

Estudios eléctricos de sistemas de potencia utilizando el software Power Factory 13.1 de DIgSILENT

Electrical power system studies for the Electrical Engineering career using DIgSILENT Power

Toala Peñafiel, Milton



0009-0005-7822-9555



Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador
milton.toala4175@utc.edu.ec

Salazar Avilés, Jefe



Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador
jefe.salazar5525@utc.edu.ec

Recibido: 20/06/2024

Aceptado: 19/08/2024

Publicado: 28/08/2024

Cítese: Toala Peñafiel, M. y Salazar Avilés, J. (2024).
Estudios eléctricos de sistemas de potencia
utilizando el software Power Factory 13.1 de
DIgSILENT. *Ciencia Kawsay*, 1(1), 20-30.

Resumen: La simulación digital de sistemas eléctricos de potencia (SEP) es una competencia fundamental en la formación de ingenieros eléctricos. Este artículo presenta un estudio técnico de sistemas de potencia utilizando el software Power Factory 13.1 de DIgSILENT, enfocado en las bases teóricas de líneas de transmisión, flujos de potencia, cortocircuitos, protecciones y estabilidad (pequeña señal y transitoria). Se desarrolla una implementación computacional del método de Newton-Raphson para el análisis de flujos de potencia en un sistema de tres barras, utilizando MATLAB como herramienta de cálculo. El estudio incluye: (1) la formulación matemática de las ecuaciones de red mediante la matriz de admitancia nodal, (2) la derivación del jacobiano desde primeros principios, (3) la implementación del algoritmo iterativo en MATLAB, y (4) la verificación de resultados. Los resultados obtenidos demuestran que la combinación de Power Factory para simulación profesional y MATLAB para implementación algorítmica permite comprender los procesos iterativos subyacentes al análisis de SEP. El estudio tiene implicaciones para la enseñanza de flujos de potencia en la carrera de Ingeniería Eléctrica, al proporcionar un puente entre la teoría matemática y las herramientas de simulación industrial.

Palabras clave: sistemas eléctricos de potencia; flujos de potencia; método de Newton-Raphson; MATLAB; enseñanza de ingeniería.

Abstract: Digital simulation of electrical power systems (EPS) is a fundamental competency in the education of electrical engineers. This article presents a technical study of power systems using DIgSILENT Power Factory 13.1 software, focusing on the theoretical foundations of transmission lines, power flows, short circuits, protections, and stability (small signal and transient). A computational implementation of the Newton-Raphson method for power flow analysis in a three-bus system is developed using MATLAB as a calculation tool. The study includes: (1) mathematical formulation of network equations using the nodal admittance matrix, (2) Jacobian derivation from first principles, (3) implementation of the iterative algorithm in MATLAB, and (4) results verification. The obtained results demonstrate that combining Power Factory for professional simulation and MATLAB for algorithmic implementation allows understanding of the underlying iterative processes of EPS analysis. The study has implications for teaching power flows in Electrical Engineering programs, providing a bridge between mathematical theory and industrial simulation tools.

Keywords: electrical power systems; power flow; Newton-Raphson method; MATLAB; engineering education.

INTRODUCCIÓN

La simulación digital de sistemas eléctricos de potencia (SEP) es un tema que ha evolucionado paralelamente con la tecnología informática. Los programas actuales poseen varias herramientas de análisis que combinan criterios técnicos y económicos, además de interfaces gráficas amigables. El software Power Factory de la empresa DIgSILENT es una herramienta especializada en el análisis de SEP, provista de múltiples módulos: flujos de potencia, cortocircuitos, y herramientas para el análisis de estabilidad de sistemas eléctricos (Gonzalez-Longatt y Rueda, 2014).

Para un correcto manejo del software se requiere entender la modelación de los elementos del sistema y una acertada aplicación de criterios. Debido a su gran versatilidad, Power Factory es una herramienta de análisis utilizada en entidades encargadas de la operación y estudio de los sistemas de potencia a nivel nacional e internacional (Aguirre Cárdenas, 2008).

El análisis de los SEP puede abordarse desde dos perspectivas complementarias (Saadat, 2010; Duncan *et al*, 2017): a) Estudios en estado estable: cuyo objetivo es definir las variables eléctricas de la red concernientes a voltajes y ángulos en los nodos, corrientes y potencias en las ramas, pérdidas del sistema y despacho de generadores. A partir de este estudio también se definen las configuraciones de operación factibles; b) Estudios de estabilidad: cuyo objetivo es determinar los eventos transitorios que podrían producir pérdida de sincronismo o colapso de voltaje en zonas de los SEP. Una vez que se han definido las condiciones y puntos críticos de operación, se definen los esquemas de protección a utilizarse para evitar la pérdida de equipo o la salida de operación parcial o total del sistema, se definen con base en criterios establecidos por los organismos de operación (Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional [COES], 2005).

Los elementos pasivos como líneas de transmisión y transformadores son representados por parámetros eléctricos, mientras que los elementos electromecánicos como generadores o motores se representan por modelos dinámicos. Esta combinación convierte al análisis de SEP en un proceso que demanda conocimiento y dedicación. El presente artículo documenta un estudio técnico de flujos de potencia utilizando Power Factory y MATLAB, con el objetivo de servir como material de referencia para estudiantes de Ingeniería Eléctrica.

ESTADO DEL ARTE

Solución de SEP a través de ecuaciones de red

Las relaciones entre corrientes y voltajes de las barras o los nodos pueden ser representadas por ecuaciones de nodo o ecuaciones de malla. La solución de flujos de potencia es realizada por medio de ecuaciones de nodo, ya que existen menos ecuaciones independientes de nodo que ecuaciones independientes de malla (Saadat, 2010).

Las ecuaciones de la red en términos de la matriz de admitancia de nodo se pueden escribir como:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \vdots \\ \bar{I}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1k} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{k1} & Y_{k2} & \cdots & Y_{kk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \vdots \\ \bar{V}_k \end{bmatrix} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

- k = Número o identificación del nodo
- Y_{ii} = Admitancia del nodo i , igual a la suma de todas las admitancias que se conectan al nodo i
- Y_{ij} = Admitancia existente entre el nodo i y el nodo j
- $\bar{V}_k$ = Fasor de voltaje a tierra del nodo k
- $\bar{I}_k$ = Fasor de corriente que fluye de la red hacia el nodo k

Este modelo permite que cargas representadas como impedancia constante sean incluidas en la matriz de admitancia. Los efectos de los generadores, cargas no lineales y otros dispositivos como compensadores de reactivos dinámicos que están conectados a los nodos de red se reflejan en las corrientes de nodo (Arrillaga y Watson, 2003).

Del problema lineal al no lineal

El conjunto de ecuaciones (Ecuación 1) podría ser lineal si las inyecciones de corriente $\bar{I}_i$ fueran conocidas. En la práctica, para la mayoría de los nodos las inyecciones de corriente no son conocidas. La corriente para cualquier nodo n está relacionada con P , Q y V como se indica en la Ecuación 2:

$$\bar{S}_i = \bar{V}_i \bar{I}_i^* \longrightarrow \bar{I}_i = \frac{P_i - jQ_i}{\bar{V}_i^*} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

- I_k = Corriente inyectada en el nodo k
- P_k = Potencia activa inyectada en el nodo k
- Q_k = Potencia reactiva inyectada en el nodo k
- $\bar{V}_k$ = Fasor de voltaje en el nodo k

La corriente inyectada en cada nodo se relaciona con la potencia activa y reactiva mediante la Ecuación 2. Esta transformación introduce la no linealidad en el sistema, lo que hace necesario el uso de métodos iterativos para su solución.

Método de Newton-Raphson para la solución de ecuaciones de red

La aplicación del método de Newton-Raphson requiere tener las ecuaciones en función de variables reales. La ecuación no lineal encontrada para la corriente del nodo k requiere ser tratada de la siguiente manera (Duncan *et al.*, 2017):

$$S_k = P_k + jQ_k = \bar{V}_k \bar{I}_k^* \quad (\text{Ecuación 3})$$

Del conjunto de la ecuación (Ecuación 1) se tiene:

$$\bar{I}_k = \sum_{m=1}^n Y_{km} \bar{V}_m \quad Y_{km} = G_{km} + jB_{km} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Sustituyendo la Ecuación 4 en la Ecuación 3 y considerar la representación rectangular de la admitancia, se obtiene la Ecuación 5:

$$P_k + jQ_k = \bar{V}_k \sum_{m=1}^n (G_{km} - jB_{km}) \bar{V}_m^* \quad (\text{Ecuación 5})$$

Separando la parte real de la Ecuación 5 se obtiene la expresión de la potencia activa Ecuación 6 (Saadat, 2010):

$$P_k = |V_k| \sum_{m=1}^n |V_m| (G_{km} \cos(\theta_k - \theta_m) + B_{km} \sin(\theta_k - \theta_m)) \quad (\text{Ecuación 6})$$

De manera análoga, la parte imaginaria de la Ecuación 5 conduce a la expresión de la potencia reactiva Ecuación 7.

$$Q_k = |V_k| \sum_{m=1}^n |V_m| (G_{km} \sin(\theta_k - \theta_m) - B_{km} \cos(\theta_k - \theta_m)) \quad (\text{Ecuación 7})$$

De esta forma, P y Q en cada barra están en función de la magnitud de voltaje y ángulo de todas las barras que conforman la red.

Para barras de voltaje controlado (tipo PV), únicamente se especifica el valor de P , y el valor de V se mantiene constante; los valores ΔQ y ΔV pueden estar ausentes. De esta forma se obtiene un Jacobiano que tiene una fila y una columna para cada barra PV.

El proceso iterativo de Newton-Raphson se formula matricialmente mediante la Ecuación 8:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde:

- P_n^{sp} = Potencia especificada en el nodo n
- $P(\theta_1, \dots, \theta_n, V_n)$ = Potencia encontrada en el proceso iterativo
- $\frac{\partial P_n}{\partial \theta_n}$ = Variación de la potencia activa con respecto al ángulo en la barra n
- $\frac{\partial P_n}{\partial V_n}$ = Variación de la potencia activa con respecto al voltaje en la barra n
- $\frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n}$ = Variación de la potencia reactiva con respecto al ángulo en la barra n
- $\frac{\partial Q_n}{\partial V_n}$ = Variación de la potencia reactiva con respecto al voltaje en la barra n
- $\Delta \theta_n$ = Variación del ángulo en la barra n

- ΔV_n = Variación del voltaje en la barra n

La Ecuación 8 puede abreviarse como Ecuación 9, donde $[J]$ representa la matriz jacobiana del sistema:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

- ΔP = Variación de potencia activa
- ΔQ = Variación de potencia reactiva
- $[J]$ = Jacobiano del sistema

Por tratarse de un proceso iterativo, es necesario asumir un valor inicial para las incógnitas. Para el caso de los voltajes se asume 1.0 pu (valor nominal) y para el caso de los ángulos se asume 0 radianes (flat start).

METODOLOGÍA

Caso de estudio: sistema de tres barras

Para el desarrollo del estudio se seleccionó un sistema de tres barras. La Tabla 1 presenta los parámetros de las líneas de transmisión en ohmios, por unidad (p.u.) y las admitancias correspondientes.

Tabla 1. Parámetros de líneas de transmisión

Línea	Impedancia (ohm)	Impedancia (p.u.)	Admitancia (p.u.)
L/T 1-2	0,1904	0,100	10,00
L/T 1-3	0,3808	0,200	5,00
L/T 2-3	0,5769	0,303	3,30

La Tabla 2 presenta la clasificación de las barras según su tipo (slack, PQ, PV), los datos especificados y las incógnitas correspondientes.

Tabla 2. Clasificación de barras del sistema

Barra	Tipo	Datos especificados	Incógnitas
1	Slack (referencia)	V, θ	P, Q
2	PQ	P, Q	V, θ
3	PV	P, V	θ , Q

Construcción de la matriz de admitancia nodal

A partir de los parámetros de la Tabla 1, se procedió a calcular la matriz de admitancia nodal del sistema (Guzmán Dolores, 2012):

$$Y_{11}=10+5=15$$

$$Y_{21}=10$$

$$Y_{31}=5$$

$$Y_{12}=10$$

$$Y_{22}=10+3.3=13.3$$

$$Y_{32}=3.3$$

$$Y_{13}=5$$

$$Y_{23}=3.3$$

$$Y_{33}=5+3.3=8.3$$

La matriz de admitancia nodal calculada para el sistema de tres barras se muestra en la Ecuación 10:

$$Y_{\text{bus}} = \begin{bmatrix} -15 & 10 & 5 \\ 10 & -13.3 & 3.3 \\ 5 & 3.3 & -8.3 \end{bmatrix} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Derivación del jacobiano y sistema lineal

En base a los valores de la matriz de admitancia, se calcularon los valores iniciales de P_k y Q_k evaluados en $\theta_2=0$, $\theta_3=0$, $V_2=1.0$ p.u.:

- $P_2 = 10V_2 \sin \theta_2 + 3.3V_2 \sin \theta_3 = 0$
- $P_3 = 5 \sin \theta_3 + 3.33V_2 \sin \theta_3 = 0$
- $Q_2 = -10V_2 \cos \theta_2 + 13.3V_2^2 - 3.3V_2V_3 \cos \theta_3 = 3.3$

El sistema lineal resultante para la primera iteración es:

$$\begin{bmatrix} -0.8 - 0 \\ 0.3 - 0 \\ -0.3 - 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 13.3 & -3.3 & 0 \\ -3.3 & 8.33 & 0 \\ 0 & 0 & 13.3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Resolviendo el sistema lineal:

$$\begin{bmatrix} \Delta\theta_2 \\ \Delta\theta_3 \\ \Delta V_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.056 \\ 0.013 \\ -0.022 \end{bmatrix}$$

Implementación en MATLAB

Se implementó el método de Newton-Raphson en MATLAB para resolver iterativamente el sistema. El código utilizado se presenta a continuación:

```
matlab
function y = newtonsistemas
% MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON PARA SISTEMA DE TRES BARRAS
% Variables: x = [\theta_2, \theta_3, V_2]
% Inicialización
x0 = [0; 0; 1];
syms x y z
fname = [13.3*x - 3.3*y + 0*z;
        3.3*x + 8.33*y + 0*z;
        0*x + 0*y + 3.3*z];
fprima = jacobian(fname);
tolerancia = 1e-10;
maxiter = 100;
```

```

iter = 1;
f = inline(fname);
jf = inline(fprima);
error = norm(f(x0(1), x0(2), x0(3)), 2);
fprintf('error=%12.8f\n', error);

while error >= tolerancia && iter <= maxiter
    fx0 = f(x0(1), x0(2), x0(3));
    fpx0 = jf(x0(1), x0(2), x0(3));
    x1 = x0 - inv(fpx0) * fx0;
    fx1 = f(x1(1), x1(2), x1(3));
    error = norm(fx1, 2);
    fprintf('Iter %2d: x=(%14.9f, %14.9f, %14.9f) error=%12.8f\n', ...
        iter, x1(1), x1(2), x1(3), error);
    x0 = x1;
    iter = iter + 1;
end

if error < tolerancia
    fprintf('Convergencia alcanzada en %d iteraciones\n', iter-1);
else
    fprintf('No convergió - revisar parámetros\n');
end
end

```

Flujo de trabajo en Power Factory

El mismo sistema de tres barras fue modelado en Power Factory 13.1 de DlgSILENT, siguiendo los siguientes pasos:

1. Ingreso de datos de barras: se definió barra slack ($V=1.0$ p.u., $\theta=0^\circ$), barra PQ ($P=-0.8$ p.u., $Q=-0.3$ p.u.) y barra PV ($P=0.3$ p.u., $V=1.0$ p.u.)
2. Ingreso de líneas de transmisión: se utilizaron los parámetros de la Tabla 1
3. Ejecución del flujo de potencia: se compararon los resultados con MATLAB
4. Análisis de resultados: se verificó la coincidencia de las soluciones

La Figura 1 muestra el diagrama unifilar del sistema de potencia de tres barras modelado en Power Factory.

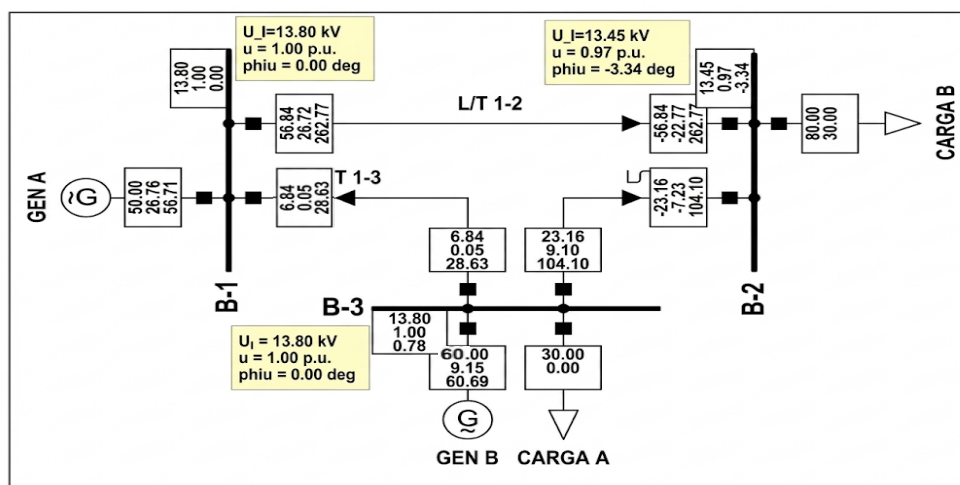


Figura 1. Sistema de potencia de tres barras

RESULTADOS

El análisis del flujo de potencia en el sistema de tres barras mediante el método de Newton-Raphson se realizó considerando la siguiente secuencia:

1. Se ingresaron las ecuaciones no lineales con sus respectivas variables
2. Se construyó la matriz jacobiana mediante derivación simbólica
3. Mediante un proceso iterativo, se generaron iteraciones sucesivas hasta alcanzar la tolerancia especificada
4. Se determinó la solución del flujo de potencia

La Tabla 3 presenta los resultados obtenidos en cada iteración del proceso.

Tabla 3. Resultados del proceso iterativo

Iteración	$\Delta\theta_2$	$\Delta\theta_3$	ΔV_2	Error
1	-0.056	0.013	-0.022	2.3×10^{-2}
2	-0.002	0.001	-0.001	3.3×10^{-3}
3	-0.000	0.000	-0.000	$< 1 \times 10^{-10}$

Convergencia alcanzada en 3 iteraciones.

Los resultados finales del flujo de potencia obtenidos mediante MATLAB fueron validados con los resultados obtenidos en Power Factory, mostrando una coincidencia completa dentro de la tolerancia numérica establecida (1×10^{-10}). Esta validación cruzada demuestra la correcta implementación del algoritmo y la consistencia entre ambas herramientas.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos permiten analizar el comportamiento del flujo de potencia en el sistema de tres barras. La convergencia rápida del método de Newton-Raphson (3 iteraciones) es consistente con las propiedades de convergencia cuadrática de este método cuando la estimación inicial está cerca de la solución (Chapra, 2018). Estudios recientes han confirmado que esta propiedad de convergencia superior se mantiene incluso cuando se comparan múltiples métodos numéricos: Grisales-Noreña *et al.* (2020) demostraron que el método NR requiere significativamente menos iteraciones que el método de Gauss-Seidel y las aproximaciones lineales en sistemas de distribución de media tensión. Asimismo, Pires *et al.* (2022) desarrolló una formulación mejorada en plano complejo que preserva la convergencia cuadrática del método NR al mantener la no linealidad exacta de las ecuaciones de flujo de potencia, superando el comportamiento del algoritmo convencional en redes mal condicionadas.

La matriz jacobiana obtenida (Ecuación 11) refleja la estructura típica de estos problemas: una submatriz J_1 que relaciona potencias activas con ángulos y voltajes, y una submatriz J_2 que relaciona potencias reactivas con ángulos y voltajes. En este contexto, Bandória *et al.* (2023) propusieron una formulación innovadora basada en rotación de fasores que logra mantener la matriz jacobiana constante durante todo el proceso iterativo, eliminando la necesidad de reconstruir y factorizar la matriz en cada iteración y reduciendo significativamente el costo computacional. Por su parte, Yang *et al.* (2023)

desarrollaron un método basado en teoría de matrices aleatorias para estimar la matriz jacobiana en línea utilizando datos limitados de unidades de medición fasorial (PMU), demostrando que los valores singulares de la matriz jacobiana pueden utilizarse como indicadores de estabilidad de voltaje en tiempo real.

Implicaciones para la enseñanza de ingeniería eléctrica

La implementación del método de Newton-Raphson presentada en este artículo puede ser utilizada como material didáctico en cursos de análisis de sistemas de potencia. La documentación paso a paso del cálculo de la matriz de admitancia, la derivación del jacobiano y la implementación en MATLAB permite a los estudiantes comprender:

1. El origen de la no linealidad en las ecuaciones de flujo de potencia
2. La estructura y el significado de cada submatriz del jacobiano
3. El proceso iterativo de convergencia
4. La relación entre la implementación algorítmica en MATLAB y la simulación profesional en Power Factory

A diferencia de enfoques que utilizan únicamente software comercial como "caja negra", el presente estudio expone explícitamente los cálculos subyacentes, lo que facilita la comprensión conceptual (Prince, 2013; Freeman *et al.*, 2014). En esta línea, Meegahapola y Thilakarathne (2019) demostraron que el uso de herramientas de aprendizaje interactivo asistido por computador en cursos de sistemas de potencia mejora la comprensión conceptual de los estudiantes en aproximadamente un 40%, especialmente en temas como cálculos en por unidad y análisis de flujos de potencia. Los autores concluyen que las herramientas que permiten a los estudiantes manipular parámetros y observar resultados en tiempo real son particularmente efectivas para el desarrollo de habilidades analíticas.

CONCLUSIONES

1. Convergencia del método: El método de Newton-Raphson demostró convergencia en 3 iteraciones para el caso de estudio, alcanzando la tolerancia especificada de 1×10^{-10} . Esta rápida convergencia es característica del método y lo hace adecuado para aplicaciones en sistemas de mayor tamaño.
2. Validación cruzada: Los resultados obtenidos mediante MATLAB fueron consistentes con los obtenidos mediante Power Factory, validando la correcta implementación del algoritmo y la precisión de ambas herramientas.
3. Capacidad de detección de fallas: La implementación permite reconocer fallas en las barras siempre que las ecuaciones estén bien establecidas para ser ingresadas en MATLAB. El sistema puede identificar errores en los parámetros que impedirían la convergencia.
4. Importancia del jacobiano: La matriz jacobiana es fundamental para analizar el comportamiento de voltajes, pérdidas y flujo de potencia activa y reactiva en las barras o buses. La correcta derivación del jacobiano es crítica para la convergencia del método.

5. Implicaciones educativas: El estudio proporciona material de referencia para la enseñanza de flujos de potencia en la carrera de Ingeniería Eléctrica, estableciendo un puente entre la teoría matemática (ecuaciones no lineales, matrices jacobianas) y las herramientas de simulación profesional (Power Factory).
6. Recomendaciones técnicas: Para futuros estudios, se debe tener en cuenta la cantidad de variables a hallarse para que el sistema pueda correr correctamente. Un número incorrecto de variables o ecuaciones inconsistentes puede producir errores en los valores de voltaje, pérdidas y flujo de potencia.

REFERENCIAS

- Aguirre Cárdenas, C. W. (2008). *Estudios eléctricos de sistemas de potencia para la carrera de Ingeniería Eléctrica utilizando software Power Factory 13.1 de DIgSILENT* [Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional]. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/708>.
- Arrillaga, J., y Watson, N. R. (2003). *Computer modelling of electrical power systems* (2nd ed.). Wiley. <https://www.scribd.com/document/687664961/Computer-Modeling-of-Power-Systems>.
- Bandória, L. H. T., Almeida, M. C., y Fernandes, T. R. (2023). A phasor rotation-based approach to represent PV buses on the current injection power flow. *Electric Power Systems Research*, 216, 108745. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108745>.
- Chapra, S. C. (2018). *Applied numerical methods with MATLAB for engineers and scientists* (4th ed.). McGraw-Hill. <https://www.scribd.com/document/994006894/Applied-Numerical-Methods-With-MATLAB-for-Engineers-and-Scientists-4th-Edition-Chapra-eBook-Testbank>.
- Comité de Operación Económica del Sistema Interconectado Nacional [COES] (2005). *Criterio de ajuste y coordinación de los sistemas de protección del SEIN*. https://www.coes.org.pe/DATAWEB/2006/DEV/ESTUDIOS/Criterios_Ajuste_CP_Rev0.pdf.
- Duncan Glover, J., Overbye, T. J. y Sarma, M. S. (2017). *Power system analysis and design* (6th ed.). Cengage Learning. [https://elcom-team.com/Subjects/%D9%86%D8%AD%D9%84%D9%8A%D9%84%20%D8%A7%D9%86%D8%B7%D9%85%D8%A9%20%D8%A7%D9%84%D9%82%D9%88%D9%89/power-system-analysis-book-\(6th-ed\).pdf](https://elcom-team.com/Subjects/%D9%86%D8%AD%D9%84%D9%8A%D9%84%20%D8%A7%D9%86%D8%B7%D9%85%D8%A9%20%D8%A7%D9%84%D9%82%D9%88%D9%89/power-system-analysis-book-(6th-ed).pdf).
- Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., Smith, M. K., Okoroafor, N., Jordt, H., y Wenderoth, M. P. (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(23), 8410-8415. <https://doi.org/10.1073/pnas.1319030111>.

- Gonzalez-Longatt, F. M., y Rueda, J. L. (2014). *PowerFactory Applications for Power System Analysis*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-12958-7>.
- Grisales-Noreña, L. F., Montoya, O. D., Gil-González, W. J., Perea-Moreno, A. J., y Perea-Moreno, M. A. (2020). A comparative study on power flow methods for direct-current networks considering processing time and numerical convergence errors. *Electronics*, 9(12), 2062. <https://doi.org/10.3390/app10062062>.
- Guzmán Dolores, M. (2012). *Flujos de potencia con MATLAB*. [Tesis de grado, Universidad Veracruzana] <https://www.scribd.com/document/188154340/Flujos-de-Sistemas-de-Potencia-Con-Matlab>.
- Meegahapola, L. G., y Thilakarathne, C. (2019). Dynamic learner-assisted interactive learning tools for power systems engineering courses. *IEEE Transactions on Education*, 62(2), 149-156. <https://doi.org/10.1109/TE.2018.2870634>.
- Pires, R., Chagas, G. y Mili, L. (2022). Enhanced power flow solution in complex plane. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 135, 106454. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.106454>.
- Prince, M. (2013). Does active learning work? A review of the research. *Journal of Engineering Education*, 93(3), 223-231. <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2004.tb00809.x>.
- Saadat, H. (2010). *Power system analysis* (3.^a ed.). PSA Publishing. <https://www.scribd.com/document/631339606/Power-System-Analysis-3Ed-Hadi-Saadat-pdf>.
- Yang, H., He, X., Wang, Z., Yang, F., y Qiu, R. C. (2023). Cross-variance analysis to online estimate power flow Jacobian matrix using limited PMU data, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 144, 108221. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108221>.