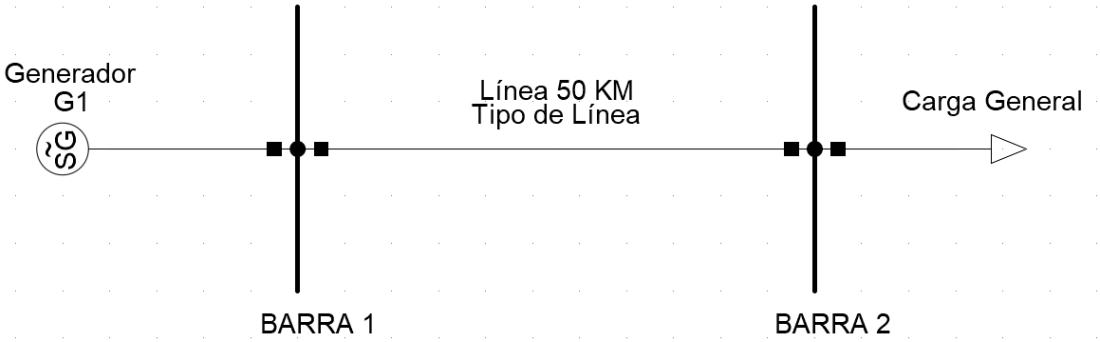
Configuración de los conductores



Fuente: Adaptación de (Grainger & Stevenson, 1996).

Ilustración 50

Sistema de Referencia



Fuente: Elaboración Propia.

Desarrollo Analítico:

A continuación, se desarrollará los siguientes literales con los valores obtenidos de la Resistencia dúplex en la ecuación (39) y la Reactancia inductiva en la ecuación (45) de la Práctica 2. Los cuales son:

$$R_{dúplex} = 0.0232\ \Omega/km$$

$$X_L = 0.365\ \Omega/km$$

Donde la Resistencia y Reactancia inductiva equivalente del sistema son:

$$R' = R_{dúplex} \cdot l = 0.0232\ (50) \approx 1{,}16\ \Omega \tag{55}$$

$$X_L{}' = X_L \cdot l = 0.365\ (50) \approx 18{,}25\ \Omega \tag{56}$$

Según la ecuación (52), la Impedancia Equivalente de la línea sería:

$$Z_L = R' + jX_L{}' = 1{,}16 + j18{,}25\ \Omega \tag{57}$$

a) Calcular la corriente en el receptor (carga)

- Potencia de la Carga:

$$S_c = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{100^2 + 50^2} \approx 111.80\ MVA \tag{58}$$

$$tan^{-1}\frac{Q}{P} = tan^{-1}\frac{50}{100} \approx 26{,}56° \tag{59}$$

$V_R = 225{,}30\ kV$

$\theta_{VR} = -1{,}95°$

$\theta_C = 26{,}56°$

$$I_R = \frac{S_c}{\sqrt{3} \cdot V_R} = \frac{111.80}{\sqrt{3}\ \cdot 225{,}30} \approx 286{,}49\ A \rightarrow 0{,}28649\ kA \tag{60}$$

$$\theta_C = \theta_{VR} - \theta_I \tag{61}$$

$$\theta_C - \theta_{VR} = -\theta_I \tag{62}$$

$$26{,}56 - (-1{,}95) = -\theta_I \tag{63}$$

$$28{,}51 = -\theta_I \tag{64}$$

$$\theta_I = -28{,}51 \tag{65}$$

$$I_R = 286{,}49 \angle -28{,}51°\ A \longrightarrow 0{,}28649 \angle -28{,}51°\ kA \tag{66}$$

En el modelo de línea corta solo existe impedancia serie, por lo que no hay corrientes derivadas a tierra. Por ello, la corriente al inicio es igual a la corriente en la carga:

$$I_{S-BARRA\,1} = I_{R-BARRA\,2} \tag{67}$$

$$I_{S-BARRA\,1} = I_{R-BARRA\,2} = 0{,}28649\ kA$$

b) Calcular la caída de tensión en la línea

- Caída de tensión:

$$\Delta V_f = Z_L \cdot I_R = (1{,}16 + j18{,}25)(286{,}49 \angle -28{,}51°) \tag{68}$$

$$\Delta V_f = 5{,}2389 \angle 57{,}85°\ kV \tag{69}$$

- Tensión de Envío:

$V_R = 225{,}30 \angle -1{,}95° kV$

$V_{R(fn)} = \dfrac{225.30}{\sqrt{3}} \rightarrow 130.077 \angle -1{,}95° kV$

$$V_{S(fn)} = V_{R(fn)} + \Delta V_f = (130.077\angle -1{,}95°) + (5{,}2389 \angle 57{,}85°) \tag{70}$$

$$V_{S(fn)} = 132.798 \angle 4.04°\ kV \tag{71}$$

$$V_{S(LL)} = 132.798\sqrt{3} = 229.99 \angle 4.04°\ kV \tag{72}$$

c) Calcular las pérdidas de potencia activa en la línea

$$P_{pérdida} = 3 \cdot {I_R}^2 \cdot R = 3\,(286{,}49)^2\,(1.16) \approx 285626{,}28\ W \rightarrow 0.285\ MW \tag{73}$$

d) Calcular los voltajes en Pu de las Barras

- Barra 1:

$$V_{B1,pu} = \frac{230}{230} = 1.00 \angle 0° \, kV \tag{74}$$

- Barra 2:

$$V_{B2,pu} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{225{,}30}{230} = 0.979 \angle -1.95° \, kV \tag{75}$$

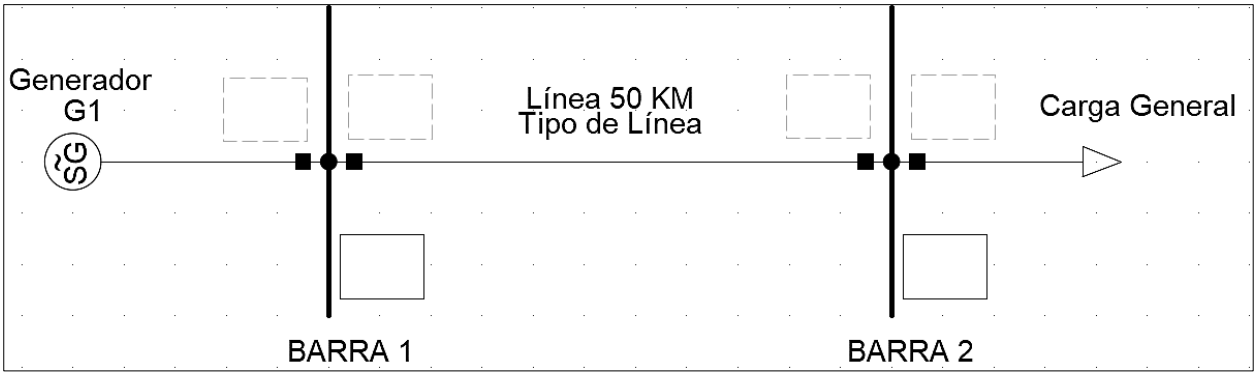
Desarrollo en el Software:

Paso 1:

1. Para el primer paso se modelará el siguiente sistema eléctrico de potencia que se mostrará a continuación:

Ilustración 51

Modelamiento de una Línea de Transmisión de 50 km



Fuente: Elaboración Propia.

2. Ya que se insertó cada elemento según la Ilustración 51, se procede a agregar los siguientes valores en cada parte del sistema, con los siguientes datos:

Datos de Generador:

Elemento	Potencia Aparente Nominal	Tensión Nominal	Factor de Potencia Nominal
Generador	150 MVA	230 kV	0,92

Datos de Barras:

Barras	Voltaje Línea- Línea
Barra 1	230 kV
Barra 2	230 kV

Datos de Línea 50 km:

Línea	Tensión Nominal	Frecuencia Nominal	Resistencia AC R´(20°C)	Reactancia X´
Línea 50 km	230 kV	60 Hz	0,0232 ohm/km	0,365 ohm/km

Datos de Carga General:

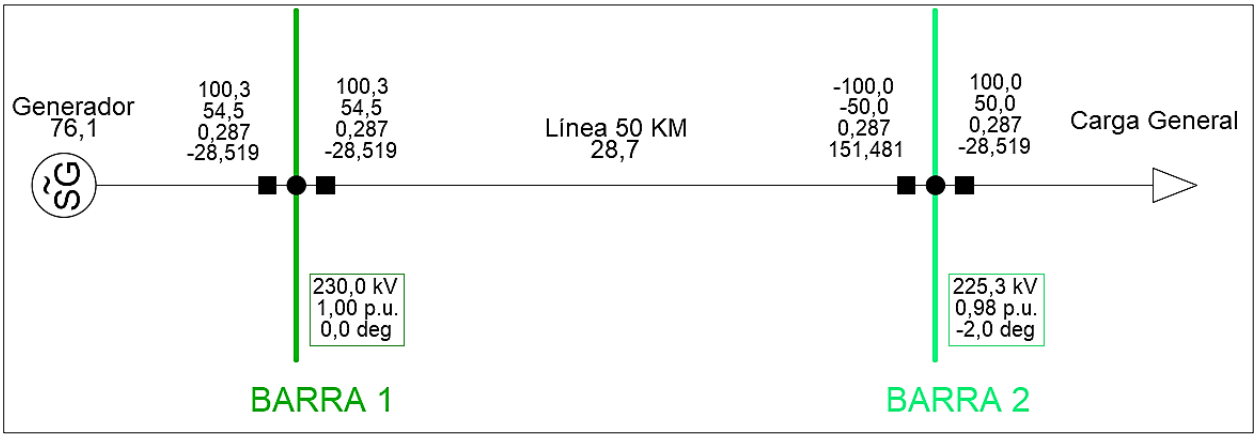
Elemento	Potencia Activa	Potencia Reactiva
Carga	100 MW	50 Mvar

Paso 2:

1. Luego de haber hecho el diagrama del sistema eléctrico de potencia con una línea de transmisión de 50 km e ingresar sus datos respectivos, se procede a realizar un flujo de carga para comparar los valores obtenidos en el software y en el desarrollo analítico.

Ilustración 52

Flujo de Carga línea de 50 km



Fuente: Elaboración Propia.

Paso 3:

1. Como último paso, se realiza un reporte de resultados para visualizar los valores de cada barra, lo que permite analizarlos e identificar posibles mejoras.

2. En la ventana de Salida, se selecciona el apartado de Reporte de resultados – Barras/Terminales.

Ilustración 53

Reporte de Resultados de nuestras Barras/Terminales

```
=================================================================================
| Red: Red            Escenario del Sistema: Red           | Caso de Estudio: Cas
---------------------------------------------------------------------------------
|          Voltaje                          Pot.      Pot.   Factor              |
|          nominal    Voltaje de Barra   Activa   Reactiva  Pot. Corriente Carga|
|           [kV]  [p.u.]    [kV]   [deg]  [MW]    [Mvar]    [-]     [kA]    [%] |
---------------------------------------------------------------------------------
|BARRA 1                                                                          |
|         230,00    1,00  230,00    0,00                                          |
|   Cub_2  /Sym      Generador           100,29    54,49   0,88    0,29   76,09 |
|   Cub_1  /Lne      Línea 50 KM         100,29    54,49   0,88    0,29   28,65 |
|                                                                                 |
|BARRA 2                                                                          |
|         230,00    0,98  225,30   -1,95                                          |
|   Cub_1  /Lod      Carga General       100,00    50,00   0,89    0,29         |
|   Cub_2  /Lne      Línea 50 KM        -100,00   -50,00  -0,89    0,29   28,65 |
|                                                                                 |
=================================================================================
```

Fuente: Elaboración Propia.

Resultados en el software de los Voltajes en Pu de las Barras:

- **BARRA 1:** 1,00 ∠ 0° Vpu
- **BARRA 2:** 0,98 ∠ -1,95° Vpu

Tabla 7

Comparación entre resultados de barras analítico y de software en el modelado de línea corta (50 km)

	Analítico		**PowerFactory**	
Barra	**V (pu)**	**Ángulo**	**V (pu)**	**Ángulo**
Barra 1	1.000	0°	1.000	0°
Barra 2	0.979	-1,95°	0.98	-1,95°

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 8

Comparación entre resultados finales analíticos y de software en el modelado de línea corta (50 km)

Variables		Analítico	PowerFactory
Emisor	$\boldsymbol{V_S}$	229,99 kV	230 kV
	$\boldsymbol{I_S}$	0,28649 kA	0,287 kA
Receptor	$\boldsymbol{V_R}$	225,30 kV	225,30 kV
	$\boldsymbol{I_R}$	0,28649 kA	0,287 kA
Pérdidas en la Línea	$\boldsymbol{P_{línea}}$	0,285 MW	0,285 MW

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Conclusión:

El trabajo con la línea corta permitió usar las ecuaciones más simples que aplican en este tipo de configuraciones, mostrando que el efecto capacitivo realmente puede ignorarse sin afectar los resultados. En la simulación se verificó que los valores de tensión, corriente y pérdidas en la línea coinciden con lo obtenido por cálculo manual, lo que respalda que el modelo usado es adecuado. Gracias a esto, se aclaró cómo se comportan eléctricamente las líneas de menor distancia y cómo se las puede representar usando parámetros concentrados.

4.1.4 Guía de Práctica N° 04 – Modelado de Línea Media (150 km)

Tema: Modelado de Línea Media (150 km).

Objetivo: Diseñar el modelo de una línea de transmisión media de 150 km en un sistema eléctrico de potencia con elementos básicos de generación, transmisión y distribución.

Marco Teórico:

- **Modelado de línea media**

Una línea de media longitud tiene una extensión aproximada entre 80 y 250 km. En este rango, el efecto de la capacitancia no puede despreciarse, ya que influye notablemente en la regulación de tensión y en la distribución de corriente. Para representar este comportamiento, se utiliza el modelo π, donde la capacitancia se divide en dos partes iguales conectadas en derivación en cada extremo, mientras que la resistencia y la inductancia se concentran en serie. Este modelo proporciona una representación más precisa del comportamiento real de la línea en régimen permanente, considerando los efectos tanto inductivos como capacitivos. (Liu et al., 2023)

El modelo π se define mediante los parámetros serie y derivación:

$$Z = R' + jX_L{}' \ [\Omega] \tag{76}$$

$$Y = jB_C{}' \ [S] \tag{77}$$

Según (Mugabe et al., 2025), las ecuaciones generales que relacionan los voltajes y corrientes en ambos extremos de la línea se expresan mediante las constantes de transmisión ABCD:

$$V_s = AV_R + BI_R \ [kV] \tag{78}$$

$$I_s = CV_R + DI_R \ [kA] \tag{79}$$

En el análisis de líneas de transmisión de longitud media, los parámetros ABCD se emplean como coeficientes que permiten relacionar las tensiones y corrientes en los extremos de la línea mediante expresiones lineales. Estos parámetros describen el comportamiento eléctrico del sistema, donde A y D son adimensionales, mientras que B y C representan la influencia de la impedancia serie y la admitancia derivativa, respectivamente. En este modelo, los coeficientes ABCD se obtienen a partir de circuitos equivalentes con parámetros concentrados, tales como los modelos nominales π, lo que facilita su aplicación en el cálculo analítico de variables eléctricas. (Mugabe et al., 2025)

Donde:

$$A = D = 1 + \frac{Y \cdot Z}{2} \tag{80}$$

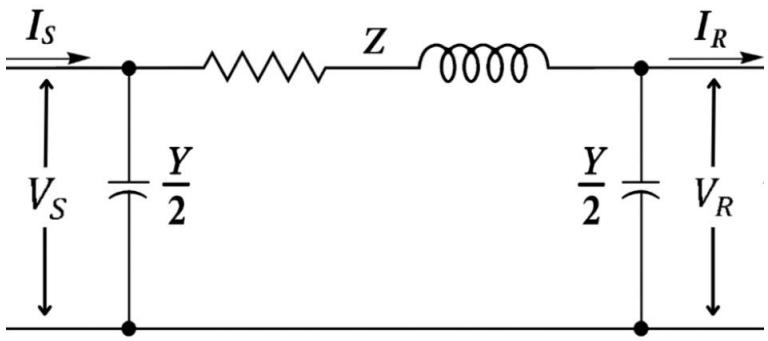
$$B = Z \ [\Omega] \tag{81}$$

$$C = Y \left(1 + \frac{Y \cdot Z}{4}\right) \ [S] \tag{82}$$

Estas expresiones se deducen del circuito equivalente π y permiten determinar los valores de V_s e I_s a partir de V_R e I_R, considerando la interacción entre la impedancia serie y la admitancia en derivación. (Mugabe et al., 2025)

Ilustración 54

Circuito nominal π de una línea de transmisión de longitud media.



Fuente: Adaptación de (Grainger & Stevenson, 1996).

- **Ángulo de desfase entre magnitudes fasoriales**

En los sistemas eléctricos de potencia, el análisis fasorial es esencial para relacionar magnitudes alternas en estado estacionario. Cada tensión y corriente se representa mediante un fasor, definido por su magnitud y ángulo. En este contexto, el ángulo de la impedancia de la carga θ_C, determina el desfase entre tensión y corriente: si $\theta_C > 0$, la corriente se atrasa respecto a la tensión (carga inductiva); si $\theta_C < 0$, se adelanta (carga capacitiva). Dada la tensión $V \angle \theta_V$, y el ángulo de impedancia θ_C, el ángulo de la corriente se calcula como $\theta_I = \theta_V - \theta_C$, reflejando cómo la naturaleza de la carga afecta la fase de la corriente respecto a la tensión aplicada. Esta relación fasorial es fundamental para el cálculo de potencias complejas, el análisis de flujos de carga y la evaluación del factor de potencia en redes eléctricas. (Ge et al., 2024)

$$\theta_C = \theta_{VR} - \theta_{IR} \tag{83}$$

Donde:

θ_C: Ángulo del factor de potencia de la carga.

θ_{VR}: Ángulo del voltaje en el extremo del receptor.

θ_{IR}: Ángulo de la corriente en el extremo del receptor.

Materiales:

- Computadora de escritorio o Laptop
- Calculadora
- Software DIgSILENT POWERFACTORY.

Caso de Estudio:

Modelado de Línea Media (150 km)

Cada fase de la línea con conductores agrupados es un ACSR *Pheasant* de 1272 kcmil configuración dúplex. En cada fase los dos conductores que integran el haz se encuentran separados 45 cm y la distancia entre los ejes de las fases adyacentes es de 8 m. La línea es de 150 km compuesto por un generador trifásico de 150 MVA a 230 kV nominales a un factor de potencia de 0.92 (inductivo) y una carga trifásica de 100 MW y 50 MVAr donde la tensión en la barra de carga es de $218{,}6\ \text{kV} \angle -6{,}12°$. Se solicita:

a) Calcular la corriente en el receptor (I_R) y de envío (I_S)

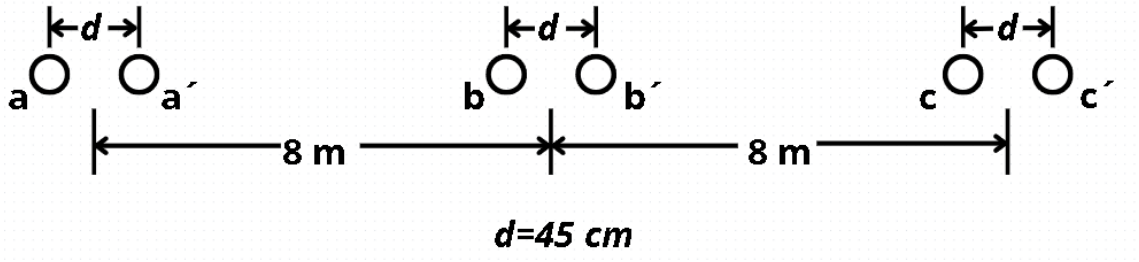
b) Calcular la caída de tensión en la línea

c) Calcular las pérdidas de potencia activa en la línea

d) Calcular los voltajes en Pu de las barras

Ilustración 55

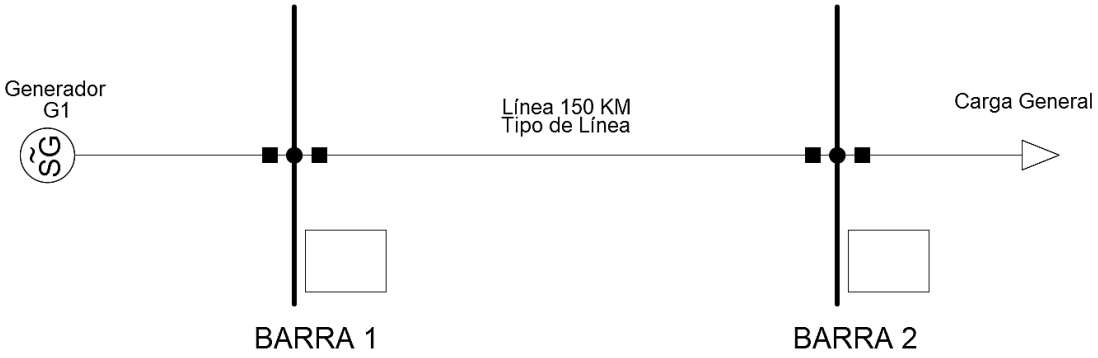
Distancia entre fases y líneas



Fuente: Adaptación de (Grainger & Stevenson, 1996).

Ilustración 56

Sistema de Referencia



Fuente: Elaboración Propia.

Desarrollo Analítico:

A continuación, se desarrollará los siguientes literales con los valores obtenidos de la Resistencia dúplex en la ecuación (39), la Reactancia inductiva en la ecuación (45) y la Susceptancia capacitiva en la ecuación (51) de la Práctica 2. Los cuales son:

$$R_{dúplex} = 0.0232\ \Omega/km$$

$$X_L = 0.365\ \Omega/km$$

$$B = 4.44\ x\ 10^{-6}\ S/km$$

Por lo que, la Resistencia y Reactancia Inductiva Equivalente del sistema son:

l: 150 km

$$R' = R_{dúplex} \cdot l = 0.0232\ (150) = 3.48\ \Omega \tag{84}$$

$$X_L{}' = X_L \cdot l = 0.365\ (150) = 54.75\ \Omega \tag{85}$$

Donde según la ecuación (76), la Impedancia Equivalente de la línea sería:

$$Z = R' + jX_L{}' = 3.48 + j54.75 \approx 54.86 \angle 86.36°\ \Omega \tag{86}$$

Por lo que también la Susceptancia equivalente sería:

$$B_C{}' = B \cdot l = 4.44\ x\ 10^{-6}(150) \approx 6.66\ x\ 10^{-4}\ S \tag{87}$$

Donde la Admitancia Shunt equivalente Y, según la ecuación (77) es igual a:

$$Y = jB_C{}' = 6.66\ x\ 10^{-4} \angle 90°\ S \tag{88}$$

Para el cálculo de los valores de envío y extremo de la línea se requieren los parámetros ABCD.

- Parámetros ABCD:

  Para los parámetros ABCD se calculan según las Ecuaciones (80), (81) y (82) por lo que se obtiene:

$$A = 1 + \frac{Y \cdot Z}{2} = 1 + \frac{(6.66\ x\ 10^{-4} \angle 90°)(54.86 \angle 86.36°)}{2} = 0.9817 \angle 0.06768° \tag{89}$$

$$A = 0.9817 \angle 0.06768° \tag{90}$$

$$B = Z = 54.86 \angle 86.36°\ \Omega \tag{91}$$

$$1 + \frac{Y \cdot Z}{4} = 1 + \frac{(6.66\ x\ 10^{-4} \angle 90°)(54.86 \angle 86.36°)}{4} = 0.99088 \angle 0.035° \tag{92}$$

$$C = Y\left(1 + \frac{Y \cdot Z}{4}\right) = (6.66\ x\ 10^{-4} \angle\ 90°)(0.99088 \angle\ 0.035°)$$
$$= 6.599\ x\ 10^{-4} \angle\ 90{,}0335°\ S \tag{93}$$

$$D = A = 0.9817\ \angle\ 0.06768° \tag{94}$$

a) Calcular la corriente en el receptor (I_R) y de envío (I_S)

- Potencia de la Carga:

$$S_c = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{100^2 + 50^2} \approx 111.80\ MVA \tag{95}$$

$$tan^{-1}\frac{Q}{P} = tan^{-1}\frac{50}{100} \approx 26{,}56° \tag{96}$$

- Corriente en el receptor:

$V_R = 218{,}6\ kV$

$\theta_{VR} = -6{,}12°$

$\theta_C = 26{,}56°$

$V_{R(fn)} = \frac{218.6}{\sqrt{3}} \rightarrow 126.19 \angle -6{,}12° kV$

$$I_R = \frac{S_c}{\sqrt{3} \cdot V_R} = \frac{111.80}{\sqrt{3} \cdot 218{,}6} \approx 295{,}28\ A \rightarrow 0.29528\ kA \tag{97}$$

$$\theta_C = \theta_{VR} - \theta_{IR} \tag{98}$$

$$\theta_C - \theta_{VR} = -\theta_{IR} \tag{99}$$

$$26{,}56 - (-6{,}12) = -\theta_{IR} \tag{100}$$

$$32{,}68 = -\theta_{IR} \tag{101}$$

$$\theta_{IR} = -32{,}68 \tag{102}$$

$$I_R = 295{,}28 \angle -32{,}68°\ A \longrightarrow 0{,}29528 \angle -32{,}68°\ kA \tag{103}$$

- Corriente de envío:

Ya que se obtuvieron los parámetros ABDC, se calcula la corriente de envío según la Ecuación (79).

$$I_S = C \cdot V_{R(fn)} + D \cdot I_R \tag{104}$$

$$C \cdot V_{R(fn)} = (6.599 \times 10^{-4} \angle 90.0335°)(126.19 \angle -6{,}12°) = 0.0832 \angle 83.916°\ kA \tag{105}$$

$$D \cdot I_R = (0.9817 \angle 0.06768°)(0.29528 \angle -32.68°) = 0.28999 \angle -32.61°\ kA \tag{106}$$

$$I_S = (0.0832 \angle 83.916°) + (0.28999 \angle -32.61°) \tag{107}$$

$$I_S = 0.2634 \angle -16.18°\ kA \tag{108}$$

b) Calcular la caída de tensión en la línea

Para el cálculo de la tensión de envío se requiere la Ecuación (78):

$$V_{S(fn)} = A \cdot V_{R(fn)} + B \cdot I_R$$

$$A \cdot V_{R(fn)} = (0.9817 \angle 0.06768°)(126.19 \angle -6{,}12°) = 123.8908 \angle -6.0473°\ kV \tag{109}$$

$$B \cdot I_R = (54.86 \angle 86.36°)(0.29528 \angle -32.68°) = 16.1990 \angle 53.68°\ kV \tag{110}$$

$$V_{S(fn)} = (123.8908 \angle -6.0473°\ ) + (16.1990 \angle 53.68°) \tag{111}$$

$$V_{S(fn)} = 132.7959 \angle 2.4493° kV \tag{112}$$

$$V_{S(LL)} = 132.7959\sqrt{3} = 230 \angle 2.4493° kV \tag{113}$$

$V_{R(fn)} = 126.19 \angle -6{,}12°\ kV$

$I_R = 0{,}29528 \angle -32.68°\ kV$

$Y = 6.66\ x\ 10^{-4} \angle 90°\ S$

$Z = 54.86 \angle 86.36°\ \Omega$

La corriente serie de la línea (I_{serie}), se determina aplicando la Ley de Corrientes de Kirchhoff, considerando las corrientes que entran y salen del nodo analizado (V_R), como se muestra en la Ilustración 57.

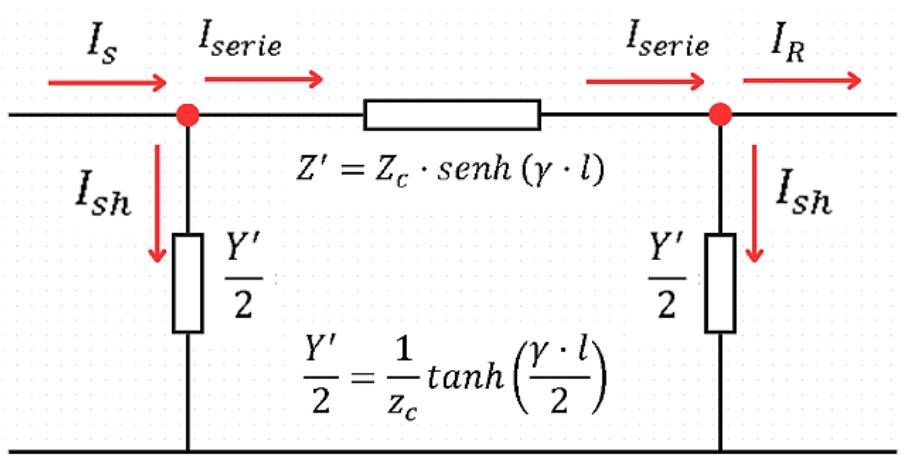
$$I_{shunt} = \frac{Y}{2}\left(V_{R(fn)}\right) = \frac{6.66\ x\ 10^{-4}\angle\ 90°}{2}(126.19\angle\ -6{,}12°) \approx 0.042\ \angle\ 83.88°\ kA \tag{114}$$

$$I_{serie} = I_R + I_{shunt} = (0{,}29528\ \angle - 32.68°) + (0.042\ \angle\ 83.88°) \tag{115}$$

$$I_{serie} \approx 0.279\angle - 24.93°\ kA \tag{116}$$

Ilustración 57

Circuito de corrientes de entrada y salida



Fuente: Adaptación de (Grainger & Stevenson, 1996).

- Caída de tensión en la Línea:

$$\Delta V_f = Z \cdot I_{serie} = (54.86\ \angle\ 86.36°)(0.279\angle - 24.93°) = 15.305\ \angle\ 61.43°\ kV \tag{117}$$

c) Calcular las pérdidas de potencia activa en la línea

$$P_{pérdida} = 3(I_{serie})^2(R) = 3(0.279)^2(3{,}48) \tag{118}$$

$$P_{pérdida} = 0.813\ MW \tag{119}$$

d) Calcular los voltajes en Pu de las barras

- Barra 1:

$$V_{B1,pu} = \frac{230}{230} = 1.000 \angle 0° \tag{120}$$

- Barra 2:

$$V_{B2,pu} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{218.6}{230} = 0{,}95 \angle -6{,}12° \tag{121}$$

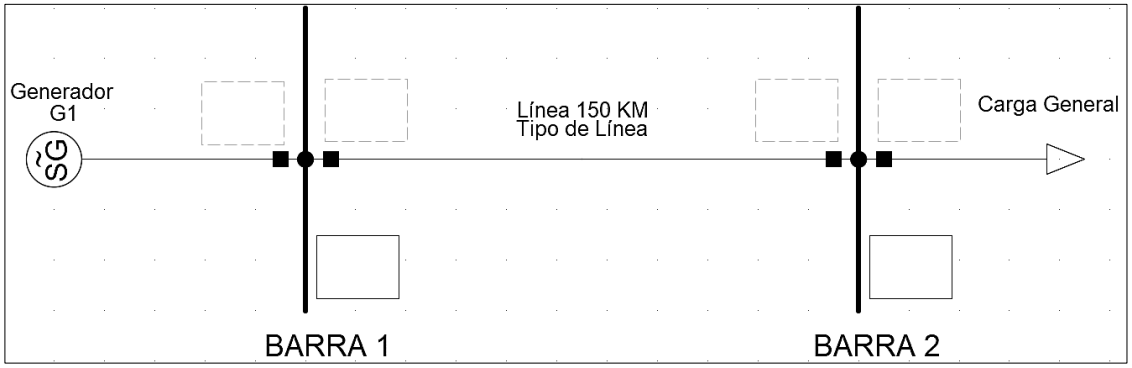
Desarrollo en el Software:

Paso 1:

1. Para realizar el modelo de línea, se debe seguir lo indicado en la Ilustración 58. Donde se agregarán los elementos que se verán a continuación:

Ilustración 58

Sistema a replicar



Fuente: Elaboración Propia.

2. Luego de que se agregaron los elementos, se procede a ingresar los siguientes datos de cada uno.

Datos de Barras:

Barras	Voltaje Línea- Línea
Barra 1	230 kV
Barra 2	230 kV

Datos de Línea 150 km:

Línea	Tensión Nominal	Frecuencia Nominal	Resistencia AC R´(20°C)	Reactancia X´	Susceptancia B´
Línea 150km	230 kV	60 Hz	0,0232 ohm/km	0,365 ohm/km	4,44 µS/km

Datos Generador:

Elemento	Potencia Aparente Nominal	Tensión Nominal	Factor de Potencia Nominal
Generador	150 MVA	230 kV	0,92

Datos Carga General:

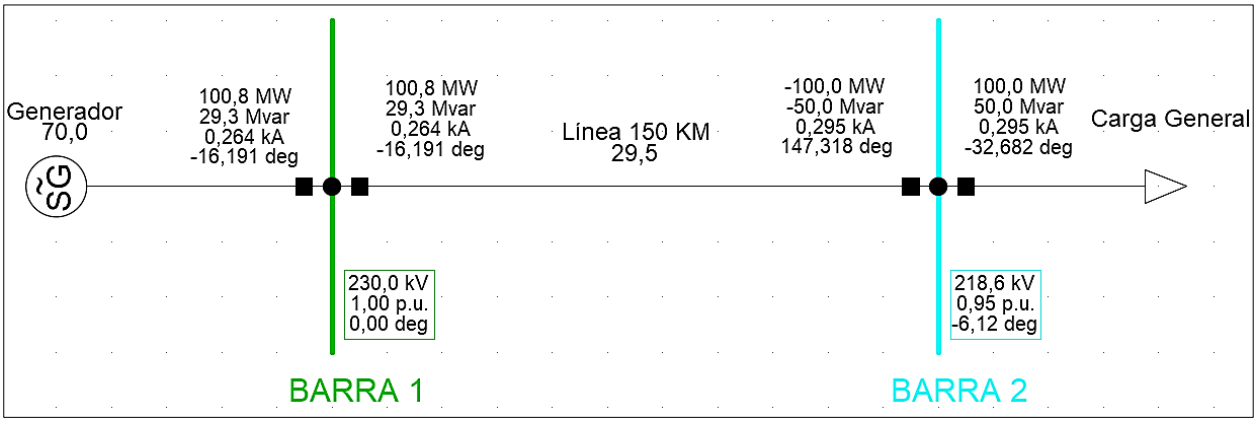
Elemento	Potencia Activa	Potencia Reactiva
Carga General	100 MW	50 Mvar

Paso 2:

1. Se realiza un nuevo flujo de carga y se verifica el estado del sistema.

Ilustración 59

Modelado de Línea de 150 km



Fuente: Elaboración Propia.

Resultados en el software de los Voltajes en Pu de las Barras:

- **BARRA 1:** 1,00 ∠ 0° Vpu
- **BARRA 2:** 0,95 ∠ -6,12° Vpu

Tabla 9

Comparación entre resultados de barras analítico y de software en el modelado de línea media (150 km)

	Analítico		**PowerFactory**	
Barra	**V (pu)**	**Ángulo**	**V (pu)**	**Ángulo**
Barra 1	1,00	0°	1,00	0°
Barra 2	0,95	-6,12°	0,95	-6,12°

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 10

Comparación entre resultados finales analíticos y de software en el modelado de línea media (150 km)

Variables		Analítico	PowerFactory
Emisor	V_S	230 kV	230 kV
	I_S	0,263 kA	0,264 kA
Receptor	V_R	218,6 kV	218,6 kV
	I_R	0,29528 kA	0,29534 kA
Pérdidas en la Línea	$P_{línea}$	0,813 MW	0,813 MW

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Conclusión:

En esta práctica se analizó una línea de media distancia utilizando el modelo π, lo que permitió incluir los efectos de la capacitancia, que en este tipo de tramos ya tienen un peso importante. Al comparar los cálculos analíticos con los obtenidos en PowerFactory, se observó una descripción más precisa del comportamiento de las tensiones y del flujo de potencia reactiva. Gracias a este ejercicio fue posible entender mejor el paso entre los modelos básicos y los intermedios, y ver por qué es necesario escoger el modelo según la distancia real de la línea.

4.1.5 Guía de Práctica N° 05 – Modelado de Línea Larga (250 km)

Tema: Modelado de Línea Larga (250 km).

Objetivo: Modelar una línea de transmisión larga de 250 km en un sistema eléctrico de potencia con elementos básicos de generación, transmisión y distribución, incorporando un elemento de control para optimizar el perfil de tensión en el sistema.

Marco Teórico:

- **Modelado de línea larga**

Una línea larga es aquella cuya longitud es igual o superior a los 250 km, donde los efectos de resistencia, inductancia y capacitancia se distribuyen de manera continua a lo largo del conductor. En este caso, el modelo concentrado ya no es válido, y se requiere representar la línea mediante parámetros distribuidos, los cuales describen con mayor precisión el comportamiento de tensión y corriente a lo largo de la distancia. Este modelo utiliza ecuaciones diferenciales de ondas senoidales que relacionan las variables en los extremos de la línea a través de funciones hiperbólicas. (Liu et al., 2023)

En el modelo de línea larga, z y y representan la impedancia serie y la admitancia shunt por unidad de longitud de la línea, expresadas en Ω/km y S/km, respectivamente. Estos parámetros distribuidos se emplean para el cálculo de la constante de propagación y la impedancia característica, y no deben confundirse con la impedancia y admitancia equivalentes de la línea completa. (Liu et al., 2023)

$$z = R_{dúplex} + jX_L \quad [\Omega/km] \tag{122}$$

$$y = jB \quad [S/km] \tag{123}$$

Las ecuaciones de una línea larga se basan en la constante de propagación (γ) y la impedancia característica (Z_c):

$$\gamma = \sqrt{zy} \ [1/km] \tag{124}$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} \ [\Omega] \tag{125}$$

En el modelo de línea larga, los voltajes y corrientes en ambos extremos se relacionan mediante las constantes de transmisión ABCD, expresadas con funciones hiperbólicas. Los parámetros ABCD establecen la relación funcional entre las magnitudes eléctricas en los extremos de envío y recepción cuando se considera la distribución continua de los parámetros de la línea. Al igual que en el modelo de línea media, estos coeficientes describen el acoplamiento entre tensiones y corrientes y conservan su interpretación física dentro del análisis del sistema. La diferencia radica en la formulación matemática empleada, ya que en este caso los parámetros se expresan mediante funciones hiperbólicas. Dichas expresiones permiten incorporar de forma explícita los efectos distribuidos de la inductancia y la capacitancia a lo largo de la línea, condición necesaria para representar con mayor fidelidad el comportamiento eléctrico de enlaces de gran longitud. Esta representación proporciona una descripción más precisa del comportamiento eléctrico de la línea, siendo adecuada para el análisis analítico de líneas de gran longitud. (Cai et al., 2020)

$$V_s = AV_R + BI_R \tag{126}$$

$$I_s = CV_R + DI_R \tag{127}$$

Donde:

$$A = D = cosh(y.l) \tag{128}$$

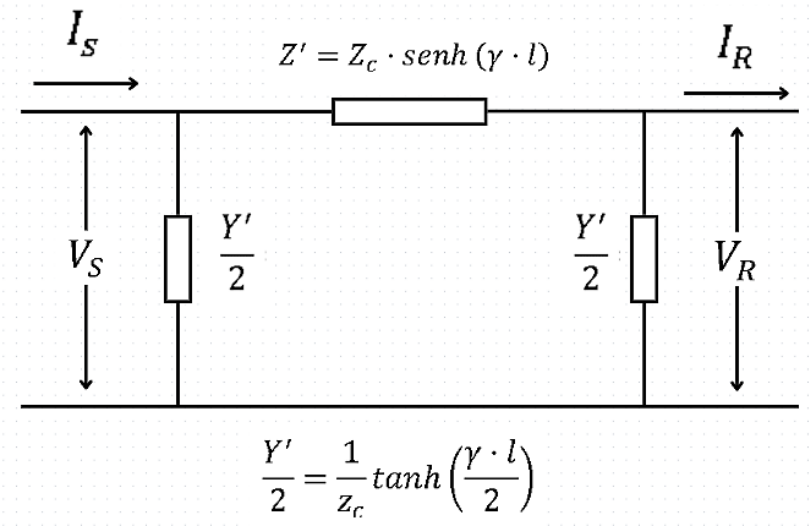
$$B = Z_c \, sinh(y.l) \tag{129}$$

$$C = \frac{sinh(y.l)}{Z_c} \tag{130}$$

Estas ecuaciones permiten obtener las magnitudes y fases de las tensiones y corrientes en los extremos de la línea considerando los efectos de propagación de la onda eléctrica. (Cai et al., 2020)

Ilustración 60

Circuito equivalente π de una línea de transmisión de longitud larga.



Fuente: Adaptación de (Grainger & Stevenson, 1996).

- **Impedancia equivalente**

La impedancia equivalente utilizada en el modelo de parámetros distribuidos representa el efecto acumulado de la resistencia y reactancia de la línea a lo largo de toda su longitud. En esta formulación, el término Z_c corresponde a la impedancia característica de la línea, mientras que la función hiperbólica $senh\,(\gamma \cdot l)$ incorpora el efecto de la constante de propagación γ y de la longitud l. (Liu et al., 2023)

$$Z' = Z_c \cdot senh\,(\gamma \cdot l)\ [\Omega] \tag{131}$$

- **Admitancia equivalente**

La admitancia equivalente distribuida actúa en cada extremo de la línea, modelo comúnmente asociado al circuito π empleado para representar líneas de longitud considerable. El término $1/z_c$ refleja la influencia de la impedancia característica, mientras que la función $tanh\,(\gamma \cdot l)/2$ resume el comportamiento simultáneo de los efectos resistivos, inductivos y capacitivos a lo largo del conductor. (Liu et al., 2023)

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{z_c} tanh\left(\frac{\gamma \cdot l}{2}\right) \tag{132}$$

- **Ángulo de desfase entre magnitudes fasoriales**

En los sistemas eléctricos de potencia, el análisis fasorial es esencial para relacionar magnitudes alternas en estado estacionario. Cada tensión y corriente se representa mediante un fasor, definido por su magnitud y ángulo. En este contexto, el ángulo de la impedancia de la carga θ_C, determina el desfase entre tensión y corriente: si $\theta_C > 0$, la corriente se atrasa respecto a la tensión (carga inductiva); si $\theta_C < 0$, se adelanta (carga capacitiva). Dada la tensión $V \angle \theta_V$, y el ángulo de impedancia θ_C, el ángulo de la corriente se calcula como $\theta_I = \theta_V - \theta_C$, reflejando cómo la naturaleza de la carga afecta la fase de la corriente respecto a la tensión aplicada. Esta relación fasorial es fundamental para el cálculo de potencias complejas, el análisis de flujos de carga y la evaluación del factor de potencia en redes eléctricas. (Ge et al., 2024)

$$\theta_C = \theta_{VR} - \theta_{IR} \tag{133}$$

Donde:

θ_C: Ángulo del factor de potencia de la carga.

θ_{VR}: Ángulo del voltaje en el extremo del receptor.

θ_{IR}: Ángulo de la corriente en el extremo del receptor.

Materiales:

- Computadora de escritorio o Laptop
- Calculadora
- Software DIgSILENT POWERFACTORY.

Caso de Estudio:

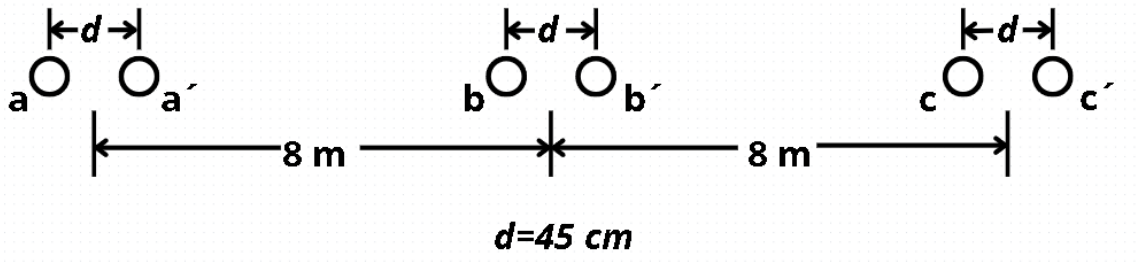
Modelado de Línea larga (250 km)

Cada fase de la línea con conductores agrupados mostrada en la Ilustración 61 es un ACSR *Pheasant* de 1272 kcmil configuración dúplex. En cada fase los dos conductores que integran el haz se encuentran separados 45 cm y la distancia entre los ejes de las fases adyacentes es de 8 m. La línea es de 250 km compuesto por un generador trifásico de 150 MVA a 230 kV nominales a un factor de potencia de 0.92 (inductivo) y una carga trifásica de 100 MW y 50 Mvar donde la tensión en la barra de carga es de $212{,}68\ \text{kV}\angle -10{,}58°$. Se solicita:

a) Calcular la corriente en el receptor (I_R) y de envío (I_S)
b) Calcular la caída de tensión en la línea
c) Calcular las pérdidas de potencia activa en la línea
d) Calcular los voltajes en Pu de las barras

Ilustración 61

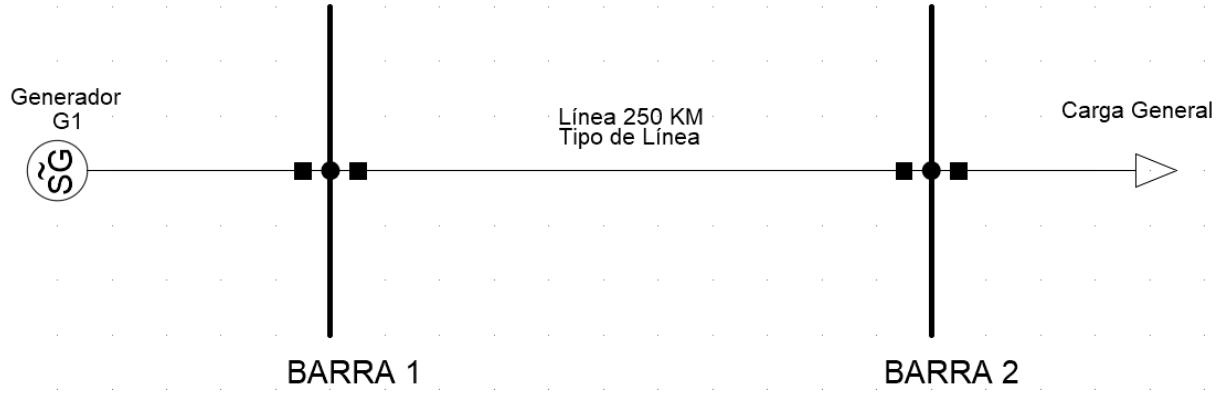
Distancia de los conductores



Fuente: Adaptación de (Grainger & Stevenson, 1996).

Ilustración 62

Sistema de Referencia



Fuente: Elaboración Propia.

Desarrollo Analítico:

A continuación, se desarrollará los siguientes literales con los valores obtenidos de la Resistencia dúplex en la ecuación (39), la Reactancia inductiva en la ecuación (45) y la Susceptancia capacitiva en la ecuación (51) de la Práctica 2. Los cuales son:

$$R_{dúplex} = 0.0232\ \Omega/km$$

$$X_L = 0.365\ \Omega/km$$

$$B = 4.44\ x\ 10^{-6}\ S/km$$

- Impedancia y admitancia por km como se indica en la Ecuación (122) y (123):

$$z = R_{dúplex} + jX_L = 0.0232 + j0.365\ \Omega/km \tag{134}$$

$$y = jB = j4.44\ x\ 10^{-6}\ S/km \tag{135}$$

$$zy = (0.0232 + j0.365)(j4.44\ x\ 10^{-6}) = -1.6206\ x\ 10^{-6} + j1.0301x\ 10^{-7} \\ \rightarrow 1.62387\ x\ 10^{-6}\angle\ 176.3631° \tag{136}$$

- Constante de propagación:

Utilizando la Ecuación (124) y aplicando el resultado de la operación (136), se obtiene:

$$\gamma = \sqrt{zy} = \sqrt{1.62387\ x\ 10^{-6}\angle\ 176.3631} = 1.2742\ x\ 10^{-3}\ \angle\ 88.18° \tag{137}$$

$$\gamma \approx 0.0000404375 + j0.00127367\ (\frac{1}{Km}) \tag{138}$$

- Impedancia característica:

Según la Ecuación (125), se obtiene:

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} = \sqrt{\frac{0.0232 + j0.365}{j4.44\ x\ 10^{-6}}} = 286.8452 - j9.1147\ \Omega \rightarrow 286.99\angle - 1.82°\ \Omega \tag{139}$$

Ya que se tiene la constante de propagación y la Impedancia característica, ya se pueden calcular la Impedancia y Admitancia equivalente del sistema como se ven en la ecuación (131) y (132).

$$Z' = Z_c \cdot senh\ (\gamma \cdot l) = (286.99\angle - 1.82°)senh\ ((1.2742\ x\ 10^{-3}\ \angle\ 88.18°)(250)) \tag{140}$$

$$Z' = 89.6101\ \angle\ 86{,}46°\ \Omega \tag{141}$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{z_c} tanh\left(\frac{\gamma \cdot l}{2}\right) = \frac{1}{286.99\angle - 1.82°} tanh\left(\frac{(1.2742\ x\ 10^{-3}\ \angle\ 88.18°)(250)}{2}\right) \tag{142}$$

$$\frac{Y'}{2} = 5.5972\ x\ 10^{-4}\ \angle\ 89{,}97°\ S \tag{143}$$

- Multiplicamos γ por *l:*

  l: 250 km

$$\gamma \cdot l = (1.2742\ x\ 10^{-3} \angle 88.18°)(250) = 0.31855 \angle 88.18° \tag{144}$$

$$\cosh\ (\gamma \cdot l) \approx 0.9500 + j0.0032 \tag{145}$$

$$\sinh\ (\gamma \cdot l) \approx 0.0096 + j0.3126 \tag{146}$$

- Parámetros ABCD (por fase, longitud total):

  Para los parámetros ABCD se calculan según las Ecuaciones (128), (129) y (130) por lo que se obtiene:

$$A = D = cosh(y.l) = 0.9500 + j0.0032 \tag{147}$$

$$B = Z' = Z_c\, sinh(y.l) = 89.6101 \angle 86{,}46°\ \Omega \tag{148}$$

$$C = \frac{sinh(y.l)}{Z_c} = \frac{0.0096 + j0.3126}{286.99\angle -1.82°} \approx 1.0898\ x\ 10^{-3} \angle 90.06° S \tag{149}$$

a) Calcular la corriente en el receptor (I_R) y de envío (I_S)

- Potencia de la Carga:

$$S_C = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{100^2 + 50^2} \approx 111.80\ MVA \tag{150}$$

$$tan^{-1}\frac{Q}{P} = tan^{-1}\frac{50}{100} \approx 26{,}56° \tag{151}$$

- Corriente en el receptor:

$V_R = 212{,}68\ kV$

$\theta_{VR} = -10{,}58°$

$\theta_C = 26{,}56°$

$V_{R(fn)} = \frac{212.68\ kV}{\sqrt{3}} = 122.79 \angle -10.58°\ kV$

$$I_R = \frac{S_C}{\sqrt{3} \cdot V_R} = \frac{111.80}{\sqrt{3} \cdot 212{,}68} \approx 303{,}49\ A \longrightarrow 0.30349\ kA \tag{152}$$

$$\theta_C = \theta_{VR} - \theta_{IR} \tag{153}$$

$$\theta_C - \theta_{VR} = -\theta_{IR} \tag{154}$$

$$26{,}56 - (-10{,}58) = -\theta_{IR} \tag{155}$$

$$37{,}14 = -\theta_{IR} \tag{156}$$

$$\theta_{IR} = -37{,}14 \tag{157}$$

$$I_R = 303{,}49 \angle -37{,}14°\ A \longrightarrow 0{,}304 \angle -37{,}14°\ kA \tag{158}$$

- Cálculo de la corriente de envío según la Ecuación (127), se obtiene:

$$I_S = C \cdot V_{R(fn)} + D \cdot I_R \tag{159}$$

$$\begin{aligned} I_S &= (1.0898\ x\ 10^{-3} \angle 90.06°)(122.79 \angle -10.58°) \\ &+ (0.95 \angle 0.192°)(0{,}30349 \angle -37{,}14°) \end{aligned} \tag{160}$$

$$I_S = 0.258 \angle -9.29°\ kA \tag{161}$$

b) Calcular la caída de tensión en la línea

Para el cálculo de la tensión de envío se requiere la Ecuación (126):

$$V_{S(fn)} = A \cdot V_{R(fn)} + B \cdot I_R$$

$$\begin{aligned} V_{S(fn)} &= (0.95 \angle 0.192°\ )(122.79 \angle -10.58°) \\ &+ (89.6101 \angle 86{,}46)(0{,}304 \angle -37{,}14°) \end{aligned} \tag{162}$$

$$V_{S(fn)} = 132.467 \angle -0.17°\ kV \tag{163}$$

$$V_{S(LL)} = 132.467\ \sqrt{3} = 229.43 \angle -0.17°\ kV \tag{164}$$

La corriente serie de la línea (I_{serie}), se determina aplicando la Ley de Corrientes de Kirchhoff, considerando las corrientes que entran y salen del nodo analizado (V_S), como se muestra en la Ilustración 63.

$$I_s = I_{serie} + I_{sh} \tag{165}$$

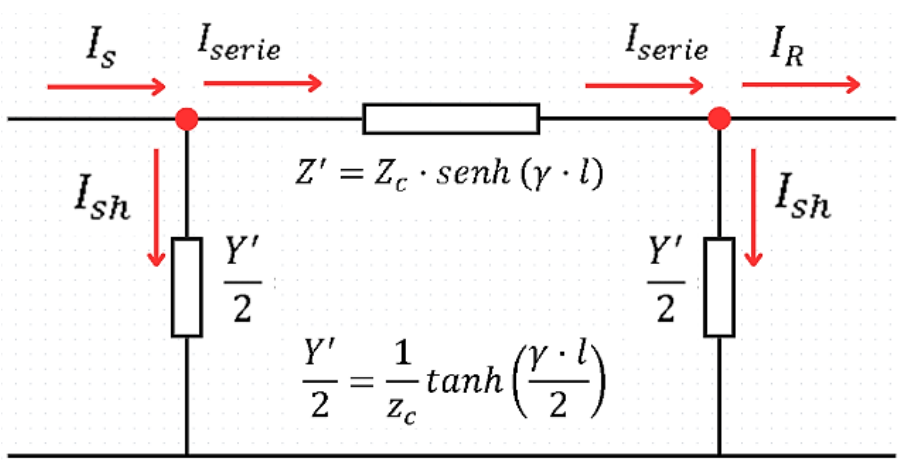
$$I_{serie} = I_s - I_{sh} \tag{166}$$

$$\begin{aligned} I_{sh} = \frac{Y'}{2} V_{S(fn)} &= (5.5972\ x\ 10^{-4} \angle 89{,}97°)(132.467 \angle -0.17°) \\ &= 0.0741 \angle 89{,}79°\ kA \end{aligned} \tag{167}$$

$$\begin{aligned} I_{serie} = I_s - I_{sh} &= (0.2582 \angle -9.29°) - (0.0741 \angle 89{,}79°) \\ &= 0.2796 \angle -24.46°\ kA \end{aligned} \tag{168}$$

Ilustración 63

Circuito de corrientes de entrada y salida



Fuente: Adaptación de (Grainger & Stevenson, 1996).

- Caída de Tensión:

$$\Delta V = Z' \cdot I_{serie} = (89.6101 \angle 86{,}46°)\ (0.2796 \angle -24.46°\ ) = 25.05 \angle 62°\ kV \tag{169}$$

c) Calcular las pérdidas de potencia activa en la línea

$R_{total} = R_{duplex} \cdot l = 0{,}0232 \cdot 250 = 5{,}8\ \Omega$

$$P_{pérdida} = 3 \cdot R_{total} \cdot {I_{serie}}^2 = 3(5.8)(0.2796)^2\ \approx 1.36\ MW \tag{170}$$

d) Calcular los voltajes en Pu de las barras

- Barra 1:

$$V_{B1,pu} = \frac{230}{230} = 1.000 \angle 0° \tag{171}$$

- Barra 2:

$$V_{B2,pu} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{212{,}68}{230} = 0.924 \angle -10.58° \tag{172}$$

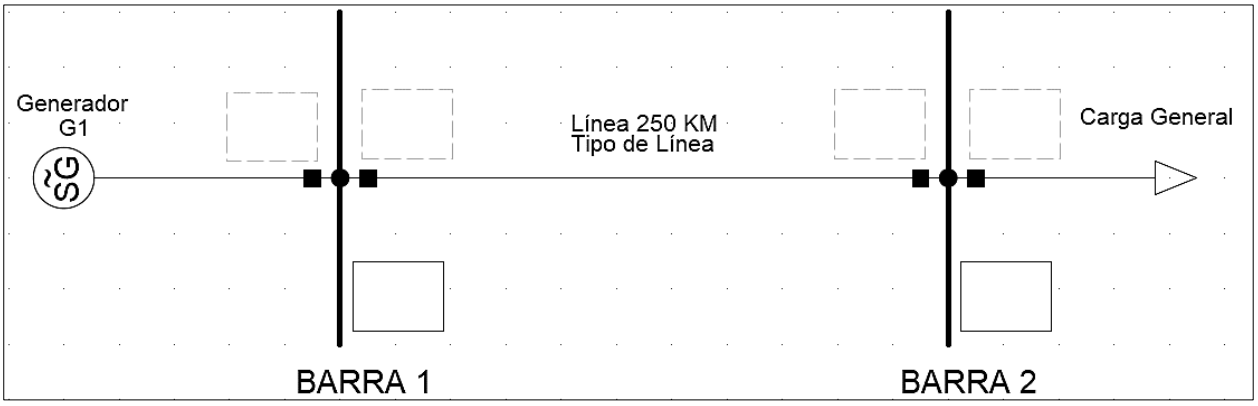
Desarrollo en el Software:

Paso 1:

1. Se realiza el siguiente modelo según la Ilustración 64, primero ingresando las barras respectivas para poder ir enlazando cada uno de los elementos a replicar:

Ilustración 64

Sistema de Referencia



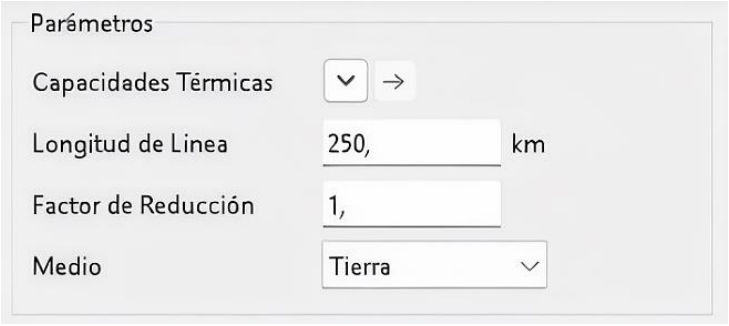
Fuente: Elaboración Propia.

2. Se ingresan los siguientes valores para el sistema:

Línea	Tensión Nominal	Frecuencia Nominal	Resistencia AC R´(20°C)	Reactancia X´	Susceptancia B´
Línea 250 km	230 kV	60 Hz	0,0232 ohm/km	0,365 ohm/km	4,44 $\mu S/km$

Ilustración 65

Referencia de cambio de longitud de la línea



Fuente: Elaboración Propia.

Datos de Barras:

Barras	Voltaje Línea- Línea
Barra 1	230 kV
Barra 2	230 kV

Datos Carga General:

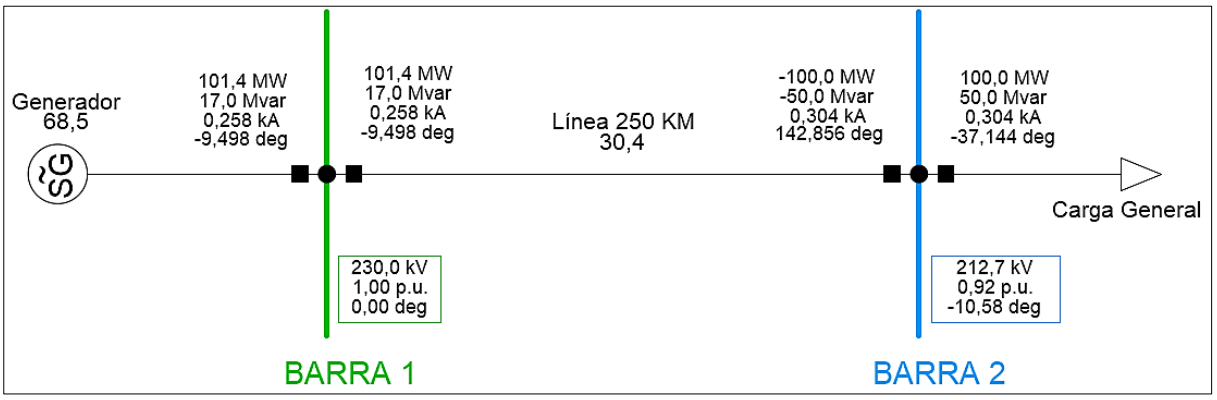
Elemento	Potencia Activa	Potencia Reactiva
Carga General	100 MW	50 Mvar

Paso 2:

1. Se realiza un nuevo flujo de carga y se verifica el estado del sistema

Ilustración 66

Flujo de Carga de nuestro sistema de 250 km



Fuente: Elaboración Propia.

Resultados en el software de los Voltajes en Pu de las Barras:

- **BARRA 1:** 1,00 ∠ 0° Vpu
- **BARRA 2:** 0,92 ∠ -10,6° Vpu

Tabla 11

Comparación entre resultados de barras analítico y de software en el modelado de línea larga (250 km)

	Analítico		PowerFactory	
Barra	**V (pu)**	**Ángulo**	**V (pu)**	**Ángulo**
Barra 1	1,00	0°	1,00	0°
Barra 2	0,924	-10,58°	0,92	-10,58°

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 12

Comparación entre resultados finales analíticos y de software en el modelado de línea larga (250 km)

Variables		Analítico	PowerFactory
Emisor	V_S	229,43 kV	230 kV
	I_S	0,258 kA	0,258 kA
Receptor	V_R	212,18 kV	212,18 kV
	I_R	0,304 kA	0,304 kA
Pérdidas en la Línea	$P_{línea}$	1,36 MW	1,36 MW

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Conclusión:

La práctica se desarrolló a partir del modelo de parámetros distribuidos, seleccionado por su capacidad para reproducir con mayor detalle el comportamiento eléctrico de líneas de transmisión de gran extensión. La simulación de este tipo de enlace permitió identificar variaciones más pronunciadas en los niveles de tensión y corriente, así como la presencia de fenómenos asociados a la propagación de la señal a lo largo del conductor. La comparación entre los valores obtenidos mediante simulación y los resultados derivados del desarrollo analítico mostró una correspondencia consistente. Esta concordancia respalda la idoneidad del modelo de parámetros distribuidos cuando el análisis requiere una descripción precisa de los efectos eléctricos característicos de líneas de transmisión extensas, tanto en condiciones de régimen permanente como en la evaluación de caídas de tensión y ángulos de fase.

4.1.6 Guía de Práctica N° 06 – Modelado del Sistema con datos del módulo AEL-MPSS-10 del laboratorio de potencia

Tema: Modelado del sistema con datos del módulo AEL-MPSS-10 del laboratorio de potencia.

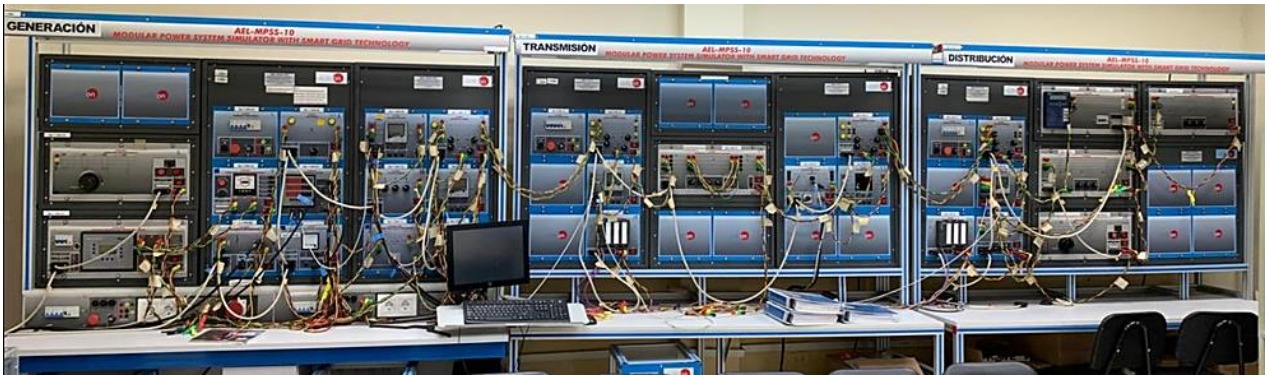
Objetivo: Modelar una línea de transmisión empleando los parámetros equivalentes del módulo didáctico, e incorporar capacitancias shunt al modelo con el fin de analizar escenarios y comparar los resultados obtenidos mediante el desarrollo analítico y el módulo físico.

Marco Teórico:

El módulo AEL-MPSS es un sistema didáctico diseñado para apoyar la enseñanza práctica de los principales procesos del sistema eléctrico, desde la generación hasta la distribución. Su estructura modular permite trabajar con componentes reales como generadores, líneas de transmisión, cargas, equipos de energías renovables y relés de protección, de manera que los estudiantes pueden reproducir situaciones propias de una red eléctrica moderna. Además, incorpora un entorno de supervisión y control basado en SCADA, lo que facilita visualizar mediciones, ejecutar maniobras y analizar el comportamiento del sistema bajo distintas condiciones operativas. Gracias a esta integración, el módulo se convierte en una herramienta útil para comprender cómo interactúan los distintos elementos de una red inteligente y cómo influyen en la estabilidad, la seguridad y la calidad del suministro. (Edibon, 2025)

Ilustración 67

Módulo EDIBON AEL-MPSS-10



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 13

Datos de Red Externa (Transformador)

Tensión		Potencia	Frecuencia de Operación
Entrada	**Salida**	**kVA**	
240 V	400 V	12 kVA	50/60 Hz

Nota. Fuente: Manual del Módulo AEL-MPSS-10.

Tabla 14

Datos de Equivalentes para la Línea de Transmisión

Variable	Datos conmutables de la Línea	
R	10 Ω	15 Ω
L	33 mH	72 mH
C	0 µF	1 µF

Nota. Fuente: Manual del Módulo AEL-MPSS-10.

Tabla 15

Datos de Potencias por cada Banco del Módulo de Cargas (Conexión Estrella)

Bancos	Módulo Resistivo por fase	Módulo Inductivo por fase	Módulo Capacitivo por fase
Por banco	150 Ω	1.4 H	7 µf

Nota. Fuente: Manual del Módulo AEL-MPSS-10.

Ilustración 68

Módulo de Generación AEL-MPSS-10

Fuente: Elaboración Propia.

Ilustración 69

Módulo de Transmisión AEL-MPSS-10

Fuente: Elaboración Propia.

Ilustración 70

Módulo de Distribución AEL-MPSS-10

Fuente: Elaboración Propia.

Materiales:

- Computadora de escritorio o Laptop
- Calculadora
- Módulo AEL-MPSS-10 (Laboratorio de Potencia - ULEAM)

Caso de Estudio:

Un sistema eléctrico trifásico está alimentado por la red eléctrica a una tensión de 240 V y seguido de un transformador elevador de 240/400 V con una potencia de 12 kVA y una reactancia de 1 Ω. Este alimenta una línea de transmisión conformada por un conductor ACSR tipo Waxwing con una resistencia a 20° C de 0.3488 Ω/milla en disposición horizontal y configuración simplex, con una distancia entre fases de 16 cm, como se muestra en la Ilustración 72. La línea de transmisión a su salida alimenta un transformador de 5 kVA con relación 1:1, y una reactancia equivalente de 1.6 Ω. La carga está constituida por dos bancos trifásicos puramente resistivos de 150 Ω por fase, conectado en paralelo con dos bancos trifásicos puramente inductivos de 1,4 H por fase. Para lo que se consideran cuatro escenarios:

1. Sistema sin carga y con apertura de S1 y S2 de las capacitancias shunt.
2. Sistema sin carga y con cierre de S1 y S2 de las capacitancias shunt.
3. Sistema con carga y con apertura de S1 y S2 de las capacitancias shunt.
4. Sistema con carga y con cierre de S1 y S2 de las capacitancias shunt.

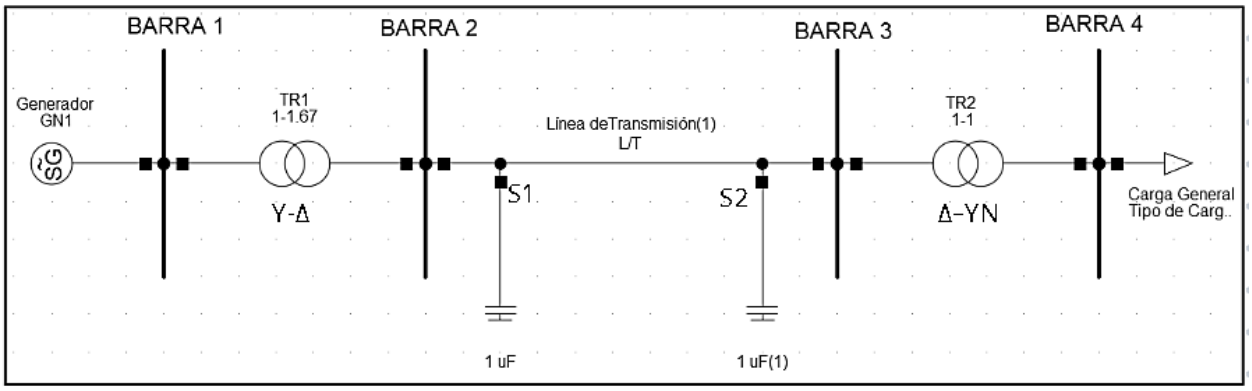
Considerando una línea de longitud de 47.01 km, para cada uno de estos escenarios, se solicita:

a) Calcular la corriente del terminal de envío I_S (lado de alta de TR1) y de recepción I_R (Carga) en los cuatro escenarios.

b) Calcular la tensión de envío V_S (lado de alta de TR1) y de recepción V_R (Carga) en los cuatro escenarios.

Ilustración 71

Sistema de Referencia para modelo del sistema



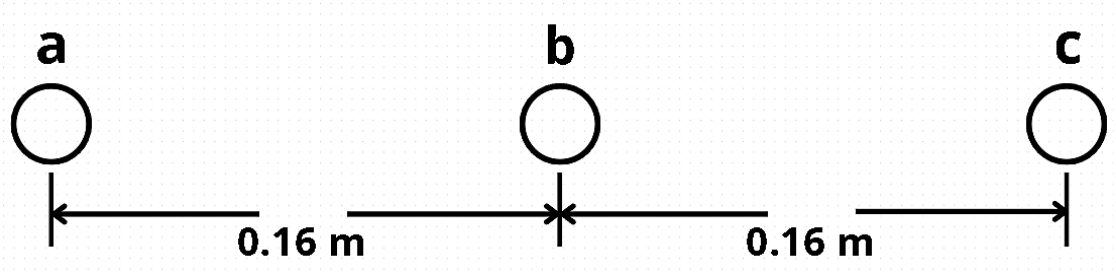
Fuente: Elaboración Propia.

Desarrollo Analítico:

A continuación, se realizará el cálculo de los parámetros R y L de la línea de transmisión:

Ilustración 72

Configuración Simplex



Fuente: Elaboración Propia.

- Cálculo de Resistencia

Se realiza la conversión de Resistencia a 20° C tipo Waxwing de Ω/milla a Ω/km con el valor que se muestra en la Tabla 4:

$$R = 0.3488\ \frac{\Omega}{milla} \cdot \frac{1\ milla}{1.609344\ km} = 0.2168\ \Omega/km \tag{173}$$

$$R = 0.2168\ \frac{\Omega}{km} \cdot 47.01\ km = 10{,}19\ \Omega \tag{174}$$

- Cálculo de Reactancia Inductiva

$D_s = RMG_{Tabla4} = 0.0198\ pies \rightarrow 0.00604\ m$

Cuando se trabaja en una configuración Simplex se mantiene el mismo RMG (0.00604 m). Para calcular la distancia equivalente entre cada fase se usa la Ecuación (18) y para el cálculo de la Inductancia la Ecuación (19).

$D = 0.16\ m$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ca}} = \sqrt[3]{0.16\ x\ 0.16\ x\ 0.32} \approx 0.201587\ m \tag{175}$$

$$L = 2\ x\ 10^{-7} ln\left(\frac{D_{eq}}{D_s^b}\right) = L = 2\ x\ 10^{-7} ln\left(\frac{0.20158}{0.00604}\right) \tag{176}$$

$$L \approx 7.015\ x\ 10^{-7} H/m \tag{177}$$

- Conversión de H/m a mH/km:

$$L = 7.015\ x\ 10^{-7}\ \frac{H}{m} \cdot \frac{1000\ m}{1\ km} \cdot \frac{1000\ mH}{1\ H} \tag{178}$$

$$L \approx 0.702\ mH/km \tag{179}$$

- Inductancia equivalente:

$$L = 0.702\ \frac{mH}{km} \cdot\ 47.01km = 33\ mH \tag{180}$$

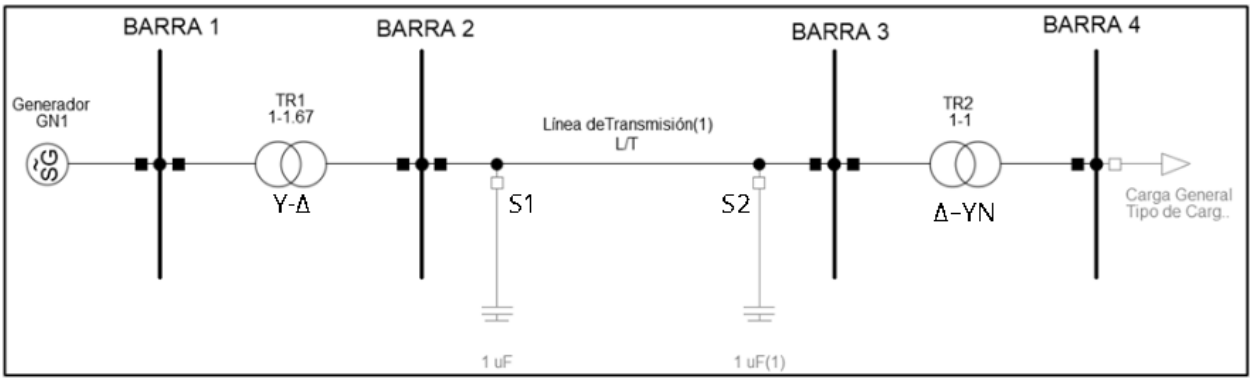
Análisis de Casos

1. **Sistema sin carga y con apertura de S1 y S2 de las capacitancias shunts**

A continuación, se realizará el siguiente ejercicio:

Ilustración 73

Sistema sin cargas y sin capacitancias shunt



Fuente: Elaboración Propia.

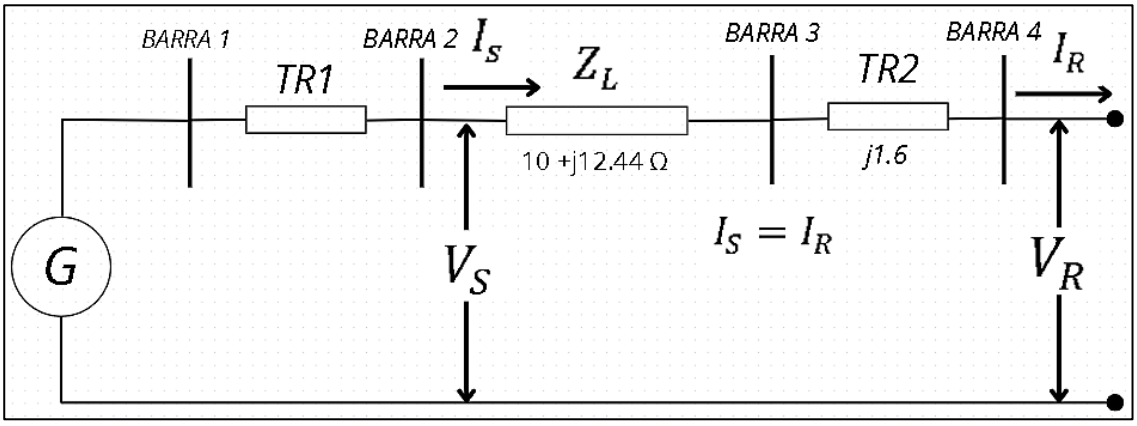
Bajo condiciones de circuito abierto, sin carga conectada y con las capacitancias shunt desconectadas, el sistema no presenta circulación de corriente a lo largo de la línea de transmisión. En consecuencia, la caída de tensión en la impedancia serie resulta nula y los niveles de tensión permanecen uniformes entre los extremos de envío y recepción. Esta condición representa el estado en vacío del sistema y sirve como referencia para evaluar el impacto de la incorporación de cargas y elementos reactivos en análisis posteriores. Por lo que:

$$V_S = V_R = 400\ V$$

$$I_S = I_R = 0\ A$$

Ilustración 74

Diagrama unifilar del sistema sin carga conectada



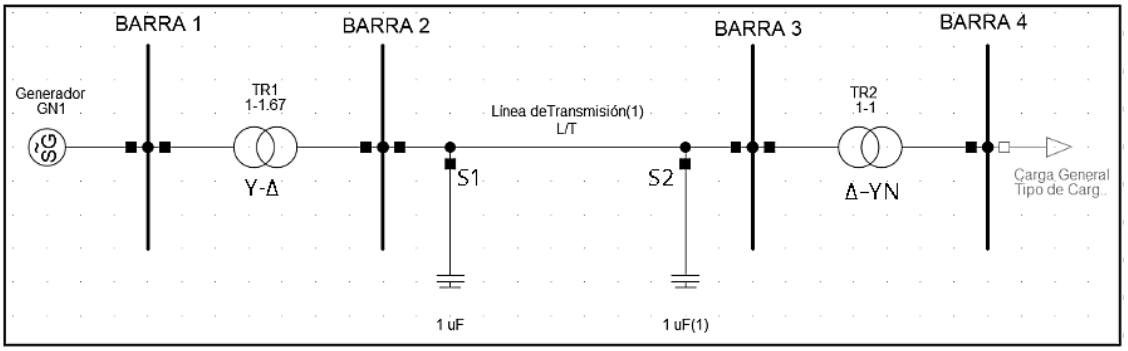
Fuente: Elaboración Propia.

2. **Sistema sin carga y con cierre de S1 y S2 de las capacitancias shunts**

A continuación, se realizará el siguiente ejercicio:

Ilustración 75

Sistema sin carga y con cierre de S1 y S2



Fuente: Elaboración Propia.

Para obtener los valores de entrada y salida del sistema, se procede a calcular como se muestra en la Ilustración 76.

Conversión de 1µF a reactancia capacitiva:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi(60)(1x10^{-6})} \tag{181}$$

$$X_C = -j2652\ \Omega \tag{182}$$

$$\mathrm{X_C} = X_{C1} = X_{C2} = -j2652\ \Omega \tag{183}$$

Valores obtenidos de R y L en la línea de transmisión:

$R = 10\ \Omega$

$L = 33\ mH$

Conversión a reactancia inductiva:

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi(60)\ (33) = 12.44\ \Omega \tag{184}$$

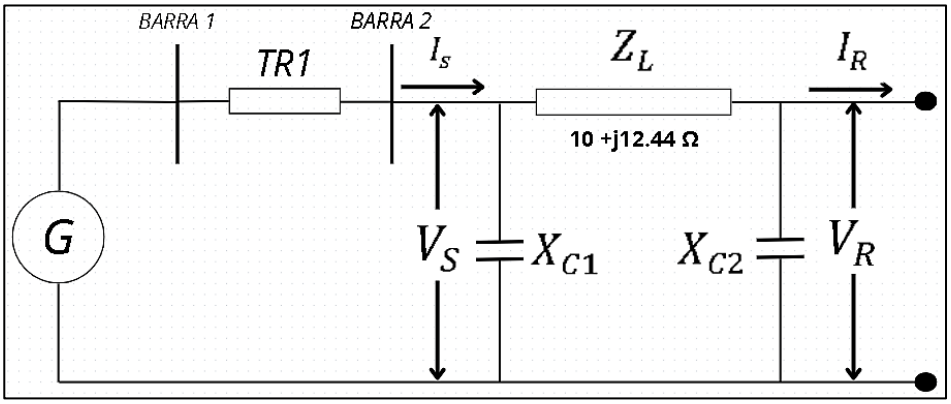
Impedancia de la Línea en rectangular y polar:

$$Z_L = 10 + j12.44\ \Omega \tag{185}$$

$$Z_L = 15.96 \angle 51.21°\ \Omega \tag{186}$$

Ilustración 76

Circuito a simplificar



Fuente: Elaboración Propia.

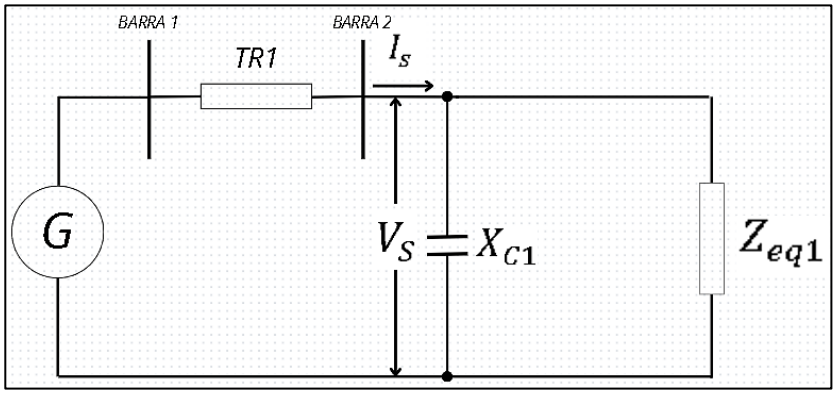
Para la reducción del sistema se procederá con el siguiente proceso:

$X_{C1} = X_{C2} = -j2652\ \Omega$

$$Z_{eq1} = Z_L + X_{C2} = (15.96 \angle 51.21°\ \Omega) + (-j2652\ \Omega) = 2639.57 \angle -89.78°\ \Omega \qquad (187)$$

Ilustración 77

Reducción a Zeq1

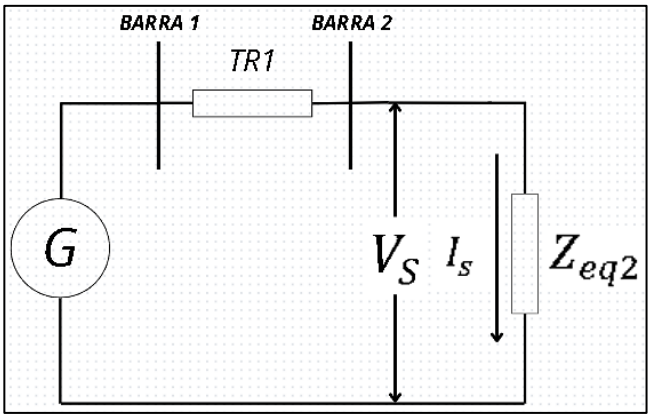


Fuente: Elaboración Propia.

$$Z_{eq2} = Z_{eq1}//X_{C1} = \frac{(2639.57 \angle -89.78°)\ (-j2652)}{(2639.57 \angle -89.78°) + \ (-j2652)} = 1322.88 \angle\ -89.89°\ \Omega \qquad (188)$$

Ilustración 78

Circuito equivalente



Fuente: Elaboración Propia.

Se procede a calcular la corriente a la salida del TR1:

Tensión de salida del transformador (TR1): 400 V

$$V_S = \frac{400\ V}{\sqrt{3}} = 230.94\ V$$

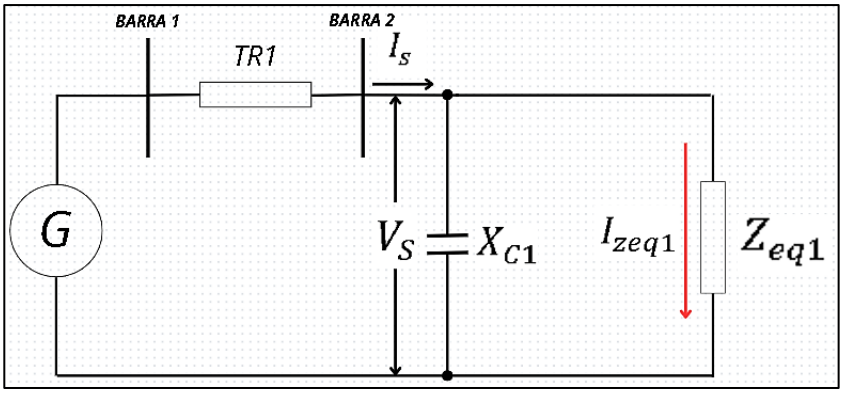
$$I_S = \frac{V_S}{Z_{eq2}} = \frac{230.94\ V}{1322.88\angle\ -89.89°} = 0{,}174\ \angle\ 89.89°\ A \tag{189}$$

Cálculo de la corriente en Z_{eq1}:

$$I_{zeq1} = \frac{V_S}{Z_{eq1}} = \frac{230.94\ V}{2639.57\ \angle - 89.78°} = 0.088\ \angle\ 89.78°\ A \tag{190}$$

Ilustración 79

Corriente circulando por Zeq1

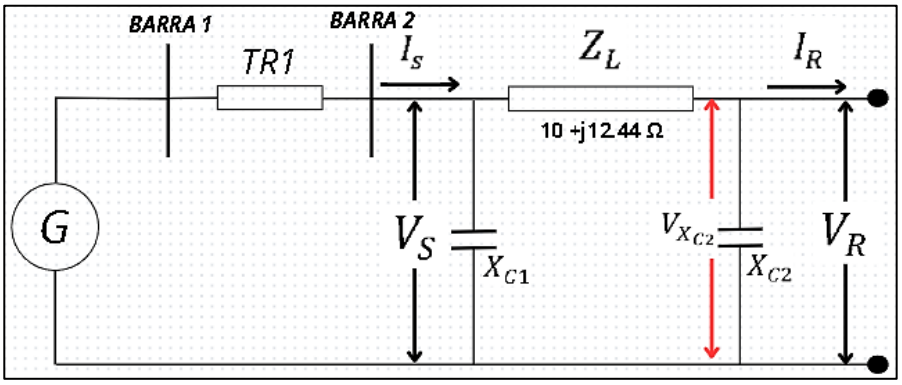


Fuente: Elaboración Propia.

Se calcula la tensión en la reactancia capacitiva X_{C2}:

Ilustración 80

Cálculo de la tensión en X_{C2}



Fuente: Elaboración Propia.

Donde, $V_S = V_{X_{C2}}$

$$V_{X_{C2}} = I_{zeq1} \cdot X_{C2} = (0.088 \angle 89.78°)(-j2652) = 233.37\angle -0.22° \, V \tag{191}$$

$$V_{LL} = V_{X_{C2}} \cdot \sqrt{3} = 404.2 \, V \tag{192}$$

La corriente en el extremo receptor I_R es cero porque el sistema se encuentra en condición de carga abierta; es decir, no existe una impedancia conectada que permita el flujo de corriente hacia la carga. Aunque el circuito posee elementos como la impedancia de la línea, capacitancias shunt y la reactancia del transformador, estos elementos solo permiten circulación de corrientes internas dentro del sistema. Sin embargo, al no existir un camino cerrado después del nodo receptor, no se establece circulación de corriente hacia la salida, por lo que:

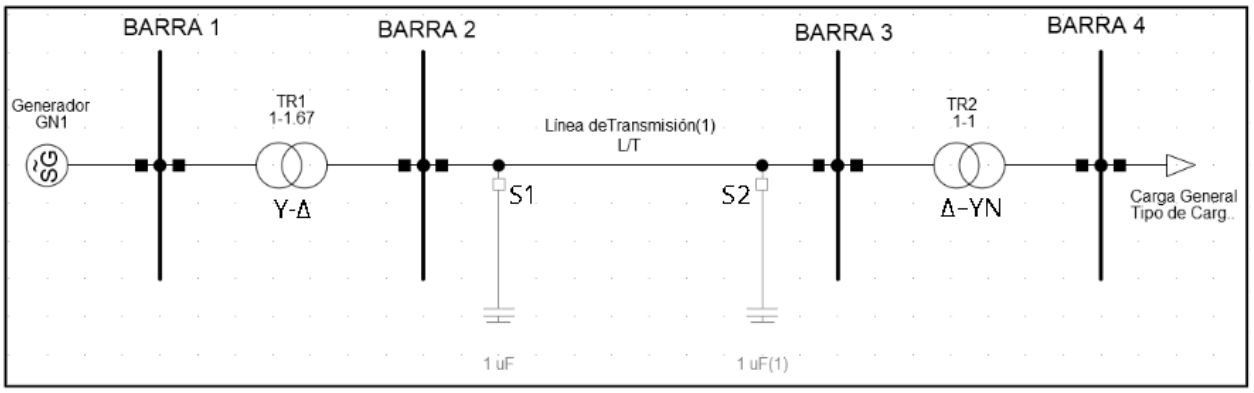
$$I_R = 0 \, A$$

3. Sistema con carga y con apertura de S1 y S2 de las capacitancias shunts

A continuación, se realizará el siguiente ejercicio:

Ilustración 81

Sistema con S1 y S2 abiertos y con carga

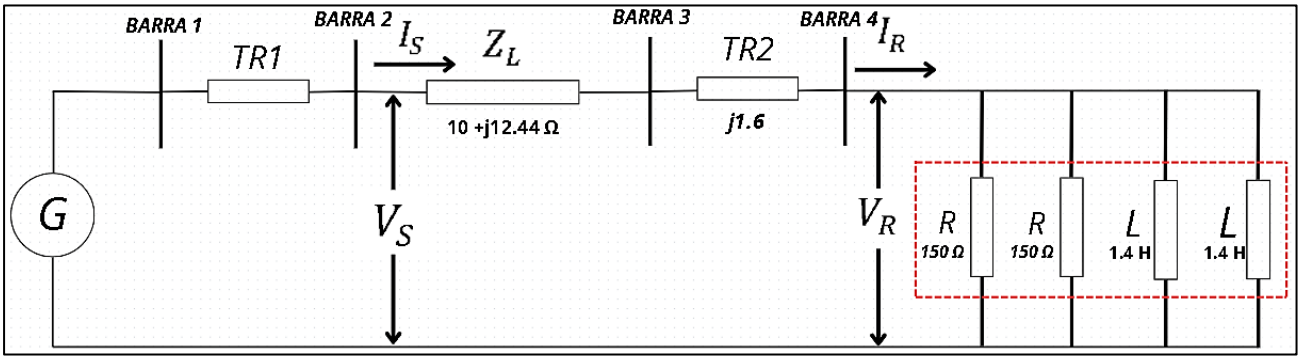


Fuente: Elaboración Propia.

Ya que la carga es RL y se encuentran en paralelo, se realiza el cálculo equivalente tanto para los dos bancos resistivos e inductivos. De la manera que se trabaja por fase se usa 150 Ω y 1.4 H para el módulo inductivo, pero al ser dos bancos por cada módulo se realiza el cálculo equivalente de ambos:

Ilustración 82

Circuito a simplificar



Fuente: Elaboración Propia.

Para el siguiente cálculo se obtuvieron los valores de resistencia e inductancia por fase de la Tabla 15:

$$R_{eq} = \frac{150 \cdot 150}{150 + 150} = 75\ \Omega \tag{193}$$

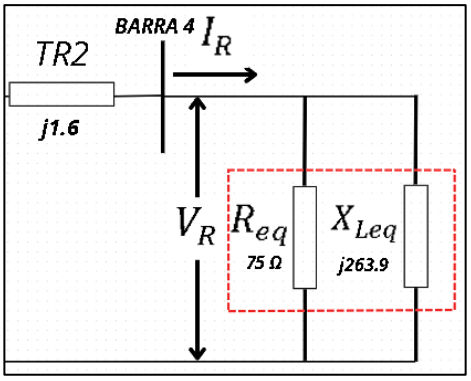
Donde, para la inductancia, se realiza la conversión a Reactancia Inductiva:

$$X_L = 2\pi f L = 2\pi(60)\ (1.4) = 527.8\ \Omega \tag{194}$$

$$X_{Leq} = \frac{j527.8 \cdot j527.8}{j527.8 + j527.8} = j263.9\ \Omega \tag{195}$$

Ilustración 83

Reducción a resistencia y reactancia equivalente



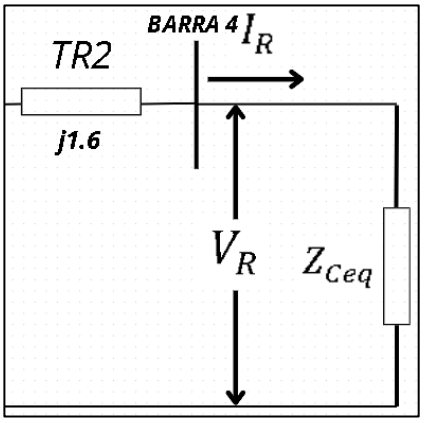
Fuente: Elaboración Propia.

Ya que se obtuvieron los datos equivalentes tanto para R como para L, al estar en paralelo, se realiza el siguiente cálculo para encontrar la impedancia equivalente de la carga.

$$Z_{Ceq} = R_{eq}\ //\ jX_{Leq} = \frac{75 \cdot j263.9}{75 + j263.9} = 72.14 \angle 15.86°\ \Omega \tag{196}$$

Ilustración 84

Impedancia Total de la Carga (Z_{Ceq})

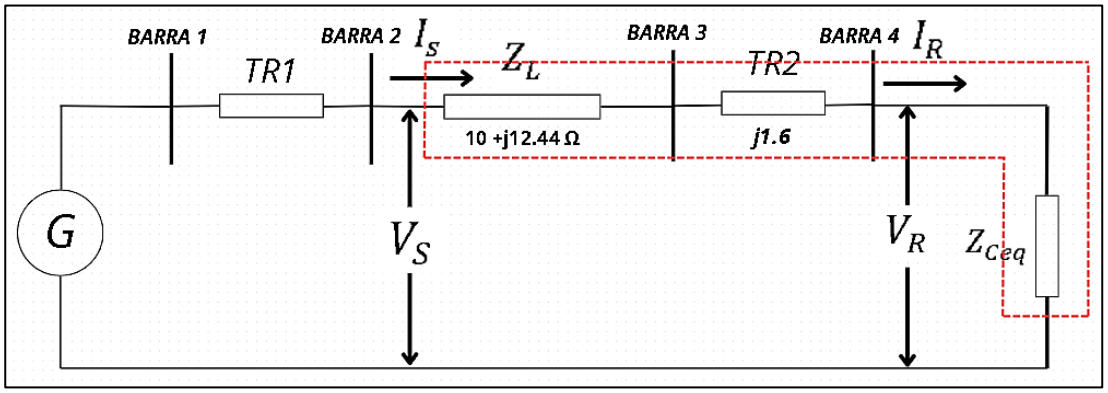


Fuente: Elaboración Propia.

Luego de que se obtuvo la impedancia equivalente de la carga, realizamos el cálculo en serie con TR2 y con Z_L, como se ve en la siguiente ilustración:

Ilustración 85

Reducción a impedancia total del sistema



Fuente: Elaboración Propia.

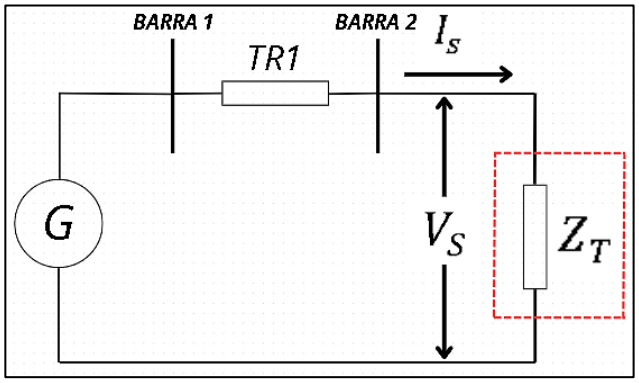
Donde, se realiza la sumatoria en serie de lo antes mencionado:

$$Z_T = Z_L + TR2 + Z_{Ceq} = (15.96 \angle 51.21° \, \Omega) + (j1.6) + (72.14 \angle 15.86° \, \Omega) \qquad (197)$$

$$Z_T = 86.27 \angle 23.03° \, \Omega \tag{198}$$

Ilustración 86

Impedancia Total del sistema



Fuente: Elaboración Propia.

Se procede a calcular la corriente a la salida del TR1:

Tensión de salida del transformador (TR1): 400 V

$$V_S = \frac{400\ V}{\sqrt{3}} = 230.94\ V$$

$$I_S = \frac{V_S}{Z_T} = \frac{230.94\ V}{86.27 \angle 23.03° \ \Omega} = 2.67\angle -23.03° A \tag{199}$$

En el modelo de línea corta solo existe impedancia serie. Por ello, la corriente al inicio es igual a la corriente en la carga:

$$I_{S-BARRA\ 2} = I_{R-BARRA\ 4} \tag{200}$$

$$I_{S-BARRA\ 2} = I_{R-BARRA\ 4} = 2.67\angle -23.03° \ A$$

Ya que se obtuvo la corriente I_S a la salida del TR1, se procede a calcular la tensión en la carga.

$$V_R = I_S \cdot Z_{Ceq} = (2.67\angle -23.03° \,)(72.14 \angle 15.86° \,) = 193.11\angle -7.17° \ V \tag{201}$$

$$V_{R-LL} = V_R \cdot \sqrt{3} \tag{202}$$

$$V_{R-LL} = 193.11 \cdot \sqrt{3} = 334.48\, V \tag{203}$$

$$V_{C-LL} = V_R \tag{204}$$

Valores para diagrama fasorial:

$$V_R = 334.48 \angle -7.17°\, V$$

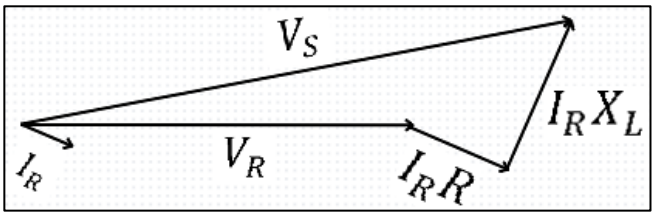
$$I_R = 2.67 \angle -23.03°\, A$$

$$I_R R = 26.7 \angle -23.03°\, V$$

$$I_R X_L = 33.21 \angle 66.97°\, V$$

Ilustración 87

Diagrama Fasorial - Sistema con carga y sin incorporación de capacitancias shunt



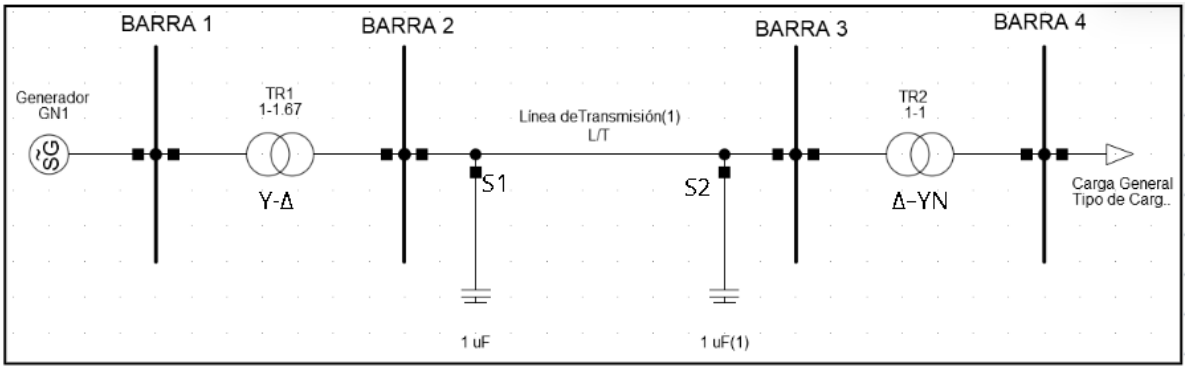
Fuente: Elaboración Propia.

4. Sistema con carga y con cierre de S1 y S2 de las capacitancias shunts

A continuación, se realizará el siguiente ejercicio:

Ilustración 88

Sistema con carga y con cierre de S1 y S2

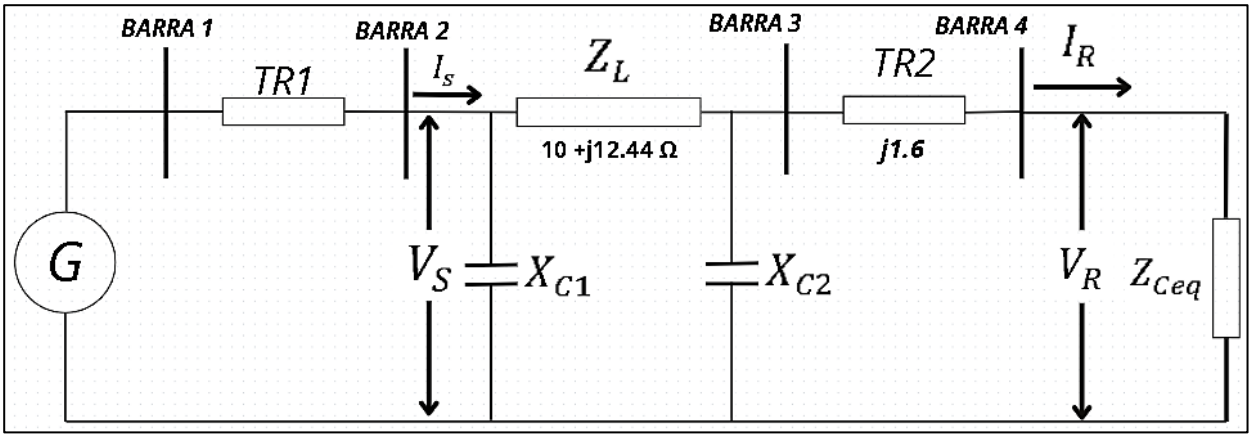


Fuente: Elaboración Propia.

Para el siguiente sistema, se procederá a la reducción del circuito como se verá a continuación:

Ilustración 89

Circuito a simplificar



Fuente: Elaboración Propia.

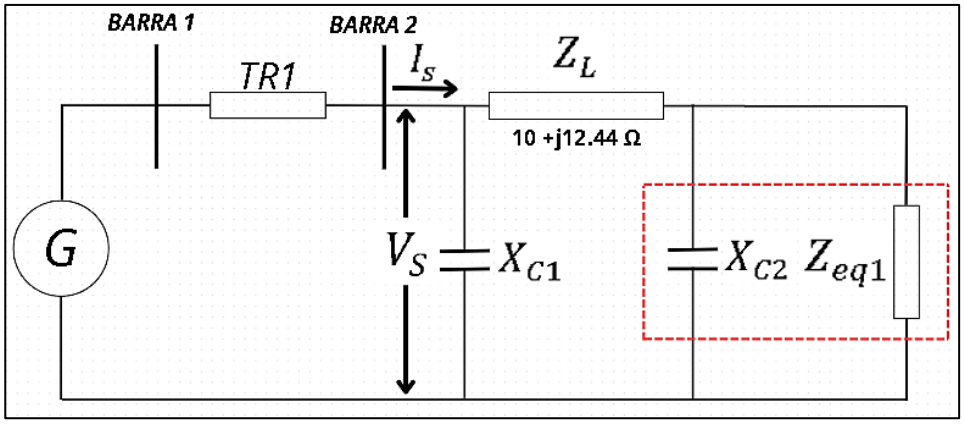
Como primer paso, se procede a realizar en serie los valores de TR2 y Z_{Ceq}, y así sucesivamente hasta tener una impedancia total a la salida de TR1. Donde:

$$Z_{Ceq} = 72.14 \angle 15.86° \, \Omega$$

$$Z_{eq1} = Z_{Ceq} + TR2 = (72.14 \angle 15.86° \, \Omega) + (j1.6) = 72.59 \angle 17.07° \, \Omega \quad (205)$$

Ilustración 90

Reducción a Zeq2



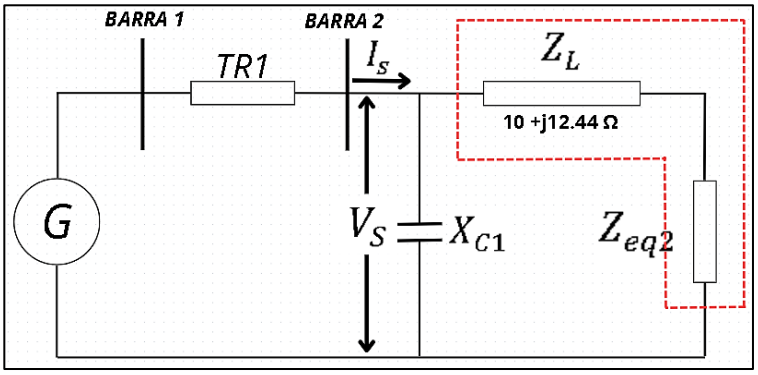
Fuente: Elaboración Propia.

$$X_{C1} = X_{C2} = -j2652 \, \Omega$$

$$Z_{eq2} = Z_{eq1} // X_{C1} = = \frac{(72.59 \angle 17.07°)(-j2652)}{(72.59 \angle 17.07°) - (j2652)} = 73.15 \angle 15.56° \, \Omega \quad (206)$$

Ilustración 91

Reducción a Zeq3

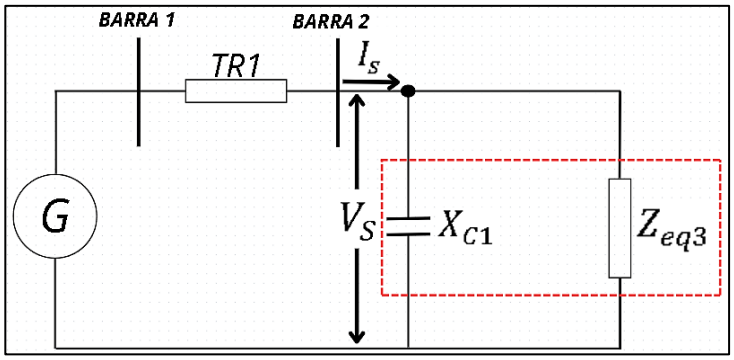


Fuente: Elab**ora**ción Propia.

$$Z_{eq3} = Z_{eq2} + Z_L = (73.15 \angle 15.56°) + (15.96 \angle 51.21° \, \Omega) = 86.62 \angle 21.72° \, \Omega \quad (207)$$

Ilustración 92

Reducción a Zeq4

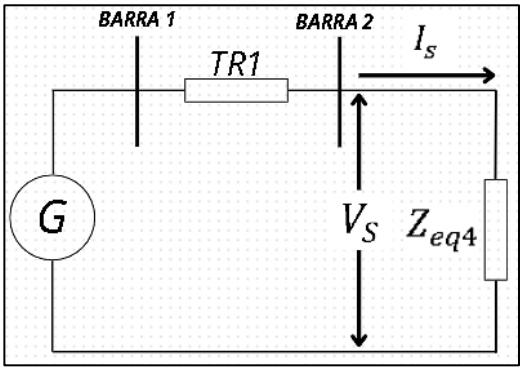


Fuente: Elab**ora**ción Propia.

$$Z_{eq4} = Z_{eq3} // X_{C1} = \frac{(86.62 \angle 21.72°)(-j2652)}{(86.62 \angle 21.72°) - (j2652)} = 87.64 \angle 19.96° \, \Omega \quad (208)$$

Ilustración 93

Circuito Equivalente



Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, se calcula la corriente que pasa por la Z_{eq4} para posteriormente, proceder a calcular de forma inversa:

Tensión de salida del transformador (TR1): 400 V

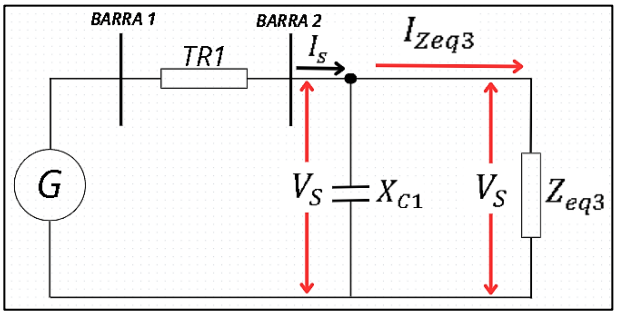
$$V_S = \frac{400\ V}{\sqrt{3}} = 230.94\ V$$

$$I_S = \frac{V_S}{Z_{eq4}} = \frac{230.94\ V}{87.64\ \angle 19.96°} = 2.6587.64\ \angle -19.96°\ \ A \tag{209}$$

Corriente en Z_{eq3}:

Ilustración 94

Misma tensión tanto en Xc1 y Zeq3

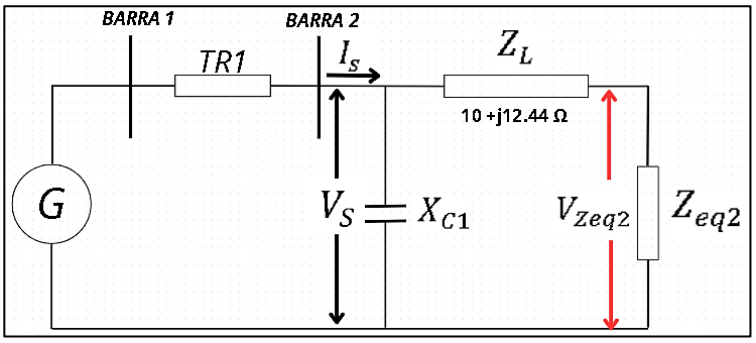


Fuente: Elaboración Propia.

$$I_{Zeq3} = \frac{V_S}{Z_{eq3}} = \frac{230.94\ V}{86.62\ \angle\ 21.72°} = 2.67\angle - 21.72°\ A \tag{210}$$

Ilustración 95

Tensión en Zeq2



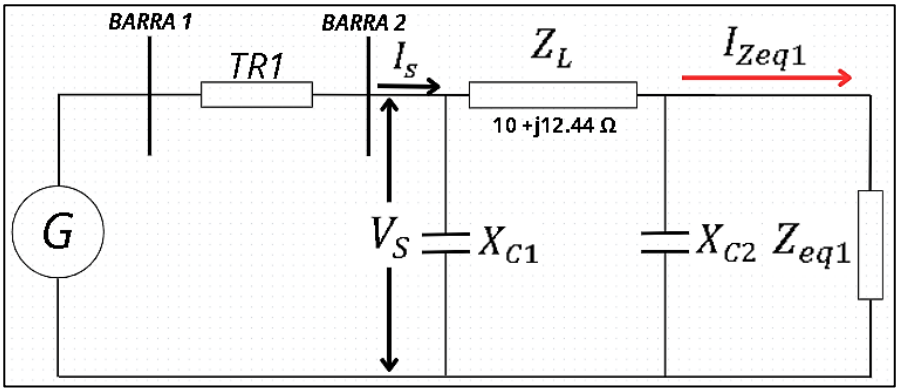
Fuente: Elaboración Propia.

Voltaje en Z_{eq2}:

$$V_{Zeq2} = I_{zeq3} \cdot Z_{eq2} = (2.67\angle - 21.72°)(73.15\ \angle 15.56°)$$
$$= 195.31\angle - 6.16°V \tag{211}$$

Ilustración 96

Cálculo de corriente en Zeq1



Fuente: Elaboración Propia.

Corriente en Z_{eq1}:

Al obtener la tensión en la Z_{eq2}, se procede a:

$$I_{Zeq1} = I_R$$

$$I_{Zeq1} = \frac{V_{Zeq2}}{Z_{eq1}} = \frac{195.31\angle -6.16°\ V}{72.59\ \angle\ 17.07°} = 2.69\angle -23.23°\ A \tag{212}$$

Voltaje en la carga Z_{Ceq}:

$$V_R = V_{Zceq}$$

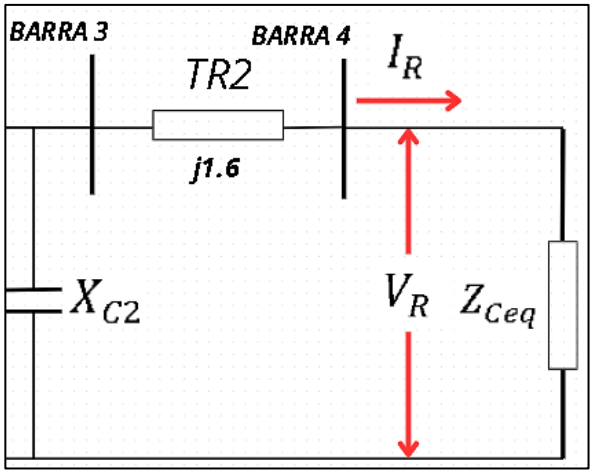
$$V_{Zceq} = I_{zeq1} \cdot Z_{Ceq} = (2.69\angle -23.23°)(72.14\ \angle\ 15.86°)$$
$$= 194.09\angle -7.37°\ V \tag{213}$$

$$V_{R-LL} = V_C \cdot \sqrt{3} \tag{214}$$

$$V_{R-LL} = 194.09 \cdot \sqrt{3} = 336.19\ V \tag{215}$$

Ilustración 97

Tensión y corriente de recepción



Fuente: Elaboración Propia.

Valores para diagrama fasorial:

$$V_R = 336.19 \angle -7.37° \; V$$

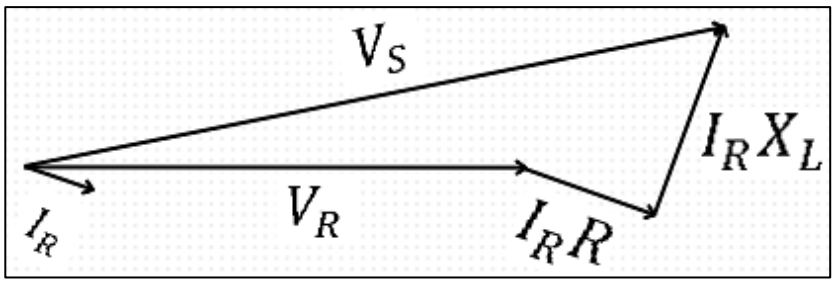
$$I_R = 2.69 \angle -23.23° \;\; A$$

$$I_R R = 26.9 \angle -23.23° \; V$$

$$I_R X_L = 33.46 \angle 66.77° \; V$$

Ilustración 98

Diagrama Fasorial - Modelo de Línea Corta con carga e incorporación de capacitancias shunt



Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 16

Sistema sin carga y con apertura de S1 y S2 de las capacitancias shunt.

Variables		Analítico	Módulo
Emisor	$\boldsymbol{V_S}$	400 V	403 V
	$\boldsymbol{I_S}$	0 A	0,3 A
Receptor	$\boldsymbol{V_R}$	400 V	406 V
	$\boldsymbol{I_R}$	0 A	0 A

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Los valores obtenidos analíticamente, tanto de tensiones como de corrientes de entrada y salida, se visualizan en la Ilustración 103, Ilustración 104, Ilustración 105 e Ilustración 106 que se

encuentra en el apartado de los Anexos, donde se pueden corroborar sus similitudes con los datos del módulo.

Tabla 17

Sistema sin carga y con cierre de S1 y S2 de las capacitancias shunt

Variables		Analítico	Módulo
Emisor	V_S	400 V	407 V
	I_S	0,17 A	0,27 A
Receptor	V_R	404 V	409 V
	I_R	0 A	0 A

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Los valores obtenidos analíticamente, tanto de tensiones como de corrientes de entrada y salida, se visualizan en la Ilustración 107, Ilustración 108 , Ilustración 109 e Ilustración 110 que se encuentra en el apartado de los Anexos, donde se pueden corroborar sus similitudes con los datos del módulo.

Tabla 18

Sistema con carga y con apertura de S1 y S2 de las capacitancias shunt

Variables		Analítico	Módulo
Emisor	V_S	400 V	403 V
	I_S	2,67 A	2,8 A
Receptor	V_R	334,48 V	317 V
	I_R	2,67 A	2,81 A

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Los valores obtenidos analíticamente, tanto de tensiones como de corrientes de entrada y salida, se visualizan en la Ilustración 111, Ilustración 112, Ilustración 113 e Ilustración 114 que se encuentra en el apartado de los Anexos, donde se pueden corroborar sus similitudes con los datos del módulo.

Tabla 19

Sistema con carga y con cierre de S1 y S2 de las capacitancias shunt

Variables		Analítico	Módulo
Emisor	$\boldsymbol{V_S}$	400 V	404 V
	$\boldsymbol{I_S}$	2,65 A	2,75 A
Receptor	$\boldsymbol{V_R}$	336,19 V	318 V
	$\boldsymbol{I_R}$	2,69 A	2,81 A

Nota. Fuente: Elaboración Propia.

Los valores obtenidos analíticamente, tanto de tensiones como de corrientes de entrada y salida, se visualizan en la Ilustración 115, Ilustración 116, Ilustración 117 e Ilustración 118 que se encuentra en el apartado de los Anexos, donde se pueden corroborar sus similitudes con los datos del módulo.

Conclusiones:

A partir del análisis comparativo de las Tabla 16, Tabla 17, Tabla 18 y Tabla 19, correspondientes al módulo AEL-MPSS-10, se puede establecer las siguientes conclusiones de los cuatro escenarios realizados:

Primer escenario: En condición de circuito abierto, sin carga conectada y con las capacitancias shunt desconectadas, el sistema no presenta circulación de corriente a lo largo de la línea de transmisión, ya que no existe un camino cerrado que permita el flujo de energía hacia el extremo receptor. Bajo estas condiciones, la impedancia serie de la línea no produce caída de tensión, por lo que los valores de tensión en el envío y en la recepción permanecen prácticamente iguales. Este escenario representa el estado en vacío del sistema y constituye una referencia adecuada para evaluar posteriormente la influencia de la carga y de los elementos reactivos en el comportamiento eléctrico de la red.

Segundo escenario: En ausencia de carga, pero con las capacitancias shunt conectadas, se observa la circulación de corriente capacitiva a lo largo de la línea, aun cuando no exista consumo de potencia activa en el extremo receptor. Esta corriente es consecuencia directa del efecto capacitivo distribuido, que introduce un componente reactivo adelantado respecto a la tensión. Aunque no se transfiere potencia útil hacia una carga, el sistema deja de estar eléctricamente inactivo debido al flujo de corriente reactiva entre los extremos. Este escenario permite evidenciar cómo la presencia de capacitancias shunt modifica el comportamiento del sistema incluso en condiciones de vacío.

Tercer escenario: Cuando se incorpora la carga RL equivalente y las capacitancias shunt permanecen abiertas, el sistema presenta circulación de corriente determinada por la impedancia resultante del paralelo entre los bancos resistivos e inductivos. En este caso, la línea corta se

comporta únicamente con su impedancia serie, generando una caída de tensión apreciable entre el extremo emisor y el receptor, como se evidencia en la Tabla 18. La comparación entre el cálculo analítico y los valores medidos en el módulo muestra diferencias reducidas, lo que confirma la validez del modelo adoptado. Además, el comportamiento fasorial evidencia el efecto del componente inductivo de la carga, reflejado en el desfase entre tensión y corriente.

Cuarto escenario: Al conectar simultáneamente la carga RL y las capacitancias shunt, el sistema presenta un comportamiento más completo y representativo de una línea con efectos reactivos incorporados. La corriente total en el envío se ve influenciada tanto por la demanda de la carga como por la contribución capacitiva, lo que modifica ligeramente los valores de tensión y corriente respecto al caso sin capacitancias, como se aprecia en la Tabla 19. Se observa que la incorporación de la capacitancia equivalente tiende a compensar parcialmente el efecto inductivo de la carga, reduciendo el impacto sobre el perfil de tensión. La comparación entre el análisis teórico y los resultados experimentales demuestra coherencia en las tendencias obtenidas, validando el procedimiento analítico desarrollado.

5 Capítulo V: Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones Generales

- Se desarrollaron varias prácticas que permitieron corroborar los resultados analíticos a través del uso de un software de simulación especializado, lo que evidenció una adecuada concordancia entre los valores teóricos y los resultados simulados en los diferentes casos de estudio analizados.
- El uso del software DIgSILENT PowerFactory facilitó el modelado y análisis de líneas de transmisión de diferentes longitudes, permitiendo evaluar parámetros eléctricos fundamentales como la caída de tensión y el comportamiento del flujo de potencia. Asimismo, se evidenció cómo la variación de parámetros eléctricos y de la longitud influye directamente en el desempeño del sistema eléctrico de potencia.
- Se empleó el módulo didáctico EDIBON AEL-MPSS-10 para el desarrollo de una práctica de laboratorio orientada al modelado de líneas de transmisión, demostrando que el módulo cuenta con las capacidades técnicas necesarias para realizar prácticas alineadas al compendio de estudio de la asignatura Sistemas Eléctricos de Potencia I.
- La práctica desarrollada en el módulo EDIBON AEL-MPSS-10 permitió corroborar experimentalmente los resultados obtenidos mediante el análisis analítico y el módulo, fortaleciendo la integración entre la teoría y la práctica. De este modo, se evidenció la importancia de la validación experimental como complemento del análisis analítico y de los valores obtenidos mediante el módulo del laboratorio de potencia.

5.2 Recomendaciones Generales

- Sería recomendable que la guía práctica elaborada pueda integrarse como material de apoyo en la asignatura de Sistemas Eléctricos de Potencia I. Su uso durante las prácticas demostró que es una herramienta útil para fortalecer el aprendizaje, ya que permite conectar la teoría con la parte práctica de manera clara y progresiva.
- Se recomienda ampliar el uso del módulo AEL-MPSS del laboratorio de potencia en futuras prácticas académicas, integrándolo de manera directa con actividades de análisis analítico y simulación en software. La incorporación de datos experimentales obtenidos directamente del módulo didáctico posibilita la comparación sistemática entre los resultados analíticos y los generados mediante simulación, lo que refuerza la comprensión práctica del estudiante y lo expone a condiciones similares a las que enfrenta un ingeniero en el ejercicio profesional.
- La experiencia con el software DIgSILENT PowerFactory evidenció la necesidad de fortalecer las competencias en su manejo, tanto en estudiantes como en docentes. El desarrollo de talleres o espacios de capacitación orientados a sus herramientas avanzadas permitiría una ejecución más eficiente de las simulaciones desde las etapas iniciales del trabajo, además de optimizar el aprovechamiento de las capacidades del programa durante el análisis de los sistemas eléctricos modelados.
- Se recomienda que esta guía práctica se mantenga en constante actualización, tomando en cuenta las opiniones de los estudiantes y docentes que la utilicen. Escuchar sus experiencias ayudaría a explicar mejor que partes no se entienden bien y podrían agregar nuevos temas al manual. De esa forma, la guía no solo se mantendría actualizada, sino que también seguiría siendo útil y cercana para quienes la usen en clases o en proyectos futuros.

6 Referencias Bibliográficas

Alcayde-García, F., Salmerón-Manzano, E., Montero, M. A., Alcayde, A., & Manzano-Agugliaro, F. (2022). Power Transmission Lines: Worldwide Research Trends. *Energies 2022, Vol. 15, Page 5777*, *15*(16), 5777. https://doi.org/10.3390/EN15165777

Ali, N. Z., Khan, A. G., Awan, M. U., Ciurdariu, L., & Brahim, K. (2024). Design and Applicability of Two-Step Fractional Newton–Raphson Method. *Fractal and Fractional 2024, Vol. 8, Page 582*, *8*(10), 582. https://doi.org/10.3390/FRACTALFRACT8100582

Atoccsa, B. A., Puma, D. W., Mendoza, D., Urday, E., Ronceros, C., & Palma, M. T. (2024). Optimization of Ampacity in High-Voltage Underground Cables with Thermal Backfill Using Dynamic PSO and Adaptive Strategies. *Energies 2024, Vol. 17, Page 1023*, *17*(5), 1023. https://doi.org/10.3390/EN17051023

Barajas-Villarruel, L. R., Rico-Ramirez, V., & Castrejón-González, E. O. (2022). Optimization models for the generation, distribution and transmission of electricity in a macroscopic system: Representation of operational regions as energy hubs. *Chemical Engineering Research and Design*, *187*. https://doi.org/10.1016/J.CHERD.2022.08.026

Baruwa, M., & Fazeli, M. (2021). Impact of Virtual Synchronous Machines on Low-Frequency Oscillations in Power Systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, *36*(3), 1934–1946. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.3029111

Bui, N. T., Nguyen, T. M. T., Ataklti, G. Y., Bui, Q. C., Dinh, T. T. N., Phan, D. T., Park, S., Choi, J., Vu, T. T. H., & Oh, J. (2021). Design of a High-Power Multilevel Sinusoidal Signal and High-Frequency Excitation Module Based on FPGA for HIFU Systems. *Electronics 2021, Vol. 10, Page 1299*, *10*(11). https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS10111299

Cai, L., Jiang, Z. H., & Hong, W. (2020). Broadband Measurement of Substrate Complex Permittivity Using Optimized ABCD Matrix. *IEEE Access*, *8*, 224513–224521. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3044699

Cai, L. ; ;, Ma, Z. ;, Rao, Z. ;, Shu, X. ;, Jiang, S. ;, Li, Z. ;, Li, X. A., Du, H., Cai, L., Ma, Z., Rao, Z., Shu, X., Jiang, S., Li, Z., & Li, X. (2024). A Method for Identifying External Short-Circuit Faults in Power Transformers Based on Support Vector Machines. *Electronics 2024, Vol. 13, Page 1716*, *13*(9), 1716. https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS13091716

Cardozo, C., Prevost, T., Huang, S. H., Lu, J., Modi, N., Hishida, M., Li, X., Abdalrahman, A., Samuelsson, P., Cutsem, T. Van, Laba, Y., Lamrani, Y., Colas, F., & Guillaud, X. (2024). Promises and challenges of grid forming: Transmission system operator, manufacturer and academic view points. *Electric Power Systems Research*, *235*. https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2024.110855

Cevallos, D., Barrera-Singaña, C., & Arcos, H. (2025). Optimal Adjustment of Reactive Power in Transmission Systems by Variation of Taps in Static Elements Using the Mean-Variance Mapping Optimization Algorithm. *Energies 2025, Vol. 18, Page 2141*, *18*(8). https://doi.org/10.3390/EN18082141

Daniela, J., Antonio, F., & Fabián, P. (2020). Metodología para Determinar la Distribución de Corrientes de Desbalance en Líneas Aéreas de Transmisión de Energía Eléctrica. *Revista Politécnica*, *44*(2). https://doi.org/10.33333/RP.VOL44N2.02

DIgSILENT GmbH. (2020). *DIgSILENT PowerFactory User Manual*. https://www.digsilent.de

Edibon. (2025). *Serie Modular de Sistemas de Energía de Redes Inteligentes (Smart Grid) | EDIBON ®*. https://www.edibon.com/es/serie-modular-de-sistemas-de-energia-de-redes-inteligentes-smart-grid#descripciongeneral

El Idrissi, A., Derouich, A., Mahfoud, S., El Ouanjli, N., Chantoufi, A., & El Mourabit, Y. (2025). Acoustic characterization of a three-phase asynchronous machine under stator unbalance defects. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, *12*, 100958. https://doi.org/10.1016/J.PRIME.2025.100958

Farooq, U., Yang, F., Shahzadi, M., Ali, U., & Li, Z. (2025). YOLOv8-IDX: Optimized Deep Learning Model for Transmission Line Insulator-Defect Detection. *Electronics 2025, Vol. 14, Page 1828*, *14*(9). https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS14091828

Garcia-Calva, T., Julieth Uribe Murcia, K., Ding, J., & Zhao, Z. (2025). Diagnosis of Stator Inter-Turn Short Circuit Faults in Synchronous Machines Based on SFRA and MTST. *Energies 2025, Vol. 18, Page 2142*, *18*(8). https://doi.org/10.3390/EN18082142

Ge, P., Xu, H., Mao, R., Tu, C., Xiao, F., & Guo, Q. (2024). Design-oriented Transient Stability Assessment for Droop-controlled Converter Considering Grid Voltage Phase-angle Jump. *Chinese Journal of Electrical Engineering*, *10*(3), 63–76. https://doi.org/10.23919/CJEE.2024.000092

Gharehpetian, G. B., Zolfaghari, M., & Bayati, N. (2025). Main challenges of generation, transmission, and distribution systems. *Future Power System Elements, Challenges, and Solutions*. https://doi.org/10.1016/B978-0-443-14091-4.00003-4

Grainger, J. J., & Stevenson, W. D. (1996). *Análisis-de-Sistemas-de-Potencia-Grainger-Stevenson*. *Primera Edición*, 574.

Han, J., Miao, S., Li, Y., Yang, W., & Yin, H. (2021). Faulted-Phase classification for transmission lines using gradient similarity visualization and cross-domain adaption-based convolutional neural network. *Electric Power Systems Research*, *191*. https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2020.106876

Kumar, C., Manojkumar, R., Ganguly, S., & Liserre, M. (2021). Impact of Optimal Control of Distributed Generation Converters in Smart Transformer Based Meshed Hybrid Distribution Network. *IEEE Access*, *9*. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3119349

Kundacina, O., Vincan, V., Gojic, G., Ninkovic, V., & Miskovic, D. (2025). Conformal Anomaly Detection for Predictive Maintenance in Thermal Power Plants. *IEEE Access*. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3546451

Lagoeiro, H., Davies, G., Marques, C., & Maidment, G. (2023). Heat recovery opportunities from electrical substation transformers. *Energy Reports*, *10*, 2931–2943. https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2023.09.074

Li, B., Wu, Q., Cao, Y., & Li, C. (2025). Search direction optimization of power flow analysis based on physics-informed deep learning. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *167*. https://doi.org/10.1016/J.IJEPES.2025.110602

Lim, M., Kim, Y., Jin, S., Ha, S., Yong Chang, S., Su Kang, H., Sang Park, G., Lee Joo, M., Jung, C. S., Cho, Y., & Bae, S. J. (2024). Depth-Based Condition Monitoring and Contributing Factor Analysis for Anomalies in Combined Cycle Power Plant. *IEEE Access*, *12*. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3403864

Liu, Y., Lu, D., Vasilev, S., Wang, B., Lu, D., & Terzija, V. (2023). Model-based transmission line fault location methods: A review. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *153*, 1–21. https://doi.org/10.1016/J.IJEPES.2023.109321

Mitolo, M. (2024). Determining the Correct Electrical Resistance of Conductors in Power Systems Analysis. *Distributed Generation and Alternative Energy Journal*, *39*(6). https://doi.org/10.13052/DGAEJ2156-3306.3961

Mugabe, R., Atim, M. R., Obungoloch, J., & Wanzala, J. N. (2025). Dynamic transmission line modeling and real-time fault analysis using ABCD parameters enhanced by equivalent π-model for accurate efficiency and voltage stability assessment. *Engineering Research Express*, *7*(4), 0453b4. https://doi.org/10.1088/2631-8695/AE2BBE

Noori, A., Zhang, Y., Nouri, N., & Hajivand, M. (2021). Multi-Objective Optimal Placement and Sizing of Distribution Static Compensator in Radial Distribution Networks with Variable Residential, Commercial and Industrial Demands Considering Reliability. *IEEE Access*, *9*. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3065883

Rafael Núñez, R. A., Posada, J., Unsihuay-Vila, C., & Pinzon-Ardila, O. (2023). Review of Smart Transformer-Based Meshed Hybrid Microgrids: Shaping, Topology and Energy Management Systems. *IEEE Access*, *11*, 130165–130185. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3334651

Romano, R., Lampasi, A., Pipolo, S., Arévalo, P., Ochoa-Correa, D., Villa-Ávila, E., Iñiguez-Morán, V., & Astudillo-Salinas, P. (2025). Systematic Review of Hierarchical and Multi-Agent Optimization Strategies for P2P Energy Management and Electric Machines in Microgrids. *Applied Sciences 2025, Vol. 15, Page 4817*, *15*(9). https://doi.org/10.3390/APP15094817

Sánchez, J. C. E., Padilla, I. A., León, R. H., Roano, G. J., & C., G. S. T. (2022). Análisis y Modelado de Líneas de Transmisión Monofásicas en Estado Transitorio. *EDUCATECONCIENCIA*, *30*(35). https://doi.org/10.58299/H5NJ2P10

Tamayo-Guzmán, F. E., Barrera-Singaña, C. A., Tamayo-Guzmán, F. E., & Barrera-Singaña, C. A. (2021). Estabilidad en régimen permanente de sistemas eléctricos de potencia considerando límites de operación en generadores, transformadores y líneas de transmisión. *Iteckne*, *18*(2), 141–149. https://doi.org/10.15332/ITECKNE.V18I2.2559

Thango, B. A., Jordaan, J. A., & Nnachi, A. F. (2020). Selection and rating of the step-up transformer for renewable energy application. *SAIEE Africa Research Journal*, *111*(2), 50–55. https://doi.org/10.23919/SAIEE.2020.9099492

Venturini, P., Borello, D., Agati, G., Krichi, M., Noman, A. M., Fannakh, M., Raffak, T., & Haidar, Z. A. (2025). Sustainable Electric Micromobility Through Integrated Power Electronic Systems and Control Strategies. *Energies 2025, Vol. 18, Page 2143*, *18*(8). https://doi.org/10.3390/EN18082143

Wang, Y., Wu, H., Xu, H., Li, Q., & Liu, S. (2020). A general fast power flow algorithm for transmission and distribution networks. *IEEE Access*, *8*. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970205

Widl, E., Leitner, B., Basciotti, D., Henein, S., Ferhatbegovic, T., & Hofmann, R. (2020). Combined Optimal Design and Control of Hybrid Thermal-Electrical Distribution Grids Using Co-Simulation. *Energies 2020, Vol. 13, Page 1945*, *13*(8). https://doi.org/10.3390/EN13081945

Xiao, D., Hu, K., & Li, C. (2025). Transmission Line Modeling-Based Position Sensorless Control for Permanent Magnet Synchronous Machines. *Electronics 2025, Vol. 14, Page 271*, *14*(2), 271. https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS14020271

Yang, F., Gao, F., Liu, B., & Ci, S. (2022). An Adaptive Control Framework for Dynamically Reconfigurable Battery Systems Based on Deep Reinforcement Learning. *IEEE*

Transactions on Industrial Electronics, *69*(12), 12980–12987. https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3142406

Yang, J. M., & Kwak, S. W. (2024). Input/output corrective control of switched asynchronous sequential machines under arbitrary switching. *Nonlinear Analysis: Hybrid Systems*, *53*, 101489. https://doi.org/10.1016/J.NAHS.2024.101489

Zahernia, A., & Rahbarimagham, H. (2021). Application of smart transformers in power systems including PV and storage systems under unbalanced and nonlinear load and fault condition. *Electric Power Systems Research*, *201*, 107535. https://doi.org/10.1016/J.EPSR.2021.107535

7 Anexos

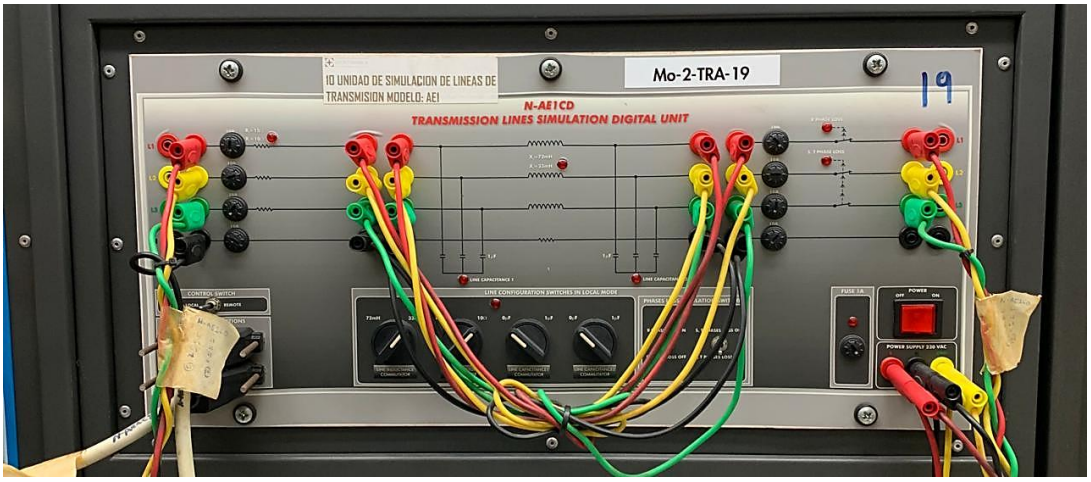
Ilustración 99

Módulo AEL-MPSS-10 - "Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia – ULEAM"

Fuente: Elaboración Propia.

Ilustración 100

Módulo de Línea de Transmisión "Mo-2-TRA-19"



Fuente: Elaboración Propia.

Ilustración 101

Módulo de Cargas Resistivas "Mo-3-DIS-31"

Fuente: Elaboración Propia.

Ilustración 102

Módulo de Cargas Inductivas "Mo-3-DIS-29"

Fuente: Elaboración Propia.

Sistema sin carga y con apertura de S1 y S2 de las capacitancias shunt

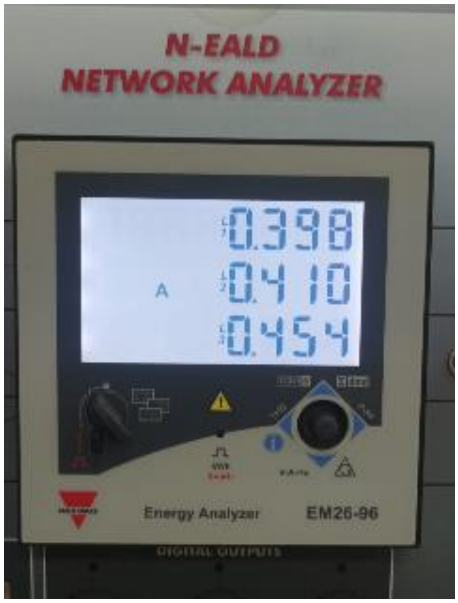
Ilustración 103

Valores de tensiones de entrada mediante el Analizador

Fuente: Elaboración Propia.

Ilustración 104

Valores de corrientes de entrada mediante el Analizador



Fuente: Elaboración Propia.

Ilustración 105

Valores de tensiones de salida mediante el Analizador

Fuente: Elaboración Propia.

Ilustración 106

Valores de corrientes de salida mediante el Analizador

Fuente: Elaboración Propia.

Sistema sin carga y con cierre de S1 y S2 de las capacitancias shunt

Ilustración 107

Valores de tensiones de entrada mediante el Analizador

Fuente: Elaboración Propia.

Ilustración 108

Valores de corrientes de entrada mediante el Analizador

Fuente: Elaboración Propia.

Ilustración 109

Valores de tensiones de salida mediante el Analizador

Fuente: Elaboración Propia.

Ilustración 110

Valores de corrientes de salida mediante el Analizador

Fuente: Elaboración Propia.

Sistema con carga y con apertura de S1 y S2 de las capacitancias shunt

Ilustración 111

Valores de tensiones de entrada mediante el Analizador

Fuente: Elaboración Propia.

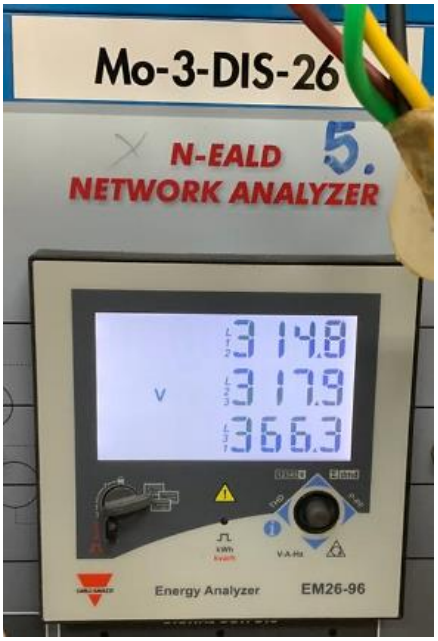
Ilustración 112

Valores de corrientes de entrada mediante el Analizador

Fuente: Elaboración Propia.

Ilustración 113

Valores de tensiones de salida mediante el Analizador



Fuente: Elaboración Propia.

Ilustración 114

Valores de corrientes de salida mediante el Analizador

Fuente: Elaboración Propia.

Sistema con carga y con cierre de S1 y S2 de las capacitancias shunt.

Ilustración 115

Valores de tensiones de entrada mediante el Analizador

Fuente: Elaboración Propia.

Ilustración 116

Valores de corrientes de entrada mediante el Analizador

Fuente: Elaboración Propia.

Ilustración 117

Valores de tensiones de salida mediante el Analizador

Fuente: Elaboración Propia.

Ilustración 118

Valores de corrientes de salida mediante el Analizador

Fuente: Elaboración Propia.