



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Análisis de sistemas eléctricos de potencia empleando el software
DigSILENT Power Factory

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en Electrónica y Automatización

Presentado por:

Briggette Melissa Briones Morante

Bethzabeth Edith Pincay Quimi

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a todos aquellos familiares, amigos y profesores que a pesar de las dificultades que viví siempre estuvieron presentes y no perdieron la fé en mí. Su apoyo fue una base que me permitió llegar a este momento de mi vida profesional. Este no es un logro individual sino de todos nosotros.

Briggette Melissa Briones Morante

Dedico de manera especial este trabajo a mis padres, tíos, amigos y profesores que estuvieron de alguna forma apoyándome para continuar esta etapa. A Canuto, mi mascota que me acompañó en las amanecidas al entregar deberes o proyectos, a todos muchas gracias.

Bethzabeth Edith Pincay Quimí

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, por demostrarme que cuando uno quiere algo en la vida sin importar lo que otros digan debes luchar para alcanzarlo y con el tiempo en conjunto con el esfuerzo puedes lograrlo. A mis padres Jorge y Manuela por su apoyo, a mis tíos Aracely y Damián que me brindaron su guía tal y como si fuese su hija, a mi hermana Betzy que es mi principal fuente para esforzarme cada día y así demostrarle que ella también tiene todo para salir adelante, a mi Mami Concho que desde el cielo sé que siempre me cuida y guía en cada paso, te querré por toda mi vida y a mis profesores y tutor de tesis por sus enseñanzas y paciencia en lo largo de mi vida estudiantil, espero ser una excelente profesional y así replicar sus acciones con las futuras generaciones.

Brigette Melissa Briones Morante

Primeramente, agradezco a Dios por permitir que estén presente mis padres Marlene y Víctor y mis abuelos María y Walter, ya que gracias a ellos soy la persona que soy en la actualidad, me formaron con responsabilidad y valores, los cuales aplique en esta etapa de mi vida. A mi hermano Douglas que, sin su apoyo y locura, mi vida sería diferente. A mis amigos Mery, Ronaldo y Nathalie, que de una forma u otra me dieron y me seguirán dando apoyo y sabiduría todo el tiempo. A mi Prima Ashly que también me brindo su apoyo y su ingenio. A los profesores, por brindarme un poco de conocimiento. A todos les agradezco mucho porque cada uno me dio motivación y lograr lo que se ve reflejado.

Bethzabeth Edith Pincay Quimí

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; Brigette Melissa Briones Morante y Bethzabeth Edith Pincay Quimi damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"



Brigette Melissa
Briones Morante



Bethzabeth Edith
Pincay Quimi

EVALUADORES



PhD. Wilton Agila Gálvez
PROFESOR DE LA MATERIA



Msc. Holger Cevallos Ulloa
PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Este proyecto investigativo promueve el uso de un software llamado DigSILENT Power Factory para el análisis de sistemas de potencia tanto a nivel académico como profesional. Esto surge debido a la necesidad de implementar una red eléctrica capaz de suministrar de forma óptima y eficiente energía a los distintos puntos del país. Para lograr esto, es importante un estudio previo en la etapa de diseño donde el uso de herramientas de análisis es primordial para alcanzar los resultados deseados. Sin embargo, estas herramientas computacionales suelen ser costosas por cuestiones de licencias o por capacitación al personal. Por tal razón, se elaboró una guía del software desde cero utilizando como ejemplo un sistema de 14 barras modificado de la IEEE al cual, le realizamos un análisis de potencia y eventos como cortocircuitos para observar como toda la red y sus elementos responden frente a este evento. Los resultados que se obtuvieron se los almacenó en archivos .txt y Excel los cuales se enviaron a Matlab para graficarlos, por medio de archivos .cvs. Esto, con el objetivo de expandir el estudio de los sistemas de potencia, ya que al incorporar otro software representa una adición de herramientas computacionales para su estudio.

Finalmente, la elaboración de esta guía permite a los usuarios ya sean estudiantes o profesionales, tener una idea de las ventajas que ofrece este software y animarse a aprender el uso de una nueva herramienta con lo cual puedan aportar a un mejor diseño y análisis de los sistemas eléctricos en el país.

Palabras Clave: Análisis, Sistemas de potencia, Energía, Software, Guía.

ABSTRACT

This research project promotes the use of a software called DigSILENT Power Factory for the analysis of power systems at both academic and professional level. This emerges due to the need to implement an electrical network capable of optimally and efficiently supplying energy to different parts of the country. To achieve this, it is important a previous study in the design stage where the use of analysis tools is essential to achieve the desired results. However, these computational tools are usually expensive due to licensing or personnel training. For this reason, a software guide was developed from scratch using as an example a modified IEEE 14-bus system to which we performed a power analysis and events such as short circuits to observe how the entire network and its elements respond to this event. The results obtained were stored in .txt and Excel files which were sent to Matlab for graphing, by means of .csv files. This, with the objective of expanding the study of power systems, since incorporating other software represents an addition of computational tools for its study. Finally, the elaboration of this guide allows users, whether students or professionals, to have an idea of the advantages offered by this software and to be encouraged to learn the use of a new tool with which they can contribute to a better design and analysis of electrical systems in the country.

Keywords: Analysis, Power Systems, Energy, Software, Guide.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO 1	18
1. Introducción	18
1.1 Descripción del problema	18
1.2 Justificación del problema	19
1.3 Objetivos	19
1.3.1 Objetivo General	19
1.3.2 Objetivos Específicos	19
1.4 Marco teórico	20
1.4.1 Sistemas Eléctricos de Potencia	20
4. Las cargas	21
1.4.2 Estudio en los sistemas de Potencia	21
CAPÍTULO 2	30
2. Metodología	30
2.1.1 Software para los análisis de los sistemas de Potencia	30
2.1.2 DigSILENT Power Factory	32
2.1.3 DigSILENT y su Lenguaje de Programación.	37
CAPÍTULO 3	39
3.1 Manejo de la interfaz de usuario del software DigSILENT Power Factory	39
3.1.1 Descripción de la interfaz de usuario	39
3.1.2 Creación de un proyecto	46
3.1.2.1 Por medio de las opciones del menú principal.	46
3.1.2.2 Por medio del Data Manager.	49
3.1.3 Creación de una red pequeña	51
3.1.3.1 Creación de barras	54
3.1.3.2 Creación de las líneas de transmisión.	58

3.1.3.3 Creación de los transformadores.	68
3.1.3.4 Creación de los generadores síncronos.	78
3.1.3.5 Creación de las cargas.....	83
3.1.4 Análisis de flujo de carga	87
3.1.5 Edición de los cuadros de Resultados del flujo de carga.....	94
3.1.6 Resultados de flujo de potencia en la ventana de salida	99
3.1.7 Creación y simulación de eventos Transitorios	102
3.1.7.1 Agregar variables de los elementos para realizar las gráficas:	104
3.1.7.2 Creación de eventos:	108
3.1.7.3 Graficación de Eventos	113
3.2 Manejo del software DigSILENT Power Factory mediante programación DPL	125
3.2.1 Creación de un archivo DPL.....	125
3.2.2 Creación de filtros y como introducirlos en un archivo DPL	128
3.2.3 Cálculo de flujo de carga	133
3.2.4 Importar resultados DPL a archivos Excel	134
3.2.5 Importar resultados DPL a archivos .txt.....	138
3.2.6 Comunicación entre DigSILENT y Matlab mediante archivos .csv.....	140
CAPÍTULO 4	142
4. Resultados y análisis	142
4.1 Análisis de Flujo de Carga del SEP 14 barras de IEEE modificado.	142
4.2 Análisis de Cortocircuitos o Fallas del SEP 14 barras de IEEE modificado. 149	
4.2.1 Falla trifásica en una barra.....	149
4.2.2 Falla bifásica en una barra	150
4.2.3 Fallas Múltiples en todas las barras	152

4.3 Comportamiento de los cortocircuitos o Fallas del SEP 14 barras de IEEE modificado.....	153
4.3.1 Fallas trifásicas en una barra.....	153
4.4 Análisis de Eventos del SEP 14 barras de IEEE modificado.....	155
CAPÍTULO 5	157
5. Conclusiones y recomendaciones.....	157
5.1 Conclusiones.....	157
5.2 Recomendaciones.....	158
BIBLIOGRAFÍA	159

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Clasificación de los tipos de estabilidad en un SEP	29
Figura 2: Software para los sistemas eléctricos de potencia.....	32
Figura 3: Interfaz Gráfica de Usuario (GUI).	34
Figura 4: Administrador de Datos (Data Manager).....	35
Figura 5: Niveles Predefinidos en DigSILENT.	36
Figura 6: Estructura Principal de un comando DLP [9].	38
Figura 7: Vista general del entorno gráfico	39
Figura 8: Barra de ventana principal.....	40
Figura 9: Menú principal	40
Figura 10: Barra de herramientas	41
Figura 11: Área de trabajo	45
Figura 12: Ventana de salida	46
Figura 13: Creación de un proyecto por medio del menú principal	46
Figura 14: Ventana para configurar parámetros del proyecto	47
Figura 15: Ventana para configurar parámetros de la red.....	48
Figura 16: Árbol del programa	49
Figura 17: Ventana del Data Manager	50
Figura 18: Creación de un nuevo proyecto por medio del Data Manager	50
Figura 19: Área de trabajo	51
Figura 20: Elementos de una red eléctrica	52
Figura 21: Tipos de barras.....	52
Figura 22: Línea de transmisión	53
Figura 23: Generador o motor síncrono.....	53
Figura 24: Transformador de 2 devanados	53
Figura 25: Transformador de 3 devanados	53

Figura 26: Símbolo para representar de forma general las cargas.	53
Figura 27: Colocación de una barra en el área de trabajo	54
Figura 28: Cambio de orientación del elemento.....	55
Figura 29: Colocación de todas las barras a utilizar en la red	55
Figura 30: Ventana para configurar los parámetros de las barras.....	56
Figura 31: Configuración para flujo de carga	57
Figura 32: Sistema de barras finalizado.....	57
Figura 33: Creación de las líneas de transmisión	58
Figura 34: Configuración de las líneas de transmisión.....	59
Figura 35: Creación de un tipo de línea	60
Figura 36: Configuración de parámetros básicos de una línea de transmisión	61
Figura 37: Parámetros a modificar para el flujo de carga.....	62
Figura 38: Ventana de inicio mostrando las configuraciones previamente realizadas	63
Figura 39: Configuración del porcentaje de flujo en las líneas	64
Figura 40: Selección de un modelo previamente creado	65
Figura 41: Selección del modelo creado.....	66
Figura 42: Modificación de nombre y longitud de un modelo previo.....	67
Figura 43: Circuito con su respectiva configuración de las líneas.	68
Figura 44: Adición de los transformadores a la red.....	69
Figura 45: Ventana correspondiente a la configuración de los transformadores	70
Figura 46: Creación de un modelo de transformador	71
Figura 47: Configuración de parámetros de un transformador	72
Figura 48: Ingreso de datos básicos del transformador	73
Figura 49: Configuración del tap del transformador	74
Figura 50: Configuración general del transformador	74
Figura 51: Ventana principal	75

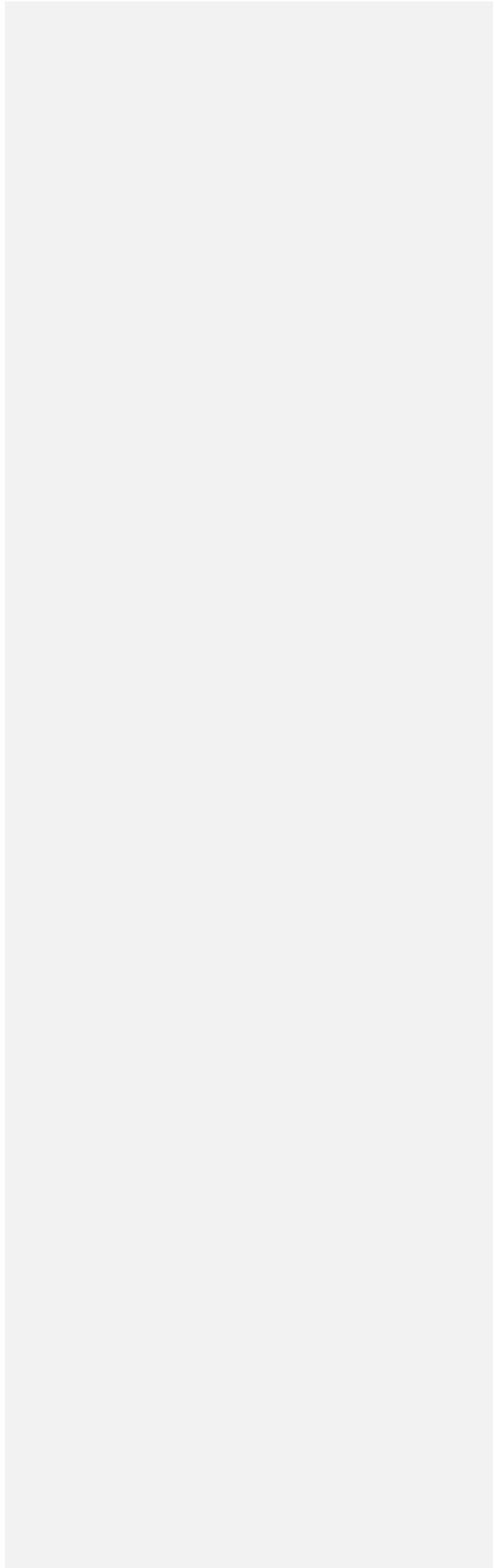
Figura 52: Selección del modelo de transformador creado previamente.....	76
Figura 53: Modelo de transformador creado para el proyecto.....	77
Figura 54: Red con los transformadores.....	77
Figura 55: Adición de los generadores a la red.....	78
Figura 56: Ventana correspondiente a la configuración de los generadores	79
Figura 57: Creación de un modelo de generador.....	80
Figura 58: Configuración de parámetros básicos de un generador.....	81
Figura 59: Configuración de parámetros de carga de un generador	82
Figura 60: Adición de los generadores a la red.....	83
Figura 61: Adición de las cargas al área de trabajo	83
Figura 62: Ventana de configuración para las cargas	84
Figura 63: Ventana de configuración - Sección "Basic Data"	85
Figura 64: Ventana de configuración - Sección "Load Flow"	86
Figura 65: Red final con la adición de cargas al sistema.	87
Figura 66: Selección del proyecto que se utilizará para el análisis	88
Figura 67: Sistema de 14 barras modificado proporcionado por la IEEE	88
Figura 68: Ventana para el cálculo de flujo de carga	89
Figura 69: Cálculo de flujo de carga realizado en el sistema de 14 barras	90
Figura 70: Acercamiento al diagrama unifilar del sistema de 14 barras luego de realizar el flujo de carga	91
Figura 71: Símbolo "Diagram Colouring"	91
Figura 72: Ventana de configuración correspondiente al símbolo "Diagram Colouring"	92
Figura 73: Ventana para la configuración de colores en el proyecto	93
Figura 74: Modificación de parámetros en los cuadros de resultado	94
Figura 75: Cuadro de ajustes	95

Figura 76: Ventana "Variable Selection Mode"	95
Figura 77: Ventana para agregar el nuevo parámetro a observar en los cuadros de resultados.....	96
Figura 78: Ventana para agregar/quitar un parámetro en los cuadros de resultado..	97
Figura 79: Visualización de los nuevos parámetros añadidos.....	98
Figura 80: Cuadro de resultados modificado con los nuevos parámetros	99
Figura 81: Icono "Output Calculation Analysis"	99
Figura 82: Ventana "Output of Results"	100
Figura 83: Icono "Maximize Output Window"	101
Figura 84: Ventana de salida maximizada con todos los resultados del análisis de carga	101
Figura 85: Resultados de los análisis separados por elementos.....	102
Figura 86: Barra de Creación y simulación de eventos.....	102
Figura 87. Ruta para seguir con la simulación	104
Figura 88: Ventana que muestra los casos de estudio existentes en el proyecto ...	104
Figura 89: Ventana "Variable Selection"	105
Figura 90: Selección de variables en general	106
Figura 91: Selección de las variables de potencia activa y reactiva del generador .	107
Figura 92: Selección de las variables frecuencia y velocidad del generador.....	107
Figura 93: Explicación del tiempo de cortocircuito y de aclaramiento	108
Figura 94: Configuración de la ubicación de la falla	109
Figura 95: Línea en la cual se realizó la falla	110
Figura 96: Configuración del evento de cortocircuito	111
Figura 97: Configuración del aclaramiento	112
Figura 98: Tiempos de cortocircuito y aclaramiento ya definidos en la línea.....	112
Figura 99: Creación de una nueva página para los gráficos	114

Figura 100: Creación de una nueva ventana de trabajo	115
Figura 101: Selección del tipo de página a crear	115
Figura 102: Icono para realizar las gráficas en la página creada previamente	116
Figura 103: Opciones de graficación	117
Figura 104: Primera disposición de gráficas tipo fila	117
Figura 105: Segunda disposición de gráficas	118
Figura 106: Configuración de los paneles de gráficos	119
Figura 107: Ingreso a la sección "All calculation"	120
Figura 108: Se selecciona el elemento para el cual se realizarán las gráficas.....	120
Figura 109: Selección de la variable a graficar en el primer recuadro.....	121
Figura 110: Selección del método de cálculo.....	122
Figura 111: Ingreso del tiempo de simulación.....	123
Figura 112: Gráficas del comportamiento del generador luego del evento de cortocircuito	124
Figura 113: Ventana "Data Manager"	125
Figura 114: Selección del área para crear un script.....	126
Figura 115: Creación de un script DPL	127
Figura 116: Ventana de configuración del script	128
Figura 117: Ventana donde se observa el contenido de elementos u objetos del script	129
Figura 118: Selección del tipo de acción a realizar	129
Figura 119: Selección del elemento a filtrar en la red	130
Figura 120: Selección del área donde se va a realizar el filtrado	131
Figura 121: Selección de toda la red para realizar el filtrado	132
Figura 122: Aplicación del filtro.....	132
Figura 123: Filtro de las líneas del sistema de 14 barras	133

Figura 124: Código DPL para el cálculo de flujo de carga	133
Figura 125: Mensaje de salida correspondiente a la revisión de la sintaxis del código	133
Figura 126: Porcentaje de flujo de carga en cada línea del sistema de 14 buses modificado de barras	134
Figura 127: Líneas de código para la importación de datos a un archivo Excel	135
Figura 128: Escritura de los valores de flujo de carga en el archivo Excel	135
Figura 129: Datos obtenidos del script importados a un archivo de Excel	136
Figura 130: Código final - Parte 1	137
Figura 131: Código final - Parte 2	137
Figura 132: Línea de código para crear en una ruta específica un archivo .txt	138
Figura 133: Línea de código para escribir información en el archivo .txt.....	138
Figura 134: Código final para la escritura de valores en un archivo .txt	139
Figura 135: Visualización de los datos en el archivo .txt.....	139
Figura 136: Esquema de colores para análisis de elementos.	143
Figura 137: Resultado de Flujo de Potencia.	144
Figura 138: Sobretensión de las barras en la ventana de salida.....	145
Figura 139: Falla aplicada a una barra.	149
Figura 140: Resultado del evento de cortocircuito	150
Figura 141: Falla bifásica.....	151
Figura 142: Resultado de la falla bifásica	151
Figura 143: Falla de una fase a tierra	152
Figura 144: Resultados de la falla de una fase a tierra	153
Figura 145: Falla trifásica en una barra	154
Figura 146: Gráficas de los voltajes de línea	154
Figura 147: Gráficas de la corriente de cortocircuito	155

Figura 148: Gráficas del generador luego del evento 156



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Opciones del menú principal.....	41
Tabla 2: Descripción de los botones más importantes.....	44
Tabla 3: Descripción de los íconos para la creación de eventos.....	103
Tabla 4: Iconos de Graficación.....	113
Tabla 4: Códigos para realizar la comunicación entre Digsilent y Matlab.....	141
Tabla 5: Datos de las barras de Transmisión.....	146
Tabla 6: Datos de los Generadores.....	147
Tabla 7: Datos de los Transformadores.....	147
Tabla 8: Datos de las líneas de Transmisión.....	148
Tabla 9: Datos de Cargas.....	148

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto brinda al cliente la posibilidad de analizar los sistemas de potencia empleando un software de gran alcance como lo es Digsilent Power Factory que no solo le permitirá analizar situaciones comunes como fallas eléctricas o respuestas del circuito en condiciones normales de operación, entre otras. Sino realizar estimaciones de los diagramas de estado en un sistema, para obtener un análisis dinámico de las variables que intervienen y poder realizar estimaciones que permitan determinar el comportamiento de la red bajo cualquier situación. Para lo cual, se realizará un enlace con Matlab mediante programación [DPL] (Digsilent Programming Language) para obtener los resultados y realizar una retroalimentación entre ambos programas simulando un sistema de lazo cerrado.

Para esto, nos centraremos en el estudio del comportamiento de flujo de potencias en un sistema de 14 barras modificado bajo la norma IEEE.

1.1 Descripción del problema

En la actualidad, los sistemas eléctricos: de potencia, comerciales e industriales requieren de un análisis del comportamiento en diferentes circunstancias, tales como: operación normal, respuestas del circuito en caso de eventos que originen algún disturbio en el sistema, análisis de cortocircuito, coordinación de protecciones, flujo de potencia, respuesta transitoria del sistema, análisis de estabilidad, etc. Estos análisis se los debe realizar en la fase de diseño y posteriormente cuando el sistema ya esté operando en condiciones reales para contrastar resultados y buscar la forma óptima de realizar el diseño del sistema teniendo en cuenta las variables y materiales involucrados.

Comentado [WEAG1]: Indicar entre paréntesis el significado

1.2 Justificación del problema

Considerando la eficiencia y el diseño adecuado que debe existir en los sistemas eléctricos de potencia para una correcta distribución de energía en el sistema eléctrico nacional, se evidencia la necesidad de estudios de ingeniería profundos para entender las amenazas relacionadas al comportamiento en estado estable y dinámico del sistema. Por tal razón, es necesario incorporar el uso de herramientas computacionales de simulación para el planteamiento y operación de los sistemas. Por lo tanto, se propone el uso de un software sofisticado llamado DigSilent Power Factory para simular los sistemas eléctricos, el cual no solo nos permitirá simular los diferentes tipos de fallas en una red eléctrica sino analizar estos valores en conjunto con el software Matlab, expandiendo las diversas formas de análisis para un futuro.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Simular un sistema de potencia de prueba de la IEEE de 14 barras modificado con el paquete DigSILENT Power Factory para la estimación dinámica de estados del sistema.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Aprender el manejo del software DigSILENT para el análisis de los sistemas eléctricos de potencia.
2. Establecer una forma de entablar una comunicación entre DigSILENT con Matlab usando DPL en la estimación de estado de sistemas eléctricos de potencia.
3. Graficar los resultados obtenidos de la estimación usando las herramientas de gráficos del software DigSILENT.

1.4 Marco teórico

En esta sección se detallan conceptos que son relevantes para la teoría que abarca el estudio de los Sistemas Eléctricos de Potencia y su comprensión para usarlos en software, en este caso Digsilent Power Factory, un simulador de estos sistemas y los fallos en líneas que pueden suceder.

1.4.1 Sistemas Eléctricos de Potencia

La generación de energía es un hecho que ha venido perfeccionándose con el pasar de los años, sabiendo que se puede realizar una conversión de esta energía, ya sea con las fuentes más comunes como el agua, el aire, el sol, los combustibles fósiles, entre otros. Por lo tanto, los Sistemas Eléctricos de Potencia están compuestos por un conjunto de elementos que forman una red interconectada, útil para satisfacer la demanda de consumo del planeta. Estos sistemas, hoy en día, son muy robustos y complejos. Se deben modelar de manera adecuada cada uno de los elementos que conforman un Sistema Eléctrico de Potencia para entender el comportamiento de los programas computacionales sobre ellos. Los elementos que conforman un Sistema Eléctrico de Potencia se explican con detalles en los siguientes subíndices.

1. Máquinas síncronas

Las máquinas síncronas operan como generadores cuando son responsables de transformar la energía de mecánica a eléctrica. Por eso, son uno de los elementos más importantes de los SEP y constan de dos partes una fija (estator) y una móvil (rotor). En la parte móvil se encuentran dos ejes: el cilíndrico y el de polos salientes. En el rotor se encuentra el devanado de campo al cual se le suministra corriente de CD para crear una fuerza llamada “Fuerza Magneto Motriz” y, a su vez en el estator se genera una corriente que se combina con esta fuerza, gracias a que el flujo resultante induce un voltaje al devanado de armadura [1].

2. El Transformador

El Transformador es la primera parte en la distribución de la energía eléctrica dentro de los Sistemas de Potencia. Resulta útil para elevar o reducir el voltaje recibido de los generadores para enviarlo por las líneas de transmisión. Este elemento enlaza los distintos voltajes que se encuentran en un SEP y, también varía la potencia reactiva enviada a los sistemas [2].

3. La línea de Transmisión

Las Líneas de transmisión sirven para transportar la energía desde las centrales de generación hasta las subestaciones y de ahí distribuir hasta los usuarios, conlleva cuatro parámetros que afectan la capacidad de cumplir su función que son la resistencia que esta posee, la inductancia, capacitancia y conductancia, aunque esta última casi no se considera porque la fuga que tienen los aisladores de líneas es muy imperceptible y variable [1].

4. Las cargas

Las cargas son las más complejas en analizar ya que en un SEP son variables y no siempre son las mismas, hay tres maneras eventuales de representar las cargas y son con potencia constante, con corriente y admitancia constantes [3].

1.4.2 Estudio en los sistemas de Potencia

Los estudios de los Sistemas Eléctricos de Potencia se realizan para saber si dichos sistemas operan en condiciones normales o están sufriendo fallas causadas por algún daño. Dentro de este estudio se encuentran los siguientes:

5. Flujos de Potencia

Realizando los estudios de flujo de potencia en los SEP, se obtienen datos que indican las condiciones de operación en estado estable de los sistemas, como la magnitud y la fase del voltaje de las barras, las potencias activas y reactivas que

circulan en las líneas, entre otros. Estos datos resultan de gran importancia porque con ayuda computacional contribuyen a la planeación y diseño de una futura expansión de los Sistemas Eléctricos de Potencia, para realizar de manera manual el flujo de potencia existen algunos métodos que se nombran a continuación [1].

Métodos de Gauss - Seidel

Es un método iterativo en el cual se tienen las variables de los SEP como los voltajes, potencias activas y reactivas de los generadores y cargas, entre otros, este método sirve para hallar en qué sentido irá el flujo en el sistema eléctrico, también observar cuáles son las pérdidas por transmisión. El proceso iterativo se efectúa hasta que los cambios en cada barra son menores que un valor mínimo especificado. Aunque el método resulta poco conveniente porque utiliza ecuaciones complejas. Las ecuaciones fundamentales se basan en la formulación de nodos de las ecuaciones de la red, empezando con la potencia compleja [4].

$$S_i = V_i * I_i^* = P_i + JQ_i \quad (1)$$

Donde:

S_i = Potencia Compleja.

V_i = Voltaje en un nodo.

I_i^* = Corriente en el nodo conjugada.

P_i = Potencia Activa en un nodo.

JQ_i = Potencia Reactiva en un nodo por su módulo complejo.

De igual modo, se obtiene la siguiente expresión y la potencia compleja conjugada va a ser igual que el voltaje en el nodo conjugado por la corriente en el nodo que es igual a la potencia activa en el nodo. No obstante, en este caso se resta la potencia reactiva con su módulo complejo por ser la conjugada [5].

$$V_i^* * I_i = P_i - JQ_i \quad (2)$$

Ahora partiendo de los números complejos y observando un nodo, en este no solo se tiene una corriente, sino la sumatoria de corrientes entrantes y salientes del nodo, aplicando la ley de Ohm. Por ello, la corriente es igual a la sumatoria desde uno igual hasta n. Estos son los números de nodos asociados al nodo analizado por la impedancia inversa de los nodos por el voltaje de los nodos adyacentes.

$$I_i = \sum_{j=1}^n Y_{ij} * V_j \quad (3)$$

Donde:

I_i = Corriente o intensidad neta inyectada en el Nodo o barra.

Y_{ij} = Matriz de admitancias de nodos o barras de NxN.

V_j = Voltaje de los nodos Adyacentes.

Remplazando (3) en (2) tenemos

$$\sum_{j=1}^n Y_{ij} * V_j = \frac{P_i - JQ_i}{V_i^*} = Y_{ii} * V_i + \sum_{j=1}^n Y_{ij} * V_j = \frac{P_i - JQ_i}{V_i^*} \quad (4)$$

Continuando con el proceso iterativo y verificando las condiciones iniciales se despeja la tensión calculada para cualquier barra es

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} * \left(\frac{P_i - JQ_i}{V_i^*} - \sum_{j=1}^n (Y_{ij} * V_j) \right) \quad (5)$$

Siendo $i \neq j$ y se aplica en las barras que tanto su potencia Activa y reactiva están especificadas.

Métodos de Newton – Raphson

Este método es también llamado el método de potencias porque las ecuaciones utilizadas en este método son en base a las potencias tanto activas como reactivas y da uso a las linealizaciones de sus ecuaciones para obtener nuevos valores expresándolas como $f(x)=0$.

Como se dijo en el método de Gauss la ecuación (5) se aplica si la Potencia activa y reactiva esta especificada, pero que pasa cuando en lugar de la potencia Reactiva, se especifica el módulo de voltaje, se debe determinar el valor de la Potencia reactiva, para poder determinar en cada iteración el valor real e imaginario de la tensión, por lo que se calcula de la ecuación (5) [4].

$$P_i - jQ_i = \left(Y_{ii} V_i + \sum_{j=1}^n (Y_{ij} * V_j) \right) V_i^* \quad (6)$$

En este caso se permitirá que $i=j$ para que la ecuación 6 quede de forma

$$P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{j=1}^n (Y_{ij} * V_j) \quad (7)$$

Donde

$$Y_{ij} = G_{ij} - jB_{ij} \quad (8)$$

Remplazando (8) y (9) en (7) tenemos:

$$P_i - jQ_i = V_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} - jB_{ij}) (V_j) \quad (9)$$

Igualando tanto las partes imaginarias como reales salen las potencias activas y reactivas, en el proceso iterativo y deben ser comparadas con los valores específicos en la barra de tensión controlada, donde queda separado [4].

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \operatorname{sen}\theta_{ij}) (V_j) \quad (10)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} \operatorname{sen}\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij}) (V_j) \quad (11)$$

Donde $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$

Como hay dos tipos de barras, que son las de carga (se especifica potencia activa y reactiva) y generación (se especifica potencia activa y el voltaje), por lo tanto, cada barra aporta con dos ecuaciones a un sistema no lineal y son las siguientes ecuaciones:

$$P_i^{espe} - V_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \operatorname{sen}\theta_{ij}) (V_j) = 0 \quad (12)$$

$$Q_i^{espe} - V_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} \operatorname{sen}\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij}) (V_j) = 0 \quad (13)$$

Al aplicar el método lo que se requiere eliminar es la diferencia entre los valores de potencia calculados y los específicos en cada iteración, por lo que:

$$\Delta P_i = P_i^{espe} - V_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \operatorname{sen}\theta_{ij}) (V_j) \quad (14)$$

$$\Delta Q_i = Q_i^{espe} - V_i \sum_{j=1}^n (G_{ij} \operatorname{sen}\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij}) (V_j) \quad (13)$$

También se desea resolver el sistema lineal de ecuaciones que se observa en la ecuación (15) [2].

$$\begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}^k \quad (15)$$

Donde H, N, M y L son términos de la matriz Jacobiana y se definen como:

$$H_{ij} = \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} \quad ; \quad N_{ij} = V_j \frac{\partial P_i}{\partial V_j}$$

$$M_{ij} = \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} \quad ; \quad L_{ij} = V_j \frac{\partial Q_i}{\partial V_j}$$

Y las condiciones a efectuarse dependiendo de los índices son los siguientes:

- Para $i=j$

$$\begin{aligned} H_{ii} &= -Q_i - B_{ii} V_i^2 \quad ; \quad N_{ii} = P_i + G_{ii} V_i^2 \\ M_{ii} &= P_i - G_{ii} V_i^2 \quad ; \quad L_{ii} = Q_i - B_{ii} V_i^2 \end{aligned}$$

- Para $i \neq j$

$$\begin{aligned} H_{ij} &= V_i V_j (G_{ij} \text{sen}\theta_{ij} - B_{ij} \text{cos}\theta_{ij}) \quad ; \quad N_{ij} = V_i V_j (G_{ij} \text{cos}\theta_{ij} + B_{ij} \text{sen}\theta_{ij}) \\ M_{ij} &= -N_{ij} \quad ; \quad L_{ij} = H_{ij} \end{aligned}$$

La matriz de coeficientes es la matriz jacobiana del sistema se resuelve y da como resultado los voltajes como se observa en (16).

$$\begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix}^{k-1} + \begin{bmatrix} \Delta\theta \\ \Delta V \end{bmatrix}^k \quad (16)$$

Las iteraciones se detienen cuando los valores del vector residuo $[\Delta P|\Delta Q]$ sean lo suficientemente pequeños [2].

Métodos de Desacople

Este método es el más utilizado cuando se necesita saber a todo tiempo lo que está ocurriendo con el sistema, se basa en que la matriz jacobiana los valores de N y M son muy pequeños para los valores de su diagonal H y L, por lo que se llega a un modelo de sistemas desacoplados con matrices de coeficientes constantes, al resolver ambos sistemas de forma alternativa, su respuesta llega a tener una convergencia comparable con la del método de Newton – Raphson [2].

Los sistemas de ecuaciones modificados son los siguientes:

$$B' \Delta \theta = \Delta P / V \quad (17)$$

$$B'' \Delta V = \Delta Q / V \quad (18)$$

Donde B' y B'' son matrices que están compuestas por:

$$\begin{aligned} B'_{ij} &= -1/X_{ij} & ; & & B'_{ii} &= \sum_{j \in i} 1/X_{ij} \\ B''_{ij} &= -B_{ij} & ; & & B''_{ii} &= -B_{ii} \end{aligned}$$

Donde:

X_{ij} = Reactancia de serie del elemento $i - j$.

B_{ij} = Parte imaginaria del elemento respecto de la matriz de admitancias.

6. Fallas en los sistemas Eléctricos de Potencia

El estudio de las fallas en los SEP facilita el análisis para la selección de los correctos interruptores, su ajuste y coordinación de las protecciones escogidas, estas fallas se originan de diferente manera y son fenómenos que ocurren en un tiempo de 20 ms a 1s, por lo que se consideran que son muy rápidas donde son despejadas por los interruptores seleccionados. Dentro de las fallas se encuentran los cortocircuitos que son fallas que se dan al momento de aumento de corriente eléctrica debido a la unión entre sus fases o entre una fase y tierra [5].

Fallas simétricas en los sistemas de potencia

Son analizadas para conocer los valores de voltaje, corriente y potencia circulada en ese tiempo de disturbio. La única falla que se puede considerar simétrica es la falla trifásica que ocurre cuando las tres líneas o fases se conectan directamente a tierra. Por lo tanto, este análisis es balanceado y se lo realiza en condiciones normales de operación [6].

Fallas asimétricas en los sistemas de potencia

Estas fallas son muy frecuentes en los SEP y pueden darse en paralelo o en serie. En ellas se analiza la corriente, ya que suele ser mucho mayor que en la falla simétrica.

Las fallas en paralelo son:

- Falla de una fase a tierra.
- Falla de línea a línea.
- Falla de dos fases a tierra.

Las fallas en serie son:

- Falla cuando una o dos líneas se desconectan y producen un desbalance.

[6].

7. Estabilidad en los sistemas de Potencia

La estabilidad es conocida como una propiedad que poseen los SEP que sirve para reaccionar y regresar a la operación normal después de haber recibido una falla o perturbación. Estas perturbaciones pueden ser grandes y de corta duración. Por lo tanto, su análisis es el de la estabilidad transiente y, también pueden ser disturbios pequeños que están presentes en grandes períodos de tiempo. En este caso, su análisis sería el de la estabilidad dinámica. [6]

Hablando del comportamiento dinámico de los SEP, este requiere de modelos matemáticos complejos y, al querer resolverlos se ve la necesidad de adaptar los recursos para que sean precisos y confiables, permitiendo la evaluación en tiempo real. Por ello, al analizar la seguridad dinámica del sistema se debe clasificar en diversas categorías la estabilidad de los sistemas, tomando en cuenta las consideraciones [7]:

- La naturaleza física de la perturbación la cual afecta en la estabilidad.
- La magnitud de las fallas o perturbaciones que se analizará.
- Los elementos de los SEP que deben ser considerados para evaluar estabilidad en periodos de tiempo.
- El método de cálculo seleccionado para determinar la estabilidad y sus márgenes de seguridad.

Al presentar las consideraciones se presenta la siguiente clasificación para analizar el problema de la estabilidad dinámica [7]:

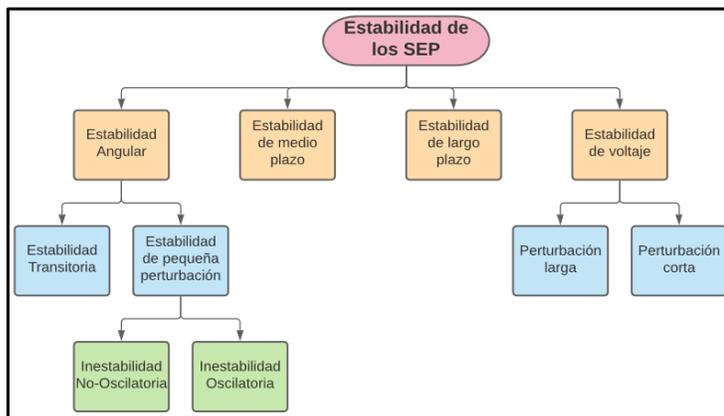


Figura 1: Clasificación de los tipos de estabilidad en un SEP

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

Para el presente proyecto se empezó realizando un estudio de las características y el manejo del software DigSILENT Power Factory analizando el funcionamiento de la interfaz de usuario para continuar con la programación mediante DPL (DigSILENT Programming Language). Esto con el objetivo de ganar experiencia en el manejo de la interfaz y así poder replicar ciertas funciones y estudios mediante programación DPL como flujos de potencias, análisis de cortocircuitos, creación de eventos, obtención de datos como corriente y voltaje de la red y sus equipos, etc.

Además, se investigó como realizar un enlace entre el software DigSILENT Power Factory y Matlab para poder comunicarse entre ellos. Para esto, se hizo uso de archivos con extensión .csv, los cuales mediante la escritura y lectura de ellos en ambas plataformas se podía realizar el envío de información.

2.1.1 Software para los análisis de los sistemas de Potencia

Existen algunos softwares que son más eficientes y consumen menos recursos que otros. En esta sección se habla de ellos, de las perturbaciones aplicadas y se detallan sus características.

8. PSS/E

Este software es uno de los más ágiles y sirve para la simulación de los SEP en condiciones de régimen estático y dinámico. Además, realiza la estabilidad de pequeñas perturbaciones. Una gran característica de este programa es que procesa una gran cantidad de datos y puede simular sistemas con un gran número de elementos como barras, cargas, líneas de transmisión, entre otras [8].

9. PSAT basado en Matlab

Este software es muy compatible con GNU Octave y también realiza simulación de régimen estático y dinámico. En este último, PSAT permite hacer flujos de potencia y análisis de estabilidad de pequeñas perturbaciones. Es una herramienta basada en el entorno gráfico de Simulink. [8]

10. MudPack

Este software permite el análisis de estabilidad de pequeñas perturbaciones en sistemas de multigeneradores. También se puede realizar el diseño y el ajuste de los estabilizadores [8].

11. PSCAD/EMTDC

En este Software por su lado permite simular y analizar la estabilidad de voltaje, estabilidad de pequeñas perturbaciones, simulaciones en el dominio del tiempo ya sea en el régimen dinámico y estático [8].

12. NEPLAN

Neplan, al igual que PSCAD, ejecuta simulaciones para la estabilidad de voltaje, la estabilidad de pequeñas señales y las respectivas simulaciones en el tiempo [8].

13. ETAP

Por último, ETAP posee muchas más herramientas para simulaciones, las cuales son: los estudios de estabilidad transiente, la confiabilidad en los sistemas de distribución, entre otros [8].

Sin embargo, este documento se enfoca en el uso y la manipulación del software DigSILENT Power Factory. Por lo tanto, se dedica una sección a este programa.

2.1.2 DigSILENT Power Factory

DigSILENT Power Factory es un software útil en la ingeniería Eléctrica, pues realiza la simulación de Sistemas Eléctricos de Potencia. Permite realizar el análisis estático o dinámico y, con ellos se observa el estudio de los sistemas para la planificación y optimización de las operaciones. Esta herramienta no solo es usada en el ámbito educativo, sino también en el investigativo y profesional-comercial. En estos tiempos, este software ha tenido una gran acogida en el sector eléctrico ecuatoriano como CENACE y TRANSELECTRIC [3].

El software posee integración funcional porque se implementa como un único ejecutable, compatible con Windows. Realiza flujo de carga, análisis de cortocircuito, entre otros análisis. Además, cuenta con una buena integración de base de datos, ya que todo lo que se requiera modelar en los sistemas eléctricos se encuentra integrado en una única base de datos que puede ser configurada [9].

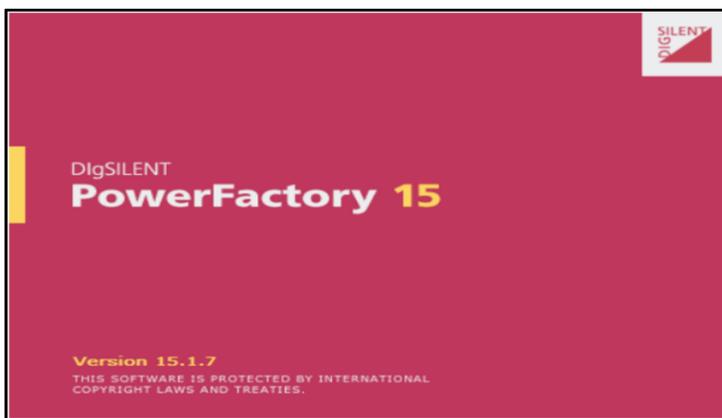


Figura 2: Software para los sistemas eléctricos de potencia

14. Base de Datos de DigSILENT Power Factory

Este programa utiliza una base de datos y es orientada a objetos y jerárquica, es decir, todos los datos que se representan en el sistema de energía se almacenan dentro de un conjunto jerárquico de carpetas que optimiza el uso de este software. Por lo tanto, todo es un objeto que pertenecen a clases análogas a las extensiones de los archivos de las computadoras y se almacenan según la disposición jerárquica en el árbol de la base de datos. [9]

15. Funciones de simulación de DigSILENT Power Factory

DigSILENT Power Factory posee una gran variedad de funciones para el análisis de simulación que se describen a continuación [9]:

- Análisis de flujo de potencia.
- Análisis de la red de bajo voltaje.
- Análisis de fallas.
- Calidad de energía y análisis de armónicos.
- Simulación dinámica.
- Simulación RMS.
- Simulaciones EMT.
- Análisis de valores propios.
- Identificación de los análisis de modelos.
- Análisis de contingencia.
- Análisis de confiabilidad.
- Restauración energética Óptima.
- Flujo de potencia óptimo.
- Optimización de la red de distribución.
- Análisis de protecciones.
- Reducción de la red.
- Estimación de Estados.

Para las simulaciones, DigSILENT usa modelos matemáticos cuyos cálculos están basados en normas ANSI, VDE, IEC, entre otras [10].

16. Interfaz Gráfica de DigSILENT

DigSILENT Power Factory utiliza una interfaz intuitiva y de fácil manejo para los usuarios. En la figura 3, se observa la interfaz de este software con las barras de tareas y el área de trabajo que posee.

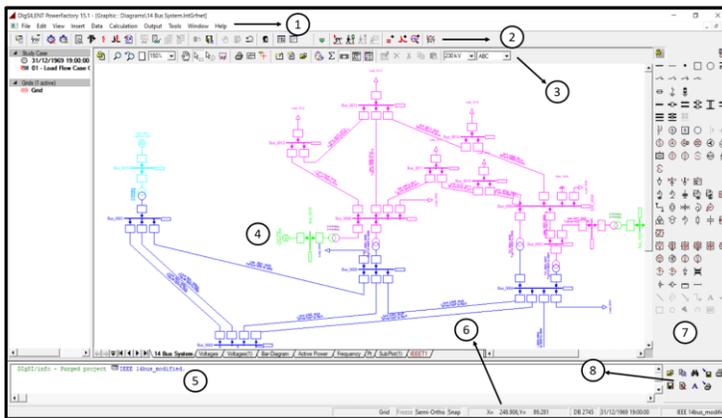


Figura 3: Interfaz Gráfica de Usuario (GUI).

A continuación, se explica parte de la interfaz y sus partes enumeradas en la figura 3. Más adelante, se dan a conocer más detalles de esta sección [9]:

1. Barra de menús.
2. Barra de herramientas.
3. Barra de opciones graficas.
4. Área de trabajo.
5. Área de resultados.
6. Barra de estado.
7. Herramientas graficas.
8. Herramientas del área de resultados.

Otra sección relevante es el Administrador de Datos “Data Manager”, ya que es una parte muy significativa del software. Aquí se encuentran las diferentes librerías que guardan los modelos creados para los elementos del SEP realizado en el área de trabajo. También, se almacenan los casos de estudio y los posibles cálculos que se le realicen al sistema, el cual se encuentra organizado de manera jerárquica como se observa en la figura 4 [9].

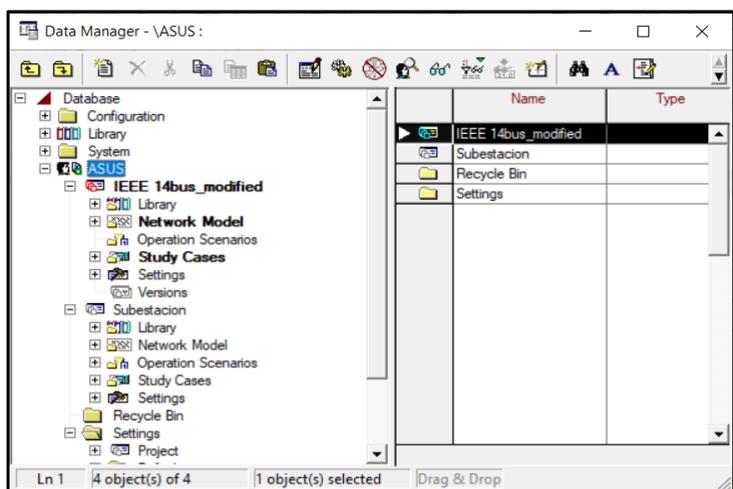


Figura 4: Administrador de Datos (Data Manager)

17. Compatibilidad de DigSILENT

La compatibilidad de DigSILENT con otros programas es una ventaja sobre otros programas de simulación, ya que realiza importaciones o exportaciones de archivos compatibles con PSS/E, NEPLAN, Matlab, entre otros mencionados con anterioridad [3].

18. Métodos de DigSILENT para el estudio de sistemas de Potencia

A continuación, se detallan los métodos usados en el análisis de los SEP que se utilizan en esta investigación.

Análisis de Flujo de Potencia

DigSILENT para realizar el flujo de potencia utiliza en método de Newton Raphson, para la convergencia de su resultado usando niveles predefinidos, los cuales son que las cargas se hagan dependientes de la tensión (Nivel 1 y 2) y que se linealizan todos los modelos (Nivel Lineal). Donde:

- Nivel 1 y 2: Son los Métodos de Flujo de Carga en AC, balanceado y desbalanceado y,
- Nivel Lineal: Es el Método de Flujo DC de carga [11].

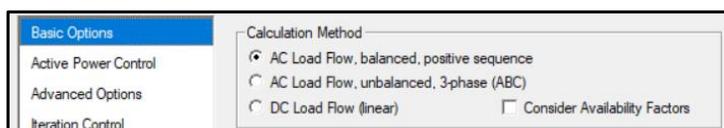


Figura 5: Niveles Predefinidos en DigSILENT.

Análisis de Corto circuito

Para el cálculo de Corto Circuito DigSILENT ofrece métodos de cálculos basados en las normas alemanas (VDE) y EE.UU. (ANSI, IEEE, IEC) [11].

- VDE. - Significa **Verband Deutscher Elektrotechniker** y la VDE0102 es norma aplicada en Alemania.
- ANSI. - American **National Standard Institute** y sirve en el diseño de circuitos de SEP y la ventaja que tiene se puede agregar un factor de corrección (Voltaje de prefalla), este factor se lo usa para analizar las diferentes variaciones de voltaje y se ejecuta en sistemas de hasta 230kV.
- IEC. - **International Electromechanical Institute**, también es aplicado a sistemas hasta 230kV, se basa en el teorema de Thévenin, porque se

calcula una fuente equivalente en el punto donde ocurre la falla, para después de eso calcular la corriente de cortocircuito, aquí hay dos normas aplicables, la IEC60909, aplicada en el diseño de circuitos de SEP y la IEC61363, aplicada en diseños de circuitos de submarinos, barcos y aviones.

- Completo. – Sirve para el cálculo de múltiples fallas.

Los tipos de fallas que poseen son [11]:

- Trifásicas.
- Monofásicas a tierra.
- Bifásicas.
- Bifásicas a tierra.

2.1.3 DigSILENT y su Lenguaje de Programación.

El lenguaje de programación que usa este software es el DigSILENT Programming Language (DPL). Resulta útil para la automatización de las tareas que realiza el programa como los cálculos que se realizan dentro de un SEP. DPL otorga varias ventajas en los siguientes aspectos [11]:

- Ofrece definición y el uso de variables predeterminadas.
- Permite la creación de nuevas funciones de cálculo.
- Tiene una interfaz flexible para acceder a las entrada y salidas de datos.
- Brinda expresiones matemáticas por medio de comandos.
- Permite la exportación de archivos para usar en otras plataformas.

En DPL, el “ComDpl” es un comando principal que conecta las variables, parámetros u objetos a varias funciones, con el fin de producir los resultados o cambios de parámetros de los elementos utilizados en el área de trabajo [9].

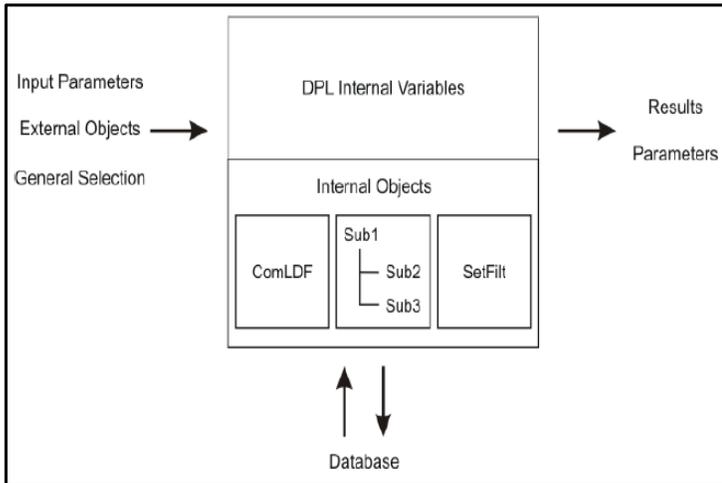


Figura 6: Estructura Principal de un comando DLP [9].

Como en la mayoría de los lenguajes de programación se definen las entradas, que son los objetos guardados en la base de datos. Esta base se almacena en la "Selección General". La información de entrada puede ser evaluada usando funciones y variables internas dentro del código fuente [11]. En la figura 6 se observa la estructura principal de un comando DPL. Al finalizar la ejecución de Comando DPL, los resultados pueden ser exportados en diferentes formatos.

CAPÍTULO 3

3.1 Manejo de la interfaz de usuario del software DigSILENT Power Factory

3.1.1 Descripción de la interfaz de usuario

1. Vista general del entorno del programa

La figura 7 muestra la ventana principal de interfaz de usuario.

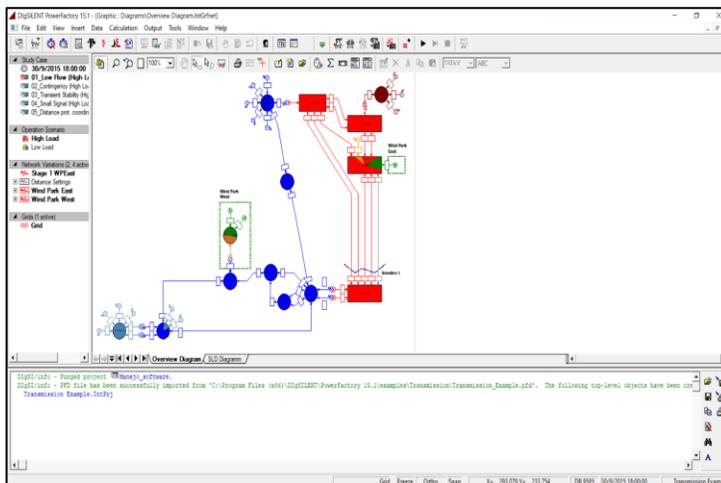


Figura 7: Vista general del entorno gráfico

En los siguientes puntos, se mostrará una descripción de las áreas más importantes de la interfaz.

2. Barra de ventana principal

La figura 8 nos proporciona información acerca de la versión del software que estamos utilizando.



Figura 8: Barra de ventana principal

3. Barra de menú principal

La figura 9 nos muestra el menú que proporciona el programa al usuario. Cada opción posee un menú desplegable en el cual se encuentran acciones específicas.

Para acceder a estas opciones basta con dar click sobre ellas o si desea trabajar desde el teclado, puede seleccionar la combinación de teclas Alt+  para desplazarse a través de ellas y de sus opciones.

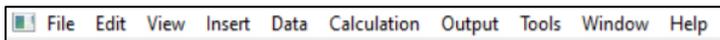


Figura 9: Menú principal

A continuación, en la tabla 1 se encuentran algunas de las actividades más importantes que se pueden realizar en cada opción:

File	Creación de proyectos.
	Acceder a ejemplos que proporciona el programa.
	Importar/Exportar proyectos.
Edit	Acceder/Modificar parámetros del proyecto.
View	Modificar el tamaño del área de trabajo.
Insert	Creación de casos de estudio.
Data	Obtener información de los elementos creados en el proyecto.
	Acceder a los scripts contenidos en el proyecto.
Calculation	Cálculo de flujo de carga.
	Simulación de cortocircuitos.
	Análisis de armónicos.
Output	Datos de salida de los procesos ejecutados.

Tools	Verificar información. Ejecutar scripts.
Windows	Manejo de la disposición de ventanas en la interfaz de usuario.
Help	Manuales de usuario

Tabla 1: Opciones del menú principal

4. Barra de herramientas

En la figura 10 se pueden observar los botones para realizar los comandos principales en la interfaz del programa.

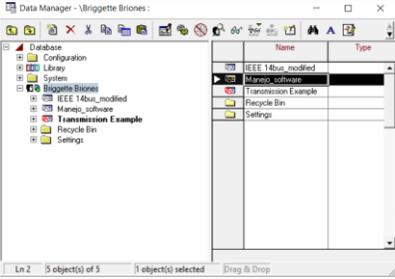
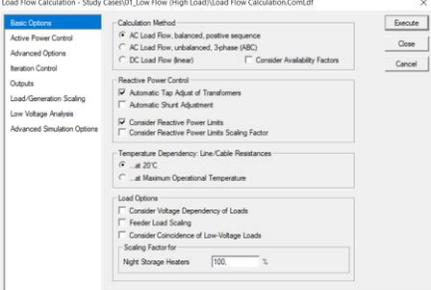
Los botones que se encuentran de un tono gris indican que no se encuentran disponibles al inicio del programa. Algunos se van activando en función del estudio que se esté realizando o cuando empiece la simulación.

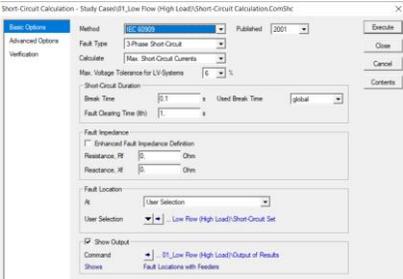


Figura 10: Barra de herramientas

A continuación, en la tabla 2 se describirán los botones más importantes involucrados en análisis como: flujo de carga, creación de eventos, configuraciones o simulación de cortocircuitos.

	Open Database Manager	Este botón abre la siguiente ventana:
---	-----------------------	---------------------------------------

		 <p>Aquí el usuario puede realizar un manejo múltiple de los archivos e información que se encuentren en su proyecto.</p>
	<p>Edit Relevant Objects for Calculation</p>	<p>Este botón muestra al usuario los objetos que se encuentren disponibles en el proyecto para su edición como, transformadores, líneas de transmisión, buses, etc.</p>
	<p>Date/Time of Calculation Case</p>	<p>Este botón permite al usuario observar o editar la fecha y hora del caso de cálculo a cierta escala de tiempo.</p>
	<p>Calculate Load Flow</p>	 <p>Este botón despliega la siguiente ventana:</p> <p>Donde el usuario seleccionara el método que necesite para realizar el flujo de potencia.</p>

		<p>Una vez configurado los parámetros se da click en el boton Execute y la simulación comenzará.</p>
	<p>Calculate Short Circuit</p>	<p>Este botón despliega la siguiente ventana:</p>  <p>Donde el usuario seleccionara el método, tipo de falla y la corriente de corto circuito que desee calcular.</p> <p>Una vez configurado los parámetros se da click en el boton Execute y la simulación comenzará.</p>
	<p>Edit Short Circuits</p>	<p>Este botón permite al usuario editar o crear eventos de cortocircuito para el análisis de fallas múltiples.</p>
	<p>Execute DPL Scripts.</p>	<p>Este botón permite al usuario ejecutar los archivos DPL disponibles en el proyecto.</p>
	<p>Output Calculation Analysis</p>	<p>Este botón le otorga al usuario en forma de salida, una predicción de los resultados de cálculo. Con lo cual, puede elaborar un informe o ayudarle a interpretar los resultados.</p>

	Break	Este botón detiene la simulación que se esté ejecutando en ese instante.
	Maximize Graphic Window	Este botón permite maximizar el área de trabajo. En caso de querer regresar al tamaño anterior, basta con volver a presionar el botón.
	Maximize Output Window	Este botón permite maximizar la ventana de salida. En caso de querer regresar al tamaño anterior, basta con volver a presionar el botón.
	Change ToolBox	Este botón permite al usuario seleccionar los diferentes tipos de análisis que cuenta el programa. A partir de su elección, mostrará de su lado derecho los botones correspondientes al análisis que se seleccionó. En el caso de la figura x se observan los botones correspondientes al análisis de contingencia.

Tabla 2: Descripción de los botones más importantes

5. Área de trabajo

En la figura 11 se puede observar un área enmarcada por un rectángulo rojo. Esta parte corresponde al área de trabajo de la interfaz en donde se visualiza la red y se colocan los objetos con los que se trabajarán.

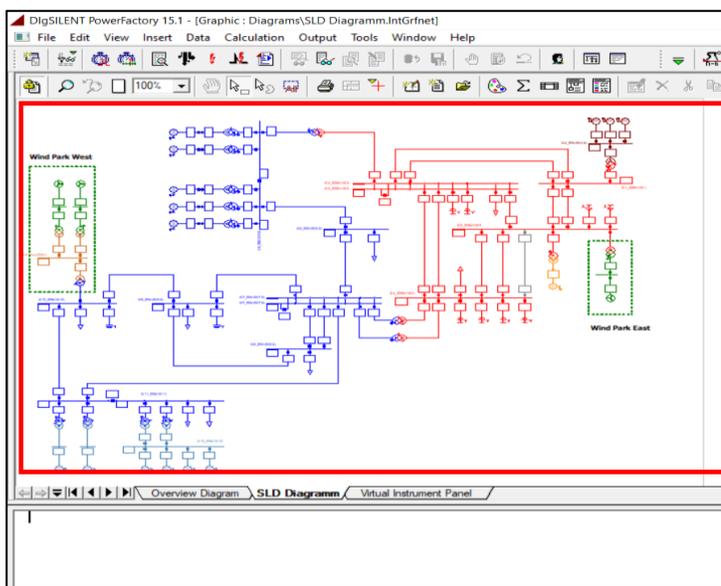


Figura 11: Área de trabajo

6. Ventana de salida

La figura 12 nos muestra la ventana de salida que proporciona la interfaz de usuario.

Los íconos que se encuentran en el lateral derecho permiten almacenar, editar, imprimir, borrar e incluso modificar el tipo de fuente de la información que se muestra.



Figura 12: Ventana de salida

3.1.2 Creación de un proyecto

Para crear un proyecto en el software Digsilent se lo puede hacer mediante dos formas:

3.1.2.1 Por medio de las opciones del menú principal.

1. Nos dirigimos al menú principal y realizamos los siguientes pasos:

File → New → Project, cómo se observa en la figura 13.

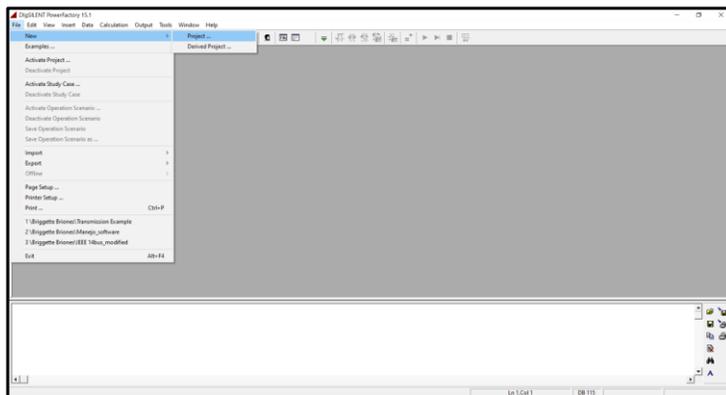


Figura 13: Creación de un proyecto por medio del menú principal

2. A continuación, nos aparecerá la siguiente ventana donde indicaremos el nombre que llevará nuestro proyecto y procederemos a dar OK.

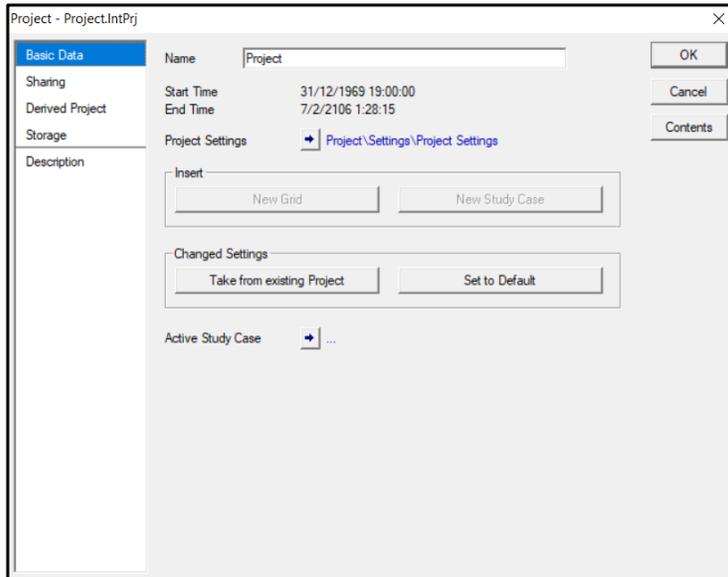


Figura 14: Ventana para configurar parámetros del proyecto

3. Aparecerá la siguiente ventana en dónde se realizará la configuración de la red que utilizaremos indicando parámetros como nombre, color y frecuencia nominal.

Por defecto, el programa le asigna una frecuencia de 50 Hz. Sin embargo, se debe tener en cuenta que en nuestra región el sistema eléctrico opera a 60 Hz.

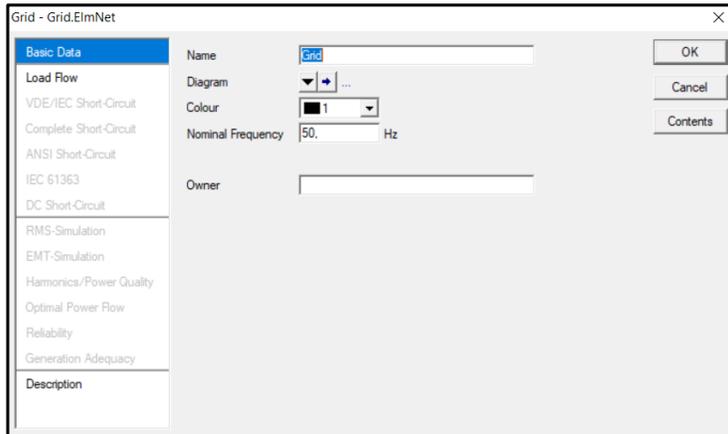


Figura 15: Ventana para configurar parámetros de la red

4. Una vez, que se hayan realizado todas las configuraciones se procede a dar OK y ocurrirá lo siguiente:

- La carpeta con el nombre del proyecto se creará con una carpeta de librería.
- Un nuevo caso de estudio se agregará a la carpeta del nuevo proyecto.
- Tanto el proyecto, como la red y el caso de estudio se activarán. Esto quiere decir, que en caso de que existan otros proyectos se desactivarán automáticamente para poder trabajar con el nuevo proyecto.

Para conocer cuál proyecto se encuentra activo, basta con observar su nombre. Estará escrito con letras negritas como se observa en la figura 16.

- Se habilitará el área de trabajo para poder agregar los elementos que conformen la red.

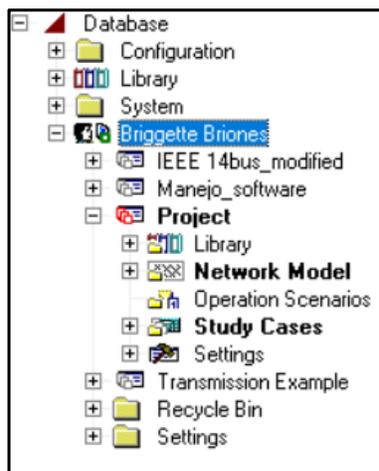


Figura 16: Árbol del programa

3.1.2.2 Por medio del Data Manager.

1. Nos dirigimos a la barra de herramientas y damos clic en el ícono  (Open Data Manager), el cuál abrirá la ventana de administración de proyectos mostrada a continuación:

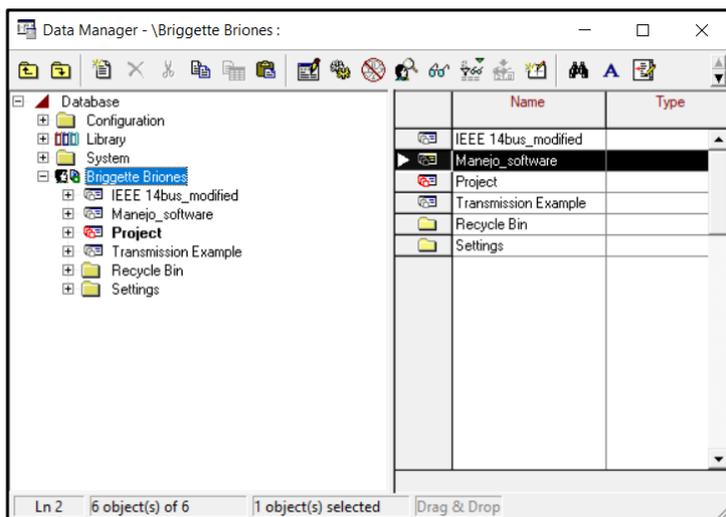


Figura 17: Ventana del Data Manager

- Nos dirigimos a la pestaña donde se encuentra el nombre de usuario, damos clic derecho y seleccionamos las opciones New → Project , cómo se observa en la figura 18.

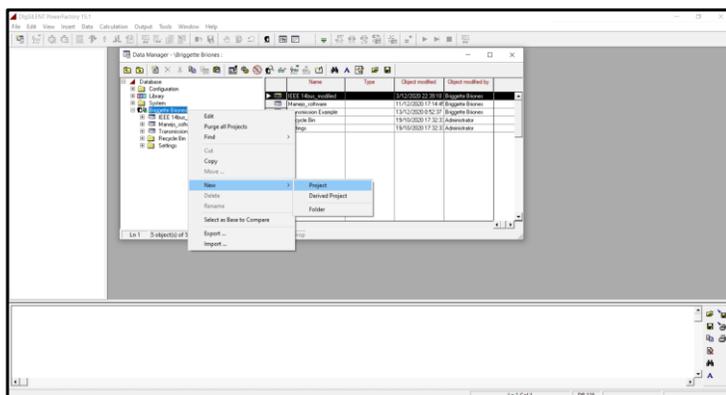


Figura 18: Creación de un nuevo proyecto por medio del Data Manager

3. Nos aparecerá la ventana mostrada en la figura 17. A partir de esta parte, el procedimiento es el mismo que al hacerlo mediante el menú principal descrito en el ítem anterior.

3.1.3 Creación de una red pequeña

1. Para la creación de una red pequeña nos dirigimos al Workspace que se encuentra en el lado derecho como se muestra en la figura 19.

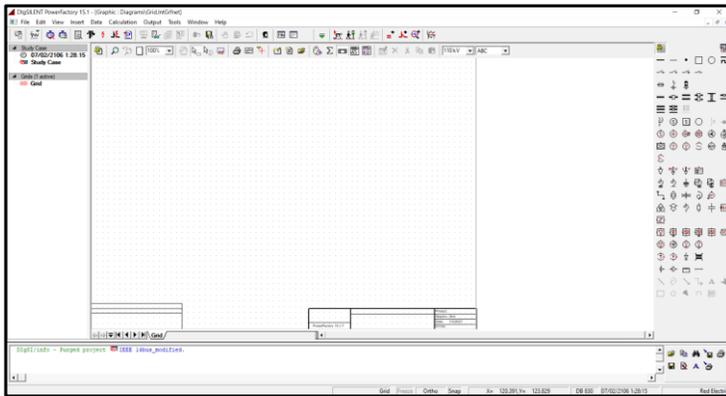


Figura 19: Área de trabajo

2. En esta sección encontramos los elementos para crear cualquier sistema eléctrico de potencia como se observa en la figura 20, encontramos, maquinas síncronas, barras, transformadores, etc.



Figura 20: Elementos de una red eléctrica

3. Para la creación de una pequeña red vamos a utilizar los elementos más comunes que serán mostrados a continuación:

- **Barras**

Existen muchas formas de esquematizar una barra como se muestra en la figura 21. Tenemos la forma normal, la forma corta y por símbolo.



Figura 21: Tipos de barras

- **Líneas de transmisión**

El icono de línea de transmisión se muestra a continuación, con este se entrelaza en sistema eléctrico de potencia.



Figura 22: Línea de transmisión

- **Generadores**

El símbolo mostrado a continuación es válido tanto para generador o motor síncronos, ya que se puede modificar sus parámetros o funciones en la sección de configuraciones.



Figura 23: Generador o motor síncrono

- **Transformadores**

Existen dos opciones para ingresar los transformadores. Estos son de 2 devanados y los de 3 devanados como se muestra a continuación:



Figura 24: Transformador de 2 devanados



Figura 25: Transformador de 3 devanados

- **Cargas**

Las cargas se las puede representar como se muestra en la figura 26. Estas pueden ser del tipo resistivas, inductivas o capacitivas.



Figura 26: Símbolo para representar de forma general las cargas.

3.1.3.1 Creación de barras

Una vez explicada la simbología de los elementos más comunes en una red, procederemos a construir nuestro sistema de potencia como se redacta en los siguientes pasos:

1. Se selecciona el primer icono de barra dando clic y se lo arrastra al espacio de trabajo como se observa en la figura 27.

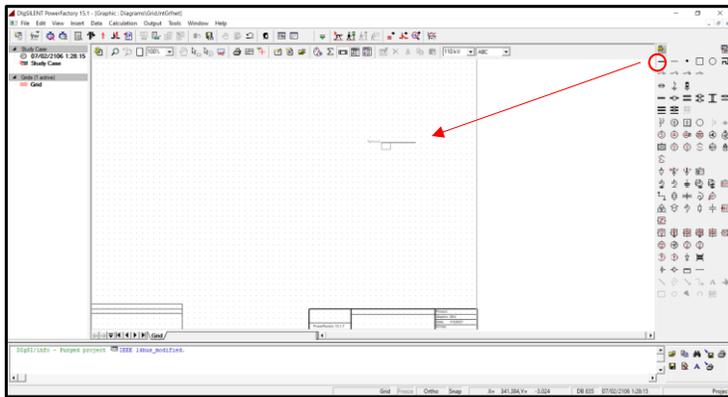


Figura 27: Colocación de una barra en el área de trabajo

2. Para poder apreciar mejor el elemento, se da clic derecho sobre el mismo y se escoge la opción "Rotate". Luego, se selecciona el tipo de rotación (figura 28).

Así mismo para dejar de graficar más barras se da clic sobre el mismo icono o se aplasta el botón ESC de nuestro teclado.

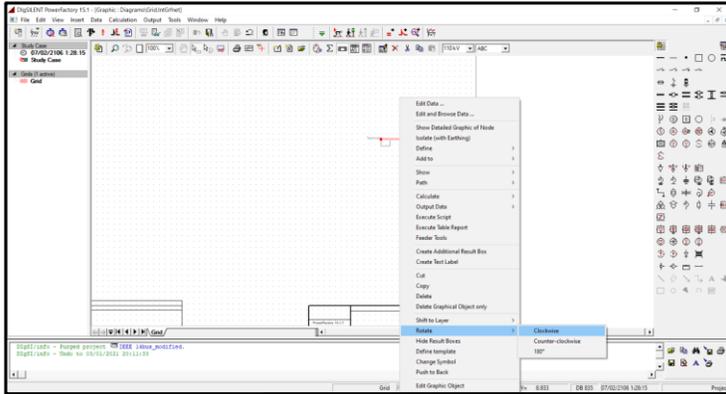


Figura 28: Cambio de orientación del elemento

3. Para nuestra red de sistema de potencia ubicaremos 6 barras como se observa en la figura 29 y procederemos a rotar algunas de ellas bajo nuestra conveniencia. Recuerden que este último paso es para obtener una mejor estética al momento de presentar la red.

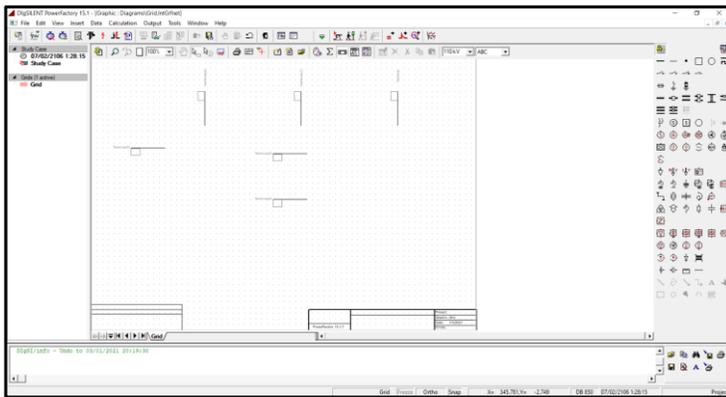


Figura 29: Colocación de todas las barras a utilizar en la red

4. Una vez completada nuestras ubicaciones de las barras, se debe asignar el nombre de cada barra y los parámetros de trabajo de cada una de ellas dando

doble clic sobre ellas. Nos aparecerá la siguiente ventana (figura 30), donde se modificarán los parámetros básicos.

En esta sección se modifican los siguientes parámetros:

- Nombre a la barra: "Barra 1"
- Valor de trabajo de la barra o también llamado voltaje de línea a línea: "10kV"
Una vez asignado ese voltaje se calculará de manera automática el voltaje de fase.
- Tipo de sistema: AC/DC
- Tecnología de fase o conexión de fases: ABC/ABC-N, entre otros.

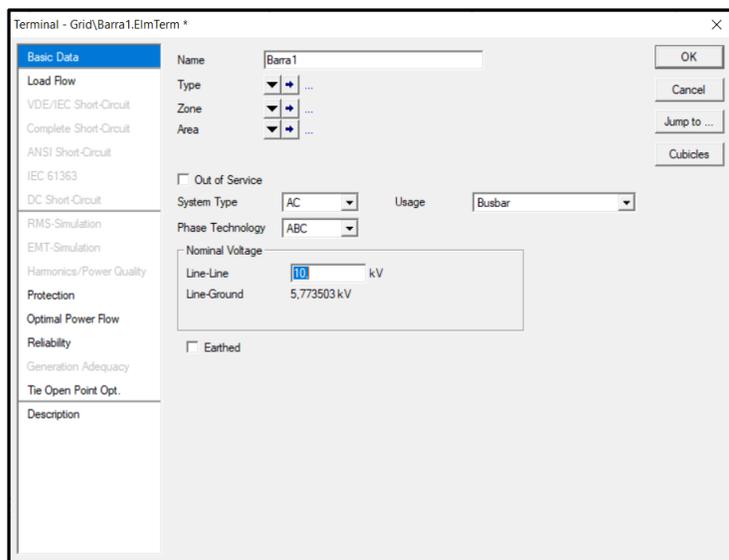


Figura 30: Ventana para configurar los parámetros de las barras

5. Luego nos vamos a la sección de flujo de carga o Load Flow (figura 31) para editar el resto de los parámetros de la barra.

En esta sección se puede editar lo siguiente:

- Voltaje de control
- Límites de voltaje de estado estable y límites de cambio de paso de voltaje.

Estos valores se los suele modificar cuando se va a realizar un flujo de potencia óptimo.

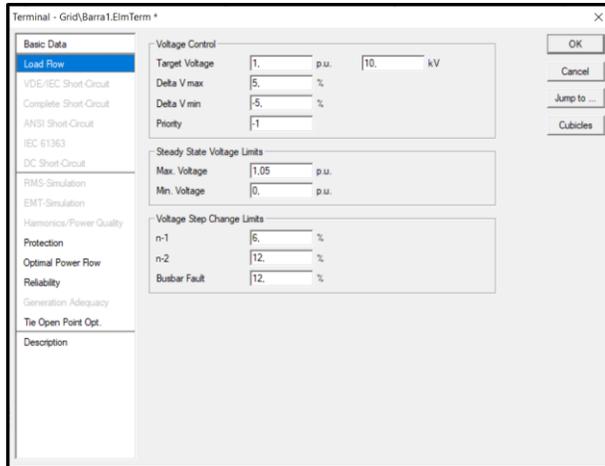


Figura 31: Configuración para flujo de carga

6. Se realizan el paso 2 y 3 para cada una de las barras, por lo que el sistema de barras quedaría como se muestra en la figura 32.

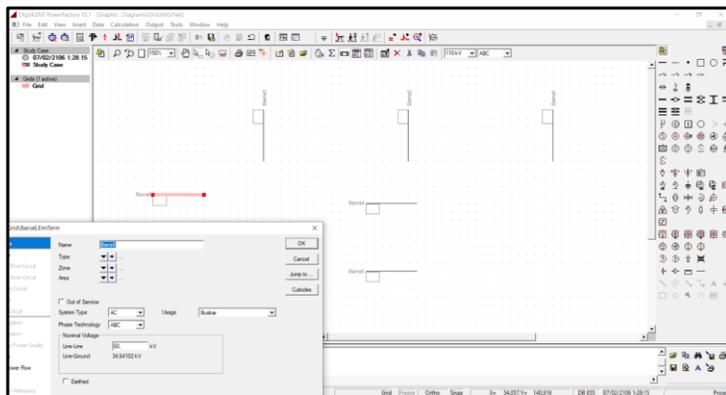


Figura 32: Sistema de barras finalizado

3.1.3.2 Creación de las líneas de transmisión.

1. Seleccionamos su icono en el panel y trazamos las líneas que se requieran entre barra y barra como se observa en la figura.
Para dejar de graficar simplemente se presiona la tecla ESC.

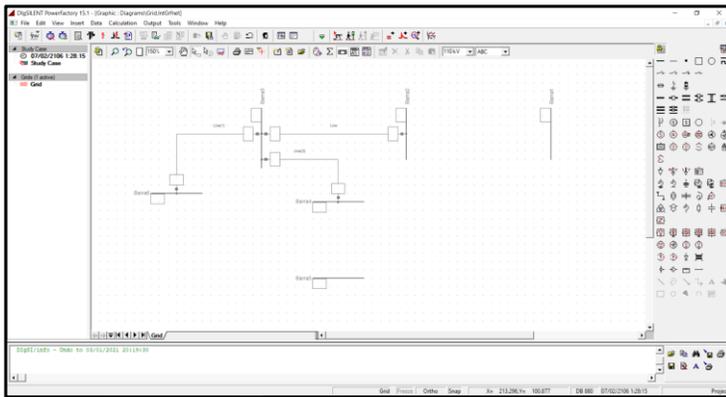


Figura 33: Creación de las líneas de transmisión

2. Para configurar los parámetros de las líneas de transmisión, damos doble clic sobre la línea que deseamos modificar y nos aparecerá la siguiente ventana donde se modificarán los datos básicos de la línea como el nombre y la longitud que se va a extender la línea entre barra y barra.

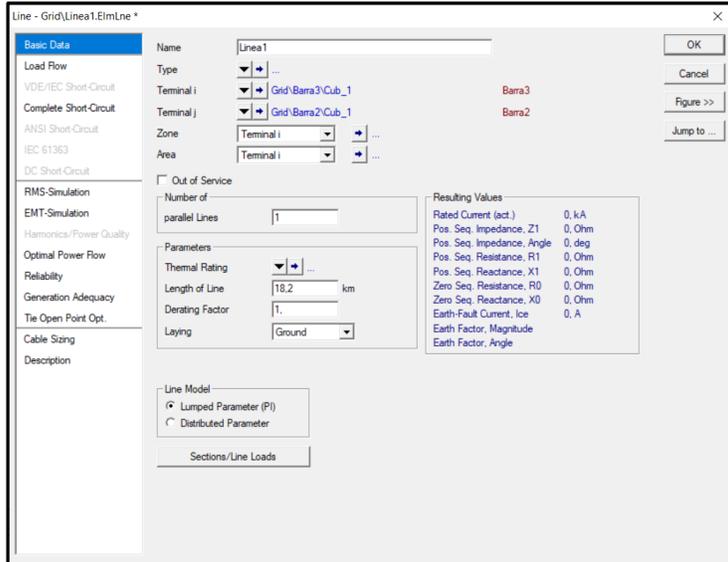


Figura 34: Configuración de las líneas de transmisión

3. Luego, creamos un tipo de línea (modelo) que puede ser usado en otro proyecto dando clic en la flecha de la opción "type" y escogemos "New Project Type". Se escoge una de las opciones que aparece, según lo que requiera el problema de construcción. En este caso "Line Type".

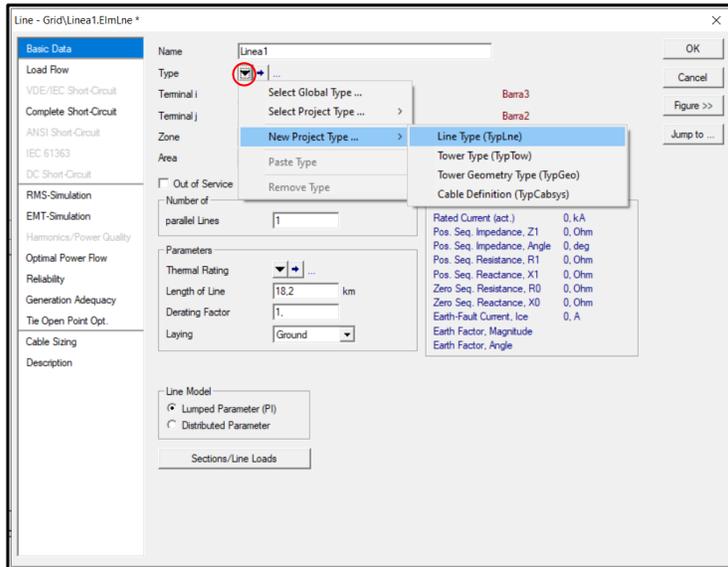


Figura 35: Creación de un tipo de línea

4. Se abrirá la siguiente ventana continuar modificando parámetros del nuevo tipo de línea creado como: el nombre, el voltaje nominal, corriente nominal, frecuencia nominal, el tipo de línea (aérea/terrestre), tipo de sistema (AC/DC), numero de fases y neutro que posea, además de la resistencia que posea la línea a 20°C y la reactancia en función de los datos proporcionados para la construcción de estas.

En este caso se observan los valores de la línea entre las barras de 60Kv creadas anteriormente.

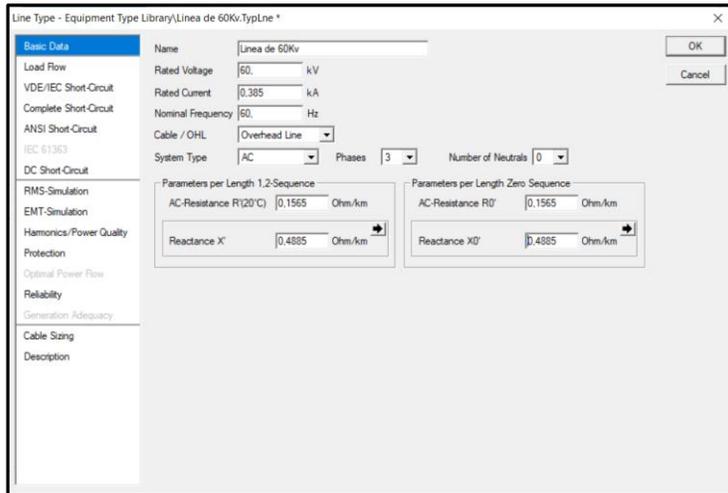


Figura 36: Configuración de parámetros básicos de una línea de transmisión

5. Nos dirigimos a la sección de flujo de carga y modificamos los valores mostrados en la siguiente ventana como la máxima temperatura de operación que es de "80 degC", el tipo de material del conductor "Aluminio" y la dependencia de temperatura. También se modifica la susceptancia en unidades uS/Km y se da clic en "OK".

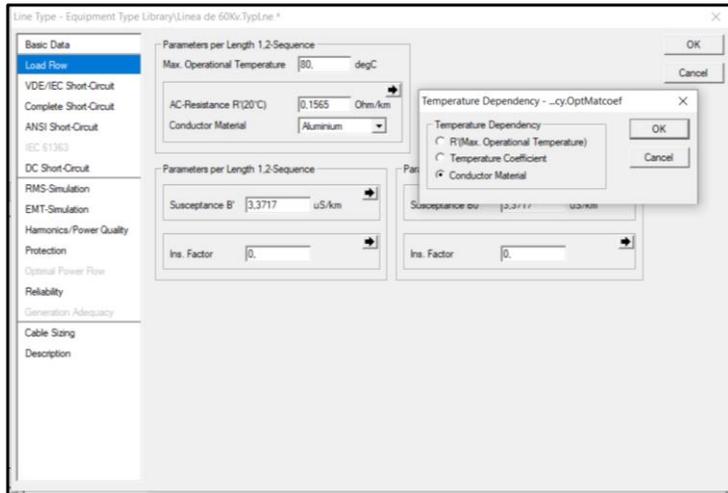


Figura 37: Parámetros a modificar para el flujo de carga

6. Nos aparecerá la ventana de inicio para la creación de un tipo de línea, pero esta vez se observan todos los datos ingresados anteriormente y en "Type" se observa el nuevo modelo creado.

También se puede seleccionar que la línea recién creada este fuera de servicio el numero paralelo de líneas

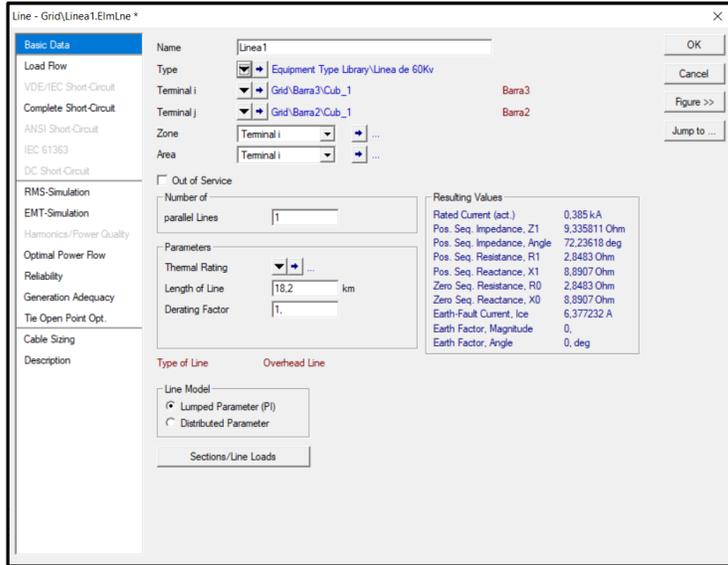


Figura 38: Ventana de inicio mostrando las configuraciones previamente realizadas

7. En esa misma ventana nos dirigimos a la sección "Load Flow" (figura 39) para modificar el porcentaje de flujo que vaya a transportar la línea mediante su desempeño cuando posea carga el sistema eléctrico. En este caso lo dejamos al 100% y presionamos "OK" para termina la edición de esa línea.

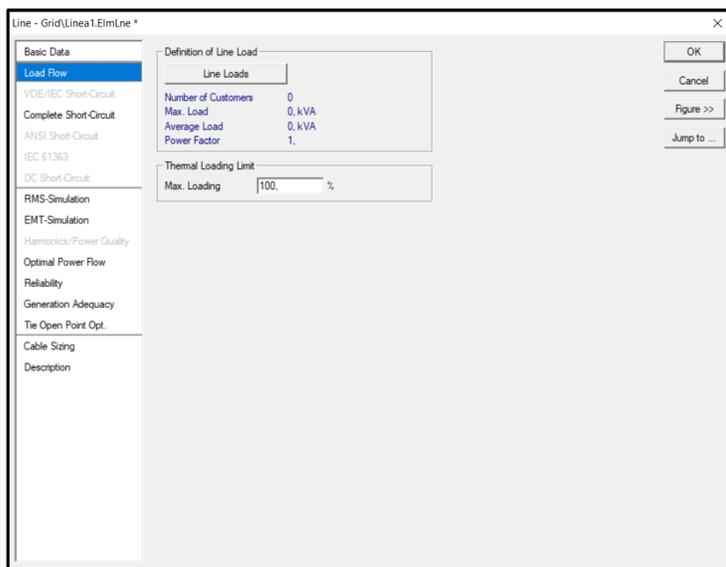


Figura 39: Configuración del porcentaje de flujo en las líneas

8. Si se desea utilizar un modelo de línea ya creado se debe dirigir a esta sección Type → Select Project Type → Line Type (figura 40). Esto último dependiendo del modelo creado previamente.

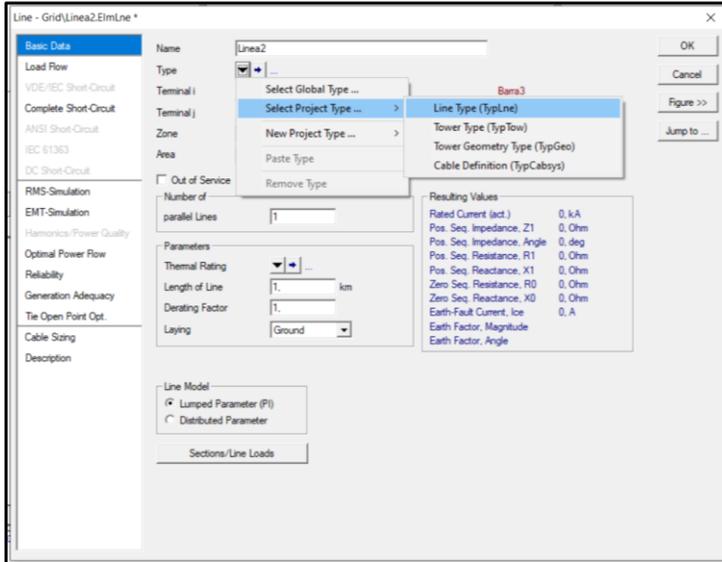


Figura 40: Selección de un modelo previamente creado

9. Seleccionamos el tipo de línea creado (modelo) para continuar editando nuestras líneas de distribución. Damos clic en “OK” y los parámetros serán los mismos ya ingresados en los pasos anteriores.

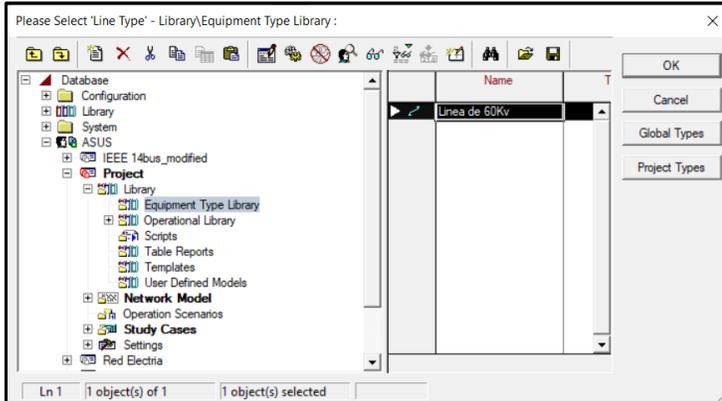


Figura 41: Selección del modelo creado

También se puede modificar el nombre y la longitud de esta nueva sección de línea de distribución como se observa en la figura 42. Se observa en Type que es el mismo modelo usado anteriormente, el de la “Línea de 60Kv”.

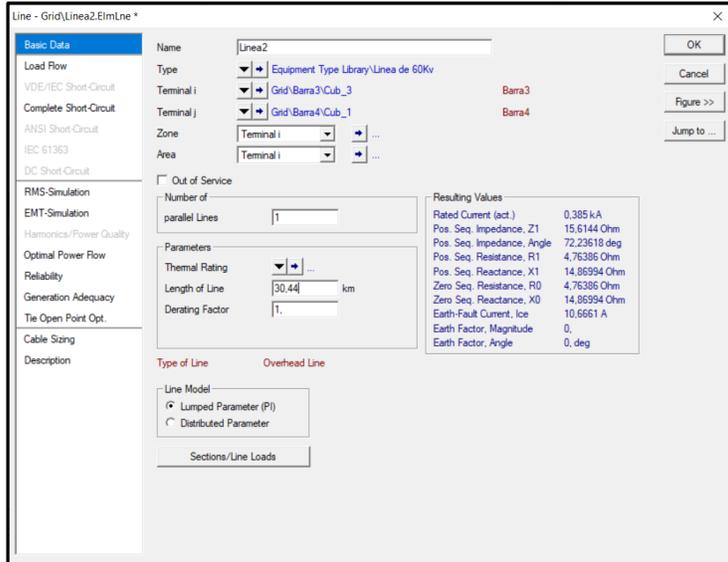


Figura 42: Modificación de nombre y longitud de un modelo previo

10. Finalmente, se realizan las modificaciones a las demás líneas según sus parámetros y valores dados para la construcción.

Si todo se realizó correctamente, en el circuito (figura 43) podremos observar los nombres de las líneas y la potencia a la que van a trabajar.

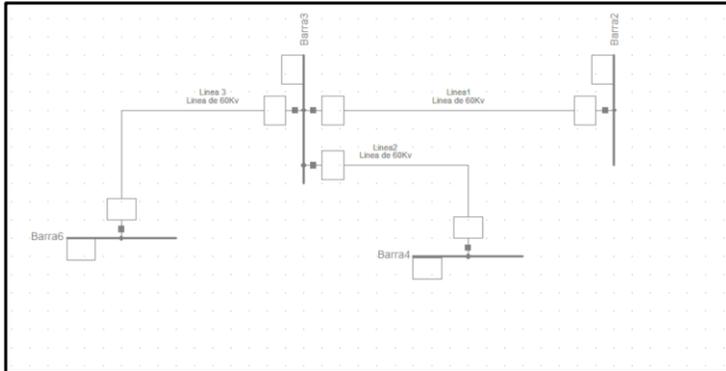


Figura 43: Circuito con su respectiva configuración de las líneas.

3.1.3.3 Creación de los transformadores.

Para nuestro ejemplo utilizaremos dos transformadores de 2 devanados.

1. Se agrega los transformadores dando clic sobre el símbolo y se arrastra el elemento al área de trabajo. Inmediatamente se conectan entre las barras como se observa en la figura 44.

Al conectarlos se ubican adecuadamente según el sentido de las barras, ya sea su orientación horizontal y vertical.

Para desactivar la opción de transformador simplemente se presiona el botón ESC del teclado.

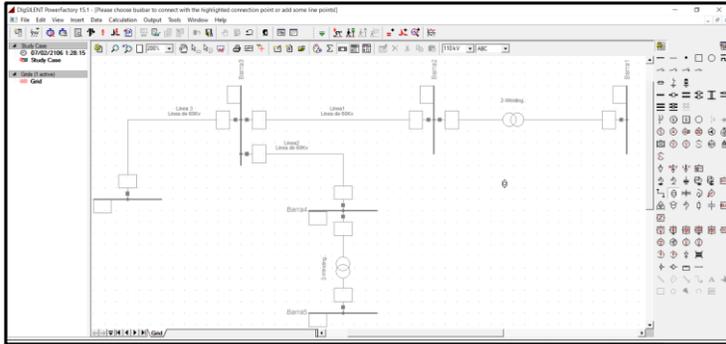


Figura 44: Adición de los transformadores a la red

2. Se da doble clic en uno de los transformadores mostrándonos su ventana de configuración para poder crear o modificar un modelo. Este paso es similar al explicado con las líneas de transmisión.

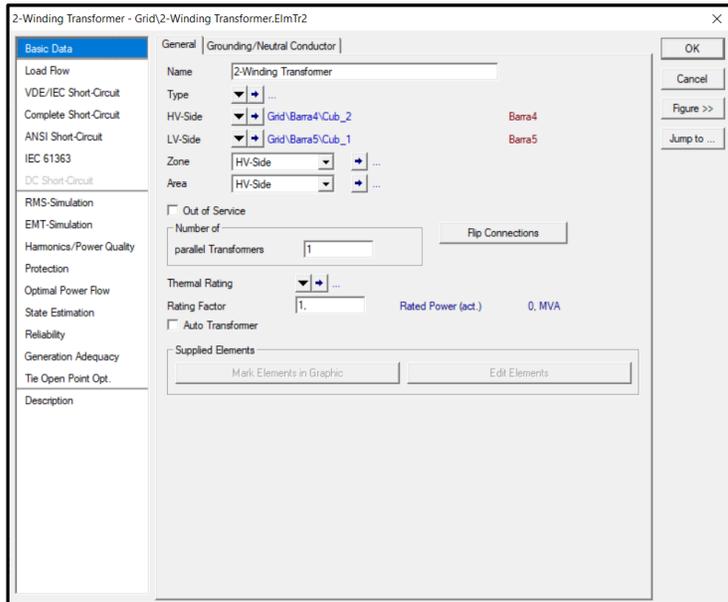


Figura 45: Ventana correspondiente a la configuración de los transformadores

Como estamos creando una red desde cero no tenemos modelos de transformadores por lo que procederemos a crear uno.

3. Para crear un modelo de transformador nos dirigimos a Type →New Project Type como se muestra en la figura 46.

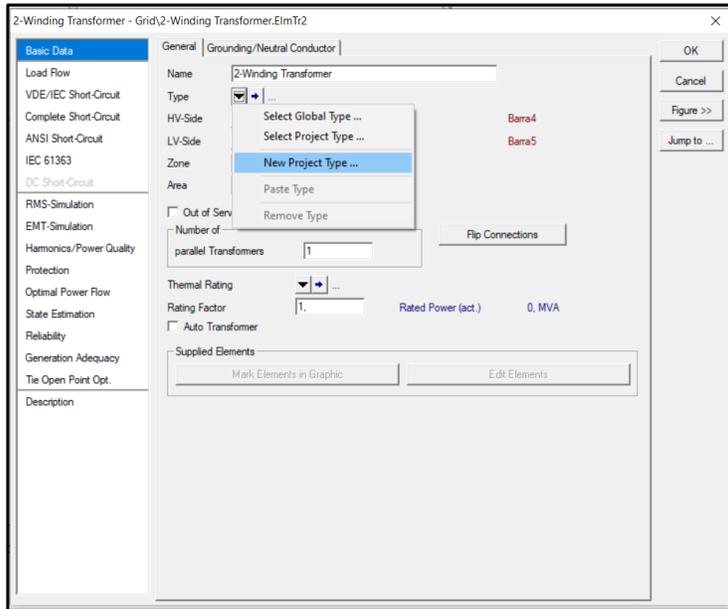


Figura 46: Creación de un modelo de transformador

4. Nos aparecerá la siguiente ventana donde se encuentran dos secciones que son los datos básicos y flujo de carga de los modelos a crear para las librerías. Aquí se coloca el nombre del modelo, el modo de conexión (trifásico/monofásico), desfase y datos requeridos como el voltaje limite, la secuencia de impedancia positiva y el conexionado (estrella/delta).

La secuencia de impedancia cero solo afectara cuando haya disturbios en la red como los cortocircuitos.

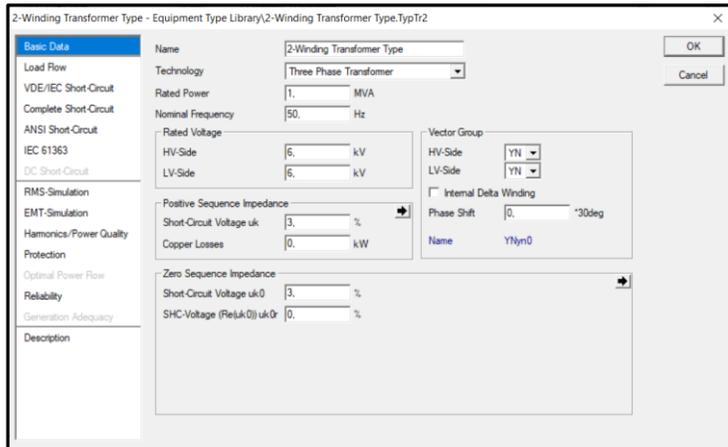


Figura 47: Configuración de parámetros de un transformador

- Ingresamos los datos de los transformadores para los datos básicos como se muestra en la figura 48. Esto se hace para cada uno de los modelos a crear en un proyecto, si es que no se puede usar uno de los modelos ya creados. En este ejemplo llamaremos al modelo “Transformador reductor” y se agrega los voltajes a los que va a estar sometido en alta y baja tensión (60/10 Kv), las conexiones que tomaran sus devanados primarios y secundario (YN/D), entre otros datos.

Figura 48: Ingreso de datos básicos del transformador

Una vez concluida esa parte nos dirigimos a la sección de flujo de carga y se llenan los datos respectivos de los transformadores como se muestra en la figura 49. Aquí se podrán modificar datos generales, cambio de taps, saturación y funciones más avanzadas, para nuestro ejemplo solo se modifica las posiciones de los taps.

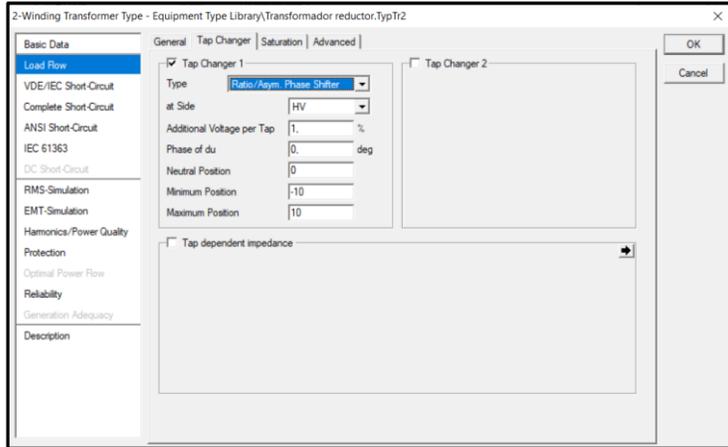


Figura 49: Configuración del tap del transformador

Los datos generales se muestran en la figura 50 y se presiona “OK” para guardar ese modelo de transformador y así ya queda almacenado en la librería del proyecto.

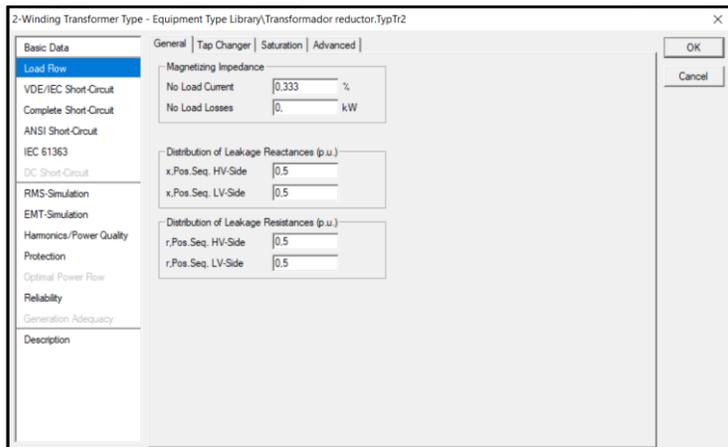


Figura 50: Configuración general del transformador

6. Regresamos a la ventana principal antes de la creación del modelo, y se observan los datos ingresados.

En Type, se observa el modelo creado llamado “Transformador Reductor”. También se observa sobre que barras está conectado y si este dispositivo estará fuera de servicio.

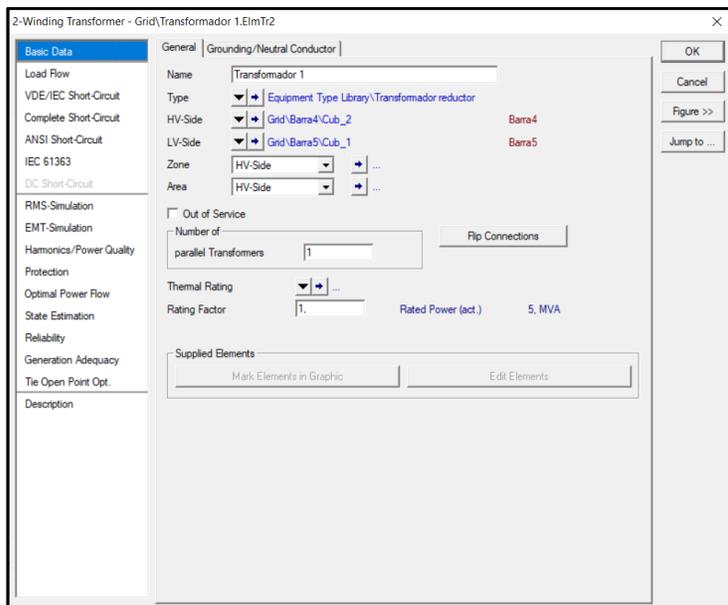


Figura 51: Ventana principal

7. Como ya tenemos creado un modelo de transformador, lo podemos seleccionar dando clic en Type → Select Project Type (Figura 52).

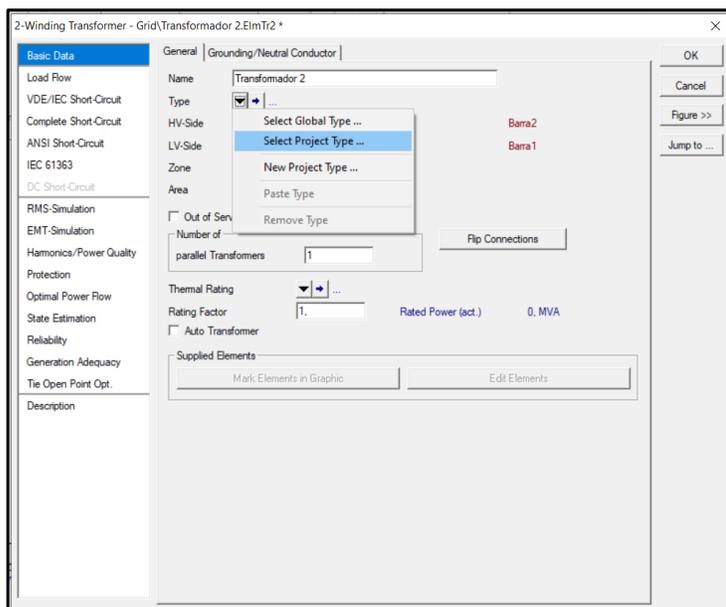


Figura 52: Selección del modelo de transformador creado previamente

8. A continuación, aparecerá la siguiente ventana donde se observa el modelo creado "Transformador reductor" y se presiona "OK".

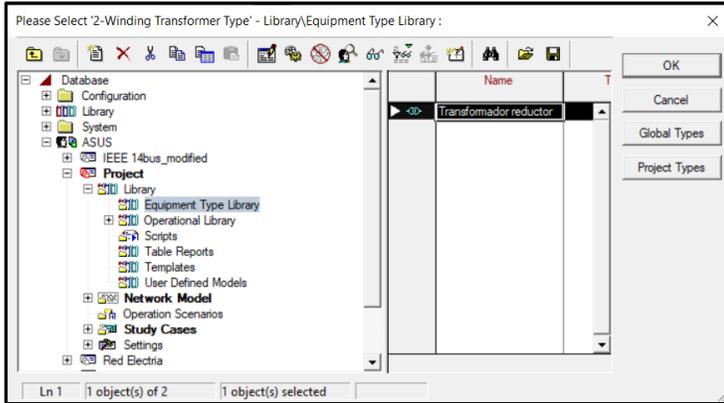


Figura 53: Modelo de transformador creado para el proyecto

9. Finalmente se observa los nombres de los transformadores y el modelo de cada uno, en el espacio de trabajo (Figura 54).

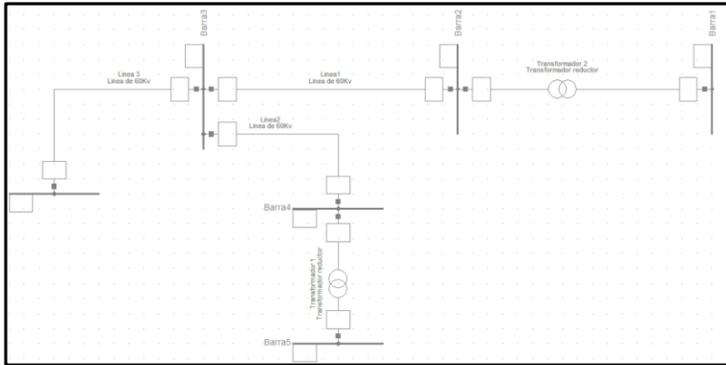


Figura 54: Red con los transformadores

3.1.3.4 Creación de los generadores síncronos.

Para nuestro ejemplo utilizaremos una maquina síncrona usada como generador.

1. Se agrega los generadores dando clic sobre el símbolo y se arrastra el elemento al área de trabajo. Inmediatamente se conectan entre las barras como se observa en la figura 55.

Para desactivar la opción de generadores simplemente se presiona el botón ESC del teclado.

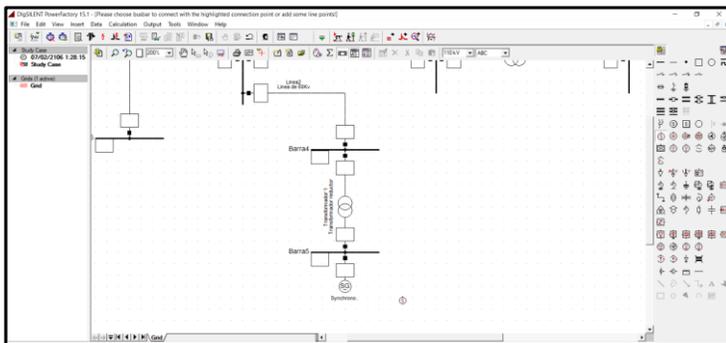


Figura 55: Adición de los generadores a la red

2. Se da doble clic en uno de los generadores mostrándonos su ventana de configuración para poder crear o modificar un modelo. Este paso es similar al explicado con las líneas de transmisión y los transformadores.

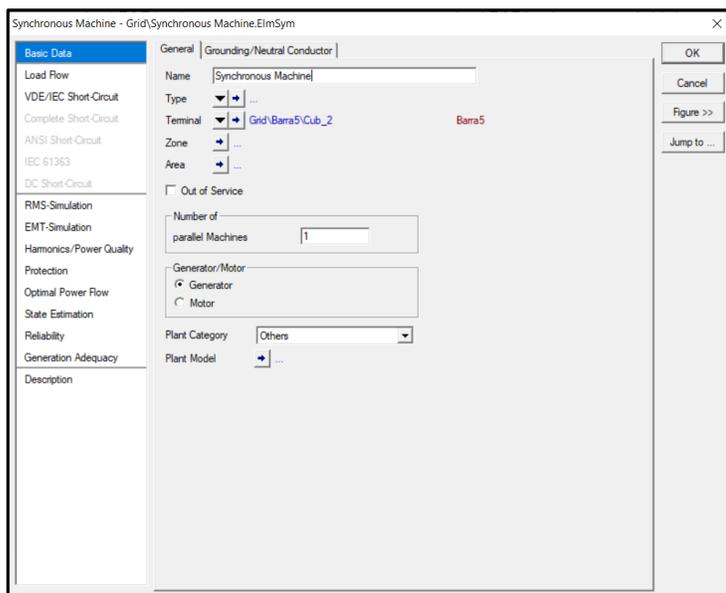


Figura 56: Ventana correspondiente a la configuración de los generadores

Como estamos creando una red desde cero no tenemos modelos de generadores por lo que procederemos a crear uno.

3. Para crear un modelo de generador nos dirigimos a Type → New Project Type como se muestra en la figura 57.

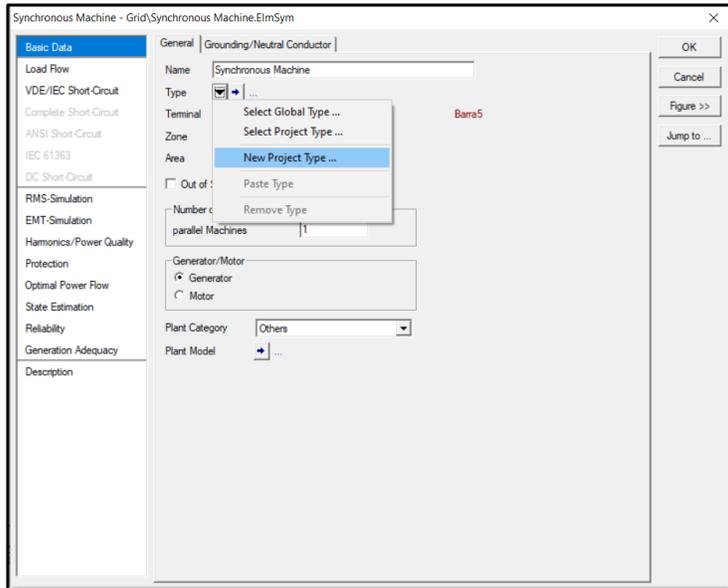


Figura 57: Creación de un modelo de generador

4. Nos aparecerá la siguiente ventana donde se encuentran dos secciones que son los datos básicos y flujo de carga de los modelos a crear para las librerías. En la sección de datos básicos “Basic Data” se coloca el nombre del modelo “Generador Principal”, el voltaje nominal “10.5 kV”, factor de potencia “0.85”, Potencia nominal aparente y el conexionado (estrella/delta).

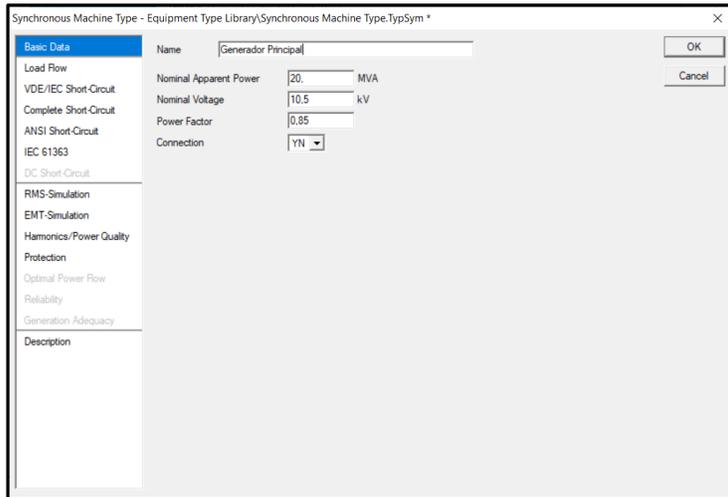


Figura 58: Configuración de parámetros básicos de un generador

En la sección de flujo de carga "Load Flow" se puede ingresar los valores de las reactancias síncronas, los límites de potencia reactiva en p.u. y las secuencias positivas y negativas de las reactancias como se observa en la figura 59. Presionamos "OK" para guardar los datos.

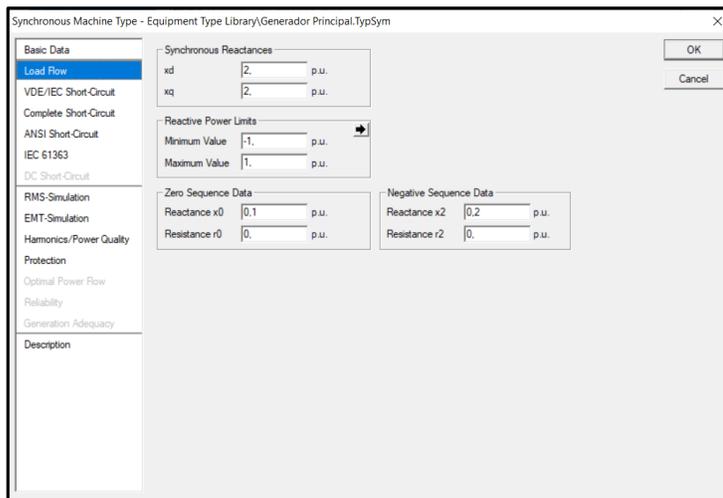


Figura 59: Configuración de parámetros de carga de un generador

5. Una vez creado el modelo, solo debemos agregarlo al proyecto tal y como lo hicimos con el transformador.
6. Finalmente, se puede observar que ya está incluido el generador en nuestra, con su nombre y el modelo o tipo asignado para este.

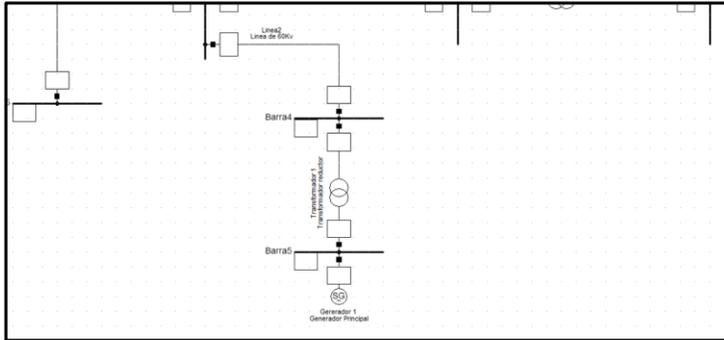


Figura 60: Adición de los generadores a la red

3.1.3.5 Creación de las cargas.

Para nuestro ejemplo utilizaremos dos cargas.

1. Se agrega una de las cargas dando clic sobre el símbolo y se lo arrastra al área de trabajo. Inmediatamente se debe conectarlas a la barra como se observa en la figura 61.

Para desactivar la opción de carga se presiona el botón ESC del teclado.

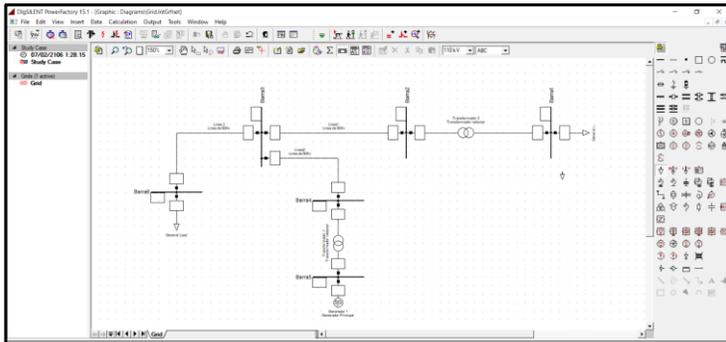


Figura 61: Adición de las cargas al área de trabajo

- Al dar doble clic sobre una de las cargas se abre la ventana de configuración para poder crear o modificar sus datos.

Aquí no es necesario crear modelos o tipos simplemente se modifican parámetros.

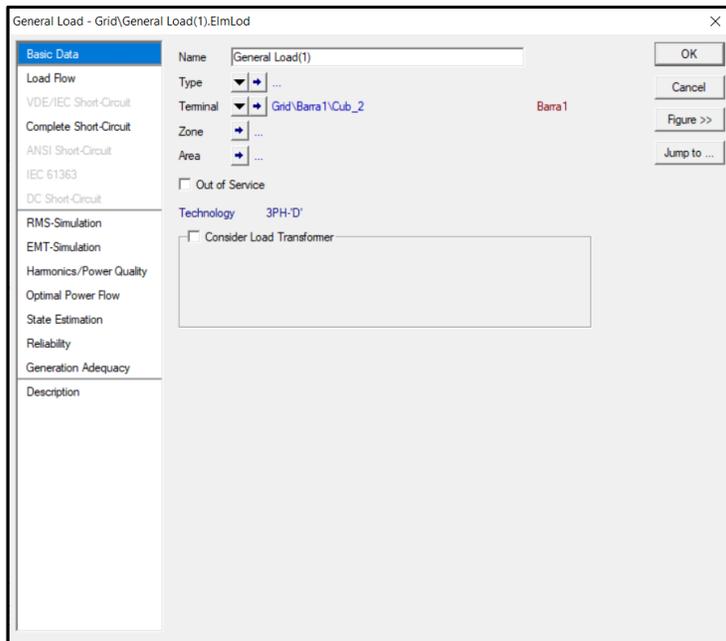


Figura 62: Ventana de configuración para las cargas

- En la sección "Basic Data" se puede nombrar la carga, en este caso "Carga 1". Las cargas, al igual que los anteriores elementos se los puede configurar para que durante el funcionamiento de la red se los considere como que estén fuera de servicio. Esto se configura realizando clic sobre el cuadro "Out of service".

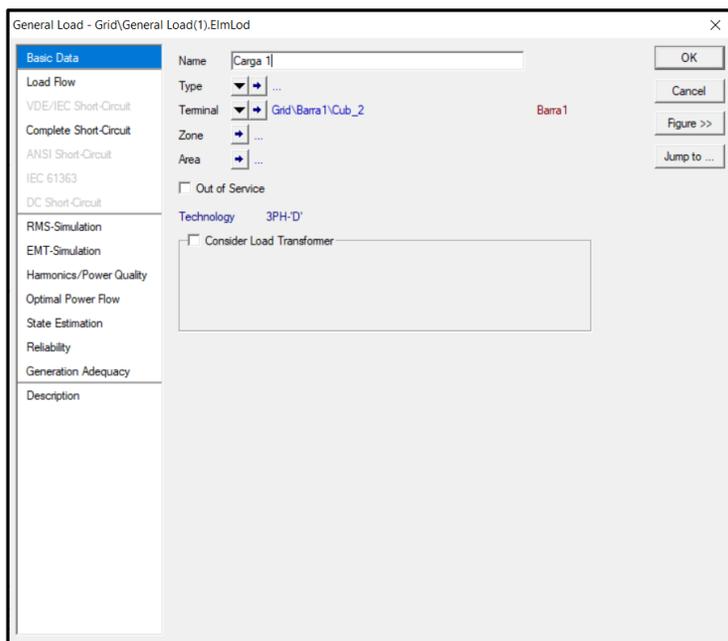


Figura 63: Ventana de configuración - Sección "Basic Data"

4. En la sección "Load Flow" ingresamos los datos generales y avanzados. Aquí se pueden modificar los siguientes parámetros:

- El modo de entrada "Input Mode" (por si no se poseen todos los valores de las cargas).
- Se ingresa si la carga es balanceada o desbalanceada.
- La potencia Activa.
- La potencia reactiva.
- El voltaje que soporta en p.u.

Para nuestro ejemplo agregaremos una carga inductiva por lo que en nuestra entrada tendremos solo potencia y el factor de potencia, como se observa en la figura 65 y damos clic en "Ok" para guardar la configuración.

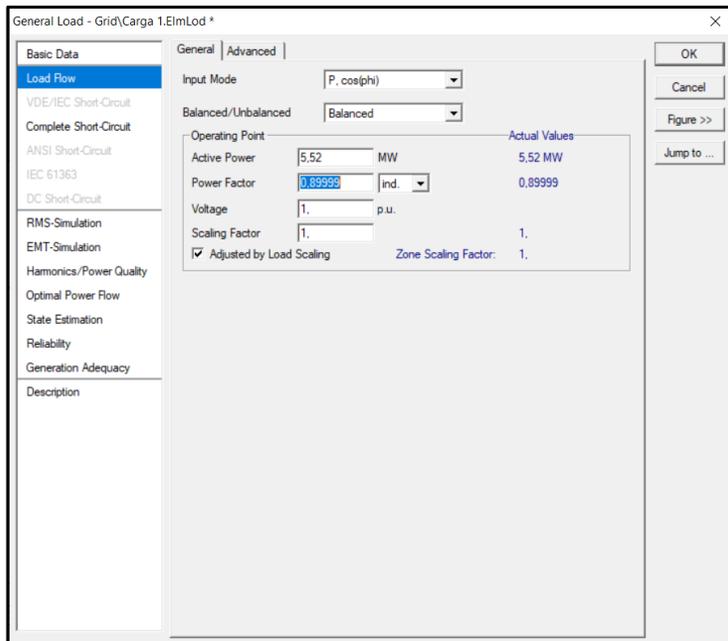


Figura 64: Ventana de configuración - Sección "Load Flow"

5. Finalmente, se realizan el paso 2, 3 y 4 de la sección de creación de las cargas para el resto de las cargas de nuestro sistema, llenando para cada caso los valores correspondientes según el tipo de carga que se desee agregar a la red como se muestra en la figura 65.

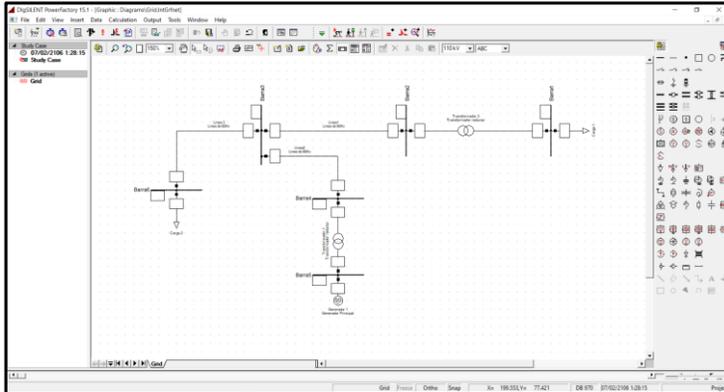


Figura 65: Red final con la adición de cargas al sistema.

3.1.4 Análisis de flujo de carga

Para el análisis de flujo de carga utilizaremos como ejemplo un sistema de 14 barras modificado proporcionado por la IEEE.

1. Procedemos a abrir el Data Manager y escogemos el proyecto al cuál vamos a realizarle el análisis de flujo de potencia. Para esto, damos clic derecho en el nombre y seleccionamos "Activate".

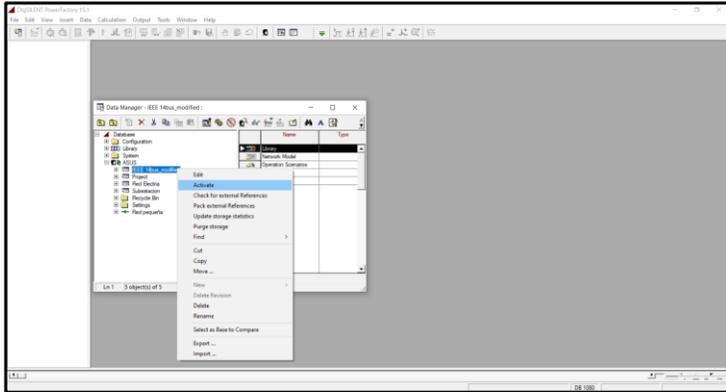


Figura 66: Selección del proyecto que se utilizará para el análisis

2. Una vez activado el proyecto, se observará el circuito en el área de trabajo (figura 67) y se podrán realizar los cálculos o análisis pertinentes en él. Se puede observar que cada uno de sus elementos poseen unos cuadros donde se mostrarán ciertos parámetros de resultados que fueron previamente seleccionados.

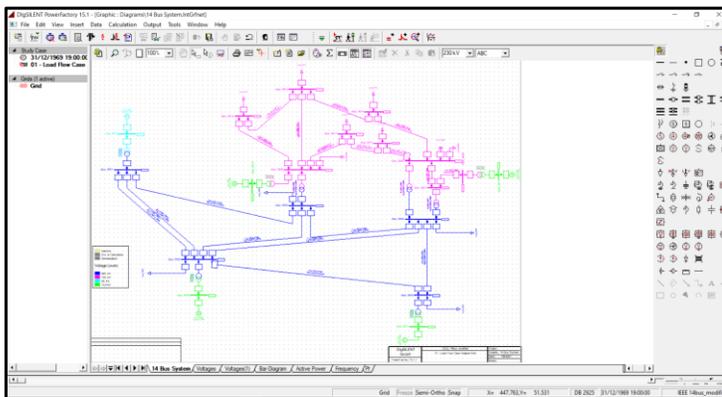


Figura 67: Sistema de 14 barras modificado proporcionado por la IEEE

3. Presionamos el icono de flujo de potencia desde la barra de herramientas y nos aparecerá la siguiente ventana con su respectivo menú.

En la sección “Basic Options” se podrá seleccionar el método de cálculo que deseemos para nuestro sistema, ya sea flujo de potencia balanceado, desbalanceado en AC y flujo de potencia en DC.

Una vez seleccionado el método de cálculo damos clic en “Execute”.

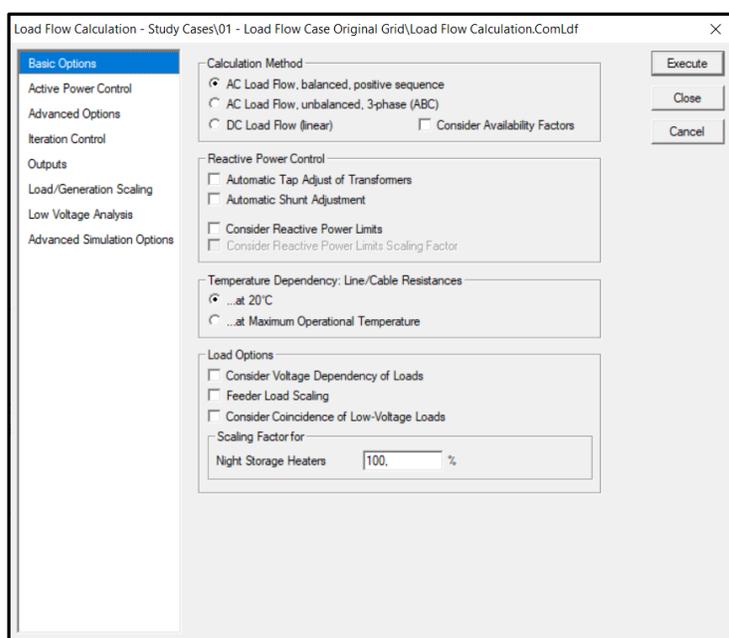


Figura 68: Ventana para el cálculo de flujo de carga

4. Luego de seleccionar el método de cálculo, la red tendrá la apariencia mostrada en la figura 69.

Se puede observar que cada elemento tiene un cuadro donde se mostrarán los parámetros por defecto. Para observar estos resultados solamente debemos poner el puntero del ratón sobre estos.

Para nuestra red se presentan los siguientes valores:

- Tensión de línea (UI)
- Tensión por unidad (u) y
- El ángulo (phiu)

También se observan los distintos colores en algunas barras.

Se debe tener en cuenta que se pueden modificar los cuadros de resultado para así poder mostrar los parámetros que se deseen.

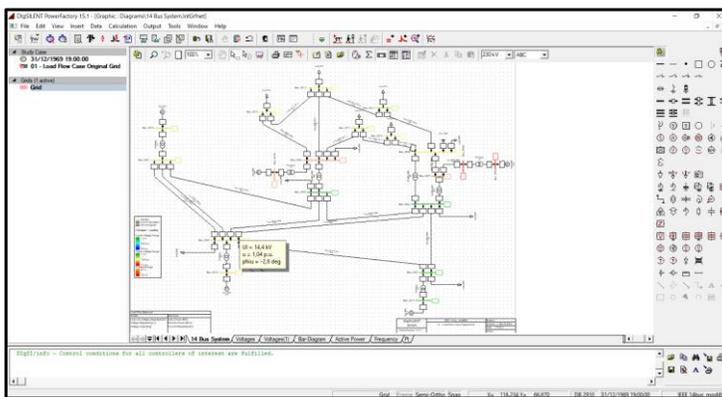


Figura 69: Cálculo de flujo de carga realizado en el sistema de 14 barras

5. Otra forma de observar los valores resultantes del flujo de potencia es realizar un acercamiento en el área de trabajo y observar el diagrama unifilar.

También se observan ciertos colores en el diagrama unifilar, estos proporcionan información sobre cada elemento de la red ya sea: Buen funcionamiento (Verde, azul, etc.) o advertencia de funcionamiento (Rojo).

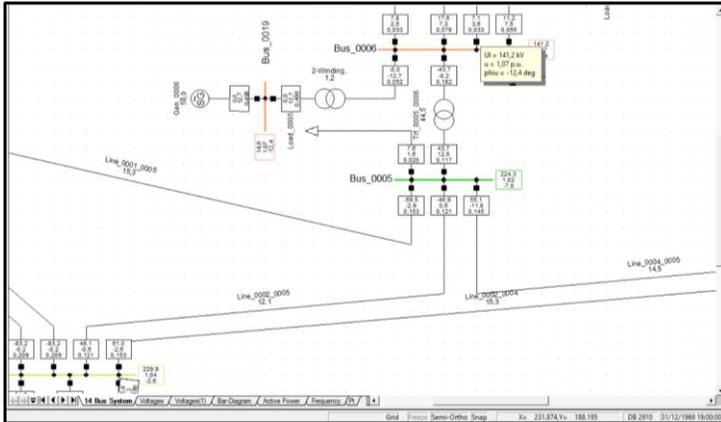


Figura 70: Acercamiento al diagrama unifilar del sistema de 14 barras luego de realizar el flujo de carga

- Para conocer el significado de los colores mencionados en el ítem anterior nos dirigimos al símbolo "Diagram Colouring", que tiene forma de una paleta de colores como se muestra en la figura 71.

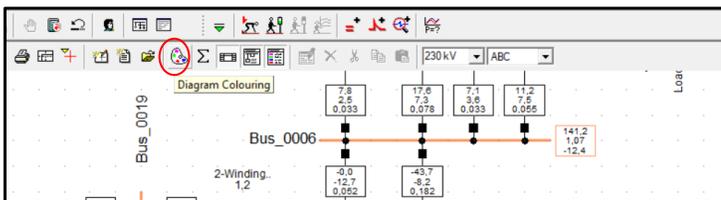


Figura 71: Símbolo "Diagram Colouring"

- Una vez que le damos clic al símbolo "Diagram Colouring" nos aparecerá una ventana compuesta de dos secciones "Basic Data" y "Load Flow".

Nos dirigimos a la sección "Load Flow" como se muestra en la figura 72 y damos clic en "Colour Settings" correspondiente a la sección 3 llamada "Other".

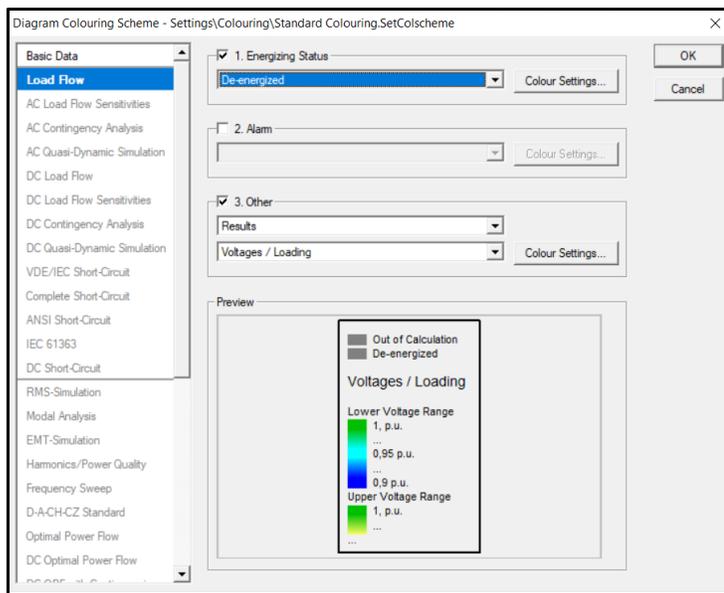


Figura 72: Ventana de configuración correspondiente al símbolo "Diagram Colouring"

8. Estando en la ventana "Project Colour Settings" (Figura 73), observamos que posee dos secciones llamadas: General y Voltages/Loading.
En la sección Voltage/ Loading se observan los valores en p.u y el color correspondiente a cada intervalo. Estos colores se ven reflejados en las barras, líneas de transmisión y los generadores, dependiendo si tienen uno o más cuadros de resultado.

Por ejemplo, los cuadros de la sección “Voltage Limits of Node Elements” solo enseñan los colores que vayan a tomar las barras y los generadores, mientras que el cuadro de la sección “Loading Limits Edge Elements” es para las líneas de transmisión y los transformadores cuando estén dentro del rango o fuera de él.

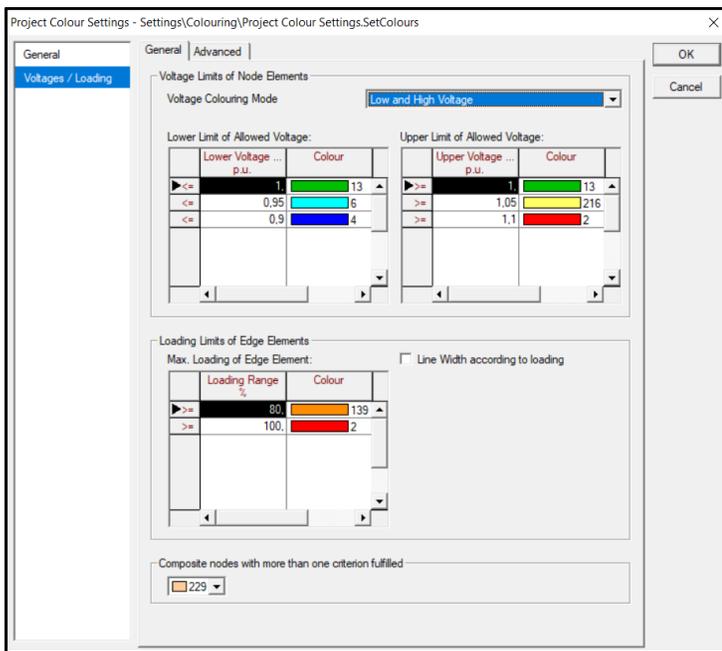


Figura 73: Ventana para la configuración de colores en el proyecto

3.1.5 Edición de los cuadros de Resultados del flujo de carga

Al momento de realizar un análisis de flujo de carga en los cuadros de resultados no siempre tenemos a simple vista la información que queremos por lo que estos cuadros se pueden modificar incluyendo/quitando un nuevo parámetro.

A continuación, se describe como realizar esta edición:

1. Seleccionamos un cuadro que queramos modificar, en este caso es el de la barra "Bus_0019".

Para agregar otro parámetro, damos clic derecho sobre el cuadro y se desplegará el siguiente menú (figura 74). Seleccionamos "Edit Format for Nodes" (esta opción es solo para barras), si fuera otro elemento seleccionamos "Edit Format for Edge Elements".

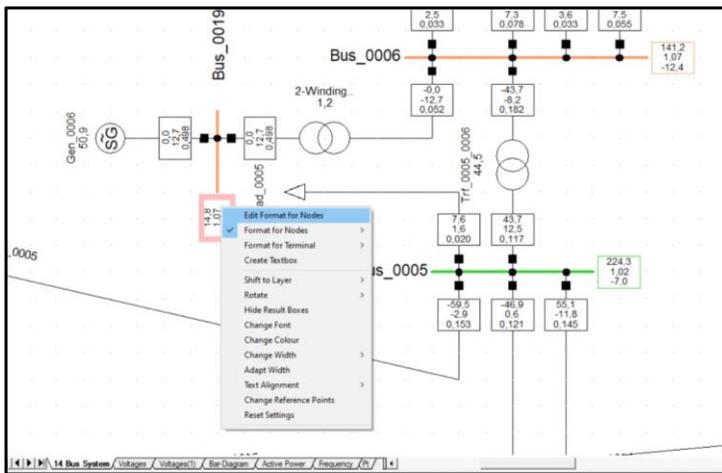


Figura 74: Modificación de parámetros en los cuadros de resultado

2. Luego aparece la siguiente ventana denominada cuadro de ajustes. Aquí se pueden eliminar parámetros seleccionándolos y presionando "Suprimir" desde nuestro teclado o agregar parámetros mediante la opción "Input Mode".

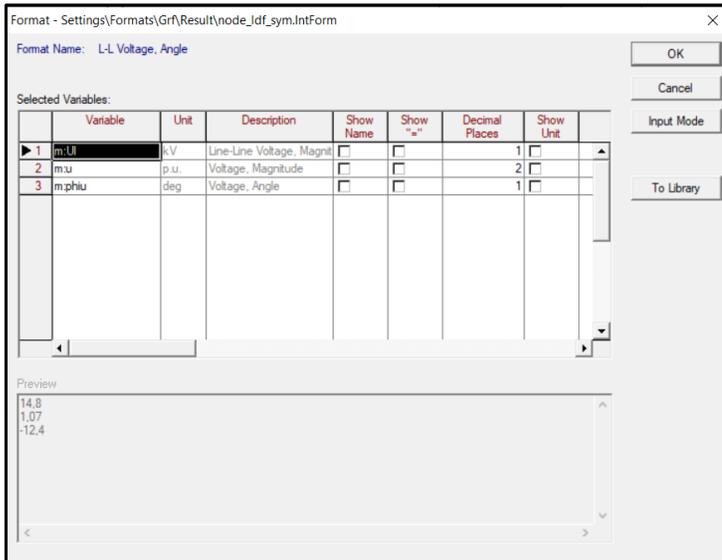


Figura 75: Cuadro de ajustes

- En caso de que se agregue un nuevo parámetro, emerge una nueva ventana (figura 76) en la cual seleccionamos la opción "Format Editor" y damos clic en "OK".

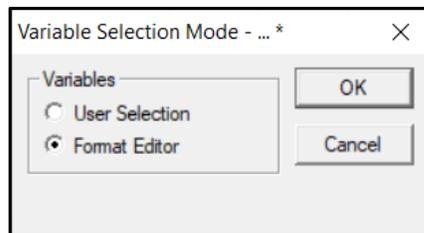


Figura 76: Ventana "Variable Selection Mode"

- Aparece otra ventana llamada "Format", en la cual se observan los parámetros ya mostrados en el cuadro de resultados de la red (UI, u y phiu). En este caso, como

se va a agregar otro parámetro nos dirigimos a la parte derecha de esta ventana y seleccionamos la opción “User defined”

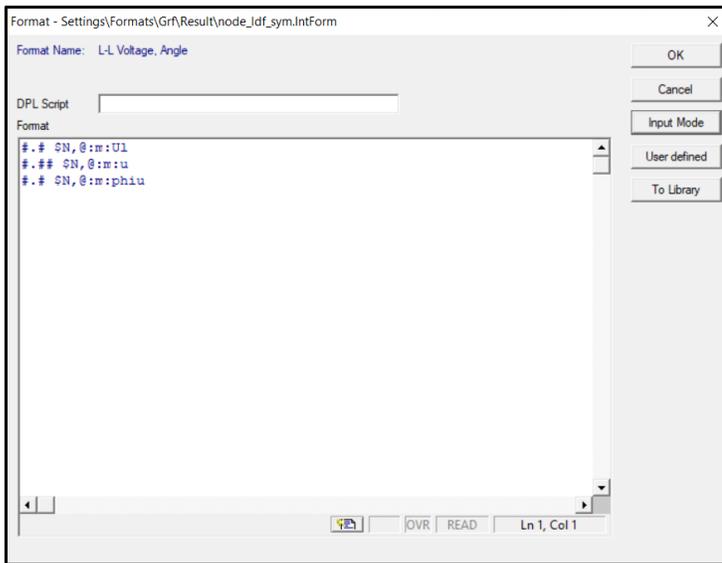


Figura 77: Ventana para agregar el nuevo parámetro a observar en los cuadros de resultados

5. Nos aparece la ventana “Variable Selection” (Figura 78) que contiene las secciones “Basic Data” y “Load Flow”.

En la sección “Load Flow” se pueden visualizar todas las variables que se pueden agregar/quitar dentro del menú “Current, Voltaje and Powers”. Para agregarlas seleccionamos en el cuadro que tienen a la izquierda cada variable por lo que aparecen en la sección “Selected Variables”. Una vez que se escogieron los parámetros a agregar damos clic en “OK”.

En este caso se agregó el flujo de potencia activa “Pflow” y reactiva “Qflow”.

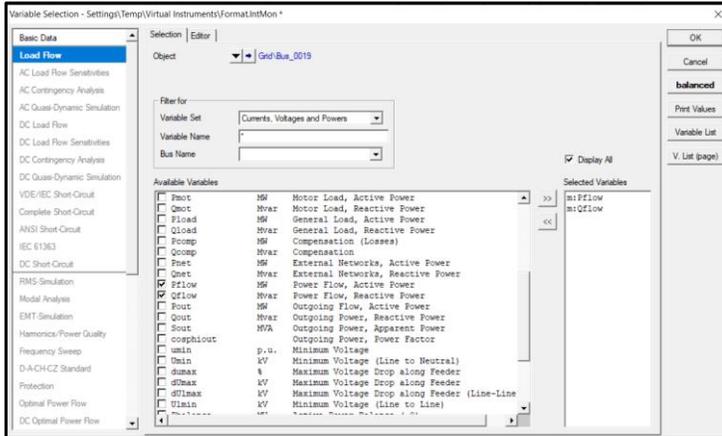


Figura 78: Ventana para agregar/quitar un parámetro en los cuadros de resultado

6. Luego regresamos a la ventana anterior "Format" donde se observan los parámetros que se agregaron en el paso anterior. Se procede a dar clic en "OK" para guardar los cambios.

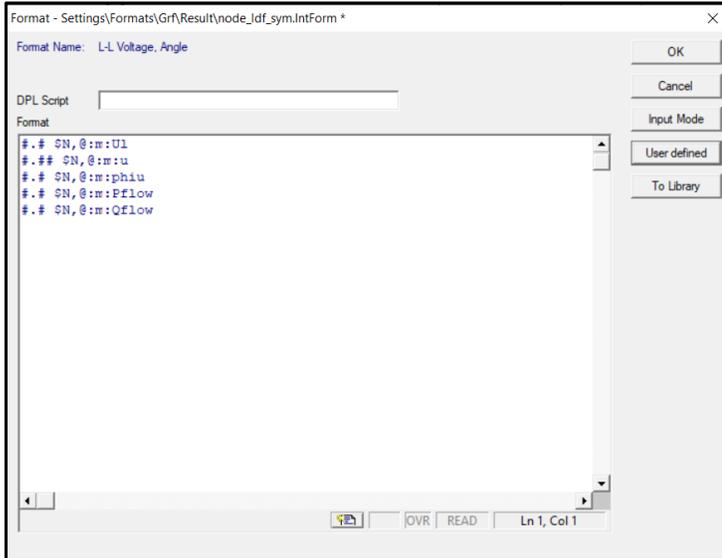


Figura 79: Visualización de los nuevos parámetros añadidos

7. Finalmente se pueden observar los parámetros “Pflow” y “Qflow” que ya se encuentran visibles en el cuadro de resultado de la barra llamada “Bus_0019” y en el resto de barras “Bus_0006” y “Bus_0005”, como se observa en la figura 81. Lo mismo se puede realizar para el resto de los elementos, si así lo desea el usuario.

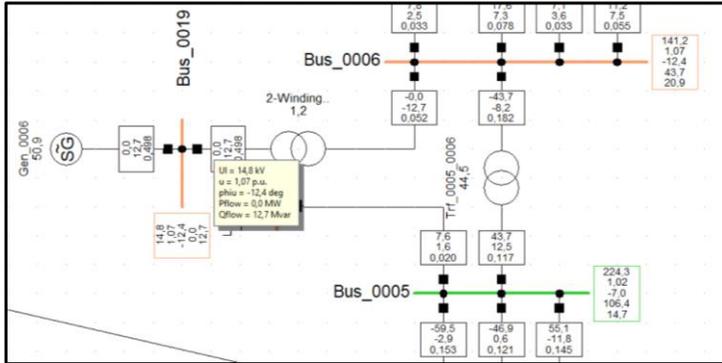


Figura 80: Cuadro de resultados modificado con los nuevos parámetros

3.1.6 Resultados de flujo de potencia en la ventana de salida

Para el análisis de flujo de carga ya mostramos los resultados de los parámetros en los cuadros mencionados anteriormente, pero hay otra forma de ver los resultados de una manera más completa y compacta y es mediante la ventana de salida.

1. Damos clic en el ícono "Output Calculation Analysis" para manejar las opciones de resultado del sistema balanceado.

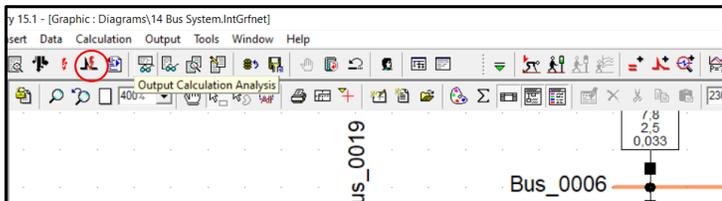


Figura 81: Icono "Output Calculation Analysis"

2. Nos aparece la siguiente ventana donde se muestran las opciones a presentar en la ventana de salida como: los terminales o barras, el sistema total, entre otros.

En este ejemplo dejaremos la selección de un reporte completo del sistema "Complete System Report" y presionamos en "Execute".

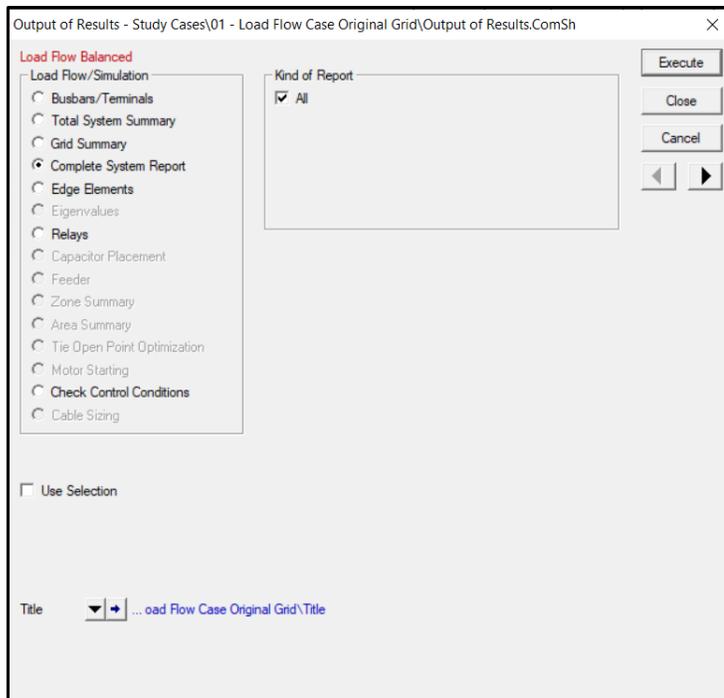


Figura 82: Ventana "Output of Results"

- Para poder visualizar mejor los resultados debemos maximizar la ventana de salida por lo que nos dirigimos al ícono “Maximize Output Window” y esperamos un momento.



Figura 83: Icono “Maximize Output Window”

- Aparecerá la siguiente ventana con todos los datos detallados del sistema como se muestra en las siguientes imágenes:

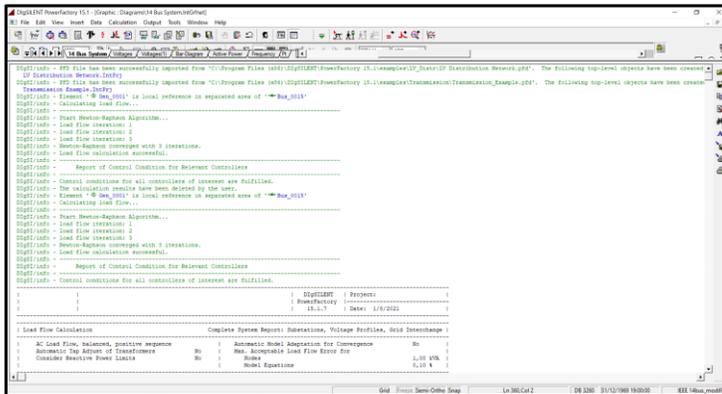


Figura 84: Ventana de salida maximizada con todos los resultados del análisis de carga

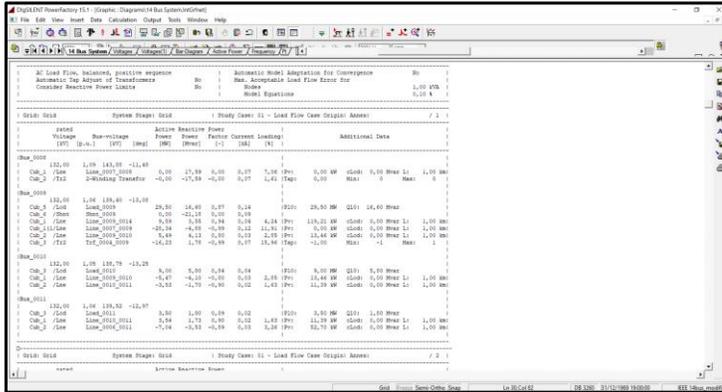


Figura 85: Resultados de los análisis separados por elementos

5. Para guardar este reporte damos clic en el icono de guardado:  .

Esta información se almacena como un archivo con extensión .out que se puede abrir con el mismo software de DigSILENT.

3.1.7 Creación y simulación de eventos Transitorios

Para la creación y simulación de eventos debemos tener en cuenta los elementos de la barra de tareas (Figura 86) y la definición de cada uno de ellos:



Figura 86: Barra de Creación y simulación de eventos.

Símbolo	Nombre	Descripción
	Edit Result Variables	Este Icono sirve para agregar los elementos y sus variables.
	Edit Simulation Event	Sirve para visualizar o guardar los eventos programados en el SEP, tales como Cortocircuitos, caídas de Línea, salida de Generadores, entre otros.
	Calculation of Initial Conditions	Con este Icono escogemos el método de simulación a calcular, ya sea valores RMS y valores instantáneos.
	Run Simulation	Este icono nos sirve para dar tiempo de simulación e iniciar la simulación.

Tabla 3: Descripción de los íconos para la creación de eventos

Para la creación de eventos transitorios se procedió a simular un cortocircuito en una línea del sistema de 14 barras modificado de la IEEE. La línea en la cual se realizó el cortocircuito es Line_0001_0002/1.

Sin embargo, nuestro objetivo fue observar el comportamiento del generador Gen_0001 de 448 MVA del circuito frente a este evento.

Para que este análisis fuese posible se debió ejecutar primero el flujo de potencia en el circuito.

3.1.7.1 Agregar variables de los elementos para realizar las gráficas:

1. Damos clic derecho en el generador “Gen_0001” porque este fue el elemento que se analizó. Para acceder a sus variables de estudio se accede a su ruta mediante la secuencia “Define → Results for RMS/EMT Simulation” como se muestra en la Figura 87.

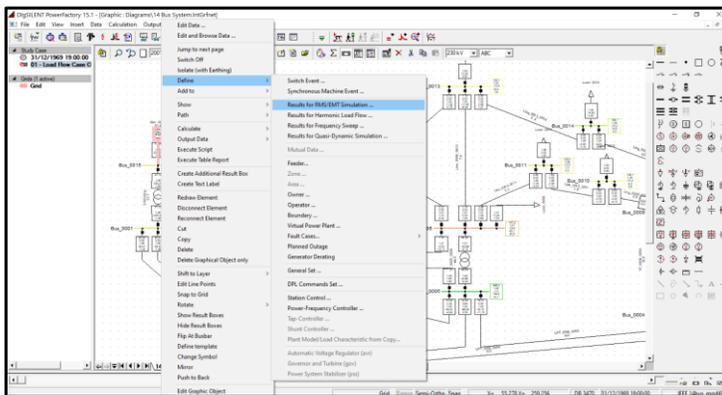


Figura 87. Ruta para seguir con la simulación

2. La ventana que se muestra a continuación es donde se guardan todas las simulaciones que se vayan a realizar y que, a su vez se encuentran por defecto en la carpeta “All calculation”. En la figura 89 se puede observar al generador que fue escogido en el paso anterior. Se procede a dar doble clic en él para acceder al siguiente menú.

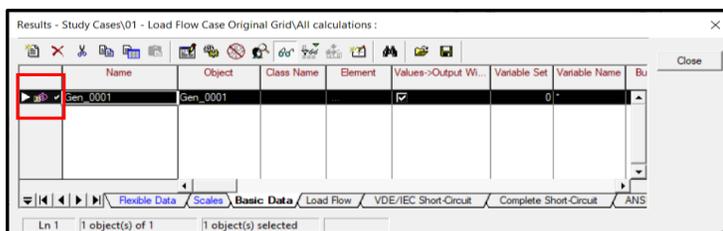


Figura 88: Ventana que muestra los casos de estudio existentes en el proyecto

3. Nos aparecerá la ventana de selección de variables donde se muestra un menú con varias opciones y el tipo de simulación que se va a requerir.

En este caso será una simulación de estabilidad transitoria por lo que seleccionamos “RMS-Simulation”, lo cual nos llevara a otra parte del menú en la que se encuentran todas las variables que se pueden analizar del generador aplicado.

En la sección “Filter for” aparece un menú desplegable, en el cual podemos seleccionar el tipo de variable que deseamos observar.

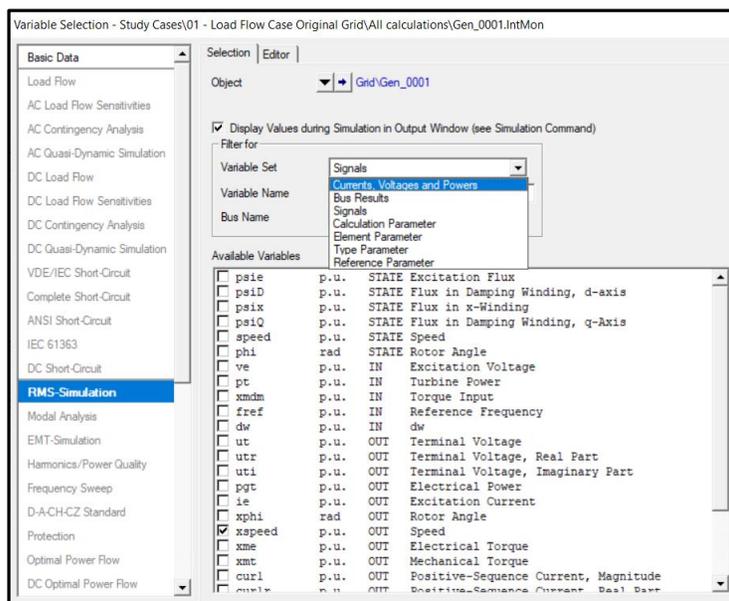


Figura 89: Ventana “Variable Selection”

4. Para seleccionar la variable que requiramos para el análisis, se da doble clic sobre la variable y se la verá en la sección de “Selected Variables”.

Si se desea eliminar alguna variable de esta sección, se da doble clic sobre la misma y se eliminará de esa sección.

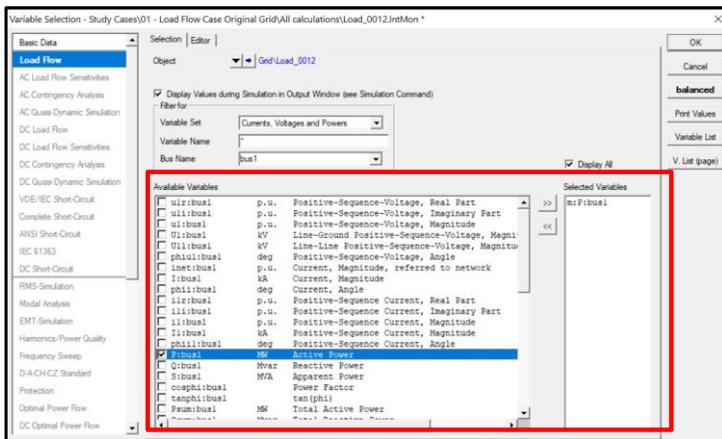


Figura 90: Selección de variables en general

- Para el ejemplo vamos a seleccionar las variables de potencia Activa y reactiva del generador. Estas se encuentran en la opción "Currents, Voltages and Powers" de la sección "Variable Set".

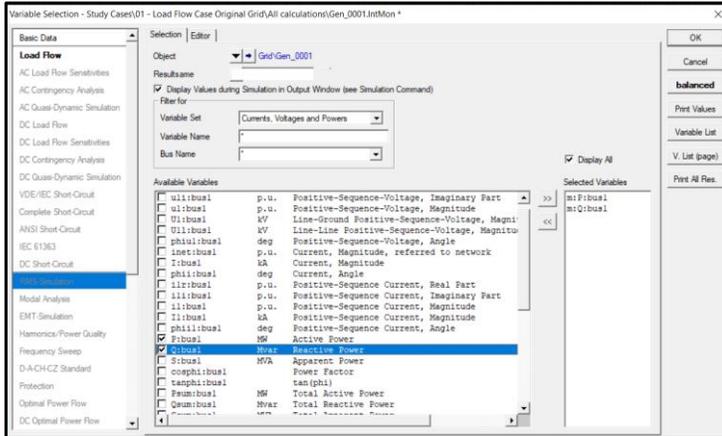


Figura 91: Selección de las variables de potencia activa y reactiva del generador

6. La frecuencia y la velocidad se encuentran en la opción “Signals” de la sección “Variable Set” como se muestra en la imagen 93. También se las agregó. Finalmente damos clic en “OK” para que se guarden los datos.

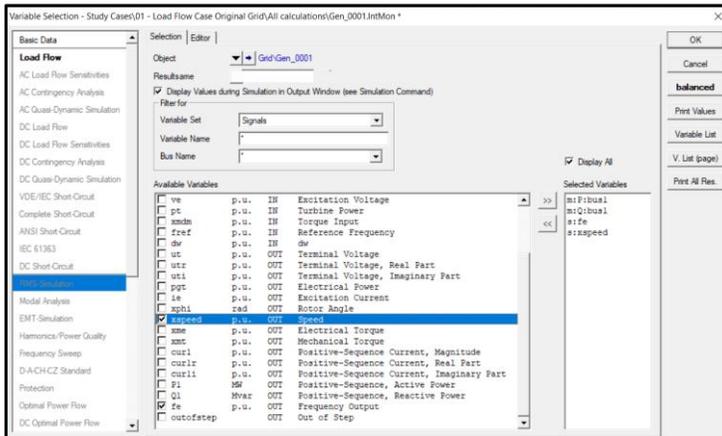


Figura 92: Selección de las variables frecuencia y velocidad del generador

3.1.7.2 Creación de eventos:

Para tener claro, como definir el tiempo de cortocircuito y cuanto este durará nos guiaremos por la figura 93.

Se puede observar la línea de tiempo en donde se va a transcurrir la simulación, en este caso será de 10 segundos y dentro de ella los eventos de cortocircuito (inicio de falla) al segundo 1 de la simulación y el aclaramiento (fin de falla) al 1.1 segundo de la simulación.

Esta falla se la realizó en una de las líneas del SEP, en este caso Line_0001_0002/1.

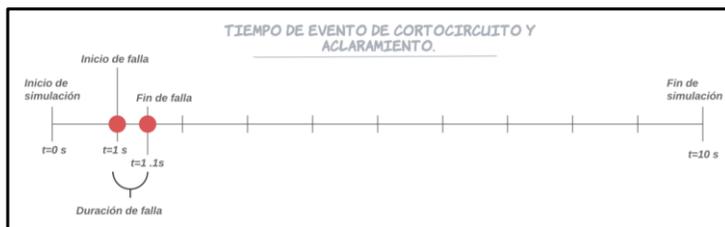


Figura 93: Explicación del tiempo de cortocircuito y de aclaramiento

Una vez que se tiene claro ese concepto, procedemos a explicar cómo se realizó el evento:

1. Damos doble clic a la línea en la cual se va a realizar la falla. Aparecerá la siguiente ventana compuesta por un menú que tiene las secciones: datos básicos, flujo de carga y las simulaciones que se le puede realizar a la línea.

Nos dirigimos a la sección de "RMS-Simulation" y activamos la casilla de "Available" para habilitar el fallo e indicamos que se realizará en el centro de la línea al colocar 50% en la casilla.

Finalmente damos clic en "OK" para guardar esta configuración.

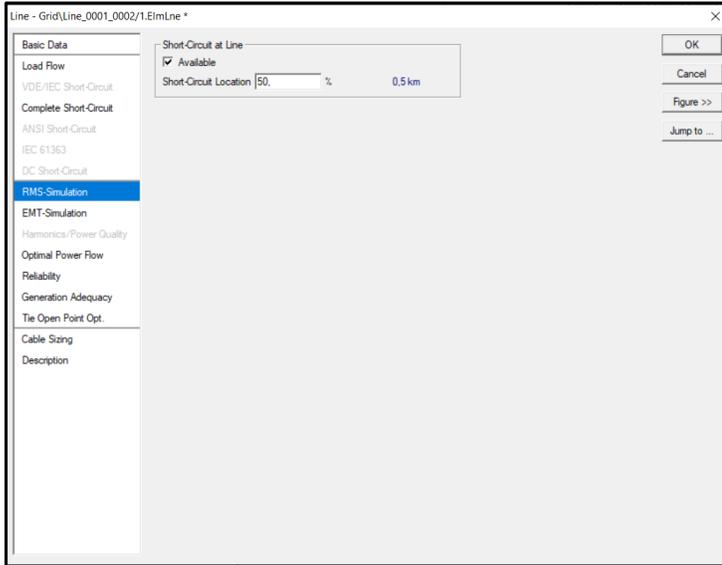


Figura 94: Configuración de la ubicación de la falla

2. Luego damos clic derecho sobre la línea a la que se le va a realizar la falla y seguimos la ruta “Define→Short-Circuit Event” cómo se observa en la Figura 95.

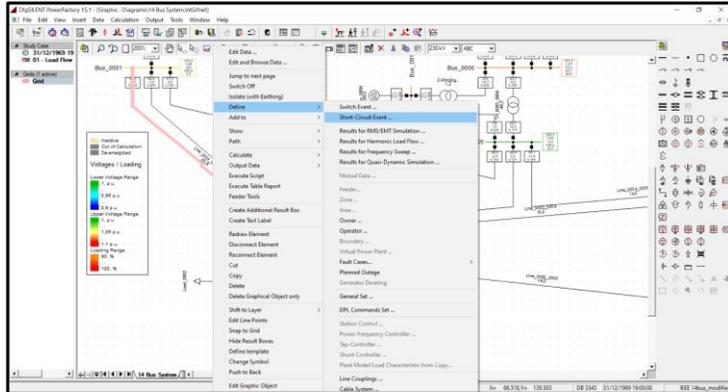


Figura 95: Línea en la cual se realizó la falla

3. A continuación, nos aparece la siguiente ventana, en esta sección se va a introducir el tiempo que va a durar la falla. El primer tramo duró “1 segundo” y el tipo de falla será un “cortocircuito Trifásico”, con impedancia cero y damos clic en “Ok” para guardar los cambios y cerrar ventana.

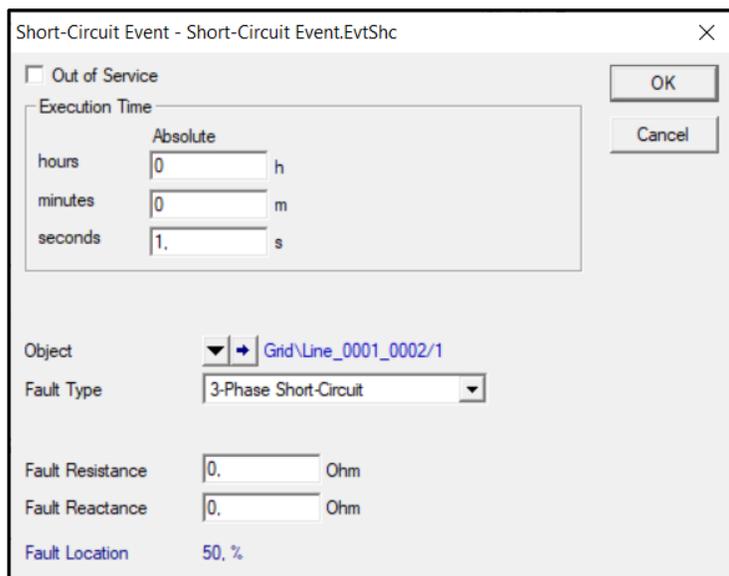


Figura 96: Configuración del evento de cortocircuito

4. Se procedió a definir el siguiente evento que fue un aclaramiento, por lo que se siguió la misma secuencia descrita en el paso 2 sobre la misma línea "Line_0001_0002/1" y se sigue la ruta "Define/Short-Circuit Event" por lo que saldrá la siguiente ventana (Figura 97) y se selecciona la opción de "Clear Short Circuit" al tiempo de 1.1 segundos y se presiona "OK" para dirigirnos a la siguiente ventana.

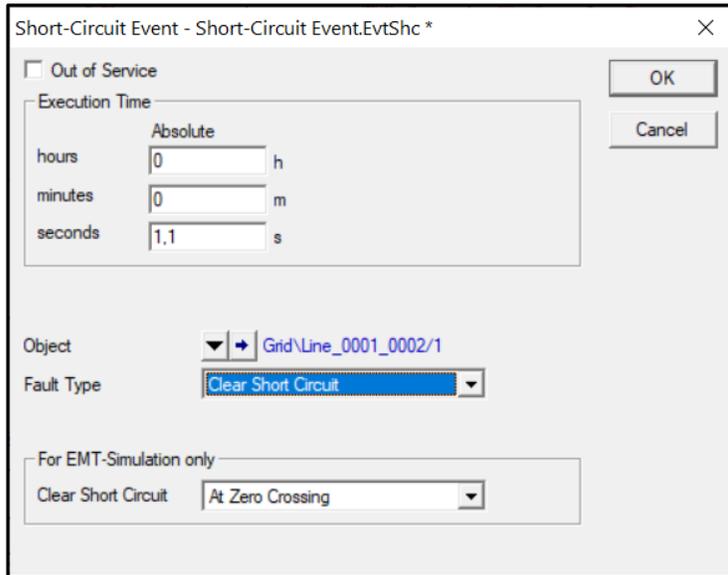


Figura 97: Configuración del aclaramiento

5. Damos clic en el ícono “Edit Simulation” de la tabla 3 para observar todos los eventos creados con sus respectivos nombres y los tiempos definidos sobre la línea “Line_0001_0002/1” cómo se observa en la figura 98 y se da clic en “Close” para guardar cambios.

Name	Time	Object StaBar, Eln Term, ...	Out of Service	Object modified	Object modified by
Short-Circuit Event	1.1	Line_0001_0002/1	<input type="checkbox"/>	09/01/2021 3:58:31	ASUS
Aclaramiento	1.1	Line_0001_0002/1	<input type="checkbox"/>	09/01/2021 14:53:00	ASUS

Figura 98: Tiempos de cortocircuito y aclaramiento ya definidos en la línea

3.1.7.3 Graficación de Eventos

En esta sección se va a explicar cómo graficar los eventos creados anteriormente. Por lo que primero, se va a explicar los íconos que utilizaremos y su significado como se muestra en la tabla 4.

Símbolo	Nombre	Descripción
	Append VIs	Este símbolo sirvió para seleccionar el tipo de gráficos se desea ver y el número de plantillas a elaborar.
	Edit Plots on Page	Edita las características de cada recuadro para graficar.
	Title Block On/Off	Este símbolo sirvió para activar o desactivar el título del análisis.
	Arrange Subplots on Top of Each Others	Este símbolo sirvió para que los plots se observen de manera horizontal.
	Arrange Subplots Automatically	Este símbolo sirvió para que los plots se observen de manera vertical.
	Zoom x-Axis	Este símbolo sirvió para realizar Zoom en el eje de las X.
	Zoom y-Axis	Este símbolo sirvió para realizar Zoom en el eje de las Y.
	Scale x-Axes automatically	Este símbolo sirvió para realizar el auto zoom de toda la función en el eje X.
	Scale y-Axes automatically	Este símbolo sirvió para realizar el auto zoom de toda la función en el eje Y.

Tabla 4: Iconos de Graficación

1. Damos clic derecho sobre la pestaña y seguimos la ruta “Insert Page→Create New Page” como se observa en la Figura 99.

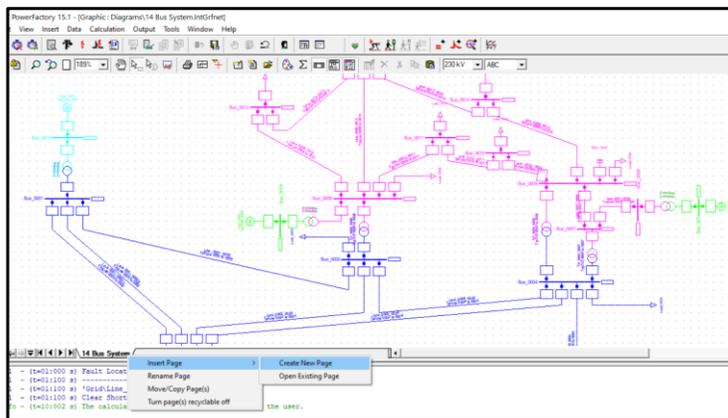


Figura 99: Creación de una nueva página para los gráficos

2. En la siguiente ventana se selecciona el tipo de página que se va a crear, en este caso se selecciona la opción de “Virtual Instrument Panel”, se le asigna el nombre de “Análisis del Generador 001” y se da clic en “Execute” para guardar y ejecutar los cambios.

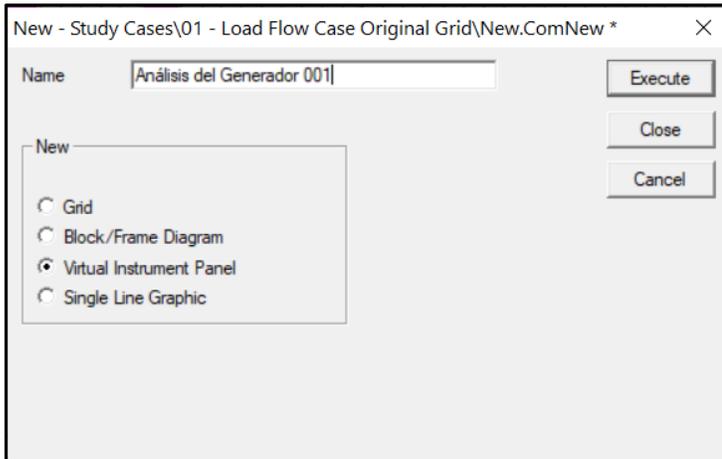


Figura 100: Creación de una nueva ventana de trabajo

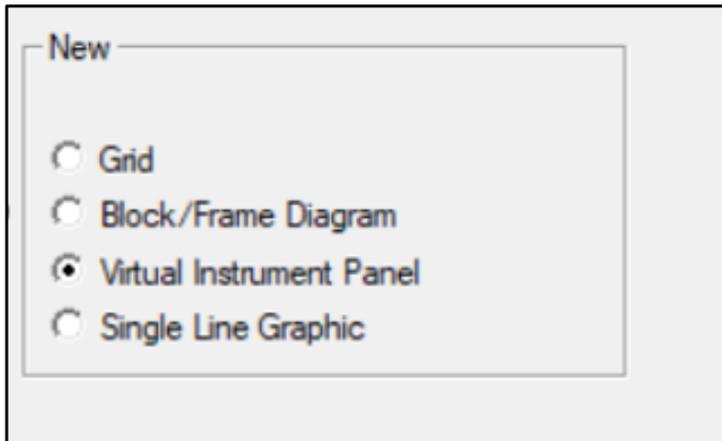


Figura 101: Selección del tipo de página a crear

3. Luego nos aparecerá la siguiente ventana donde debemos incluir los parámetros observables ya previamente configurados (Potencia Activa (Mw), Reactiva (Mvar), la velocidad del rotor y la frecuencia) para así poder visualizar los eventos en los tiempos establecidos.

Para realizar esta acción se da clic sobre el icono del recuadro rojo que parece velocímetro llamado "Append new VI(s)".

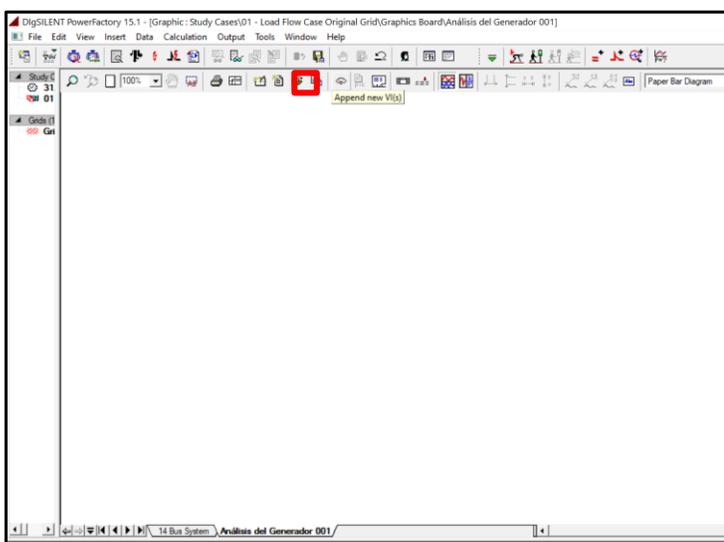


Figura 1: Icono para realizar las gráficas en la página creada previamente

4. Aparece la siguiente ventana donde nos encontramos con las diferentes opciones de gráficos que se desea representar y la cantidad de los cuadros a graficar también llamados "VI(s)". Pero en este caso deseamos ver la evolución de los parámetros con respecto al tiempo por los que seleccionamos "Subplot (VisPlot)" y el número "4" se debe a que ese es el número las variables que se seleccionaron antes. Finalmente damos clic en "OK"

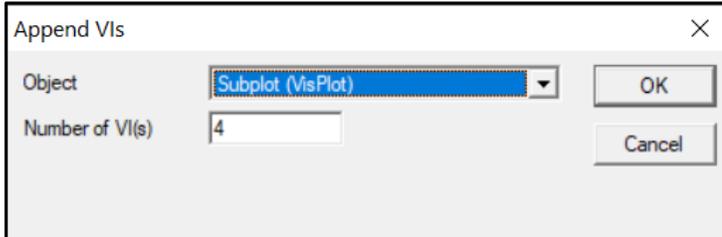


Figura 2: Opciones de graficación

5. Luego en esta ventana se muestran cuatro plantillas para graficar las variables. Automáticamente nos aparecerán para observarlas de forma vertical, pero si queremos cambiar su orientación se da clic en el icono  y la ventana quedará como se observará en la figura 105.

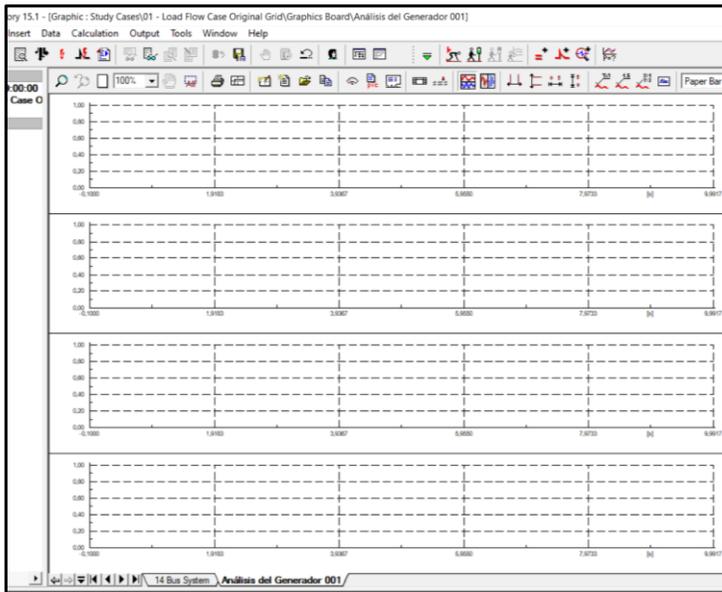


Figura 3: Primera disposición de gráficas tipo fila

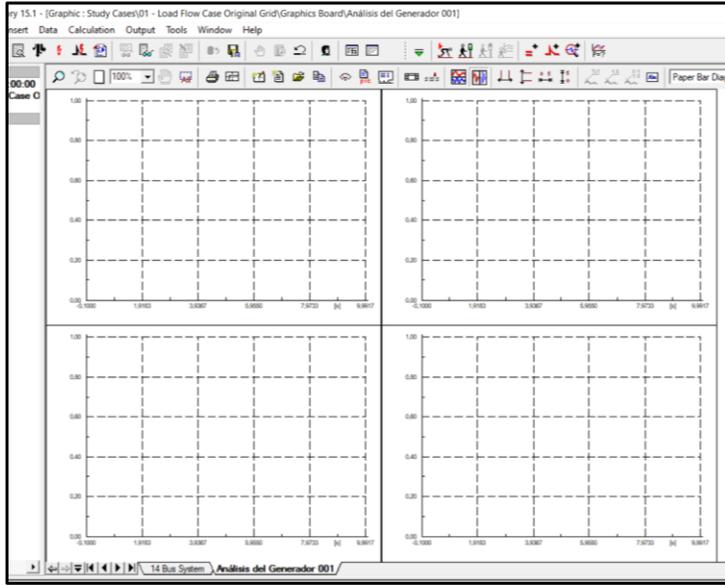


Figura 4: Segunda disposición de gráficas

6. Una vez seleccionada la orientación de los gráficos se da doble clic sobre cualquier recuadro y se llena la siguiente ventana (Figura 106). En esta sección se ingresan parámetros como el color, la variable, los límites del gráfico, entre otras características de cada una de las cuatro variables seleccionadas anteriormente.

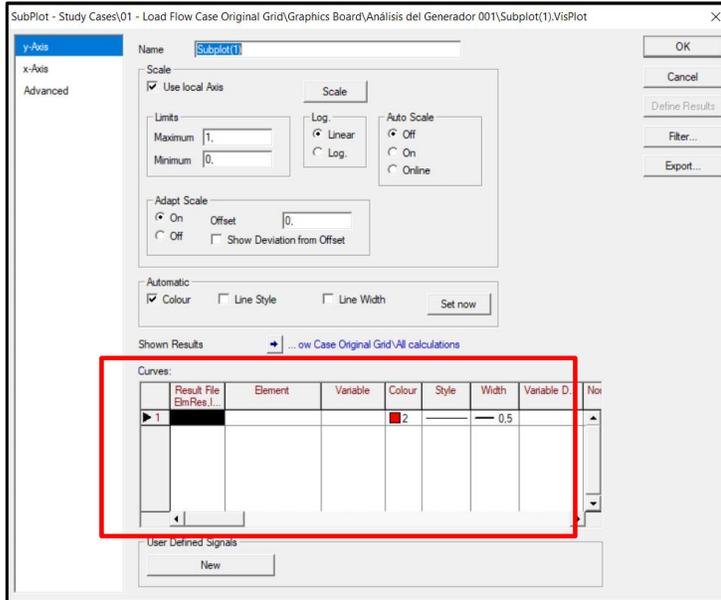


Figura 5: Configuración de los paneles de gráficos

7. En la sección “Result File ElmRes, IntComtrade” de la figura 106 se da doble clic y se selecciona “All calculations” como lo indica la figura 107 ya que ahí se guardan todos los cálculos realizados en el programa, en este caso los eventos creados anteriormente. Finalmente se da clic en “OK” y se guardan los cambios.

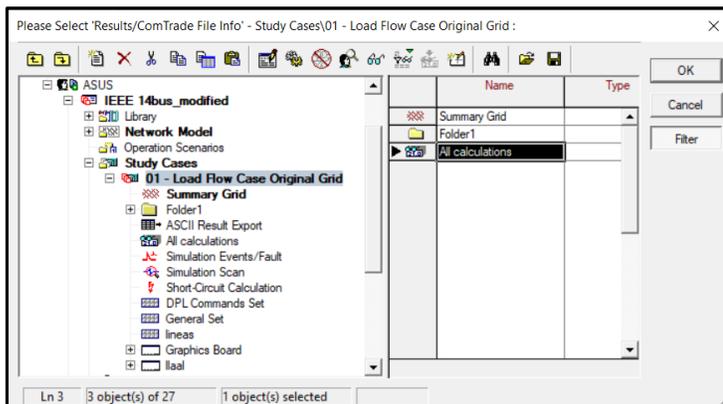


Figura 6: Ingreso a la sección "All calculation"

- Nos dirigimos a la sección "Element" de la figura 106 donde damos doble clic y nos aparecerá la siguiente ventana donde seleccionamos el elemento a analizar, en este caso Gen_0001 y damos clic en "OK".

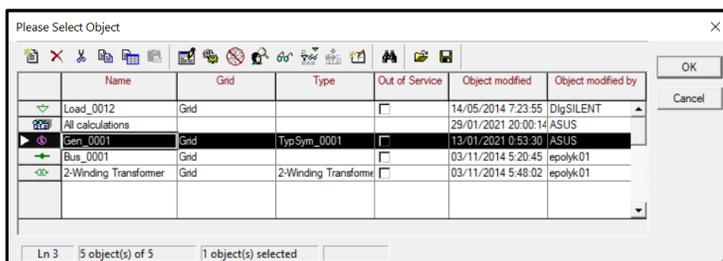


Figura 7: Se selecciona el elemento para el cual se realizarán las gráficas

- Una vez elegido el elemento a observar, seleccionamos la variable que se observará en el primer gráfico como se observa en la figura 109. En este caso la Potencia activa en MW (m:P:bus1) y seleccionamos "OK" para guardar los cambios.

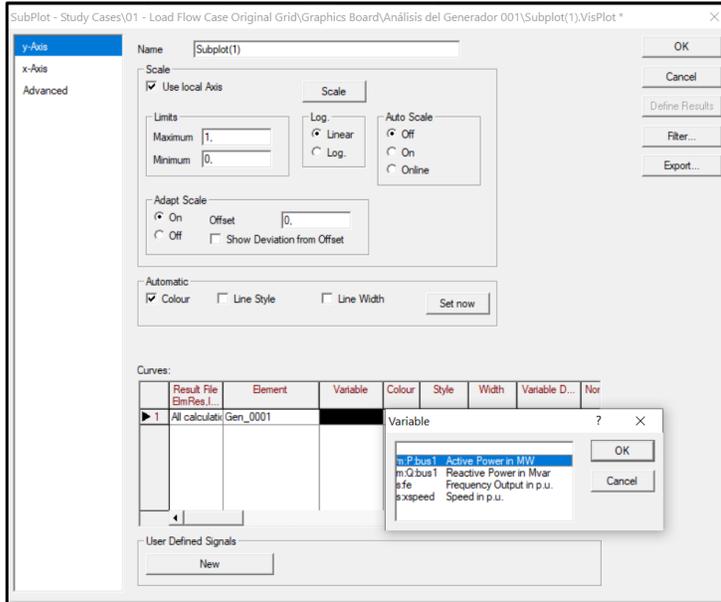


Figura 8: Selección de la variable a graficar en el primer recuadro

10. Después se elige el color, estilo y el grosor de línea a graficar como se explicó en el paso 6. Este mismo procedimiento se lo realiza para las demás variables.

11. Una vez realizada la configuración de las gráficas se presionó el botón  para seleccionar el método de simulación y se presenta la siguiente ventana donde encontramos los dos métodos:

- RMS Values (Electromechanical transients): para presentar los valores medios de la ejecución.
- Instantaneous Values (Electromagnetic Transients): para presentar la ejecución en manera de ondas.

Seleccionamos el método RMS y sistema balanceado. Damos clic en “Execute” para ejecutar y guardar cambios.

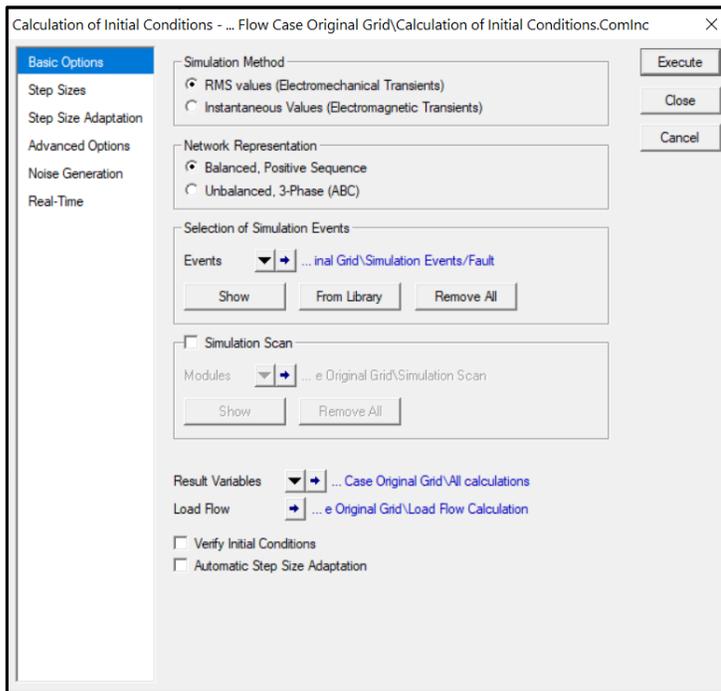


Figura 9: Selección del método de cálculo

12. Ingresamos el tiempo de simulación, en este caso los 10 segundos y ejecutamos dando clic "Execute"

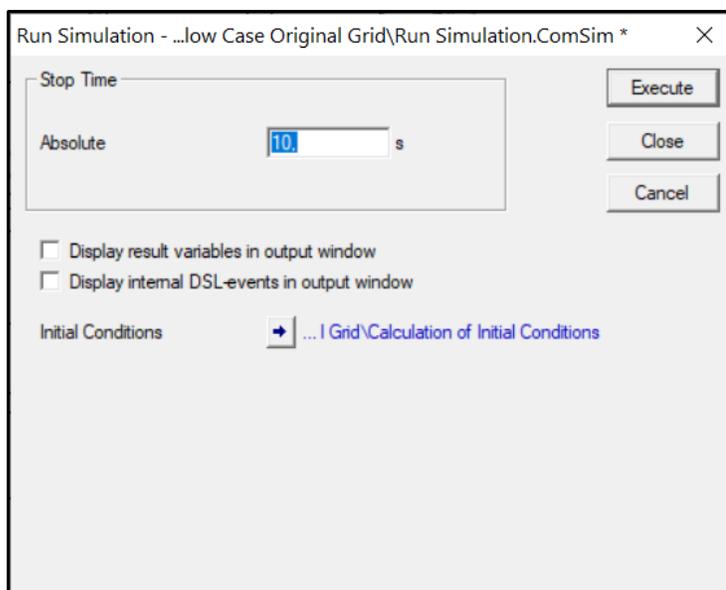


Figura 10: Ingreso del tiempo de simulación

13. Finalmente se pueden observar las gráficas como se muestra en la figura 112. Si la gráfica no se observa con claridad se va a la sección de menú y se presiona  o  para auto escalar las gráficas según las preferencias del usuario.

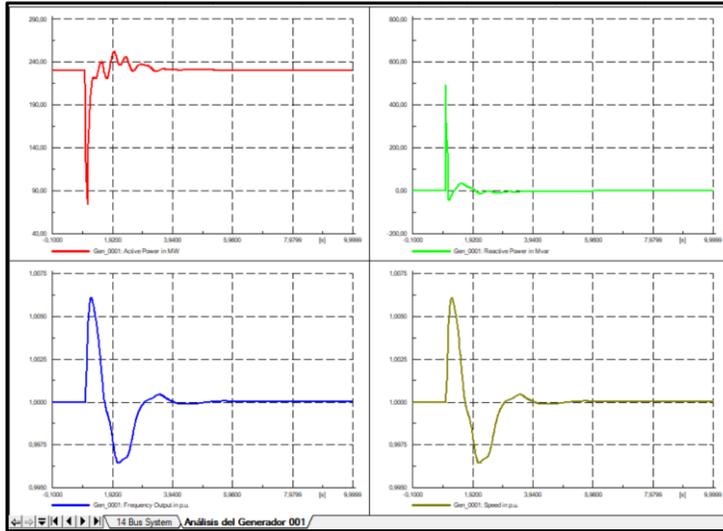


Figura 11: Gráficas del comportamiento del generador luego del evento de cortocircuito

3.2 Manejo del software DigSILENT Power Factory mediante programación DPL

3.2.1 Creación de un archivo DPL

1. Nos dirigimos a la barra de herramientas y damos click en el ícono  (Open Data Manager), el cuál abrirá la ventana de administración de proyectos mostrada a continuación:

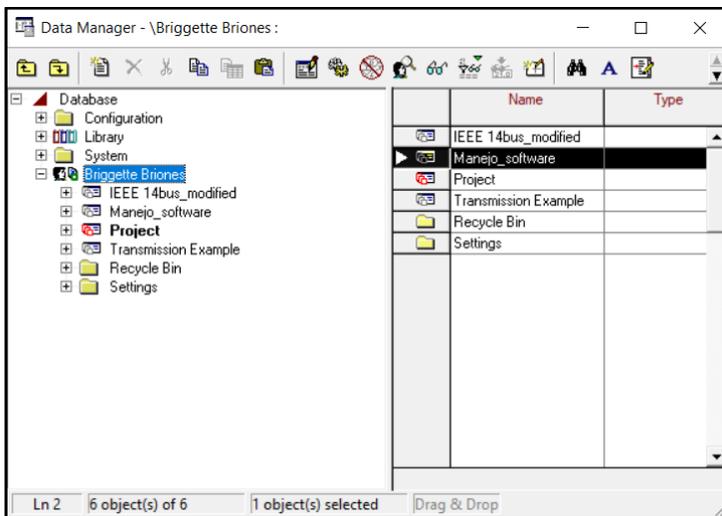


Figura 12: Ventana "Data Manager"

2. Desplegamos el menú correspondiente al proyecto en el cual vamos a trabajar y damos clic en la pestaña "Scripts".

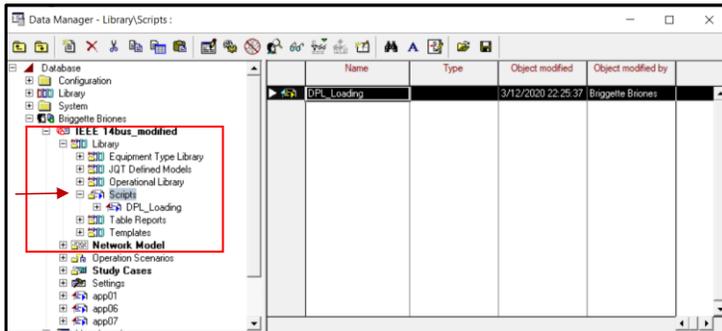


Figura 13: Selección del área para crear un script

3. Del lado derecho de la figura 114, podemos observar la ventana de información donde se observan los scripts que posee el proyecto. Damos clic derecho en cualquier parte en blanco y seleccionamos New → Others.

Nos aparecerá el siguiente recuadro y seleccionamos OK.

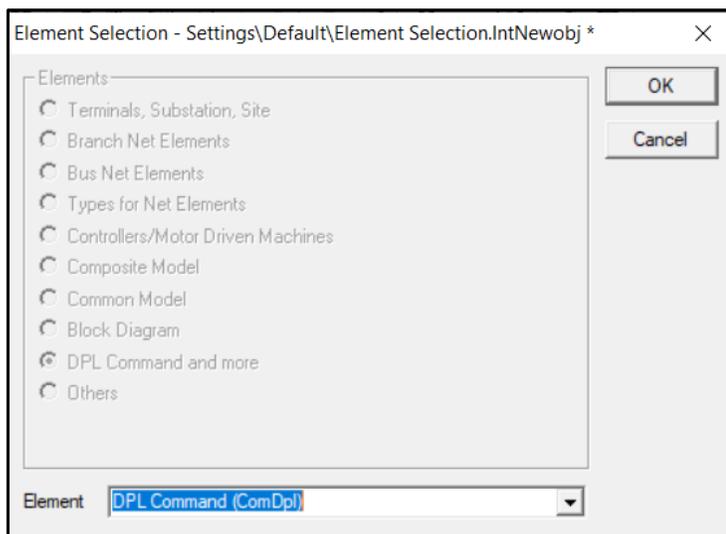


Figura 14: Creación de un script DPL

4. Finalmente, nos aparecerá el siguiente cuadro donde podremos darle nombre al script.

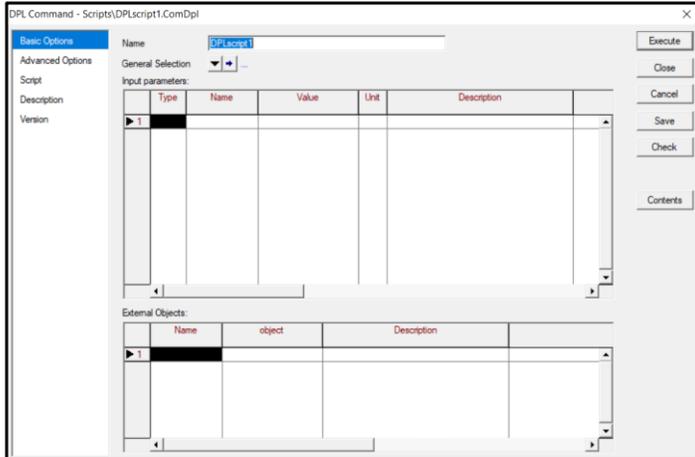


Figura 15: Ventana de configuración del script

3.2.2 Creación de filtros y como introducirlos en un archivo DPL

Una vez que hemos creado el script, podemos hacer varios análisis como flujo de cargas, cortocircuitos, etc.

Para esto, requerimos información de los elementos que se encuentran dispuestos en el área de trabajo. Esta información se la puede obtener de forma directa mediante programación. Sin embargo, el utilizar filtros nos permite tener un orden de los elementos u objetos que disponemos y realizar un script de forma más ordenada.

Este paso es opcional, depende de los gustos del programador.

1. A partir de la ventana mostrada en la figura 117 nos dirigimos al botón "Contents", donde nos aparecerá la siguiente ventana:

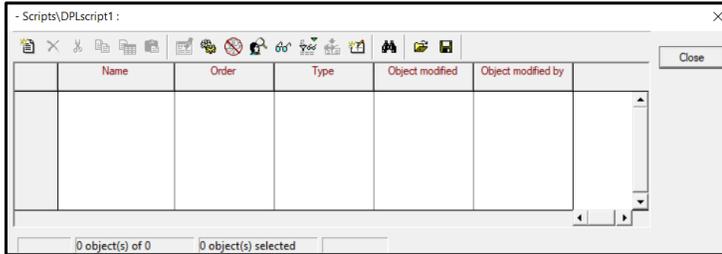


Figura 16: Ventana donde se observa el contenido de elementos u objetos del script

2. En la sección en blanco, damos clic derecho y seleccionamos New → Others, con lo cual se abrirá el siguiente cuadro:

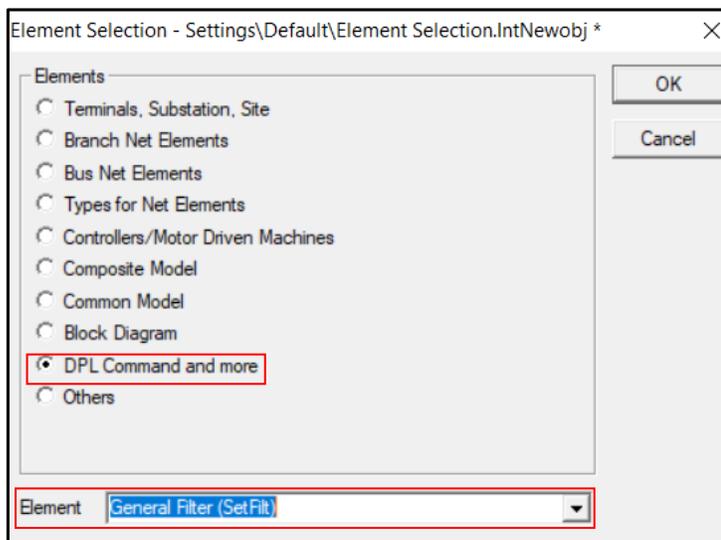


Figura 17: Selección del tipo de acción a realizar

Escogemos *General Filter (SetFilt)* para realizar un filtrado general y seleccionamos OK en la ventana.

3. En el siguiente cuadro de dialogo, le asignamos un nombre al filtro y en la sección "*Object Filter*" indicaremos el tipo de objeto que queremos filtrar. Pueden ser las líneas de trabajo, elementos como transformadores, maquinas síncronas, etc. En este ejemplo, haremos el filtrado de las líneas de trabajo del sistema de 14 barras modificado de la IEEE.

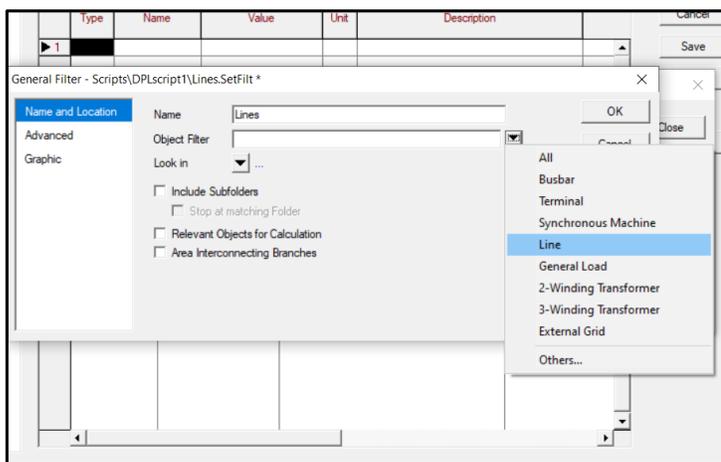


Figura 18: Selección del elemento a filtrar en la red

4. Una vez seleccionado el tipo de objeto a filtrar, nos dirigimos a la opción "Look in" y ponemos "Select"

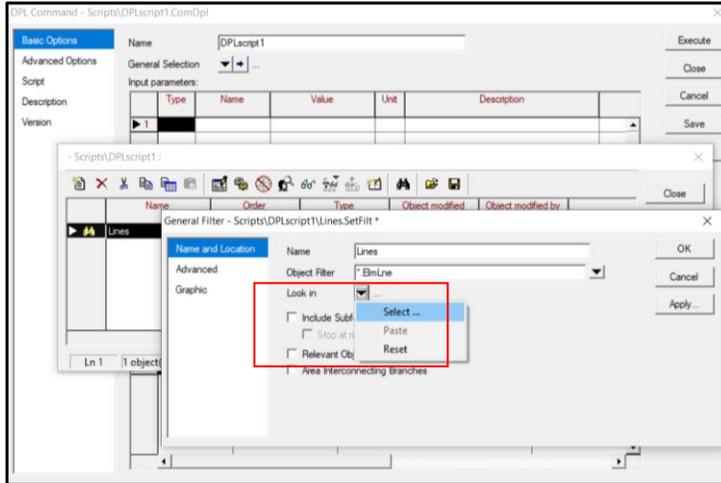


Figura 19: Selección del área donde se va a realizar el filtrado

5. Nos aparecerá la siguiente ventana donde escogemos la opción "Network Data" y damos OK

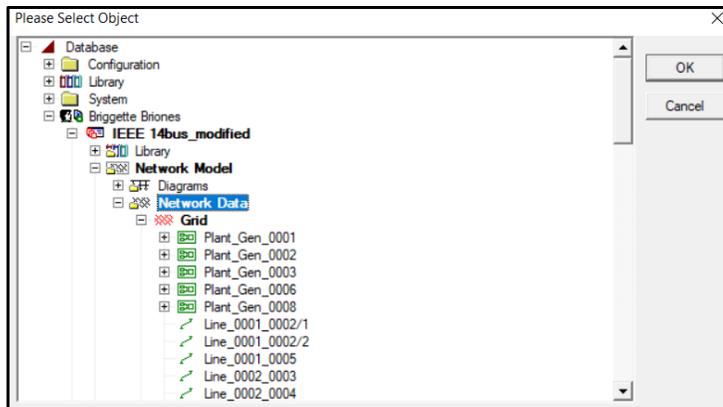


Figura 20: Selección de toda la red para realizar el filtrado

- Finalmente, marcamos la opción “Include Subfolders” y aplicamos el filtro con la opción “Apply”.

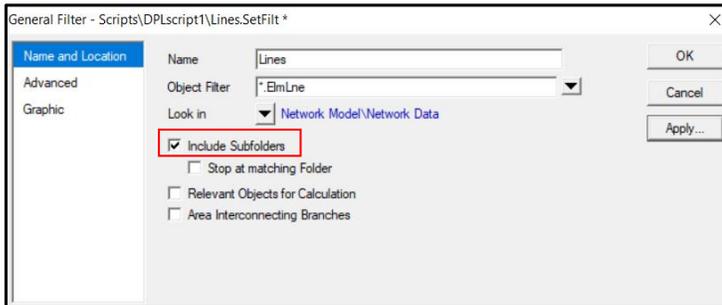


Figura 21: Aplicación del filtro

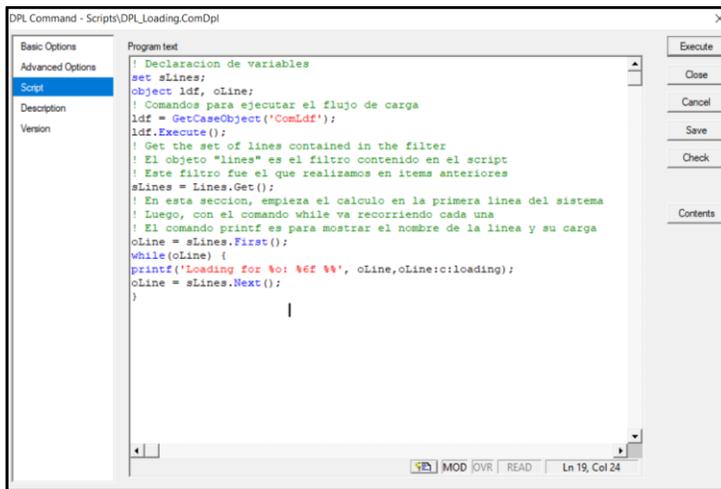
- El filtro tendrá el siguiente aspecto:

Name	Gnd	Type	Terminal i	Terminal j	Zone	Area	Out of Service
Line_0001_0002/1	Gnd	TypLine 0001 to 0002	Bus_0001	Bus_0002			<input type="checkbox"/>
Line_0001_0002/2	Gnd	TypLine 0001 to 0002	Bus_0001	Bus_0002			<input type="checkbox"/>
Line_0001_0005	Gnd	TypLine 0001 to 0005	Bus_0001	Bus_0005			<input type="checkbox"/>
Line_0002_0003	Gnd	TypLine 0002 to 0003	Bus_0002	Bus_0003			<input type="checkbox"/>
Line_0002_0004	Gnd	TypLine 0002 to 0004	Bus_0002	Bus_0004			<input type="checkbox"/>
Line_0002_0005	Gnd	TypLine 0002 to 0005	Bus_0002	Bus_0005			<input type="checkbox"/>
Line_0003_0004	Gnd	TypLine 0003 to 0004	Bus_0003	Bus_0004			<input type="checkbox"/>
Line_0004_0005	Gnd	TypLine 0004 to 0005	Bus_0005	Bus_0004			<input type="checkbox"/>
Line_0006_0011	Gnd	TypLine 0006 to 0011	Bus_0011	Bus_0006			<input type="checkbox"/>
Line_0006_0012	Gnd	TypLine 0006 to 0012	Bus_0006	Bus_0012			<input type="checkbox"/>
Line_0006_0013	Gnd	TypLine 0006 to 0013	Bus_0013	Bus_0006			<input type="checkbox"/>
Line_0007_0008	Gnd	TypLine 0007 to 0008	Bus_0007	Bus_0008			<input type="checkbox"/>
Line_0007_0009	Gnd	TypLine 0007 to 0009	Bus_0007	Bus_0009			<input type="checkbox"/>
Line_0009_0010	Gnd	TypLine 0009 to 0010	Bus_0009	Bus_0010			<input type="checkbox"/>
Line_0009_0014	Gnd	TypLine 0009 to 0014	Bus_0014	Bus_0009			<input type="checkbox"/>

Figura 22: Filtro de las líneas del sistema de 14 barras

3.2.3 Cálculo de flujo de carga

1. Para realizar el flujo de carga empleamos el siguiente código:



```
DPL Command - Scripts\DPL>Loading.ComDpl
Basic Options
Advanced Options
Script
Description
Version
Program text
! Declaracion de variables
set sLines;
object ldf, oLine;
! Comandos para ejecutar el flujo de carga
ldf = GetCaseObject('ComLdf');
ldf.Execute();
! Get the set of lines contained in the filter
! El objeto "lines" es el filtro contenido en el script
! Este filtro fue el que realizamos en items anteriores
sLines = Lines.Get();
! En esta seccion, empieza el calculo en la primera linea del sistema
! Luego, con el comando while va recorriendo cada una
! El comando printf es para mostrar el nombre de la linea y su carga
oLine = sLines.First();
while(oLine) {
printf('Loading for %o: %f %f', oLine,oLine.c:loading);
oLine = sLines.Next();
}
```

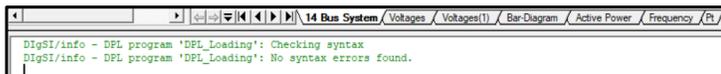
Figura 23: Código DPL para el cálculo de flujo de carga

2. La descripción de cada sección se encuentra detalla en la figura 124.

Como puede observarse, hicimos uso del filtro mencionado en ítems anteriores lo que permitió simplificar el uso de líneas de código.

Una vez realizado el código, damos clic en “Check” el cual, verificará solo la sintaxis del código.

3. Si todo está correcto, nos aparecerá el siguiente mensaje en la ventana de salida:



```
14 Bus System / Voltages / Voltages(1) / Bar-Diagram / Active Power / Frequency / Pt /
DigSI/info - DPL program 'DPL>Loading': Checking syntax
DigSI/info - DPL program 'DPL>Loading': No syntax errors found.
```

Figura 24: Mensaje de salida correspondiente a la revisión de la sintaxis del código

4. Para ejecutar el código, damos en clic en “Execute” y en la ventana de salida se muestra el resultado de flujo de carga para cada línea como se muestra a continuación:

```
DigSI/info - Calculating load flow...
DigSI/info - Start Newton-Raphson Algorithm...
DigSI/info - load flow iteration: 1
DigSI/info - load flow iteration: 2
DigSI/info - load flow iteration: 3
DigSI/info - Newton-Raphson converged with 3 iterations.
DigSI/info - Load flow calculation successful.
DigSI/info - Report of Control Condition for Relevant Controllers
DigSI/info - Control conditions for all controllers of interest are fulfilled.
Loading for Line_0001_0002/1: 20,912829 %
Loading for Line_0002_0003: 19,004582 %
Loading for Line_0002_0005: 12,086978 %
Loading for Line_0002_0004: 15,343260 %
Loading for Line_0003_0004: 5,618439 %
Loading for Line_0004_0005: 14,509634 %
Loading for Line_0001_0005: 15,324412 %
Loading for Line_0006_0012: 3,332647 %
Loading for Line_0012_0013: 0,729564 %
Loading for Line_0006_0013: 7,786672 %
Loading for Line_0013_0014: 2,402722 %
Loading for Line_0009_0014: 4,235764 %
Loading for Line_0009_0010: 2,845277 %
Loading for Line_0010_0011: 1,629452 %
Loading for Line_0006_0011: 3,257902 %
Loading for Line_0007_0009: 11,911424 %
Loading for Line_0001_0002/2: 20,912829 %
Loading for Line_0007_0008: 7,059769 %
DigSI/info - DPL program 'DPL>Loading'
```

Figura 25: Porcentaje de flujo de carga en cada línea del sistema de 14 buses modificado de barras

3.2.4 Importar resultados DPL a archivos Excel

Para la descripción de este ejemplo, haremos uso del ejemplo descrito en el ítem anterior. Procederemos a enviar la información del flujo de carga de cada línea a un archivo de Excel.

1. Para realizar esta acción, se debe agregar al script anterior el código correspondiente al enlace con el programa Excel descrito a continuación:

```

! ***** IMPORTAR DATOS A EXCEL *****
error= xlStart(); !Inicio de Excel
! Esta seccion del codigo nos permite conocer si hubo algun error
! en la comunicacion con el programa
if (error){
    Error('No puede iniciarse la aplicacion Excel') ;
    exit();
}

! En esta seccion creamos la hoja de excel y le asignamos un nombre
xlSetVisible(1); ! El numero '1' es para mostrar el Excel
! Para ocultar el Excel se coloca '0'
xlNewWorkbook(); !Crear nuevo libro
xlSetWorksheetName(1,'FC'); ! A la hoja '1' se le llamara 'FL'
row=1; col=1; i=1;
xlSetValue(col,row,'Flujos de carga');

```

Figura 26: Líneas de código para la importación de datos a un archivo Excel

Esta sección de código, solo nos sirve para establecer el enlace y crear la hoja en blanco con su respectivo nombre.

2. A continuación, en la sección de código correspondiente al cálculo de flujo de carga se agregaron dos líneas de código subrayadas en la siguiente imagen:

```

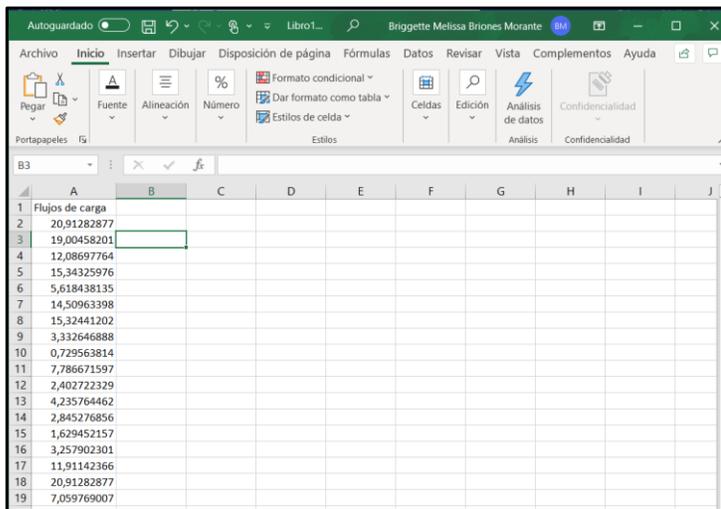
! ***** CALCULO DEL FLUJO DE CARGA *****
! Comandos para ejecutar el flujo de carga
ldf = GetCaseObject('ComLdf');
ldf.Execute();
! Get the set of lines contained in the filter
! El objeto "lines" es el filtro contenido en el script
! Este filtro fue el que realizamos en items anteriores
sLines = Lines.Get();
! En esta seccion, empieza el calculo en la primera linea del sistema
! Luego, con el comando while va recorriendo cada una
! El comando printf es para mostrar el nombre de la linea y su carga
oLine = sLines.First();
while(oLine) {
    printf('Loading for %o: %6f %%', oLine,oLine:c:loading);
    xlSetValue(col,row+i,oLine:c:loading);
    i=i+1;
    oLine = sLines.Next();
}

```

Figura 27: Escritura de los valores de flujo de carga en el archivo Excel

Con esto, lo que hacemos es que en cada fila del archivo en Excel se almacene el valor del flujo de carga de la línea correspondiente.

- Una vez que se ejecute todo el código, se nos abre automáticamente en el computador un archivo de Excel con las características previamente configuradas y con la información solicitada como se muestra a continuación:



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Flujos de carga									
2	20,91282877									
3	19,00458201									
4	12,08697764									
5	15,34325976									
6	5,618438135									
7	14,50963398									
8	15,32441202									
9	3,332646888									
10	0,729563814									
11	7,786671597									
12	2,402722329									
13	4,235764462									
14	2,845276856									
15	1,629452157									
16	3,257902301									
17	11,91142366									
18	20,91282877									
19	7,059769007									

Figura 28: Datos obtenidos del script importados a un archivo de Excel

4. A continuación, mostraremos el código completo:

```
! Declaracion de variables
int error,row,col,i;
set sLines;
object ldf, oLine;

ClearOutput();

! ***** IMPORTAR DATOS A EXCEL *****

error= xlStart(); !Inicio de Excel
! Esta seccion del codigo nos permite conocer si hubo algun error
! en la comunicacion con el programa
if (error){
  Error('No puede iniciarse la aplicacion Excel') ;
  exit();
}

! En esta seccion creamos la hoja de excel y le asignamos un nombre
xlSetVisible(1); ! El numero '1' es para mostrar el Excel
! Para ocultar el Excel se coloca '0'
xlNewWorkbook(); !Crear nuevo libro
xlSetWorksheetName(1,'FC'); ! A la hoja '1' se le llamara 'FL'
row=1; col=1; i=1;
xlSetValue(col,row,'Flujos de carga');
```

Figura 29: Código final - Parte 1

```
! ***** CALCULO DEL FLUJO DE CARGA *****
! Comandos para ejecutar el flujo de carga
ldf = GetCaseObject('ComLdf');
ldf.Execute();
! El objeto "lines" es el filtro contenido en el script
! Este filtro fue el que realizamos en items anteriores
sLines = Lines.Get();
! En esta seccion, empieza el calculo en la primera linea del sistema
! Luego, con el comando while va recorriendo cada una
! El comando printf es para mostrar el nombre de la linea y su carga
oLine = sLines.First();
while(oLine) {
  printf('Loading for %o: %6f %%', oLine,oLine:c:loading);
  xlSetValue(col,row+i,oLine:c:loading);
  i=i+1;
  oLine = sLines.Next();
}
```

Figura 30: Código final - Parte 2

3.2.5 Importar resultados DPL a archivos .txt

Para este ejemplo, además de escribir el resultado del flujo de carga como el porcentaje de cargabilidad, también se agregaron las potencias activas y reactivas de cada línea respectivamente.

1. Para la creación de un archivo .txt se ingresó la siguiente instrucción:

```
fopen('D:\Users\Brigette Briones\Documents\Materia Integradora\Prol.txt', 'w', 1);
```

Figura 31: Línea de código para crear en una ruta específica un archivo .txt

Se debe tener en cuenta que el comando fopen tiene la siguiente sintaxis:

- fopen('ruta_archivo', 'w(write) o r(read)', N°asignado)

2. Una vez creado el archivo .txt, para poder escribir información en él se debe usar el comando fprintf que posee la siguiente sintaxis:

- fprintf(Doc_Num_Asignado, '%o%s...', object, int, ...)

En nuestro código se ingresó de la siguiente forma:

```
fprintf(l, 'FLUJO: %f || Potencia Activa: %f || Potencia Reactiva: %f', oLine:c:loading, oLine:w:F:bus1, oLine:w:Q:bus1);
```

Figura 32: Línea de código para escribir información en el archivo .txt

3. Finalmente, el código completo quedó de la siguiente forma:

```

! Declaracion de variables
int error,row,col,i;
set sLines;
object ldf, oLine;
ClearOutput();

! ***** IMPORTAR DATOS A UN ARCHIVO .txt *****

! Para crear el archivo txt
fopen('D:\Users\Brigitte Briones\Documents\Materia Integradora\Prol.txt','w', 1);

! ***** CALCULO DEL FLUJO DE CARGA *****
! Comandos para ejecutar el flujo de carga
ldf = GetCaseObject("ComLdf");
ldf.Execute();
! El objeto "lines" es el filtro contenido en el script
! Este filtro fue el que realizamos en items anteriores
sLines = Lines.Get();
! En esta seccion, empieza el calculo en la primera linea del sistema
! Luego, con el comando while va recorriendo cada una
! El comando printf es para mostrar el nombre de la linea y su carga
oLine = sLines.First();
while(oLine) {
! Imprimir informacion por la ventana de salida
printf("Loading for %o: %f %f %f %f ", oLine,oLine:cloading,oLine:m:Fbus1,oLine:m:Q:bus1);
! Guardar informacion en el archivo .txt
fprintf(1,"FLUJO: %f || Potencia Activa: %f || Potencia Reactiva: %f",oLine:cloading,oLine:m:Fbus1,oLine:m:Q:bus1);
oLine = sLines.Next();
}

```

Figura 33: Código final para la escritura de valores en un archivo .txt

Y el contenido del archivo .txt se almacenó de la siguiente forma:

Figura 34: Visualización de los datos en el archivo .txt

3.2.6 Comunicación entre DigSILENT y Matlab mediante archivos .csv

Durante nuestra investigación, encontramos una forma relativamente sencilla de enviar/recibir información entre ambos programas haciendo uso de archivos con extensión .csv.

Claro que esto depende de la aplicación que se vaya a realizar y la cantidad de información que se vaya a enviar/recibir.

Se debe tener en cuenta que estos códigos funcionan como un tipo de conmutador. Mientras uno está operando, el otro espera la respuesta.

A continuación, se describirá el pseudo código base para ambos programas en la tabla 4 con los cuales se puede realizar la comunicación.

DigSILENT	Matlab
<pre> Leer Flag.csv; Leer Data.csv; While(i <=iteraciones){ Leer Flag.csv; While(Flag.csv = 1){ Leer Flag.csv If (Flag.csv = 0){ Break; } } Leer Data.csv; mainDig.Execute(InputData,OutputData); Escribir Data.csv; Escribir Flag.csv = 1; I = I +1; } </pre>	<pre> Leer Flag.csv; Leer Data.csv; While(i <=iteraciones){ Leer Flag.csv; While(Flag.csv = 0){ Leer Flag.csv If (Flag.csv = 1){ Break; } } Leer Data.csv; OutputData = mainMat(InputData); Escribir Data.csv; Escribir Flag.csv = 0; I = I +1; } </pre>
<p>Si el archivo Flag.csv = 1 ; Matlab se está ejecutando y DigSILENT espera la respuesta Si el archivo Flag.csv = 0 ; DigSILENT se está ejecutando y Matlab espera la respuesta</p>	

Tabla 4: Códigos para realizar la comunicación entre Digsilent y Matlab

La idea detrás del procedimiento descrito en la tabla 4 es realizar un lazo en los cuales ambos programas estén leyendo/escribiendo dos archivos .cvs.

Un archivo funcionará como bandera, la cual indicara que software se está ejecutando; mientras que el otro se encargará de contener los datos que se estén escribiendo/leyendo.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En el capitulo actual se van a describir los resultados obtenidos durante el proceso de desarrollo del proyecto y gracias a la metodología descrita en el capítulo 2, para así darle solución a la problemática planteada en el capítulo 1, por lo cual se utilizó el sistema eléctrico de potencia de la IEEE de 14 barras modificado, para el análisis de todos los estudios que se hablaron en el capítulo 2.

4.1 Análisis de Flujo de Carga del SEP 14 barras de IEEE modificado.

Para esta sección se comparó los valores en por unidad (p.u.) de los voltajes y la cargabilidad de los elementos. Basándonos en el cuadro de esquema de colores que nos proporciona DigSILENT, donde muestra la siguiente clasificación:

- Rango de voltaje inferior.
- Ranfo de voltaje superior.
- Rango de Carga.

Lo cuales van a depender de la capacidad de cada elemento, tal como se muestra en la figura 136.

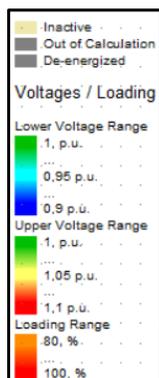


Figura 35: Esquema de colores para análisis de elementos.

Se ejecutó en el software el flujo de potencia, para observar las potencias activas y reactivas de toda la red y de paso el voltaje adquirido en cada barra del sistema.

Para que el sistema opere en el régimen estable y al mismo tiempo sea optimo, por lo que nos dio como resultado la figura 137 que se observa, en esta se observó el distinto color de las barras de interconexión (Las llamadas Buses), lo que nos indicó que la mayoría de las barras estaba con sobrevoltaje (V p.u.) de dimensionamiento como se observa también en la ventana de salida (Figura 138), el problema se observa en las barras que se encuentran de color naranja y rojo (Bus_0006, Bus_0007, Bus_0008, Bus_0018, Bus_0019), según la tabla 5 que nos indica que la tensión de esta se sobrepasa en un 6 a 10% del valor nominal.

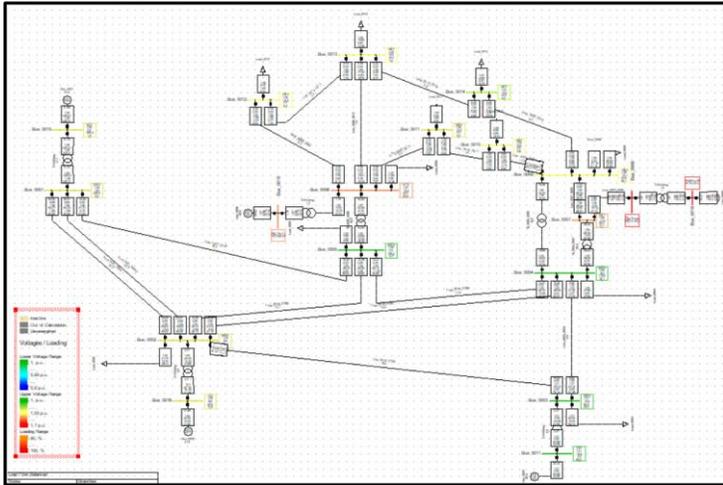


Figura 36: Resultado de Flujo de Potencia.

Otra Manera de expresar los resultados fue en la ventana de salida, como se muestra en la figura 138, aquí se observan los porcentajes de sobrevoltaje por medio de diagramas de barras, donde también se observó el porcentaje de sobretensión del 0 al 10%, de las cuales las que superan el 5% son las de color rojo y las verdes son las de menor tensión. También se mostraron los parámetros ingresados (rtd.V [kV]) por el usuario, para observar la sobretensión.

Grid: Grid		System Stage: Grid		Study Case: 01 - Load Flow Case Original Annex:		Voltage - Deviation [%]		
rd.V	Bus - voltage							
[kV]	[p.u.]	[kV]	[deg]	-10	-5	0	+5	
Bus_0008	132,00	1,090	143,88	-11,48				
Bus_0009	132,00	1,056	139,40	-13,08				
Bus_0010	132,00	1,051	138,75	-13,25				
Bus_0011	132,00	1,057	139,52	-12,97				
Bus_0012	132,00	1,055	139,28	-13,28				
Bus_0013	132,00	1,050	138,66	-13,36				
Bus_0014	132,00	1,036	136,70	-14,20				
Bus_0001	220,00	1,060	233,20	-0,00				
Bus_0015	22,00	1,060	23,32	0,00				
Bus_0016	13,80	1,045	14,42	-2,57				
Bus_0017	13,80	1,010	13,94	-10,58				
Bus_0018	13,80	1,090	15,04	-11,48				
Bus_0019	13,80	1,070	14,77	-12,43				
Bus_0002	220,00	1,045	229,90	-2,57				
Bus_0003	220,00	1,010	222,20	-10,58				
Bus_0004	220,00	1,018	223,88	-8,41				

Grid: Grid		System Stage: Grid		Study Case: 01 - Load Flow Case Original Annex:		Voltage - Deviation [%]		
rd.V	Bus - voltage							
[kV]	[p.u.]	[kV]	[deg]	-10	-5	0	+5	
Bus_0005	220,00	1,020	224,33	-7,04				
Bus_0006	132,00	1,070	141,24	-12,43				
Bus_0007	132,00	1,062	140,13	-11,48				

Figura 37: Sobretensión de las barras en la ventana de e salida.

Por último, el reporte que se mostró en la ventana de salida nos permitió extraer los datos de los elementos del SEP de las tablas descritas a continuación, obtuvimos los resultados de todo el sistema, para analizar el comportamiento de nuestro SEP, donde tenemos, el nombre del elemento, el voltaje Asignado, el voltaje de la barra en exceso, tanto en kV o p.u. También se obtuvo datos de los generadores, los transformadores, las líneas de transmisión y las cargas, presentando las potencias Activas y Reactivas, el factor de potencia, la corriente y la cargabilidad de todos estos, al final se observa que ninguno de estos elementos esta sobrecargado gracias a un condensador acoplado a una de las barras que aporta potencia reactiva al sistema.

Nombre del Elemento	Voltaje [kV]	Voltaje de la barra	
		[p.u.]	[kV]
Bus_0001	220	1,06	233,20
Bus_0002	220	1,04	229,90
Bus_0003	220	1,01	222,20
Bus_0004	220	1,02	223,88
Bus_0005	220	1,02	224,33
Bus_0006	132	1,07	141,24
Bus_0007	132	1,06	140,13
Bus_0008	132	1,09	143,88
Bus_0009	132	1,06	139,40
Bus_0010	132	1,05	138,75
Bus_0011	132	1,06	139,52
Bus_0012	132	1,06	139,28
Bus_0013	132	1,05	138,66
Bus_0014	132	1,04	136,70
Bus_0015	22	1,06	23,32
Bus_0016	13,80	1,04	14,42
Bus_0017	13,80	1,01	13,94
Bus_0018	13,80	1,09	15,04
Bus_0019	13,80	1,07	14,77

Tabla 5: Datos de las barras de Transmisión.

Nombre del Elemento	Potencias		Factor de Potencia	Corriente [kA]	Cargabilidad [%]
	Activa [MW]	Reactiva [Mvar]			
Gen 0001	230,21	1,48	1,00	5,70	51,39
Gen 0002	40,00	12,33	0,96	1,68	41,86
Gen 0003	00,00	24,98	0,00	1,03	62,45
Gen 0006	00,00	12,73	0,00	0,50	50,93
Gen_0008	00,00	17,59	0,00	0,68	70,37

Tabla 6: Datos de los Generadores.

Nombre del Elemento	Potencias		Factor de Potencia	Corriente [kA]	Cargabilidad [%]
	Activa [MW]	Reactiva [Mvar]			
2-Winding Transformador	-0,00	17,59	0,00	0,07	1,61
Trf_0004_0009	-16,23	1,78	-0,99	0,07	15,95
2-Winding Transformador	-230,21	-1,48	-1,00	0,57	21,72
2-Winding Transformador	40,00	12,33	0,96	1,68	4,01
2-Winding Transformador	0,00	24,98	0,00	1,03	2,47
2-Winding Transformador	0,00	12,73	0,00	0,50	1,19
Trf_0004_0007	28,34	-9,70	0,95	0,08	29,44
Trf_0005_0006	43,66	12,52	0,96	0,12	44,54

Tabla 7: Datos de los Transformadores.

Nombre del Elemento	Potencias		Factor de Potencia	Corriente [kA]	Cargabilidad [%]
	Activa [MW]	Reactiva [Mvar]			
Line_0007_0008	0,00	17,59	0,00	0,07	7,06
Line_0009_0014	9,59	3,55	0,94	0,04	4,24
Line_0007_0009	-28,34	-4,88	-0,99	0,12	11,91
Line_0009_0010	5,49	4,13	0,80	0,03	2,85

Line_0010_0011	-3,53	-1,70	-0,90	0,02	1,63
Line_0006_0012	-7,68	-2,37	-0,96	0,03	3,33
Line_0012_0013	1,58	0,77	0,90	0,01	0,73
Line_0006_0013	-17,40	-6,84	-0,93	0,08	7,79
Line_0013_0014	5,48	1,81	0,95	0,02	2,40
Line_0001_0002/1	84,47	-1,85	1,00	0,21	20,92
Line_0001_0002/2	84,43	-1,86	1,00	0,21	20,91
Line_0001_0005	61,31	5,19	1,00	0,15	15,32
Line_0002_0003	75,57	3,34	1,00	0,19	19,00
Line_0002_0005	48,13	-0,59	1,00	0,12	12,09
Line_0002_0004	61,04	-2,64	1,00	0,15	15,34
Line_0003_0004	-21,10	3,53	-0,99	0,06	5,62
Line_0004_0005	-54,72	13,08	-0,97	0,15	14,51
Line_0006_0011	7,09	3,64	0,89	0,03	3,26

Tabla 8: Datos de las líneas de Transmisión.

Nombre del Elemento	Potencias		Factor de Potencia	Corriente [kA]	Cargabilidad [%]
	Activa [MW]	Reactiva [Mvar]			
Load_0009	29,50	16,60	0,87	0,14	—
Shnt_0009	0,00	-21,18	0,00	0,09	—
Load_0010	9,00	5,80	0,84	0,04	—
Load_0011	3,50	1,80	0,89	0,02	—
Load_0012	6,10	1,60	0,97	0,03	—
Load_0013	13,50	5,80	0,92	0,06	—
Load_0014	14,90	5,00	0,95	0,07	—
Load_0002	21,70	12,70	0,86	0,06	—
Load_0003	94,20	19,00	0,98	0,25	—
Load_0004	47,80	-3,90	1,00	0,12	—
Load_0005	7,60	1,60	0,98	0,02	—
Load_0006	11,20	7,50	0,83	0,06	—

Tabla 9: Datos de Cargas.

4.2 Análisis de Cortocircuitos o Fallas del SEP 14 barras de IEEE modificado.

Se aplicó el cálculo de cortocircuito a nuestro sistema sin impedancia de falla, aunque en los sistemas reales existen muchas impedancias como los árboles al tocar las líneas de transmisión, pero para muestra de la aplicación nuestro sistema no aplicó dicha impedancia.

4.2.1 Falla trifásica en una barra

Se aplicó el método de la IEC60909, y el tipo de falla fue trifásico para calcular la máxima corriente de cortocircuito, para una barra, en este caso fue el **Bus_0001** como se muestra en la figura 139, tanto como en el área de trabajo, como en la ventana de salida, se observan resultados.

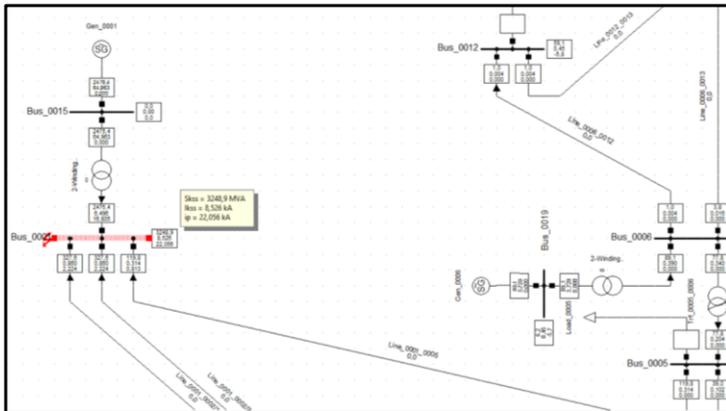


Figura 38: Falla aplicada a una barra.

y de resultado nos apareció lo siguiente (Figura 140) en la ventana de salida.

```

DigSI/wrng - -----
DigSI/wrng - *Grid\Gen_0003.ElmSym:
DigSI/wrng - Stator Resistance too low, set to 0,014000 p.u. acc. VDE0102/IEC60909
DigSI/info - Element '*@ Gen_0001' is local reference in separated area of '*Bus_0015'
DigSI/info - Short-circuit calculated at Terminal Grid\Bus_0001
DigSI/info - Short-circuit calculation successfully executed!
-----
| | | | | DigSI/LENT | Project: |
| | | | | PowerFactory |-----|
| | | | | 15.1.7 | Date: 2/18/2021 |
|-----|
| Fault Locations with Feeders | | | | |
| Short-Circuit Calculation / Method : IEC 60909 | | | | | 3-Phase Short-Circuit / Max. Short-Circuit Currents |
|-----|
| Asynchronous Motors | | Grid Identification | | Short-Circuit Duration |
| Always Considered | | Automatic | | Break Time | 0,10 s |
| Decaying Aperiodic Component (idc) | | Conductor Temperature | | Fault Clearing Time (tch) | 1,00 s |
| Using Method B | | User Defined No | | c-Voltage Factor | User Defined |
| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Grid: Grid | System Stage: Grid | | | Annex: | / 1 | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | rtd.V. | Voltage | c- | Sv* | | Ik* | | ip | Ib | Sb | Ik | Ith |
| | [kV] | [kV] | [deg] | Factor | [MVA/MVA] | [kA/kA] | [deg] | [kA/kA] | [kA] | [MVA] | [kA] | [kA] |
|-----|
| Bus_0001 | 220,00 | 0,00 | 0,00 | 1,10 | 3248,94 MVA | 8,53 kA | -87,85 | 22,06 kA | 6,57 | 2505,09 | 8,53 | 8,75 |
|-----|

```

Figura 39: Resultado del evento de cortocircuito

En donde se presenta el voltaje de la barra que es de 220kV, pero como se ejecutó una falla trifásica el voltaje de falla es cero, con un factor de corrección de 1.1 (puesto por la norma), La potencia de cortocircuito inicial es de 3248.94MVA, la corriente de cortocircuito subtransitoria, debido a la corrientes subtransitorias es de 8.53 kA a un angulo de -87.85 deg, la corriente pico (siendo instantanea) ip es de 22.06 kA, la corriente de cortocircuito de interrupción Ib fue de 6.57kA, la potencia de cortocircuito de interrupción Sb fue de 2505.09 MVA, la corriente de cortocircuito en estado estable es de 8.53kA, y la corriente de cortocircuito del equivalente térmico es de 8,75kA

4.2.2 Falla bifásica en una barra

Se aplicó el método de la IEC60909, y el tipo de falla fue bifásico para calcular la máxima corriente de cortocircuito, por lo que el sistema ya no será balanceado para una barra, en este caso fue el **Bus_0001** como se muestra en la figura x, tanto como en el área de trabajo, como en la ventana de salida, se observan resultados.

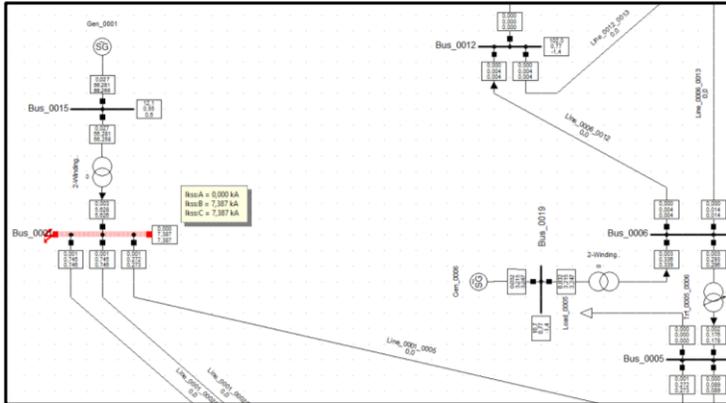


Figura 40: Falla bifásica

y de resultado nos apareció lo siguiente (Figura 142) en la ventana de salida, cada fase por convertirse en un sistema desbalanceado.

```

DigSI/info - Short-circuit calculated at Terminal Grid\Bus_0001
DigSI/info - Short-circuit calculation successfully executed!
-----
|                               | DigSILENT | Project: |
|                               | PowerFactory | 15.1.7   |
|                               | Date: 2/19/2021 |
|-----|-----|-----|
| Fault Locations with Feeders | 2-Phase Short-Circuit / Max. Short-Circuit Currents |
| Short-Circuit Calculation / Method : IEC 60909 |
|-----|-----|-----|
| Asynchronous Motors | Grid Identification | Short-Circuit Duration |
| Always Considered | Automatic | Break Time | 0,10 s |
| | | Fault Clearing Time (Ith) | 1,00 s |
| | Conductor Temperature | c-Voltage Factor |
| | User Defined | No | User Defined | No | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Grid: Grid | System Stage: Grid | Annex: / 1 |
|-----|-----|-----|
| rtd.V. | Voltage | c- | Sk** | Ik** | ip | Ib | Sb | EFF |
| [kV] | [kV] | [deg] Factor | [MVA/MVA] | [kA/kA] | [deg] | [kA/kA] | [kA] | [MVA] | [-] |
|-----|-----|-----|
| Bus_0001 | A | 220,00 | 139,68 | 0,60 | 1,10 | 0,00 MVA | 0,00 kA | 0,00 | 0,00 kA | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 1,00 |
| | B | 69,84 | -179,40 | | | 938,25 MVA | 7,39 kA | -170,44 | 19,11 kA | 7,39 | 938,25 | 0,00 |
| | C | 69,84 | -179,40 | | | 938,25 MVA | 7,39 kA | 1,56 | 19,11 kA | 7,39 | 938,25 | 0,00 |
  
```

Figura 41: Resultado de la falla bifásica

En donde se presenta el voltaje de la barra que es de 220kV para la fase A, el voltaje de falla es diferente en la Línea A, en comparación con las líneas B y C, con un factor de corrección de 1.1 (puesto por la norma), La potencia de cortocircuito inicial es de 0.00MVA en la fase A y 938.25 MVA en las otras fases, la corriente de cortocircuito

subtransitoria, debido a la corrientes subtransitorias es de 0.00kA en la fase A y 7.39 kA en las otras fases, la corriente pico (siendo instantanea) i_p es de 0.00kA en la fase A y 19.11 kA en la fase B y C, la corriente de cortocircuito de interrupción I_b fue de 0.00kA en la fase A y 7.39 kA en las otras fases, la potencia de cortocircuito de interrupción S_b fue de 0.00 MVA para la fase A y 938.25 MVA para las fases restantes.

4.2.3 Fallas Múltiples en todas las barras

Aplicando el método completo, con el tipo de falla de una fase a tierra, se calcula la máxima corriente de cortocircuito, seleccionado que la Fase A se vaya a tierra y ejecutando la falla en todas las barras el resultado quedo de la siguiente manera Figura x.

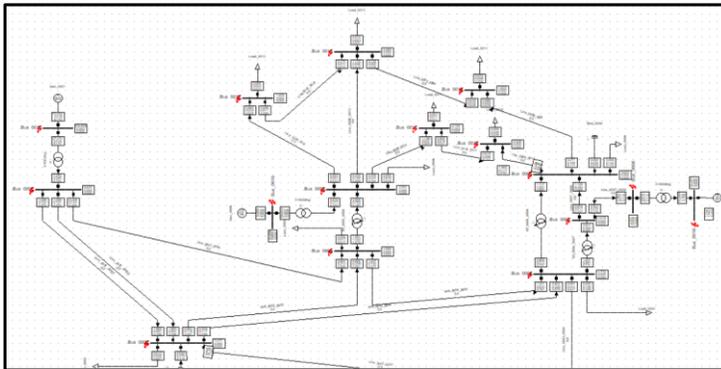


Figura 42: Falla de una fase a tierra

Recordando que cada falla es independiente, y no depende de los fallos de las otras barras, se observa en la ventana de salida los resultados (Figura 144).

Grid: Grid	System Stage: Grid										Annex:			/ 2
	rd. V		Voltage			c-	Sik					Ig	Ib	Ia
	[kV]	Ph	[kV]	[p.u.]	[deg]	Factor	[MVA]	[kA]	[deg]	[kA]	[deg]	[kA]	[kA]	[kA]
Bus_0015	22,00	A	0,00	0,00	0,00	1,0	1281,07	100,86	-86,41	89,80	-86,02	270,10	90,71	187,51
		B	12,31	0,97	-107,08		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		C	12,34	0,97	107,99		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bus_0016	13,80	A	0,00	0,00	0,00	1,0	939,08	117,86	-83,97	106,81	-83,60	293,81	107,72	183,67
		B	7,84	0,98	-111,73		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		C	7,84	0,98	106,72		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bus_0017	13,80	A	0,00	0,00	0,00	1,0	352,22	44,21	-84,97	41,98	-84,29	100,79	42,16	77,65
		B	7,61	0,95	-119,63		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		C	7,14	0,90	100,32		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bus_0018	13,80	A	0,00	0,00	0,00	1,0	179,17	22,49	-97,70	21,16	-97,23	59,99	21,27	44,08
		B	7,86	0,99	-115,16		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		C	7,62	0,96	92,87		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bus_0019	13,80	A	0,00	0,00	0,00	1,0	285,84	35,89	-91,11	33,75	-90,38	89,76	33,83	65,30
		B	7,41	0,93	-103,07		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		C	7,37	0,92	78,47		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bus_0002	220,00	A	0,00	0,00	0,00	1,0	949,77	7,48	-83,72	6,77	-83,38	18,44	6,83	11,44
		B	123,74	0,97	-111,04		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		C	125,16	0,99	105,84		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bus_0003	220,00	A	0,00	0,00	0,00	1,0	352,74	2,78	-84,85	2,64	-84,18	6,33	2,65	4,89
		B	120,89	0,95	-119,57		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		C	113,99	0,90	100,16		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bus_0004	220,00	A	0,00	0,00	0,00	1,0	606,11	4,77	-81,94	4,46	-81,47	10,70	4,48	7,03
		B	112,65	0,89	-98,21		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		C	112,65	0,89	81,79		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bus_0005	220,00	A	0,00	0,00	0,00	1,0	620,80	4,89	-82,32	4,57	-81,91	11,13	4,60	7,22
		B	112,98	0,89	-96,84		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		C	112,99	0,89	83,16		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bus_0006	132,00	A	0,00	0,00	0,00	1,0	286,17	3,78	-91,02	3,55	-90,29	9,46	3,57	6,88
		B	70,65	0,93	-102,30		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		C	70,65	0,93	77,70		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Bus_0007	132,00	A	0,00	0,00	0,00	1,0	306,21	4,02	-91,78	3,81	-91,14	10,19	3,83	6,87
		B	70,15	0,92	-101,38		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
		C	70,15	0,92	78,62		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Figura 43: Resultados de la falla de una fase a tierra

4.3 Comportamiento de los cortocircuitos o Fallas del SEP 14 barras de IEEE modificado.

Para las fallas en las barras se tienen los tipos de fallas que son la trifásica, bifásica, monofásicas, entre otras.

4.3.1 Fallas trifásicas en una barra.

Se realizó un evento de cortocircuito en una barra (Bus_0001) presentado en la figura y así no solo ver los cálculos finales presentados en la ventana de salida si no también evento Transitorio en una gráfica.

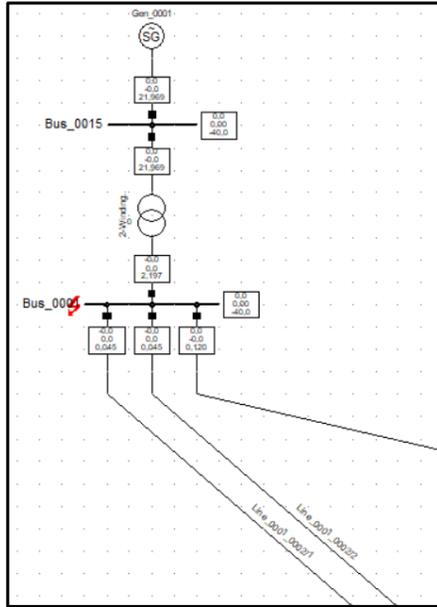


Figura 44: Falla trifásica en una barra

Esto se lo pudo realizar gracias a la creación de eventos transitorios y las gráficas resultantes del voltaje de línea de las fases y las corrientes de cortocircuito son las siguientes:

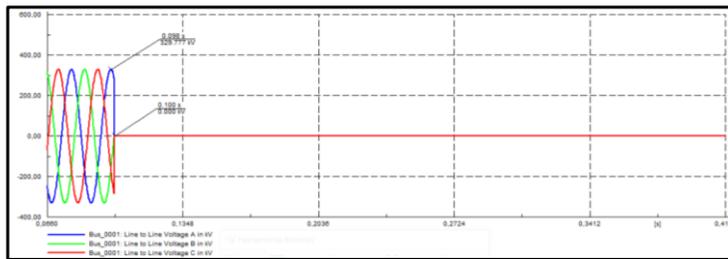


Figura 45: Gráficas de los voltajes de línea

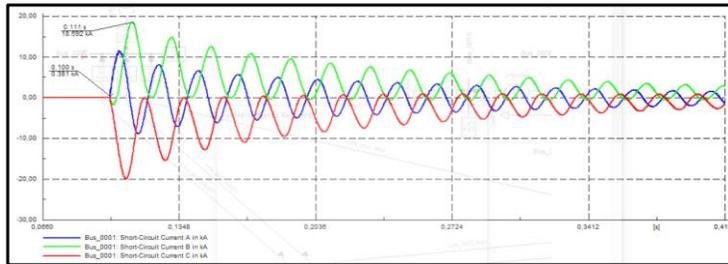


Figura 46: Gráficas de la corriente de cortocircuito

Como se mencionó en el evento, ocurrió una falla trifásica de cortocircuito en una barra que se realizó a los 0.100 s, y se observa que todas las tensiones caen a cero en ese tiempo y una de las corrientes de cortocircuito se despunta, llegando a un punto de 18.592 kA, gracias a eso se generó la parte asimétrica de la curva de corriente de cortocircuito y la parte simétrica, generada por la componente continua que se generó.

4.4 Análisis de Eventos del SEP 14 barras de IEEE modificado.

Para la realización de eventos, se analizó el Gen_0001, porque cerca de él, en una barra de transmisión, se realizó un cortocircuito a los 1s y el aclaramiento del mismo a los 1.1s, esto se vio reflejado en las variables agregadas del generador como se observa las perturbaciones en la potencia activa, reactiva, el voltaje de línea y la velocidad del rotor en p.u., mientras ocurrió el evento como se observa en la figura 148.

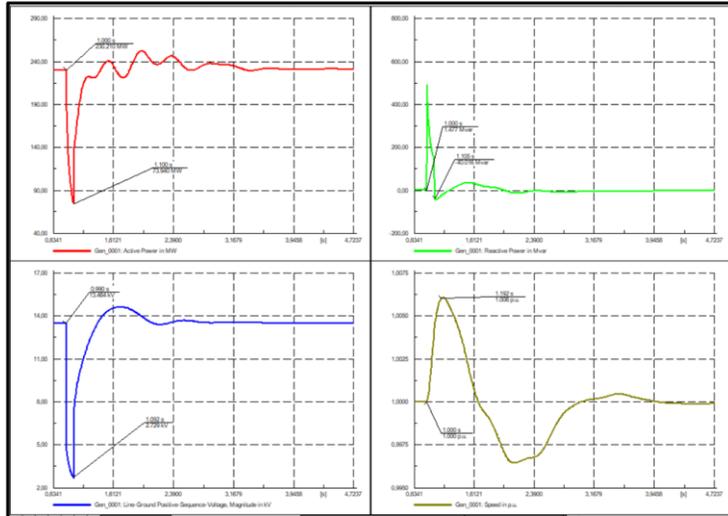


Figura 47: Gráficas del generador luego del evento

Se observó los índices y el tiempo de duración del evento y que tanto salieron las variables del régimen estable, aplicando el método en RMS de las condiciones iniciales.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se realizaron los estudios de estado estable y dinámico en un sistema de potencia de prueba de la IEEE de 14 barras modificado, mostrando sus resultados mediante gráficas y almacenando estos valores en archivos de texto o en programas como Excel para futuros análisis.
- La elaboración de una guía precisa de las funcionalidades más usadas les permitió a los lectores ya sea a nivel profesional como académico captar su atención para la adquisición y manejo de este software.
- Se estableció un enlace de comunicación con el software Matlab mediante el uso de archivos .csv lo que incrementa la posibilidad de futuros estudios utilizando las herramientas que brindan ambos programas.
- La programación DPL fue de gran ayuda al momento de ejecutar los estudios realizados ya que se puede acceder a cualquier variable de cualquier elemento que se encuentre agregado en la base de datos.
- DigSILENT es una herramienta que facilita mucho los cálculos empleados en los estudios de los sistemas de potencia, ya que son confiables y seguros sus resultados y son basados en algunos métodos mencionados en este documento.
- Las simulaciones que se ejecutan en DigSILENT no solo son estáticas y sirven para estudios post-operativo, si no que sus simulaciones también se las puede realizar en tiempo real utilizando estudios dinámicos, para

observar como va reaccionando el Sistema y si está trabajando en condiciones normales.

- El software de DigSILENT nos permite observar variables eléctricas y dinámicas gracias a sus herramientas visuales como los diagramas vs tiempo y ver su comportamiento en voltaje, corrientes, potencias, entre otros; ante cambios como eventos transitorios o cortocircuitos.

5.2 Recomendaciones

- Algo que pude percibir durante la búsqueda de material para el manejo del software es que había poco material en español, por lo que el continuar con la elaboración de esta guía sería un excelente aporte para la comunidad hispanohablante.
- Continuar con los pasos mencionados en este documento para la elaboración de proyectos y elaboración de casos de estudios, ya que facilita mucho al lector e investigador a realizar sus proyectos de manera ágil.
- Revisar la documentación teórica para el uso de este software y observar el uso que se da en el programa y adquirir agilidad en los cálculos que se pueden realizar.
- Fomentar el estudio de y uso de DigSILENT en las universidades e investigaciones, ya que este Software reduce mucho el tiempo en las soluciones de los estudios de los Sistemas Eléctricos de Potencia.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. J. Grainger y W. D. Jr., Análisis de Sistemas de Potencia, México: McGraw-Hill, 1996.
- [2] A. G. Expósito, J. L. M. Ramos, J. A. R. Macías, E. R. Ramos y J. M. R. Santos, Sistemas Eléctricos de Potencia Problemas y ejercicios Resueltos, Madrid: Prentice Hall, 2003.
- [3] J.Núñez, J.Cepeda y G.Salazar, «Comparación Técnica entre los Programas de Simulación de Sistemas de Potencia DIgSILENT PowerFactory y PSS/E,» *Revista Técnica Energía*, vol. 11, nº 1, pp. 22-30, 31 01 2015.
- [4] W. D. Stevenson, Analisis de Sistemas Electricos de Potencia, Mexico: McGRAW-HILL, 1975.
- [5] D. Kothari y I. Nagrath, Sistemas Eléctricos de Potencia, México: McGraw-Hill, 2008.
- [6] J. L. Chancay, Análisis de Fallas en sistemas Eléctricos de Potencia, Guayaquil: Centro de Difusión y Publicaciones, ESPOL, 2010.
- [7] C. D. L. Verdugo, Evaluación del comportamiento dinámico de un sistema eléctrico interconectado mediante modelos reducidos obtenidos de, Valparaíso: Pontifica Universidad Católica de Valparaíso , 2020.
- [8] A. A. Recalde, Estabilidad de los Sistemas de Potencia: Problemáticas en escenarios Complejos., 2014.
- [9] D. GmbH, DIgSILENT PowerFactory Version 2017 User Manual, Gomarigen, Germany: DIgSILENT, 2017.
- [10] L. L. C. Segovia, *Modelación y simulación del sistema de control de los motores de tracción del metro de Quito y análisis dinámico de su operación en la red eléctrica*

mediante co-simulación entre Matlab/Simulink y PowerFactory de DigSILENT,
Quito, 2019.

- [11] J. M. C. Santana, *Análisis de la Operación del sistema Nacional interconectado del Ecuador Utilizando Programación en DigSILENT,* Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2008.