

1-1-2014

Estructuración y desarrollo de guías educativas para el manejo del software digsilent v14 utilizando la herramienta DPL con base en un sistema de potencia de prueba de la IEEE

Héctor Alfonso Arias Arias

Nelson Camilo Saavedra Perdomo

Follow this and additional works at: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica

Citación recomendada

Arias Arias, H. A., & Saavedra Perdomo, N. C. (2014). Estructuración y desarrollo de guías educativas para el manejo del software digsilent v14 utilizando la herramienta DPL con base en un sistema de potencia de prueba de la IEEE. Retrieved from https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_electrica/30

This Trabajo de grado - Pregrado is brought to you for free and open access by the Facultad de Ingeniería at Ciencia Unisalle. It has been accepted for inclusion in Ingeniería Eléctrica by an authorized administrator of Ciencia Unisalle. For more information, please contact ciencia@lasalle.edu.co.

**ESTRUCTURACIÓN Y DESARROLLO DE GUÍAS EDUCATIVAS PARA EL
MANEJO DEL SOFTWARE DIGSILENT v14 UTILIZANDO LA HERRAMIENTA
DPL CON BASE EN UN SISTEMA DE POTENCIA DE PRUEBA DE LA IEEE**

**HECTOR ALFONSO ARIAS ARIAS
NELSON CAMILO SAAVEDRA PERDOMO**

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BOGOTÁ D.C
2014**

**ESTRUCTURACIÓN Y DESARROLLO DE GUÍAS EDUCATIVAS PARA EL
MANEJO DEL SOFTWARE DIGSILENT v14 UTILIZANDO LA HERRAMIENTA
DPL CON BASE EN UN SISTEMA DE POTENCIA DE PRUEBA DE LA IEEE**

**HECTOR ALFONSO ARIAS ARIAS
NELSON CAMILO SAAVEDRA PERDOMO**

Director

LUIS HERNANDO CORREA SALAZAR

Ingeniero Electricista

**UNIVERSIDAD DE LA SALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
BOGOTÁ D.C.**

2014

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

**Gracias a Dios y cada una de las personas que aportaron
en nuestro proceso de formación académica y personal.**

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	6
INTRODUCCIÓN.....	7
OBJETIVO GENERAL.....	8
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	8
1. ESTUDIOS EN SISTEMAS DE POTENCIA.....	9
1.1 Flujo de Carga.....	9
1.1.1 Matriz de Admitancias.....	10
1.1.2 Definición de Barrajes.....	11
1.1.3 Métodos de Solución para Flujos de Potencia.....	12
1.1.3.1 Método Gauss Seidel.....	12
1.1.3.2 Método Newton Raphson.....	13
1.1.3.3 Método de Newton Raphson Desacoplado.....	15
1.1.3.4 Método de Newton.....	16
1.2 Análisis de Corto Circuito.....	17
1.2.1 Fallas Simétricas.....	19
1.2.2 Fallas Asimétricas.....	20
1.3 Coordinación de Protecciones.....	20
1.3.1 Criterios de Ajuste y Coordinación de Protecciones.....	21
1.4 Transitorios.....	22
1.5 Armónicos.....	23
1.5.1 Cálculo de Distorsión Armónica.....	24
1.5.2 Límites de Distorsión Armónica.....	25
1.5.3 Formas de Atenuar los Efectos Nocivos de los Armónicos.....	25

2. SISTEMA DE POTENCIA IEEE (14 NODOS)	27
2.1 Descripción del Sistema de Potencia de la IEEE de 14 Nodos.	27
2.1.1 Características Eléctricas del Sistema Potencia.	28
2.1.2 Parámetros Técnicos de Generadores.	28
2.1.3 Parámetros Técnicos de Transformadores.	29
2.1.4 Parámetros Técnicos de Líneas de Transmisión	30
3. DIGSILENT V14.	31
3.1 Power Factory	31
3.1.1 Generalidades.	32
3.1.2 Herramienta de Flujo de Carga.	33
3.1.2.1 Opciones Básicas	34
3.1.2.2 Control de Potencia Activa.	35
3.1.2.3 Opciones Avanzadas	36
3.1.2.4 Control de iteraciones	36
3.1.2.5 Salidas	36
3.1.2.6 Opciones Avanzadas de Simulación.	37
3.1.3 Herramienta de Corto Circuito	37
3.1.4 Herramienta de coordinación de protecciones.	38
3.1.4.1 Tipos de Relés.	39
3.1.4.1.1 Relé de Sobre Corriente.	39
3.1.4.1.2 Relé de distancia.	40
3.1.4.2 Coordinación de Protecciones	41
3.1.5 Herramienta de Transitorios	42
3.1.5.1 Función Básica	42
3.1.5.2 Función Trifásica.	43

3.1.5.3	Función de Transitorios Electromagnéticos.....	43
3.1.6	Herramienta de Armónicos	45
3.1.6.1	Creación de Fuentes de Armónicos	45
3.1.6.2	Procedimiento para Realizar Cálculo de Armónicos	46
3.2	DPL (DigSilent Programming Language)	47
3.2.1	Generalidades.....	47
3.2.2	Estructuración de DPL	48
3.2.3	Herramientas de DPL.....	50
3.2.3.1	Operadores Matemáticos.....	50
3.2.3.2	Comandos de lenguaje DPL.....	51
3.2.3.3	Herramientas de Estudio de Sistemas de Potencia.....	51
3.2.3.4	Filtros (SetFilt).....	52
3.2.3.5	Herramienta de Resultados (ElmRes)	53
3.2.3.6	Características (Cha*).....	53
3.2.3.7	Escala y trigger (TRy) (Cha*).....	54
3.2.3.8	Herramienta de Matriz (IntMat).....	54
4.	ESTRUCTURACIÓN DE GUÍAS	56
5.	CONCLUSIONES	57
6.	RECOMENDACIONES	58
	BIBLIOGRAFÍA.....	59
	ANEXO A	60
	ANEXO B	63

LISTA DE ILUSTRACIONES

ILUSTRACIÓN 1 BARRA DE ELEMENTOS DE DIGSILENT.	33
ILUSTRACIÓN 2. BARRA DE ESTUDIOS DE DIGSILENT.	33
ILUSTRACIÓN 3 CURVA DE RELÉ DE SOBRE TENSIÓN	39
ILUSTRACIÓN 4 CURVA DE RELÉ DE DISTANCIA	40
ILUSTRACIÓN 5 COORDINACIÓN DE PROTECCIONES	41
ILUSTRACIÓN 6. ESTRUCTURA DE UN DPL	48
ILUSTRACIÓN 7 INTERFAZ DE UN DPL	49
ILUSTRACIÓN 8 VENTANA DE CONTENIDOS DE DPL	51
ILUSTRACIÓN 10 VENTANA DE CREACIÓN DE FILTRO	52
ILUSTRACIÓN 11 HERRAMIENTA RESULTS	53
ILUSTRACIÓN 12 HERRAMIENTA DE ESCALA Y TRIGGER	54
ILUSTRACIÓN 13 HERRAMIENTA MATRIX.	55

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. LÍMITES DE DISTORSIÓN NORMA IEEE 519.	25
TABLA 2. CARACTERÍSTICAS DE LOS GENERADORES.	29
TABLA 3 CARACTERÍSTICAS DE LOS TRANSFORMADORES.	30

RESUMEN

Este proyecto establece y propone unas guías educativas que permiten a los estudiantes de ingeniería eléctrica de la universidad de La Salle tener una herramienta para el uso del software Digsilent v14, con enfoque en el comando DPL, el cual es de gran importancia en la formación íntegra como ingeniero electricista, específicamente en las aéreas de sistemas de potencia.

El desarrollo de este proyecto se da con base en un sistema de potencia eléctrico de prueba de la IEEE que permite efectuar diferentes tipos de estudios como análisis de cortocircuito, estabilidad y flujos de carga. Las simulaciones planteadas familiarizan a los estudiantes con el programa Digsilent v14, generando un ambiente amigable con el software. Los temas de las guías contemplan un alcance para que sean idóneas en materias como Sistemas de Potencia, Protecciones Eléctricas, Generación, Líneas de transmisión y distribución, entre otras.

La importancia de este proyecto, para un ingeniero electricista, radica en tener conocimiento teórico y técnico, el cual se puede adquirir por medio de las guías orientadas a desarrollar con este software. El proyecto fomentará en el estudiantado una iniciativa en el uso del software para procesos de diseños eléctricos, operación y planeamiento de sistemas de potencia.

INTRODUCCIÓN

Es importante que los ingenieros electricistas conozcan las diferentes herramientas que les permitan realizar estudios, análisis y labores de planeamiento de una manera más eficiente. El software especializado es una herramienta que permite agilizar procesos matemáticos o estadísticos para obtener los resultados en un menor tiempo. Uno de los procesos que demanda mayor número de operaciones matemáticas es el análisis de sistemas de potencia, ya que éste utiliza métodos matemáticos de solución como Gauss Seidel y Newton Raphson, que requieren cierto número de iteraciones para obtener los resultados. Cabe señalar que entre mayor sea el número de nodos; es decir, el tamaño del sistema de potencia, se necesitará de un mayor número de iteraciones, generando mayor tiempo y esfuerzo computacional para la producción de resultados.

Debido a la importancia de los sistemas eléctricos de potencia en la Ingeniería eléctrica, es necesario que los estudiantes de ingeniería busquen alternativas para reducir los tiempos de diseño y análisis de estos. Por ello la universidad de La Salle adquirió Digsilent v14. Este software es bastante utilizado por un número grande de electrificadoras en el mundo y, por supuesto en Colombia ya que cuenta con una alta confiabilidad en el mercado debido a la innovación en varios aspectos.

Existen diferentes paquetes de software especializado para el análisis de potencia que suplen las necesidades básicas en un sistema de potencia. Digsilent v14 aparte de realizar análisis de potencia, brinda características especiales como la generación automática de subestaciones basado en configuraciones básicas y de acuerdo a las necesidades requeridas, y la realización de cálculos de parámetros para líneas de transmisión. Adicionalmente genera gráficas y tablas propias para un reporte, lo cual permite que el estudiante desarrolle la habilidad de análisis de dichas gráficas.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Estructuración y desarrollo de guías educativas con el fin de fomentar el manejo del software Digsilent v14 con un enfoque en la herramienta DPL para sistemas de potencia.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Simular en Digsilent v14 el sistema eléctrico de potencia de prueba de la IEEE generando un reporte de los pasos necesarios para familiarizar al estudiante con la interfaz.
2. Realizar los estudios de Flujo de carga, cortocircuito, transitorios, coordinación de protecciones y estudio de armónicos en el sistema de potencia de potencia de prueba de la IEEE.
3. Estructurar scripts con la herramienta DPL para los distintos estudios analizados en el sistema de potencia de prueba de la IEEE.
4. Elaborar las guías con base a los análisis propuestos teniendo cuenta el sistema de potencia de prueba de la IEEE.

1. ESTUDIOS EN SISTEMAS DE POTENCIA

1.1 Flujo de Carga

Los sistemas de potencia sufren de grandes cambios durante su operación, estos cambios son provocados por circunstancias como por ejemplo aumento de carga, fallas, salida de generadores y salida de subestaciones entre otros. Estos, cambios provocan que los parámetros del sistema de potencia se modifiquen constantemente, por ello es necesario que los Ingenieros conozcan los parámetros adecuados del sistema para tomar los correctivos necesarios cuando los cambios sean muy bruscos.

El estudio de flujo de carga es una herramienta que permite conocer los parámetros del sistema en estado permanente, es decir; en un instante de tiempo único. Cuando se realiza un flujo de carga se obtienen los siguientes parámetros del sistema de potencia:

- Los valores de tensión tanto en magnitud como en ángulo de cada barra.
- Las potencias activas y reactivas inyectadas en cada barra.

Con los resultados que arroja el estudio de flujo de carga se pueden conocer las condiciones eléctricas del sistema de potencia, además permite evaluar aspectos como son:

- Pérdidas en las líneas de transmisión.
- Funcionamiento del sistema cuando salgan de operación generadores o subestaciones.
- Carga en los equipos de sistema de potencia.
- Análisis de contingencias.

Además de ello es posible conocer, por medio del estudio de flujo de carga, las posibilidades de expandir el sistema de potencia, para que no se vea afectado el correcto funcionamiento.

Antes de realizar un flujo de potencia es importante conocer la relación entre la potencia activa (MW) y la frecuencia (f). Esta relación muestra que a mayor potencia activa generada (MW) aumenta la frecuencia, así como también a mayor potencia reactiva generada (MVAR), la magnitud de la tensión, |V|, aumenta. La tensión |V| se ve afectada en zonas locales donde hay mayor Q, mientras que la frecuencia (f) si se modifica en todo el sistema de potencia.

El flujo de carga utiliza la ley de Ohm y las leyes de Kirchhoff para formular la ecuación principal para el estudio del flujo de carga que es:

$$I_{BUS} = [Y_{BUS}] * V_{BUS} \quad \text{o} \quad V_{BUS} = [Z_{BUS}] * I_{BUS}$$

Donde I_{BUS} = Vector de corrientes nodales

Y_{BUS} = Matriz de Admitancias

Z_{BUS} = Matriz de Impedancias

V_{BUS} = Vector de voltajes

1.1.1 Matriz de Admitancias

La matriz admitancias es de vital importancia para el desarrollo del flujo de potencia, de ahí la importancia de entender la manera más adecuada de obtener los valores que la conforman. La matriz de admitancia es una matriz cuadrada simétrica con un tamaño de $n \times n$ siendo n el número de nodos. Las componentes de la diagonal se obtienen sumando las admitancias que se encuentran conectados al nodo referido, y el resto de las componentes fuera de la diagonal se obtienen con el valor negativo de la admitancia entre los dos nodos. A continuación se presentan las ecuaciones para conformar la matriz de admitancias.

Elementos de la diagonal

$$Y_{ii} = \sum_{k=0}^n y_{ki} \quad (1)$$

Donde y_{ki} representa el nodo en estudio y k los nodos conectados a dicho nodo.
Elementos fuera de la diagonal

$$Y_{ij} = -y_{ij} \quad (2)$$

Donde i y j representan los nodos.

1.1.2 Definición de Barrajes

Para realizar un correcto estudio de flujo de carga es necesario nombrar las barras según su funcionalidad y sus incógnitas dentro del sistema de potencia; es decir:

Barra Slack: Ésta será la barra referencia del sistema y se fijarán el voltaje en magnitud y ángulo, teniendo como incógnitas las potencias activas y reactivas.

Barra PV: Tiene valor de potencia activa generada y la magnitud de la tensión, dejando como incógnitas la potencia reactiva y el ángulo de la tensión.

Barra PQ: También se conocen como barras de carga, las cuales tienen valores de potencia activa y reactiva consumida y con la incógnita de tensión, tanto en magnitud como en ángulo.

El cálculo de potencias complejas en el flujo de carga de una barra P a otra barra Q está dada por la siguiente ecuación:

$$S_{pq} = V_p I_{pq}^* = \left[Y_{pq}^* + \left(\frac{Y_{pq}'}{2} \right)^* \right] V_{pq}^2 - V_p V_q^* V_{pq}^* \quad (1)$$

Donde el subíndice indica el barraje.

1.1.3 Métodos de Solución para Flujos de Potencia

Luego de plantear el tipo de barras y de definir los valores de la matriz de admitancias y del vector de voltajes se procede a resolver el sistema utilizando métodos como Gauss-Seidel, Flujo D.C, Método desacoplado rápido y el más utilizado en los sistemas computacionales: Newton Raphson.

1.1.3.1 Método Gauss Seidel

El método de Gauss Seidel acelera la obtención de resultados en comparación con el método de Gauss ya que éste toma los resultados de la primera iteración y los utiliza para hallar los valores de las incógnitas faltantes, mientras que el Gauss los utiliza para hallar nuevamente los valores de las mismas incógnitas. La ecuación que utiliza el método de Gauss Seidel es:

$$\dot{V}_{pq}^{k+1} = \frac{1}{Y_{pp}} \left[\frac{P_p - jQ_p}{(V_p^k)^*} - \sum_{q=1}^{p-1} \dot{Y}_{pq} \dot{V}_q^{k+1} - \sum_{q=p+1}^n \dot{Y}_{pq} \dot{V}_q^k \right] \quad (2)$$

Es necesario tener en cuenta esta ecuación siempre y cuando el sistema de potencia cuente con barras de carga y flotantes. Para realizar el flujo de carga se asumen valores de tensión en las barras de carga y se procede a realizar las iteraciones hasta que converja. Posteriormente se utilizan los resultados para hallar las potencias. Cuando existen barras de generación (PV), es necesario calcular el valor de la potencia reactiva y para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q_p = -\text{Imag}\{V_p^* \sum_{q=1}^n \dot{Y}_{pq} \dot{V}_q\} \quad (3)$$

Es importante limitar la potencia reactiva de acuerdo con las restricciones del generador, definiendo las potencias reactivas mínimas y máximas. Esto permitirá mantener el valor de la magnitud del voltaje en estos nodos según lo señalado por el sistema.

En resumen, los pasos para utilizar el método de Gauss Seidel para resolver un flujo de carga son los siguientes:

1. Definir los valores de tensión en ángulo y voltaje para la barra de referencia, la magnitud de los voltajes y potencias en las barras PV, las potencias activas y reactivas de los nodos PQ y los parámetros para la matriz de admitancia.
2. El siguiente paso es suponer valores de magnitud y ángulo para los voltajes que no se tienen siendo práctico asumir valores de 1.0 p.u para la magnitud y de 0° para el ángulo.
3. Por medio de la ecuación (2) calcular los voltajes de las barras PQ.
4. Con la ecuación (3) calcular las potencias reactivas en los nodos PV y verificar si estas potencias están dentro de los límites de los generadores. (Si el valor de la potencia reactiva no está dentro de los límites del generador, se toma el valor de la potencia reactiva excedida (Q) y se utiliza en la ecuación (2)).
5. Calcular tensiones en las barras de carga y con la ecuación (1) se calculan las potencias inyectadas del sistema.

1.1.3.2 Método Newton Raphson

Este método es el más utilizado para resolver flujos de carga de sistemas de potencia reales, por ende es el método utilizado por los diferentes paquetes computacionales especializados. Este método se basa en las serie de Taylor, tomando como referencia los valores de potencia especificados y comparándolos con los calculados para hallar el error y corregir los valores de los fasores. Para este método es necesario conocer, en cada iteración, el valor de la potencia activa y reactiva, para ello se utilizan las siguientes ecuaciones.

$$P_p = \sum_{q=1}^n V_p V_q (G_{pq} \cos \theta_{pq} + B_{pq} \sin \theta_{pq}) \quad (4)$$

$$Q_p = \sum_{q=1}^n V_p V_q (G_{pq} \sin \theta_{pq} + B_{pq} \cos \theta_{pq}) \quad (5)$$

Estas potencias son necesarias para poder utilizar la ecuación general de Newton Raphson que es:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta^k \\ \Delta V^k \end{bmatrix} = -[J^k]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P^k \\ \Delta Q^k \end{bmatrix} \quad (6)$$

Donde ΔP^k y ΔQ^k hacen referencia a la resta de la P y Q especificada y la P y Q calculada.

La matriz Jacobiana es una matriz cuadrada que se puede dividir en cuatro matrices que son:

$$-[J^k]^{-1} = \begin{bmatrix} H & N \\ M & L \end{bmatrix} \quad (7)$$

Estas matrices están dadas por las diferentes variaciones que tiene el sistema y sus tamaños se dan teniendo en cuenta el número de nodos(n) y el número de nodos de carga (m).

$$H_{pq} = \frac{\partial \Delta P_p}{\partial \theta_q}, \text{ Tama\~{n}o} = (n-1) \times (n-1)$$

$$M_{pq} = \frac{\partial \Delta Q_p}{\partial \theta_q}, \text{ Tama\~{n}o} = m \times (n-1)$$

$$N_{pq} = V_q \frac{\partial \Delta P_p}{\partial \theta_q}, \text{ Tama\~{n}o} = (n-1) \times m$$

$$L_{pq} = V_q \frac{\partial \Delta Q_p}{\partial \theta_q}, \text{ Tama\~{n}o} = m \times m$$

En resumen, los pasos que se requieren para resolver un flujo de carga por el método de newton Raphson son los siguientes:

1. Se establecen los valores iniciales del sistema como los son voltajes y potencias.
2. Se asumen voltajes para todos los nodos donde no se especifiquen en las condiciones iniciales.

3. Se hallan las potencias calculadas y se encuentran los ΔP y ΔQ . Si el error es bajo se halló la solución.
4. Si el error es alto se hallan los valores de la matriz jacobiana y se calculan nuevamente los voltajes hasta disminuir el error.

1.1.3.3 Método de Newton Raphson Desacoplado

Este método se desprende del método de Newton Raphson, con ciertas diferencias que permiten resolver sistemas de potencia con un gran número de barras de una manera más rápida.

La principal diferencia se da ya que el método de Newton Raphson maneja una matriz Jacobiana, la cual está subdividida en cuatro matrices, en cambio en el método de Newton Raphson desacoplado se eliminan dos matrices; N y M. Pero esto es posible ya que la variación del ángulo no afecta en gran medida a la potencia reactiva en líneas de transmisión (M), así como también las variaciones de la magnitud del voltaje afectan en muy poco la potencia activa en las barras (N). Por ello la ecuación para el método se podría definir así:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial \Delta P}{\partial \theta} & 0 \\ 0 & V \frac{\partial \Delta Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \frac{\Delta V}{V} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \frac{\Delta V}{V} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Este método se basa en el cálculo en cada iteración de las potencias activas y reactivas las cuales van disminuyendo el valor de error de la tensión calculada. Aunque puede requerir de más iteraciones si es menos extenso ya que son menos las matrices y por ende las operaciones matemáticas son más fáciles. El resto del método se opera de igual forma en el método Newton Raphson.

1.1.3.4 Método de Newton

En muchas ocasiones se tiende a pensar que este método es utilizado exclusivamente para sistemas de potencia que operen con corrientes continuas, pero es erróneo ya que su aplicación está fundamentada en corrientes alternas. Este método es bastante útil y rápido ya que sus operaciones matemáticas se hacen con números reales pero en sus resultados sólo se obtiene potencia activa y no reactiva. Para realizar el flujo de carga por este método es necesario asumir algunos valores como por ejemplo:

Las tensiones en las barras son iguales a la nominal; es decir, 1 p.u, las diferencias angulares en las barras son muy pequeñas, la resistencia de las líneas es despreciable frente a la reactancia. De esto se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$G_{ik} = \frac{R_{ik}}{R_{ik}^2 + X_{ik}^2} = 0 \quad (9)$$

$$B_{ik} = \frac{-X_{ik}}{R_{ik}^2 + X_{ik}^2} = \frac{-1}{X_{ik}} \quad (10)$$

$$P_p = \sum_{q=1}^n \frac{\theta_p - \theta_q}{X_{pq}} \quad (11)$$

Con estas ecuaciones es posible armar la ecuación del flujo DC, la cual contiene los vectores de potencia, ángulo y la matriz de susceptancias, teniendo en cuenta que los valores de B se hacen cero cuando p o q son el nodo de referencia.

$$[P] = [B][\theta] \quad (12)$$

$$[\theta] = [B]^{-1}[P] \quad (13)$$

En resumen, lo primero que se debe hacer para realizar un estudio de flujo de potencia por este método es hallar los valores de la matriz de susceptancias con la ecuación (10) teniendo en cuenta el nodo de referencia, luego hallar los valores de la potencia con la ecuación (11) y por último hallar los valores de los ángulos de la tensiones con la ecuación (13).

1.2 Análisis de Corto Circuito

Un cortocircuito es una falla en el sistema eléctrico que produce un incremento brusco en la corriente debida a un contacto entre una fase o fases a tierra o bien entre fases. Las fallas pueden presentar daños en equipos, por causa de factores atmosféricos, también por descargas eléctricas sobre líneas, entre otros. Su presencia no es predecible así como su ubicación que se presentará en un punto genérico de la red eléctrica. Cuando tal defecto se produce en sistemas de potencia, dicho contacto tiene lugar a través de un arco eléctrico por contacto directo entre conductores o bien entre conductores y tierra con las consecuencias correspondientes al mismo; como son daños a equipos, instalaciones o personal.

El análisis de cortocircuito tiene como aplicación la selección de las protecciones eléctricas del sistema eléctrico, niveles de cortocircuito, dimensionamiento de las mallas a tierra, capacidad térmica de cables; así como también la verificación del nivel de cortocircuito en determinados puntos del sistema eléctrico de potencia.

Los valores de corriente de cortocircuito a considerar son:

- La corriente máxima de cortocircuito: Con ella se puede determinar el dimensionamiento del equipo de protección, cálculo de ajuste de protecciones y dimensionamiento de puesta a tierra. Esta corriente máxima de cortocircuito se obtiene cuando en el sistema se tiene el mayor número de fuentes de generación operando.
- La corriente mínima de cortocircuito: Puede utilizarse para realizar verificaciones del ajuste de protecciones y se obtiene cuando el sistema se encuentra operando con el menor número de fuentes de generación.

Los análisis de cortocircuito se necesitan para el diseño de sistemas de potencia, por ejemplo en el dimensionamiento de los equipos. La selección de los equipos que conforman la red no sólo depende de los requerimientos en tensión y corriente en estado estable, sino de los requerimientos en tensión y corriente durante

eventos de cortocircuito. Las aplicaciones típicas de ingeniería donde se requiere el análisis de cortocircuito son:

- Estudiar fallas comparadas con la apertura y cierre de interruptores
- Verificación de la Soportabilidad térmica de los componentes del sistema de potencia
- Selección y ajuste de los dispositivos de protección
- Dimensionamiento de los equipos de puesta a tierra y a neutro y diseño de la malla de tierra de subestaciones.
- Estudiar problemas entre los circuitos del sistema de potencia y los circuitos de comunicación.
- Determinación de los esfuerzos de construcción mecánicos.

El cortocircuito es básicamente un fenómeno de relativa corta duración, ya que los dispositivos de protección aislarán la falla del elemento en 2 o 3 segundos. Hay dos tipos de impedancias entre el FEM equivalente del sistema de potencia y la ubicación de la falla:

- Impedancias de equipos o componentes no rotativos, como alimentadores y transformadores
- Impedancias variables de máquinas rotativas

El comportamiento de la máquina sincrónica durante el cortocircuito puede describirse por tres incrementos sucesivos de los valores de la reactancia del devanado del estator:

- Las reactancias subtransitorias X_d'' y X_q'' , las cuales determinan el flujo de corriente durante los primeros ciclos.
- Las reactancias transitorias X_d' y X_q' , las cuales puede presentarse entre los periodos subtransitorios y de estado estable, dependiendo del diseño de la máquina.

- Las reactancias sincrónicas X_d y X_q , las cuales determinan el flujo de corriente en estado estable.

De acuerdo con la variación de la reactancia definida anteriormente, los valores de las corrientes de cortocircuito son:

- I_k'' , corriente de cortocircuito subtransitoria
- I_k' , corriente de cortocircuito transitoria
- I_k , corriente de cortocircuito de estado estable.

El cálculo de las corrientes de cortocircuito es básicamente por un cálculo en régimen transitorio y podría requerir la solución de ecuaciones diferenciales; sin embargo, en la práctica, para las aplicaciones mencionadas anteriormente, el cálculo de la corriente subtransitoria I_k'' en estado estable tiene la precisión suficiente. Las otras dos corrientes se pueden calcular a partir de I_k'' , aplicando unos factores.

1.2.1 Fallas Simétricas

Las fallas simétricas se deben a eventos en los cuales las tres fases del sistema son iguales en el instante del corto circuito, por ejemplo, cuando se ponen en contacto las tres fases en un mismo punto del sistema. Este tipo de falla es el más severo en la mayoría de los casos. Por otro lado, otro tipo de falla simétrica se debe a cuando las tres fases y tierra se ponen en contacto en un mismo punto del sistema. Esta falla no es muy común, dado que en el momento que se pongan a tierra tendrá que ser al mismo tiempo y que la impedancia de la tierra permanezca constante.

1.2.2 Fallas Asimétricas

Son eventos en los cuales la corriente en las tres fases es diferente en el momento que se presenta la falla y se obtiene un desbalance en la corriente en las tres fases. Este tipo de falla es la más presentada en los sistemas de potencia. Una de ellas es el corto circuito fase a fase; esta falla se presenta cuando se ponen en contacto directo o indirecto dos fases cualesquiera del sistema. De igual manera se comporta el cortocircuito bifásico a tierra o de dos fases a tierra. La trayectoria a tierra puede o no contener una impedancia, esto conlleva a que se otorgue una impedancia de falla igual a cero, generalmente es así debido a la dificultad para obtener dicho valor. Además al considerar la impedancia de falla cero se da un margen de seguridad en la obtención de la corriente de falla. La impedancia de falla es determinada por los Operadores de Red a través de ensayos experimentales.

1.3 Coordinación de Protecciones

En el sistema de protección se debe considerar un arreglo el cual esté totalmente adaptado a todas las condiciones de operación normal del sistema eléctrico y además de ello, se requiere una coordinación para asegurar que los eventos de fallas y eventos anormales que se presenten en el sistema sean aislados afectando en mínimo las partes sanas.

Coordinar las protecciones se refiere a definir tiempos de operación de la protección para permitir la actuación debidamente del relé de protección, minimizando los tiempos de actuación y garantizando una apropiada graduación en los tiempos de actuación de todas las protecciones, tanto principales como de respaldo.

1.3.1 Criterios de Ajuste y Coordinación de Protecciones

Para garantizar una adecuada coordinación de protecciones en un sistema eléctrico se requiere que las protecciones principales y de respaldo sean protecciones unitarias; es decir, solamente requieran ajustes con respecto a las características de operaciones de cada relé. Además de ello las protecciones principales y de respaldo sean protecciones graduadas, esto hace referencia a que puedan ser ajustadas y coordinadas de acuerdo a las exigencias del sistema eléctrico. El ajuste de las protecciones está determinado por la capacidad y el comportamiento de los equipos e instalaciones del sistema eléctrico, para ello se deben considerar las condiciones de operación del sistema.

Para realizar la coordinación de protecciones es necesario tener la corriente de cortocircuito de los transformadores, corriente de carga de las líneas de transmisión y las corrientes de arranque de los grandes motores. También se deben considerar las posibles sobrecargas que tenga el sistema eléctrico, de acuerdo a sus capacidades de diseño. De esta manera se definen los ajustes de protección que representan los umbrales de estas capacidades con un cierto margen de seguridad.

Se debe definir la operación de los relés de protección para detectar las fallas, el funcionamiento anormal del sistema y las condiciones indeseadas de los equipos. El ajuste y la coordinación de la protección deben tener las siguientes características:

- Sensibilidad para detectar las condiciones por muy pequeñas que éstas sean.
- Velocidad para detectar las condiciones lo más pronto posible.

1.4 Transitorios

Un sistema de potencia está en una condición de operación de estado estable si todas las cantidades físicas que se miden (o se calculan) y que describen la condición de operación del sistema, se pueden considerar constantes para propósitos de análisis.

Si, estando en una condición de estado estable, ocurre un cambio repentino o una secuencia de cambios en uno o más parámetros del sistema, o en una o más de sus cantidades de operación, se dice que el sistema experimenta una perturbación de su condición de operación de estado estable.

Las perturbaciones pueden ser grandes o pequeñas de acuerdo con su origen. Una perturbación grande es aquella para la cual las ecuaciones no lineales que describen la dinámica del sistema de potencia no se pueden linealizar de forma válida para los propósitos de análisis. Las fallas en los sistemas de transmisión, los cambios repentinos de carga, las pérdidas de unidades generadoras y las maniobras en líneas son ejemplos de perturbaciones grandes. Si el sistema de potencia está operando en una condición de estado estable y experimenta un cambio que se pueda analizar de manera apropiada a través de versiones linealizadas de sus ecuaciones dinámicas diferenciales se dice que ha ocurrido una perturbación pequeña.

Un ejemplo de una perturbación pequeña puede ser el cambio en la ganancia de un regulador automático de voltaje en el sistema de excitación de una gran unidad generadora. El sistema de potencia es estable para una condición de operación particular si, después de ocurrir una perturbación pequeña, regresa esencialmente a la misma condición de operación de estado estable. Sin embargo, si después de un disturbio grande, se alcanza una condición de operación significativamente diferente, pero de estado estable aceptable, se dice que el sistema es transitoriamente estable.

En todos los estudios de estabilidad, el objetivo es determinar si los rotores de las máquinas que están siendo perturbadas regresan a una operación con velocidad constante.

1.5 Armónicos

El estudio de armónicos en los sistemas de potencia ha ido tomando día a día más importancia debido a que la cantidad de cargas no lineales conectadas a ellos ha ido aumentando de una manera acelerada. Existen grandes perjuicios que generan los armónicos en los sistemas de potencia como por ejemplo la reducción en la eficiencia de los sistemas de generación y de transporte, mayor desgaste del aislamiento de los componentes de la red, mal funcionamiento del sistema o de alguno de sus componentes, paros de servicio no deseados y, por supuesto, mayores pérdidas.

Las cargas no lineales son especialmente cargas basadas en electrónica de potencia. Los variadores de velocidad, convertidores, rectificadores, equipos de soldadura, hornos de arco, balastos de lámparas fluorescentes son algunos ejemplos de elementos generadores de armónicos, estos equipos son utilizados por industrias durante su funcionamiento. También existen otras fuentes de armónicos en los sistemas que no son precisamente cargas como diodos, semiconductores o transformadores saturados o grandes corrientes en el neutro.

Los armónicos se definen como tensiones o corrientes sinusoidales cuya frecuencia es múltiplo entero de la frecuencia fundamental de alimentación del sistema. Los armónicos tienen un orden, que es la relación entre la frecuencia del armónico y la frecuencia del fundamental; es decir, cuando la frecuencia de alimentación es de 60 Hz la frecuencia de los armónicos son 3° orden de 180 Hz, 5° orden 300 Hz , el de 7° orden 420 Hz, etc.

El tercer armónico tiene unas características especiales que son bastantes nocivas en los sistemas eléctricos. Existen diferentes fuentes de este tipo de armónicos como por ejemplo balastros electrónicos o cargas desbalanceadas. Estos armónicos pueden aumentar la corriente en el neutro aún por encima de la corriente nominal. Este armónico no existe cuando el sistema no cuenta con el neutro. En el caso del quinto armónico este no se desplaza por el neutro sino que lo hace por las tres fases. Este tipo de armónicos genera resonancia entre los elementos inductivos y los capacitivos, aunque su efecto es más dañoso para los condensadores, provocando en muchos casos la ruptura del dieléctrico.

1.5.1 Cálculo de Distorsión Armónica

Una de las maneras de calcular la distorsión armónica del sistema es encontrando la distorsión individual generada por cada una de las ondas. La distorsión individual está dada por la ecuación:

$$V_n \% = \frac{V_n}{V_f} * 100 \quad (14)$$

Donde V_n =Valor del voltaje de orden n

V_f =Valor del voltaje de la fundamental

Para hallar la distorsión armónica total se utiliza la siguiente ecuación:

$$THDV\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{40} V_n^2}}{V_f} * 100 \quad (15)$$

Estas mismas ecuaciones se utilizan para calcular la distorsión armónica individual y total de la corriente.

1.5.2 Límites de Distorsión Armónica

Los armónicos son perjudiciales para los sistemas eléctricos cuando aumentan la tensión o la corriente de manera que saturan o alteren el funcionamiento normal de los equipos. La IEEE 519 y la IEC 61000-3-4 muestran unos límites permisivos de distorsión armónica, con los cuales los efectos de los armónicos sobre el sistema eléctrico son tolerables.

Tabla 1. Límites de distorsión Norma IEEE 519.

Voltaje de barra en PCC	Distorsión de voltaje individual% V_n %	Distorsión de voltaje total% THDV
<69 kV	3.0	5.0
69001 V a 161 kV	1.5	2.5
161001<	1.0	1.5

Fuente: Autor. Norma IEEE 519.

1.5.3 Formas de Atenuar los Efectos Nocivos de los Armónicos

Es imposible eliminar los armónicos ya que como ya se mencionó antes, son producidos por las cargas no lineales, estas cargas son necesarias para el funcionamiento de industrias o inclusive de equipos en las viviendas. La solución no debe ser salir de la fuente aunque en algunos casos se debe estudiar esta posibilidad, sino que más bien se deben diseñar mecanismos para atenuar sus efectos.

Una inspección previa al sistema eléctrico es muy importante para tomar acciones correctivas para mitigar los armónicos. Allí se deben identificar parámetros como sistemas de puesta a tierra, cargas desbalanceadas y conexiones del sistema. Uno de los métodos más utilizados para mitigar el efecto de los armónicos son la instalación de filtros pasivos, activos e híbridos. Estos filtros son conectados en paralelo a la carga generadora de armónicos, en el caso de los filtros pasivos estos poseen una baja impedancia lo que facilita que la corriente de los armónicos fluya por ellos. En el caso de los filtros activos, estos generan una corriente que se contrapone a la corriente de los armónicos cancelándolos, no obstante estos requieren consumir potencia del sistema y son más costosos pero a su vez más eficientes.

2. SISTEMA DE POTENCIA IEEE (14 NODOS)

2.1 Descripción del Sistema de Potencia de la IEEE de 14 Nodos.

El sistema de potencia de prueba de la IEEE de 14 nodos, corresponde a una parte del sistema de potencia eléctrico americano, más exactamente de la parte medio oeste de EE.UU del año de 1962. El sistema se encuentra referenciado en la página de la Universidad (University of Washington Electrical Engineering), allí se encuentran los resultados de un flujo de potencia, como lo son, potencias y voltajes. También se estipulan los valores de resistencias, reactancias y susceptancias de las líneas de transmisión, valores necesarios para el análisis de sistemas de potencia. Cabe resaltar que para este caso no existen límites en la capacidad de transmisión de las líneas.

El sistema de prueba de la IEEE posee una potencia de 300 MVA, con voltajes de 230 kV y 115 kV. Cuenta con dos barrajes de generación, el primero de 260 MW y el segundo de 40 MW. En los barrajes cuatro y cinco se encuentran sistemas de transformación, también cuenta con bancos de condensadores en los barrajes 3, 6 y 8.

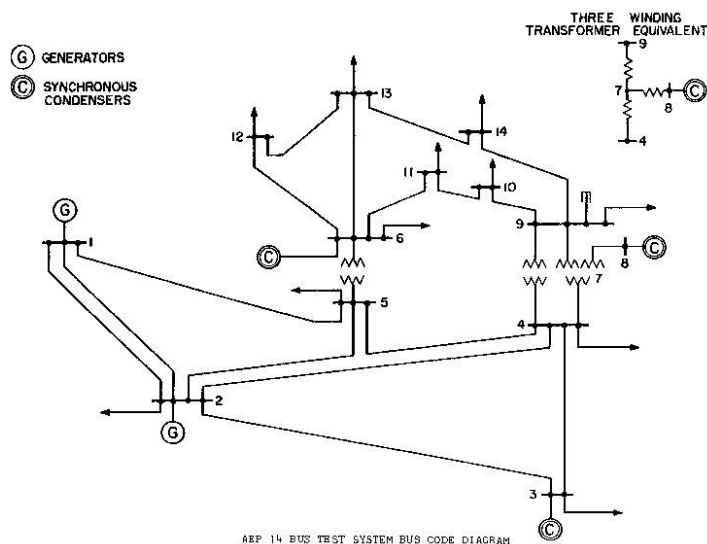


Ilustración 1. Sistema de Potencia de Prueba de la IEEE 14 Nodos.

2.1.1 Características Eléctricas del Sistema Potencia.

Basado en el formato de datos comunes de IEEE (IEEE Common Data Format), se identifica en el sistema de potencia de la IEEE de 14 nodos, que en el barraje 1 se establece el nodo slack o nodo de referencia, el cual controla el voltaje y ángulo del mismo, este barraje tiene un generador de 240 MW. Adicionalmente se tienen cuatro nodos de PV en los nodos 2,3,8 y 10, siendo el nodo 2 el único que genera potencia activa con 40 MW y en los nodos 3,8 y 10 potencia reactiva de 23.4, 12.2 y 17.4 MVAR respectivamente. Los demás nodos son de tipo PQ.

El sistema de potencia de la IEEE de 14 nodos maneja dos niveles de tensión que no son definidos en la información registrada en la documentación; sin embargo, el registro muestra en qué barrajes se encuentran los niveles de tensión (Alta Tensión AT, Baja Tensión BT). Debido a esto se asumieron 230 kV para AT y 115 kV para BT.

2.1.2 Parámetros Técnicos de Generadores.

En los modelos comunes, las características técnicas de los generadores comerciales, no son comunes generadores que dispongan niveles de tensión altos en sus terminales. En base a esto se planteó en el sistema de potencia, un modelo de generación para el nodos 1 y 2 como se puede observar en cualquier sistema de generación real; generando a un nivel de tensión de 13.8 kV y adicionando un transformador que eleve dicha tensión al nivel de tensión de 230 kV que se ha asumido anteriormente.

Las características de los generadores utilizados en el sistema de potencia de la IEEE corresponden a generadores en Colombia. La tabla N°1 muestra sus características. Teniendo en cuenta que el generador uno cuenta con dos unidades y es el utilizado en la unidad uno de Chivor, el segundo corresponde al generador de Termocartagena.

Tabla 2. Características de los Generadores.

	Generador Nodo 1	Generador Nodo 2
Potencia nominal [MVA]	140	88,24
Voltaje Nominal [V]	13,8	13,8
F.P	0,9	0,85
X₀ [%]	12	9,1
X_d' [%]	30	21
X_d'' [%]	17	13
X₂ [%]	18	12
X_d [%]	92	203
X/R	84,21	102,7

2.1.3 Parámetros Técnicos de Transformadores.

A continuación se describen los 5 transformadores utilizados en el sistema de potencia. Para el sistema de generación, se utilizan dos transformadores que eleven el voltaje con el fin de garantizar el voltaje base del sistema de potencia de la IEEE. Estos transformadores contienen las características de los sistemas de generación de Chivor (G1) y Termocartagena (G2). [8]

En la tabla siguiente se encuentran descritos los transformadores, mencionados anteriormente:

Tabla 3 Características de los Transformadores.

Trasformador	G1	G2	Nodo 5-6	Nodo 4-9	Nodo 4-9-8
Potencia Nominal[MVA]	162	78	90	90	150
Voltaje nominal [KV]	13.8/230	13.8/230	115/230	115/230	13,8/115/230
Conexión BT/AT	D/YN	D/YN	YN/YN	YN/YN	D/YN/YN
Voltaje adicional por tap	2.5%	2.5%	1.25%	1.25%	0,96%
Min tap/Max Tap	-2/2	-6/2	-4/8	-4/8	-16/10

2.1.4 Parámetros Técnicos de Líneas de Transmisión

La IEEE registra los datos de resistencia, reactancia y susceptancia de las líneas de transmisión de 230 kV y 115 kV, aunque no presenta datos de secuencias positivas o negativas necesarias para realizar estudios como armónicos. Por esta razón se toman líneas reales del sistema de potencia Colombiana con características similares a las expuestas en la IEEE. Estos datos están registrados en el Anexo 1.

3. DIGSILENT V14

DigSilent V14 es un software especializado en análisis de sistemas de potencia, es muy apetecido y requerido por los operadores de red debido a la gran versatilidad que presenta. Este software permite que el usuario tenga un mayor grado de interacción con los sistemas de potencia ya que contiene herramientas que facilitan la manipulación de los resultados obtenidos en cada análisis. Aunque existen otros software que realizan los diferentes análisis a los sistemas de potencia como por ejemplo flujos de carga, análisis de corto circuito, simulación de armónicos, coordinación de protecciones, etc. Digsilent brinda una herramienta sofisticada que permite no solo realizar estos análisis sino que además permite manejar los resultados obtenidos en un DPL donde el usuario puede compararlos y operarlos. DigSilent se podría dividir en dos grandes partes. La primera es la sección Power Factory que es la parte gráfica del software y la segunda que es el comando DPL que es la parte operativa que se encarga de automatizar las herramientas de Power Factory y desarrollar aplicaciones personalizadas.

3.1 Power Factory

Power Factory es la parte gráfica de DigSilent. Esta herramienta permite generar diagramas unifilares de los sistemas de potencia. Power Factory brinda diferentes herramientas para insertar transformadores, generadores, líneas de transmisión y demás objetos necesarios en los sistemas de potencia. Una gran ventaja que se obtiene al utilizar DigSilent es la facilidad al crear los elementos del sistema de potencia con los requerimientos necesarios para cada proyecto. El software cuenta también con diferentes cargas como máquinas síncronas, asíncronas o simples cargas con valores definidos por los usuarios.

Power Factory presenta varias herramientas que permiten el análisis de los sistemas de potencia, estas permiten manipular los sistemas de potencia en

diferentes escenarios. Cuenta con herramientas para realizar estudios de flujo de carga, corto circuito, armónicos, transitorios, coordinación de protecciones. Estas herramientas están definidas bajo normas internacionales como la ANSI o IEC, lo cual permite al usuario saber si los resultados obtenidos en cada estudio están dentro de los límites establecidos en las normas.

3.1.1 Generalidades

Es importante, antes de abordar los estudios requeridos en los sistemas de potencia, conocer un poco sobre algunos aspectos que presenta DigSilent V14. Power Factory cuenta con dos secciones: la sección superior es la que se utiliza para graficar el diagrama unifilar y la sección inferior muestra los resultados o errores que presentan la simulación. El primer paso para comenzar la construcción del caso de estudio es crear un proyecto dentro del Data Manager y definir la frecuencia de la red. Posteriormente se procede a construir el diagrama unifilar con los iconos mostrados en la figura N° 2 que hacen referencia a los elementos del sistema de potencia como lo son transformadores, líneas, máquinas síncronas, barras etc. Es importante definir las especificaciones técnicas de cada uno de estos elementos, esto se puede lograr generando un nuevo proyecto de líneas, generadores, transformadores, etc., o también cargando elementos de las librerías que ofrece el software.

Una de las ventajas que tiene DigSilent es el manejo de escenarios. Estos permiten crear diferentes condiciones para el sistema de potencia; es decir, en algún caso adicionar cargas, en otros líneas, o diferentes objetos. Esto permite analizar y comparar las variaciones que sufre el sistema de potencia en cada caso.

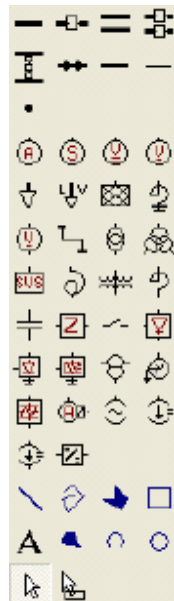


Ilustración 1 Barra de elementos de DigSilent.




En la Ilustración 3 representa la barra de estudios que ofrece DigSilent, en la cual se puede observar la herramienta de flujo de carga , cortó circuito  o acceso a comandos DPL .




Ilustración 2. Barra de estudios de DigSilent.

3.1.2 Herramienta de Flujo de Carga

Esta herramienta permite realizar el estudio de flujo de carga, arrojando resultados como la potencia activa (MW) y potencia reactiva (MVA_r) a través de los distintos elementos del sistema de potencia, también registra las tensiones y ángulos de todas las barras. Con los resultados del flujo de carga se pueden analizar la posición óptima de los taps, la carga de los generadores, transformadores y líneas de transmisión y además las pérdidas en el sistema de potencia.

Para realizar el flujo de carga, las máquinas sincrónicas (generadores) deben ser ajustadas definiendo una de las siguientes características de control:

- Máquina de referencia, control de tensión (IVI,) (Slack, SL) Por lo general un solo generador.
- Voltaje constante, potencia activa constante (PV). Por lo general todos los demás generadores.

Existen dos maneras de correr el flujo de potencia en DigSilent ya sea desde el menú principal (calculo ← Flujo de carga) o con el link . Con esta opción se accede a la pantalla flotante del flujo de carga y sus opciones respectivas, como lo son flujo de carga con dependencia de la tensión, adaptación automática de modelos, sistemas balanceados o desbalanceados, ajuste automático de taps de transformadores, etc. A continuación se describen las configuraciones más importantes que presenta Digsilent para realizar el flujo de carga.

3.1.2.1 Opciones Básicas

Esta ventana presenta cinco pestañas, en la primera se encuentra el método de cálculo, allí se define qué tipo de cálculo se desea realizar, ya sea AC con carga balanceada y secuencia positiva, DC con carga lineal DC o AC con carga desbalanceada y secuencia ABC. Para esta opción es necesario haber habilitado la opción de desbalance de las cargas previamente.

La siguiente división presenta el control de potencia reactiva. Allí se define si el control de los taps del transformador y los shunts sea automático, pero esta opción se puede ejecutar siempre y cuando se hallan habilitado en cada uno de los elementos. También cuenta con la opción de considerar los límites de potencia reactiva de los generadores para que durante el flujo no sean excedidos, pero en caso de que se superen se mostrará un mensaje.

La tercera división define las opciones de carga, se pueden habilitar opciones como cargas dependientes de la tensión, escalonamiento de cargas de alimentadores (tienen que ser previamente definidas en los elementos), factores de coincidencia de cargas de baja tensión. Esta opción realiza el cálculo del flujo de carga en baja tensión, considerando los factores de coincidencia, para producir las máximas corrientes de rama y la máxima caída de voltaje.

También presenta, en la cuarta división, el factor de escala. Es el factor por el cual se multiplica la potencia de calefacción almacenada de noche para todas las cargas en baja tensión y por último se define la temperatura de operación de las líneas.

3.1.2.2 Control de Potencia Activa

En esta ventana se cuenta con tres diferentes secciones que permiten definir como se desea que se controle la potencia activa del sistema. En la primera sección se define si el control de la potencia activa va a ser por despacho, por control secundario, por control primario según cargas desbalanceadas, o si se hace por inercia teniendo en cuenta los límites de los generadores. En la segunda sección se define cual es el elemento de equilibrio del sistema.

3.1.2.3 Opciones Avanzadas

Esta ventana permite definir qué método utilizar para realizar el flujo de carga, ya sea por Iteración de corriente, Newton Raphson o por Newton Raphson clásico, también se puede definir si se requiere que el control de los taps sea directo; es decir, que se muestra el modelo del tap en el flujo o escalonado donde se realizan flujos de carga con taps fijos y se van variando para observar las desviaciones de voltaje.

3.1.2.4 Control de iteraciones

DigSilent cuenta con esta opción que permite definir el número de iteraciones, normalmente estas no exceden las 55 iteraciones en sistemas de potencia grandes. En esta opción también se pueden definir los errores máximos permisibles con lo cual se podrían obtener resultados más rápidos en sistemas que no converjan rápidamente. La opción de adaptación del modelo automático para convergencia habilita a DigSilent para cambiar algunos parámetros del modelo matemático que permitan ser más lineales y así encontrar una solución de flujos de carga en caso que con los métodos tradicionales no lo logre.

3.1.2.5 Salidas

En esta ventana se pueden modificar los valores de tensión mínimos y máximos en p.u en las barras, además se puede modificar la máxima carga de los elementos de sistema de potencia. Adicionalmente cuenta con la opción de mostrar reportes sobre el progreso de la convergencia.

3.1.2.6 Opciones Avanzadas de Simulación

La herramienta de flujo de carga permite habilitar o deshabilitar los elementos de protección y de control para realizar el estudio.

3.1.3 Herramienta de Corto Circuito

El programa DigSILENT *PowerFactory* ofrece cuatro métodos de cortocircuito: Norma Alemana VDE 0102, Norma Internacional 60909, Norma ANSI e IEEE C37 y método completo, la cual es la combinación de las normas IEC 60909 o ANSI. Dependiendo del método a escoger DigSilent puede calcular los siguientes tipos de fallas:

- Cortocircuito trifásico
- Cortocircuito bifásico
- Cortocircuito monofásico – fase a tierra
- Cortocircuito con dos fases a tierra
- Cortocircuito con una fase y el neutro
- Cortocircuito con dos fases a neutro
- Cortocircuito con dos fases neutro a tierra
- Cortocircuito con tres fases a neutro

En cada tipo de falla se pueden calcular las máximas y mínimas corrientes de cortocircuito, dependiendo de la necesidad del usuario. Estas dos corrientes son muy usadas cuando se requiere hallar redes equivalentes. La Máxima tolerancia de tensión se basa de acuerdo con las normas VDE e IEC, esta tolerancia de tensión se usa para definir separadamente el factor C (constante) para cortocircuitos en baja tensión. DigSilent tiene la habilidad que escoge el reporte de

texto en la ventana de salida. El usuario puede configurar la forma como desee que salga el reporte utilizando la opción "Command", flecha azul.

Las opciones de falla se pueden escoger entre calcular el cortocircuito en todas las barras y terminales, seleccionar una barra en particular o una falla en una selección de barras.

3.1.4 Herramienta de coordinación de protecciones

DigSilent V14 permite coordinar protecciones de una manera ágil, teniendo en cuenta las curvas características de los diferentes relés para cada uno de los equipos. El software posee información de relés de diferentes marcas con características reales que permiten modificar algunos parámetros para adecuarlos a los requerimientos necesarios.

Para la coordinación de protecciones en DigSilent se requiere crear equipos de medición, CT's, PT's y relés, tal como se hace en la realidad. Esto permite tener un mayor grado de exactitud en el momento de obtener los resultados, ya que permite evaluar cada uno de los parámetros de los equipos.

Los CT's y PT's que se requieren para la coordinación de protecciones, son los que permiten, tomar la señal de corrientes y tensiones de los equipos. En estos equipos se pueden modificar parámetros como el burden, la potencia, tap's, etc.

3.1.4.1 Tipos de Relés

En la coordinación de protecciones se requieren diferentes tipos de relés, Digsilent cuenta con varios relés con diferentes características, pero adicionalmente es posible insertar cualquier tipo de relé.

3.1.4.1.1 Relé de Sobre Corriente

El software permite crear relés de sobre corriente sobre cualquier interruptor dentro del sistema de potencia. Dentro de los relés se establecen parámetros como tiempo del dial, rango de corriente, corriente pickup, tiempo de pickup, entre otros.

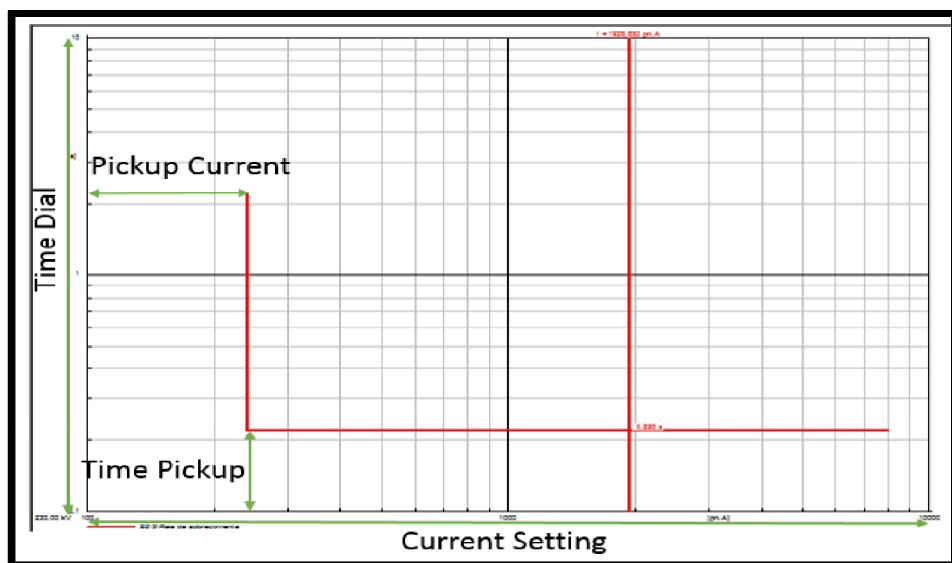


Ilustración 3 Curva de relé de sobre tensión

3.1.4.1.2 Relé de distancia

Los relés de distancia son elementos que se utilizan principalmente para la protección de líneas de transmisión, Digsilent permite crear estos equipos con características especiales, como la configuración de las zonas de impedancia y los tiempos de operación del relé en cada una de estas zonas.

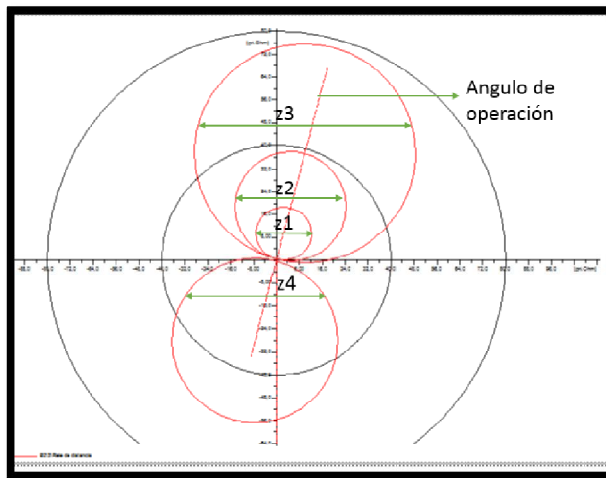


Ilustración 4 Curva de relé de distancia

3.1.4.2 Coordinación de Protecciones

DigSilent permite realizar una coordinación gráfica de las protecciones, utilizando las curvas de todos los relés e identificando como actuarían estos en las diferentes fallas que se puedan presentar.

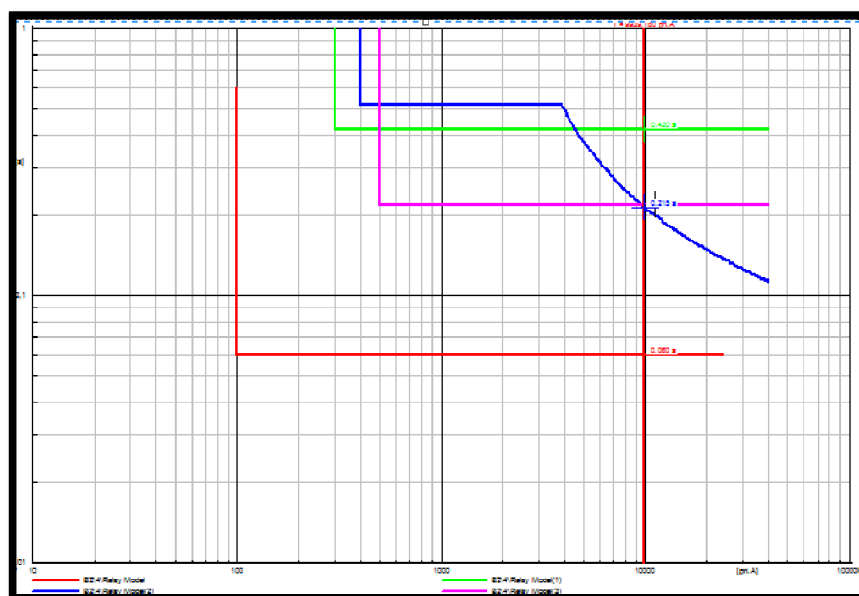


Ilustración 5 Coordinación de protecciones

3.1.5 Herramienta de Transitorios

La función de simulación de transitorios del DigSILENT analiza el comportamiento dinámico de un sistema de potencia en el dominio del tiempo. Los transitorios en un sistema eléctrico de potencia pueden presentarse por:

- Corto plazo (short – term), o transitorios electromagnéticos
- Término medio (Mid – term), o transitorios electromecánicos
- Término largo (Long – term)

DigSilent cubre todo el rango de fenómenos de transitorios en sistemas eléctricos de potencia, por lo tanto existen tres funciones para simulaciones disponibles.

3.1.5.1 Función Básica

Esta función básica utiliza un modelo (RMS) de red simétrica de estado estable para transitorios mid-term y long-term bajo condiciones balanceadas. Esta función usa una representación simétrica de estado estable de la red eléctrica pasiva. Usando esta representación solamente se toman en cuenta las componentes fundamentales de tensión y de corriente. Dependiendo de los modelos usados de generadores, motores, controladores, plantas de potencia y máquinas manejadoras de motores, se pueden realizar los siguientes estudios:

- Estabilidad de transitorios (determinación del tiempo crítico de aclaración de la falla)
- Estabilidad de término medio (mid-term, optimización de la reserva rodante y deslastre de carga)
- Estabilidad oscilatoria (optimización de dispositivos de control)
- Arranque de motores (determinación de tiempos de arranque y caídas de tensión)
- Varios eventos pueden ser introducidos:

- Arranque y/o pérdida de generadores o motores
- Deslastre de carga
- Conmutación de líneas y transformadores
- Corto circuitos
- Inserción de elementos de red
- Variación de puntos de ajuste de controladores
- Cambio de algunos parámetros del sistema.

3.1.5.2 Función Trifásica

Una función trifásica que usa un modelo (RMS) de red en estado estable para transitorios mid – term y long – term para condiciones balanceadas y desbalanceadas de la red. Con esta función se pueden simular, además de los eventos listados arriba, los siguientes:

- Corto circuitos monofásicos a tierra
- Corto circuitos bifásicos a tierra
- Corto circuitos fase – fase
- Interrupciones monofásicas de línea

3.1.5.3 Función de Transitorios Electromagnéticos

La función de transitorios electromagnéticos pueden obtenerse en la herramienta como método de transitorios dinámicos, en condiciones balanceadas y desbalanceadas. Las tensiones y corrientes son tratadas aquí por sus valores instantáneos, tanto que se toma en cuenta la conducta dinámica de los elementos

pasivos de la red. Esta habilidad es necesaria para aplicaciones como:

- Componentes DC y armónicas de corrientes y tensiones
- Comportamiento detallado de inversores de máquinas
- Conducta exacta de HVDC en sistemas de transmisión
- Fenómeno de sobretensiones en dispositivos de interrupción

Debido a que la red eléctrica se representa completamente en el dominio de la frecuencia, se pueden simular todos los eventos descritos, simétricos y asimétricos.

Basados en el cálculo de flujo de cargas, la función de estabilidad del DigSilent determina las condiciones iniciales de todos los elementos del sistema de potencia, cumpliendo con el requerimiento de que las derivadas de todas las variables de estado, cargas, máquinas, controladores, etc., sean cero. También está determinado qué tipo de representación de red debe ser usada para un análisis más amplio, cuál es el tamaño de los pasos de integración a usar, cuales son los eventos a manejar y dónde almacenar los resultados.

La simulación usa un procedimiento iterativo para resolver el flujo de carga AC de la red y un modelo dinámico de integración de variables de estado simultáneamente.

El proceso completo para realizar una simulación de transitorios comprende los siguientes pasos:

- Cálculo de flujo de carga
- Cálculo de valores iniciales, el cual puede incluir la creación de una nueva definición de resultados o una nueva definición de eventos para la simulación.
- Correr la simulación

- Creación de planos para mirar gráficamente el resultado de las variables antes seleccionadas.

3.1.6 Herramienta de Armónicos

Un estudio de armónicos en un sistema de potencia permite determinar los valores de THD (distorsión armónica total) de tensión y corriente, la herramienta de cálculo de armónicos con la que cuenta el software Digsilent permite hallar estos valores basados en las normas IEEE e IEC. Esto permite una comparación más fácil entre los resultados obtenidos y los valores de las normas, ofreciendo la posibilidad de tomar acciones correctivas en caso que sean requeridas. Para el estudio de armónicos en sistemas de potencia se toman los armónicos de orden 5°,7°,11°,13°, etc., ya que los armónicos múltiplos de 3 no entran en el estudio por que la conexión utilizada en los transformadores es delta, es decir que no tienen neutro donde estos armónicos se presentan.

Para realizar un correcto estudio de armónicos es necesario configurar las cargas que inyectan armónicos al sistema de potencia, DigSilent cuenta con varias alternativas para generar armónicos tanto de corriente como de tensión. Rectificadores, tiristores o convertidores basados en PWM, son algunos de ellos. También cuenta con la opción, dentro de las cargas generales, de habilitarlas como fuentes de corriente.

3.1.6.1 Creación de Fuentes de Armónicos

Para configurar las fuentes de armónicos de corriente a partir de las cargas generales se deben tener en cuenta algunos aspectos y el tipo:

- Fuente de armónicos balanceadas, donde se deben especificar las magnitudes y ángulos de cada uno de los armónicos.

- Fuente de armónicos desbalanceadas, donde se especifican las magnitudes, ángulos y el orden de los armónicos para cada una de las fases.
- Fuente de armónicos según la IEC, donde se pueden especificar armónicos de orden par, impar o interarmónicos, teniendo en cuenta su magnitud.

Para configurar las fuentes de armónicos de tensión se utilizan las fuentes AC. Allí se pueden especificar la frecuencia y la magnitud de los armónicos deseados.

3.1.6.2 Procedimiento para Realizar Cálculo de Armónicos

Para realizar el estudio de armónicos en DigSilent, se debe primero ubicar las fuentes generadoras de armónicos en los barrajes correspondientes y con las especificaciones requeridas, luego se debe ir a cálculo de armónicos donde se despliega una ventana con ciertos parámetros requeridos. Se define la representación de la red balanceada o desbalanceada, si una sola frecuencia o todas las frecuencias, la frecuencia nominal del sistema. Este módulo también permite definir el manejo de las fuentes de armónicos teniendo en cuenta la norma IEC 61000-3-6 o por defecto del usuario. También se puede establecer cómo determinar los valores de HD y THD, basados en la norma IEC 61000-3-6, o basados en otros métodos menos comunes. Los resultados obtenidos de este estudio permiten obtener los HD y THD para todas y cada una de las secuencias.

3.2 DPL (DigSilent Programming Language)

El DPL (*Digsilent* Programming Language) es la herramienta que genera un valor agregado a Digsilent con respecto a los demás software diseñados para el análisis de sistemas de potencia. Los DPL permiten automatizar los procesos de Power Factory, ya que brinda diferentes posibilidades como lo son la definición y manipulación de variables en procesos matemáticos, o llamar objetos del sistema de potencia para operarlos. Todo ello permite un mejor manejo de los resultados que a su vez genera un mejor análisis en los sistemas de potencia.

Los Scripts son algoritmos desarrollados dentro de los DPL los cuales se estructuran en un lenguaje similar a C++ y que se encargan de definir los pasos que se requieren para cada análisis. Estos scripts pueden definir procesos como por ejemplo contingencias, donde se requiere saber el comportamiento del sistema cuando sale un generador, una línea o un transformador. El script se desarrolla para que corra flujos de carga n veces para cada situación de una manera automática.

3.2.1 Generalidades

Los Scripts desarrollados en los DPL cuentan con ciertas características especificadas como por ejemplo la definición de las variables. Estas son:

- **Set:** Esta variable permite almacenar un conjunto de objetos que se encuentran en el diagrama unifilar, como por ejemplo el conjunto de barras, transformadores, etc.
- **Object:** Esta variable permite acceder a los objetos del diagrama unifilar de manera individual; es decir, una barra, un transformador, etc. Además de

tomar un elemento que se encuentre en los conjuntos almacenados en la variable Set.

- **Double:** Es una variable de números reales de máximo 15 dígitos.
- **Int:** Es una variable de números enteros.
- **String:** Permite generar variables de caracteres.

Cabe resaltar que DigSilent (DPL) cuenta con funciones preestablecidas que permiten acelerar ciertos procesos. Funciones como seno, coseno, mínimo, máximo, valor absoluto, entre otras. Cuenta también con constantes como pi, e, que son de gran ayuda para el desarrollo de los scripts.

3.2.2 Estructuración de DPL

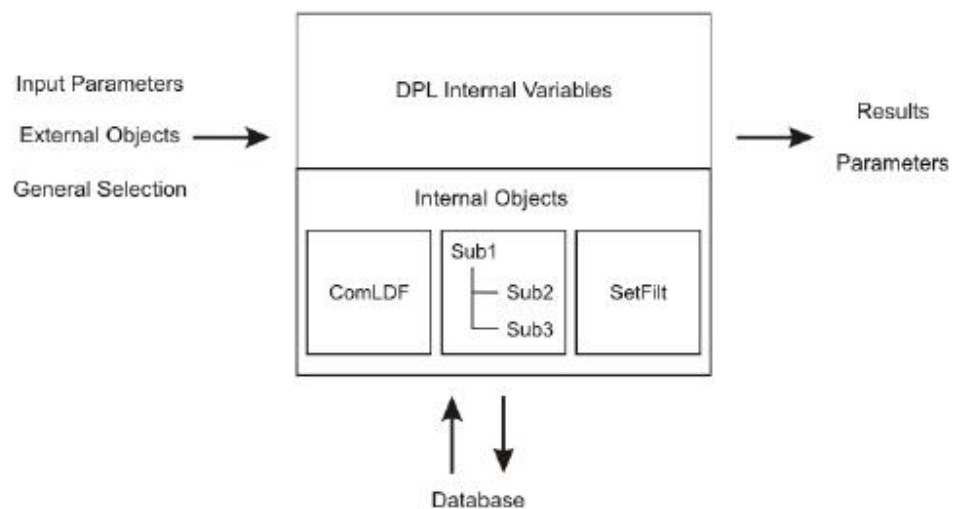


Ilustración 6. Estructura de un DPL

En la estructura de los DPL se definen variables de entrada, variables de salida y objetos de entrada. La manipulación de las variables u objetos, se hacen en la ventana de Script, donde se crea el escrito en lenguaje C++. Estos escritos pueden llamar subrutinas que pueden ser otros DPL o estudios predeterminados como flujos de carga o corto circuito, etc.

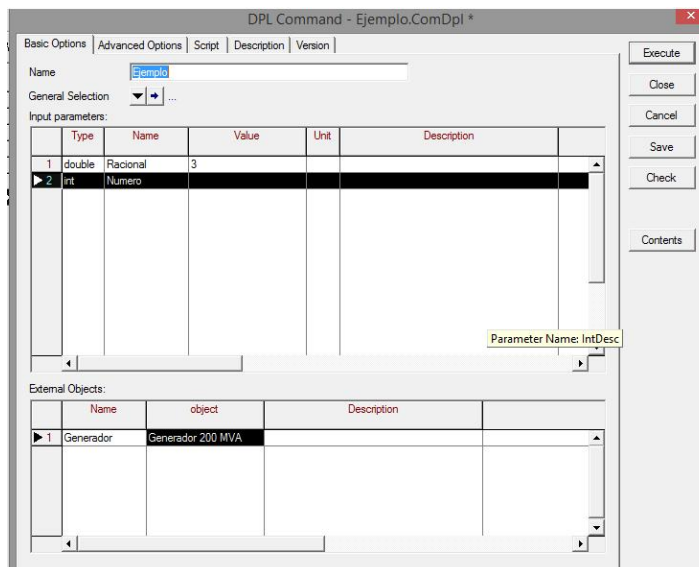


Ilustración 7 Interfaz de un DPL

En la Ilustración 7 se muestra la Interfaz de los DPL, esta se subdivide en:

- **Selección general:** En esta opción se deben definir los objetos del diagrama unifilar sobre el cual se quiere ejecutar el DPL.
- **Entrada de parámetros:** Aquí se definen las variables a ingresar como números u objetos. Estos valores son los que se van a utilizar en los Scripts.
- **Objetos externos:** Aquí se llaman los objetos que requieren ser modificados en el Script como por ejemplo líneas, transformadores, cargas, etc.
- **Opciones Avanzadas:** En esta ventana se crean las variables de salida con los resultados del Script y que son necesarios como datos de entrada en otros DPL.
- **Script:** Se escribe la programación requerida para cada estudio, tomando los datos de entrada y generando los datos de salida.
- **Descripción:** En esta ventana se puede describir el funcionamiento y funcionalidad del DPL

- **Versión:** En esta ventana se establecen datos de autor, compañías o notas del DPL
- **Contenidos:** Los DPL pueden tener subrutinas, las cuales se crean en la opción de contenidos. Allí se crean otros DPL, filtros o estudios, que se utilizaran en el DPL.

3.2.3 Herramientas de DPL

Los DPL cuentan con diferentes herramientas, las cuales se utilizan dependiendo de la aplicación requerida.

3.2.3.1 Operadores Matemáticos

DigSilent cuenta con diferentes operadores matemáticos que se pueden utilizar en los DPL y más exactamente los escritos (Script), como lo son suma, resta, multiplicación y división. Adicionalmente cuenta con funciones trigonométricas seno, coseno, tangente, etc. Estas funciones están establecidas en radianes.

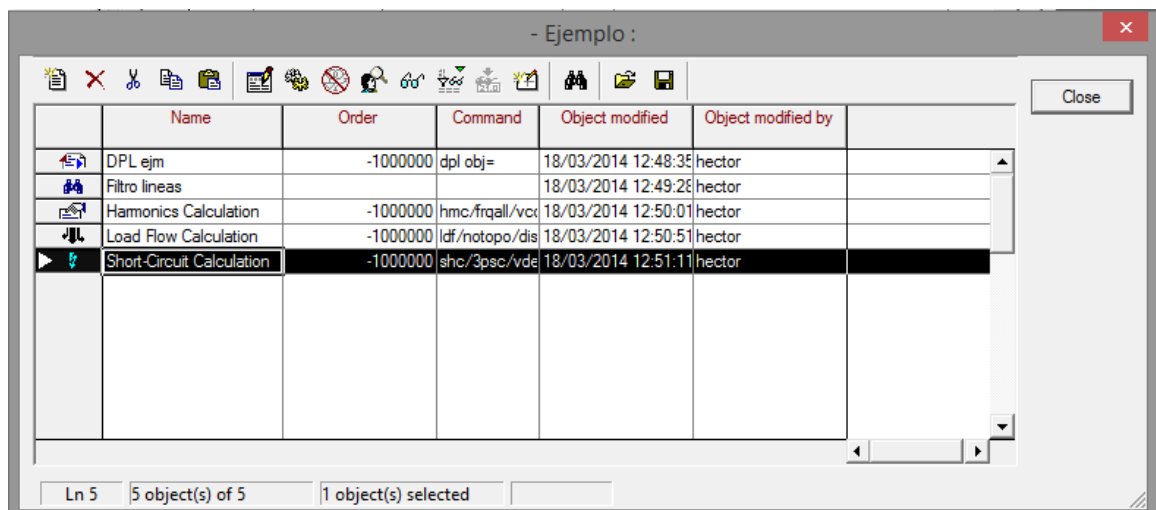
Los escritos también pueden utilizar funciones como valor absoluto, parte entera del número, parte racional del número, potencias, número máximo, número mínimo, etc. Estas funciones permiten facilitar el escrito y obtener resultados como máximas tensiones o mínimas potencias entre otras, que son importantes para los diferentes estudios en los sistemas de potencia.

3.2.3.2 Comandos de lenguaje DPL

La programación que se usa en los Scripts de DigiSilent, se basan en el lenguaje de programación de C++, usando los comandos esenciales como “While”, “For”, “IF”, etc.; teniendo en cuenta la sintaxis del mismo.

3.2.3.3 Herramientas de Estudio de Sistemas de Potencia

Los DPL presentan la opción de crear “contenidos” con el propósito de tomar resultados de los diferentes tipos de estudio y operarlos dentro del Scrip.



	Name	Order	Command	Object modified	Object modified by	
	DPL ejm	-1000000	dpl obj=	18/03/2014 12:48:35	hector	
	Filtro lineas			18/03/2014 12:49:28	hector	
	Harmonics Calculation	-1000000	hmc/frqall/vcd	18/03/2014 12:50:01	hector	
	Load Flow Calculation	-1000000	ldf/notopo/dis	18/03/2014 12:50:51	hector	
	Short-Circuit Calculation	-1000000	shc/3psc/vde	18/03/2014 12:51:11	hector	

Ln 5 5 object(s) of 5 1 object(s) selected

Ilustración 8 Ventana de contenidos de DPL

Algunos de los estudios que se pueden realizar son:

- Flujos de carga (ComLdf)
- Cálculo de corto circuito (ComShc)
- Cálculo de armónicos (ComHmc)

Estos estudios se pueden llamar al escrito por medio del nombre otorgado en la ventana de contenidos de la siguiente “variable.Execute” y se pueden almacenar en una variable doublé o int dentro del Script.

3.2.3.4 Filtros (SetFilt)

Los filtros permiten tomar objetos específicos del diagrama unifilar. Estos pueden tomar todas las líneas, generadores, transformadores, interruptores. Estos filtros también permiten tomar elementos con ciertas especificaciones. Por ejemplo se puede diseñar un filtro que solamente tome generadores con una carga mayor a 80%. Esta herramienta es bastante útil en el Script, ya que permite obtener objetos específicos para realizar las operaciones requeridas.

Para crear el filtro se accede desde contenidos en el DPL, luego se escoge la opción nuevo objeto, se selecciona DPL Command and more y se escoge el elemento General Filter. Este filtro es utilizado para cualquier elemento del diagrama unifilar.

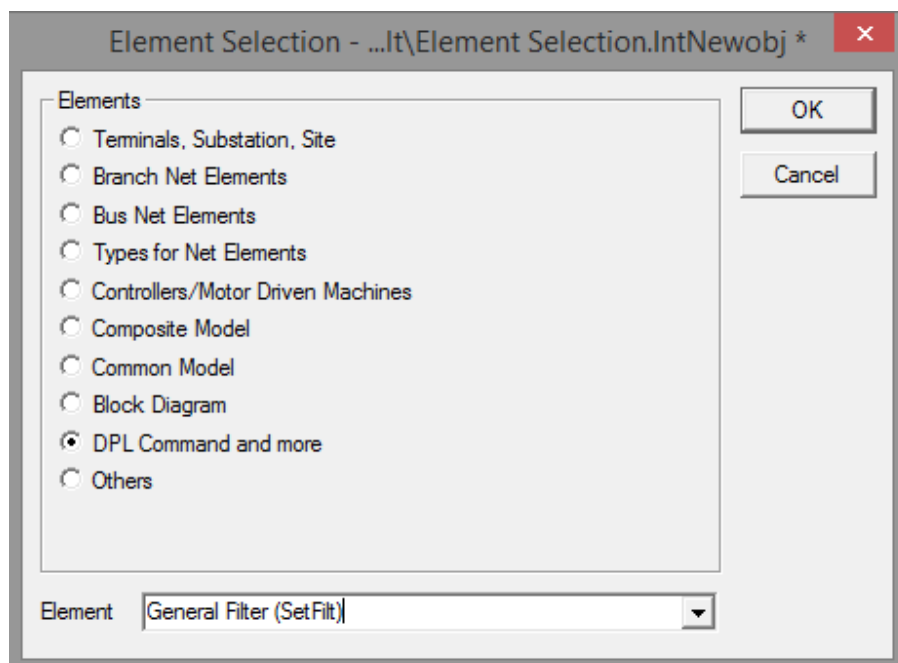


Ilustración 9 Ventana de creación de filtro

3.2.3.5 Herramienta de Resultados (ElmRes)

La herramienta de resultados (ElmRes) se utiliza para almacenar los resultados obtenidos después de la ejecución de un comando en PowerFactory o DPL. El objetivo de la herramienta de resultados es guardar determinadas variables específicas durante una simulación, con el fin de poder acceder a ellos cuando sean necesarios. Estos resultados se pueden utilizar para elaborar graficas o en un Script en DPL.



Ilustración 10 Herramienta Results

3.2.3.6 Características (Cha*)

Las características son variables de tensión, potencia, etc. que se asignan a los elementos, con el fin de utilizarlos dentro del DPL. Para utilizar estas características es necesario generar escalas que modifiquen iterativamente las variables de los elementos.

3.2.3.7 Escala y trigger (TRy) (Cha*)

La escala y trigger permite crear contadores de tiempo o frecuencia. Con esta herramienta se pueden crear DPL, con variaciones de tiempo en segundos, minutos, horas, días, con lo cual se pueden establecer parámetros para equipos en cada unidad de tiempo.

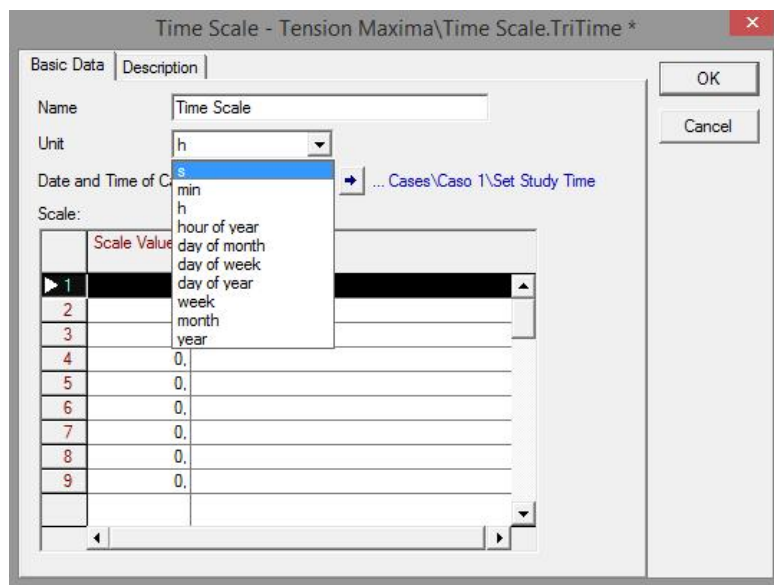


Ilustración 11 Herramienta de Escala y trigger

3.2.3.8 Herramienta de Matriz (IntMat)

Las matrices en DPL pueden ser utilizadas con el fin de obtener valores constantes de tal forma en que puedan manipularse de forma iterativa en la programación de un DPL.

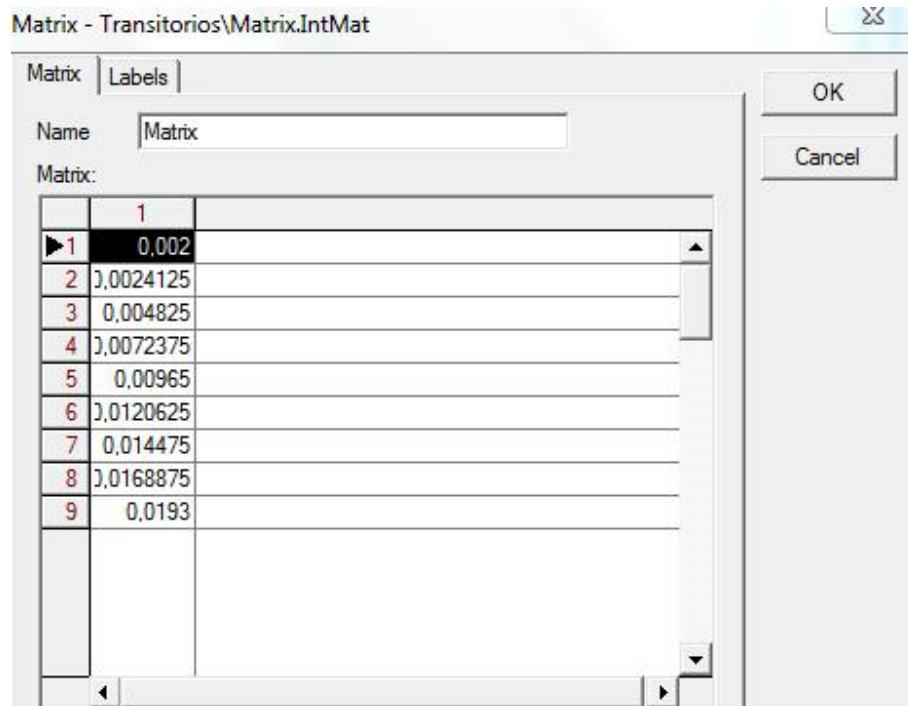


Ilustración 12 Herramienta Matrix.

4. ESTRUCTURACIÓN DE GUÍAS

La metodología planteada en las siete guías presentadas en este documento pretende familiarizar de una manera rápida a los estudiantes, con el uso de la herramienta de DPL en el programa DigSilent. Con el fin de evidenciar la versatilidad del software y que de esta manera los estudiantes cuenten con una herramienta de gran ayuda en el estudio de sistemas de potencia. Para que las guías sean de gran aporte es necesario que el estudiante, cuente con bases en temas como: análisis de sistemas de potencia, programación en C++ y esencialmente el uso de DigSilent en Power Factory. Cada Guía cuenta con una aplicación para cada uno de los estudios planteados en los objetivos de este proyecto. La estructura de las guías planteadas se compone de tres partes Introducción, desarrollo en Power Factory y desarrollo en DPL.

La introducción contiene un breve marco teórico donde se plasma el fin del estudio determinado en los sistemas de potencia y con ello la importancia de los resultados de cada uno de estos estudios. También, cada práctica contiene los objetivos planteados para la estructuración de cada DPL, de la misma manera se establece un diagrama de flujo, donde se evidencia la estructura general de la guía.

Las guías contienen un desarrollo que permite establecer los parámetros específicos para el desarrollo de las aplicaciones en la programación del DPL. Cabe resaltar que la guía no cuenta con todo el procedimiento requerido en Power Factory ya que el objetivo principal del proyecto es el uso de la programación en DPL.

Por último, las guías presentan un procedimiento detallado de la estructuración de la programación en DPL, contando con imágenes tomadas del software las cuales permiten visualizar los pasos definidos en la guía.

5. CONCLUSIONES

El software DigSilent V14 ofrece determinadas herramientas para los diferentes estudios en los sistemas de potencia. Esto conlleva a que en comparación a los distintos paquetes comerciales de simulaciones de sistemas eléctricos, DigSilent sea innovador en el proceso de adquisición de las distintas variables con el fin de poder realizar estudios personalizados dependiendo de la necesidad del estudio.

El sistema de potencia de la IEEE que propone la Universidad “Washington Electrical Engineering”, presenta una tabla de datos que está limitada a un solo caso de estudio de sistemas de potencia que es el flujo de carga. El sistema de prueba no cuenta con parámetros suficientes para poder realizar un estudio de armónicos y cortocircuito. Además, es un sistema muy robusto que impide visualizar los efectos transitorios.

Con la ayuda de la estructuración de los DPL's se pueden llegar a explicar los diferentes fenómenos eléctricos que se presentan en los sistemas de potencia, ya que es posible modificar cada parámetro individualmente y simular las consecuencias que ejerce sobre un sistema de potencia.

El manual del software carece de información clara y concisa para el proceso de aprendizaje de las diferentes herramientas necesarias para el uso de la programación del DPL.

El trabajo realizado con la estructuración de las guías permite identificar las ventajas que ofrece la herramienta DPL en los posibles estudios que pueden ser realizados por los estudiantes, en distintos proyectos futuros que aporten en el análisis de los sistemas de potencia.

6. RECOMENDACIONES

Es importante que en el momento de abordar las guías o de realizar proyectos en DigSilent se cuente con conocimientos que aporten en el análisis de los resultados obtenidos por el software, ya que se debe tener un criterio para concluir si los resultados obtenidos son coherentes.

Dado que el software DigSilent V14 ofrece gran cantidad de métodos de simulación, puede llegar a ser interesante enfocarse en un trabajo conjunto con otros paquetes comerciales como, Matlab Simulink, NetPlan e incluso de interfaz como Station Ware, que ayude en el estudio de sistemas de potencia.

Sería interesante, una estructuración en DPL en la cual interactúen los fenómenos transitorios con la coordinación de protecciones, con el objetivo de realizar la coordinación de protecciones que puedan evacuar los transitorios sin afectar la confiabilidad del sistema.

La guía planteada de transitorios se enfocó en el fenómeno transitorio que realiza la salida de una carga considerable del sistema. Gracias a las diferentes alternativas que ofrece DigSilent V14 puede llegar a ser provechoso estudiar otros fenómenos transitorios generados por cortocircuitos, cambiador de Taps, despacho de generación, entre otros, que alteran el comportamiento del sistema de potencia.

BIBLIOGRAFÍA

ABB Power T&D Company Inc. (1997). *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*, (5ta ed). Raleigh, North Carolina.

DigSilent, (2004). Manual de Instrucciones DigSilent V14

Enríquez Harper Gilberto. (2005). *El libro practico de los generadores, transformadores y motores eléctricos*.

Hernandez Giraldo Jair Alexander, Loba Sanchez Richard Jahir. (2002). *Elaboración de una Guía práctica que facilite el uso del software aplicando al STN*. Tesis pregrado Ingeniero Electricista. Universidad de la Salle, Facultad de Ingeniería Eléctrica (ANEXOS). Bogotá, Colombia.

IEEE. (1992). *Recommended practices and requirements for harmonics control in electrical power systems*. ANSI/IEEE Standard 519.

John j. Grainger, William D. Stevenson. (2007). *Análisis de Sistemas de Potencia*.

J. Shlabbach. (2008). *Short-Circuit Currents*. Institution of Engineering and Technology IET, England.

Lazar Irwin. (1990). *Análisis y Diseño de sistemas eléctricos*.

University Washington Electrical Engineering. *Power Systems Test Case Archive*. IEEE 14 Nodes.

ANEXO A

Características del sistema de potencia

N° Bus	Tipo de Bus	Voltaje [P.U]	Angulo [grados]	Potencia demandada [MW]	Potencia demandada [MVAR]	Potencia Generada [MW]	Potencia Generada [MVAR]	Voltaje base[KV]	Voltaje deseado [P.U]	Maximo [MVAR]	Minimo [MVAR]	Shunt Conductancia [P.U]	Shunt Suceptancia [P.U]
1	Swing (V ϕ)	1,060	0	0	0	232,4	-16,9	0	1,06	0	0	0	0
2	Generador (PV)	1,045	-4,98	21,7	12,7	40	42,4	0	1,045	50	-40	0	0
3	Generador (PV)	1,010	-12,72	94,2	19	0	23,4	0	1,01	40	0	0	0
4	Demanda (PQ)	1,019	-10,33	47,8	-3,9	0	0	0	0	0	0	0	0
5	Demanda (PQ)	1,020	-8,78	7,6	1,6	0	0	0	0	0	0	0	0
6	Generador (PV)	1,070	-14,22	11,2	7,5	0	12,2	0	1,07	24	-6	0	0
7	Demanda (PQ)	1,062	-13,37	0	0	0	0	0	0	24	0	0	0
8	Generador (PV)	1,090	-13,36	0	0	0	17,4	0	1,09	0	0	0	0
9	Demanda (PQ)	1,056	-14,94	29,5	16,6	0	0	0	0	0	0	0	0,19
10	Demanda (PQ)	1,051	-15,1	9	5,8	0	0	0	0	0	0	0	0
11	Demanda (PQ)	1,057	-14,79	3,5	1,8	0	0	0	0	0	0	0	0
12	Demanda (PQ)	1,055	-15,07	6,1	1,6	0	0	0	0	0	0	0	0
13	Demanda (PQ)	1,050	-15,16	13,5	5,8	0	0	0	0	0	0	0	0
14	Demanda (PQ)	1,036	-16,04	14,9	5	0	0	0	0	0	0	0	0

Linea	Resistencia [P.U]	Reactancia [P.U]	Suceptancia[P.U]	Relacion de vueltas	Potencia Base [MVA]	Voltaje Base[KV]	Impedancia Base[Ω]	Resistencia real[Ω]	Reactancia Real [Ω]
1-2	0,01938	0,05917	0,0528	0	300	230	176,33	3,42	10,43
1-5	0,05403	0,22304	0,0492	0	300	230	176,33	9,53	39,33
2-3	0,04699	0,19797	0,0438	0	300	230	176,33	8,29	34,91
2-4	0,05811	0,17632	0,034	0	300	230	176,33	10,25	31,09
2-5	0,05695	0,17388	0,0346	0	300	230	176,33	10,04	30,66
3-4	0,06701	0,17103	0,0128	0	300	230	176,33	11,82	30,16
4-5	0,01335	0,04211	0	0	300	230	176,33	2,35	7,43
4-7	0	0,20912	0	0,978	300	230	176,33	0,00	36,87
4-9	0	0,55618	0	0,969	300	230	176,33	0,00	98,07
5-6	0	0,25202	0	0,932	300	230	176,33	0,00	44,44
6-11	0,09498	0,1989	0	0	300	115	44,08	4,19	8,77
6-12	0,12291	0,25581	0	0	300	115	44,08	5,42	11,28
6-13	0,06615	0,13027	0	0	300	115	44,08	2,92	5,74
7-8	0	0,17615	0	0	300	230	176,33	0,00	31,06
7-9	0	0,11001	0	0	300	230	176,33	0,00	19,40
9-10	0,03181	0,0845	0	0	300	115	44,08	1,40	3,73
9-14	0,12711	0,27038	0	0	300	115	44,08	5,60	11,92
10-11	0,08205	0,19207	0	0	300	115	44,08	3,62	8,47
12-13	0,22092	0,19988	0	0	300	115	44,08	9,74	8,81
13-14	0,17093	0,34802	0	0	300	115	44,08	7,54	15,34

ANEXO B