

---

---

# Casos de Estudio para el Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia.

*Actividad I.*

---

---

Por

MARIO SÁNCHEZ GUTIÉRREZ



**INGENIERÍA**  
FACULTAD

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla  
FACULTAD DE INGENIERÍA

&

Investigación y Estudios de Posgrado  
FACULTAD DE INGENIERÍA BUAP

El presente compendio de ejercicios es realizado para la materia de Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia, impartida por el Doctor Ismael Albino Padilla. Esto como parte de la Maestría en Ingeniería con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia.

MAYO 2024

## *Índice.*

<i>Introducción .....</i>	<i>2</i>
<i>Datos del Sistema .....</i>	<i>3</i>
<i>Obtención de <math>Y_{\text{barra}}</math> .....</i>	<i>4</i>
<i>Solución del Sistema .....</i>	<i>4</i>
<i>Obtención de Voltajes .....</i>	<i>5</i>
<i>Flujos de Potencia en Líneas y Pérdidas del Sistema .....</i>	<i>6</i>
<i>Dirección de Flujos de Potencia en Diagrama Unifilar .....</i>	<i>6</i>
<i>Punto de Operación del Sistema .....</i>	<i>7</i>

## *Introducción.*

Como parte de nuestra especialización a través de esta Maestría en Ingeniería con Opción Terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia debemos de aprender cómo es que estos sistemas son modelados matemáticamente, para el correcto cálculo y predicción del comportamiento de estos, por su complejidad, extensión y grandes cantidades de factores a considerar, se ha desarrollado a través de métodos numéricos como Gauss-Seidel y Newton-Raphson, la resolución de estos grandes centros de carga tomando como base la Ley de Corrientes de Kirchhoff.

Durante las clases del día 26 y 27 de abril, se nos enseñó como es que se modelan y transforman ecuaciones del tipo lineal a métodos numéricos de resolución, concretamente Gauss-Seidel, con este método se modeló un sistema de 4 barras, sirviendo como base de nuestros estudios y todo lo que implica un problema de este tipo, determinando la  $Y_{barras}$  y obteniendo los voltajes a través de iteraciones.

Durante clase solo se pudieron realizar tres iteraciones de este tipo, donde obteniendo el valor de los voltajes anteriores y teniendo una base de  $V_1 = 1.0 \angle 0^\circ$ , se realizaron los cálculos pertinentes, esto nos demostró lo tardío que esto podía llegar a ser en el pasado, sin embargo, en la actualidad, con el poder de cálculo de los microprocesadores y los lenguajes de programación en entornos de desarrollo, como lo es MATLAB, nos han permitido llegar a los resultados de manera prácticamente de forma inmediata.

Concretamente MATPOWER, un software de tipo open source, desarrollado por un conjunto de universidades en Estados Unidos, nos permite realizar el modelado de estos sistemas con alta precisión y considerando todos los métodos y estudio que estos involucran, siendo muy conveniente para uso tanto educativo, como el presente trabajo, o como una herramienta industrial.

El presente trabajo presenta el caso de estudio realizado a mano durante la clase del 27 de abril, un sistema de cuatro barras, con dos generadores, y con dos líneas más, al ejemplo original del día 26, conectando y demandando energía en el sistema.

### Datos del Sistema.

A continuación, se presenta el sistema a desarrollar en el presente trabajo, siendo agregadas dos líneas más al sistema, modificando así su comportamiento con respecto al centro eléctrico original.

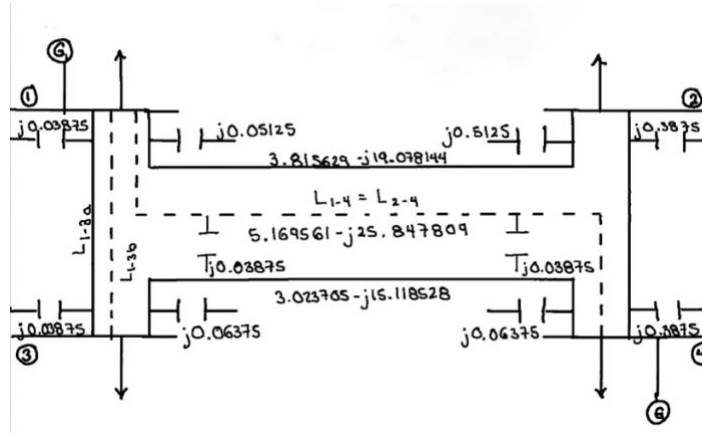


Ilustración 1. Sistema de Prueba de 4 Barras.

Del Sistema de Prueba (Ilustración 1), tenemos en P.U. y con valores base de: 100 MVA y 230 kV.

Tabla 1. Datos de Líneas.

Línea Barra-Barra	Z Serie P.U.		Serie $Y = z^{-1}$		Y paralelo j Y/2 pu	MVAR totales
	R	jx	G	jB		
1-2	0.01008	0.05040	3.815629	-19.078144	0.05125	10.25
1-3 (1)	0.00744	0.03720	5.169561	-25.847809	0.03875	7.75
1-3 (2)	0.00744	0.03720	5.169561	-25.847809	0.03875	7.75
1-4	0.00744	0.03720	5.169561	-25.847809	0.03875	7.75
2-4	0.00744	0.03720	5.169561	-25.847809	0.03875	7.75
3-4	0.01272	0.06360	3.023705	-15.118528	0.06375	12.75

Tabla 2. Datos de Barras.

Barra	Generación		Carga		Observaciones V, P.U.
	P, MW	Q, MVar	P, MW	Q, MVar	
1	-----	-----	50	30.99	1.01∠0° Compensación
2	0	0	170	105.35	1∠0° Carga
3	0	0	200	123.94	1∠0° Carga
4	318	-----	80	49.58	1.02∠0° Volt. Controlado

### *Obtención de $Y_{barra}$ .*

La matriz de admitancias, también conocida como  $Y_{barra}$ , es una herramienta fundamental en el análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP). Su creación se debe a varias razones que la convierten en un elemento crucial para comprender el comportamiento de estos sistemas complejos.

Esta matriz nos permite transformar el análisis nodal, basado en las Leyes de Kirchhoff, en un sistema de ecuaciones lineales más sencillo de resolver. En lugar de trabajar con ecuaciones individuales para cada nodo, la matriz condensa la información de todas las conexiones entre nodos en una única matriz. Esto facilita enormemente el análisis de sistemas de gran tamaño y complejidad.

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix}$$

En el caso del presente sistema, la matriz  $Y_{barra}$  es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} 19.324459 - j96.454071 & -3.815629 + j19.078144 & -10.339122 + j51.695618 & -5.169561 + j25.847809 \\ -3.815629 + j19.078144 & 8.985190 - j44.835953 & 0 & -5.169561 + j25.847809 \\ -10.339122 + j51.695618 & 0 & 13.362827 - j66.672896 & -3.023705 + j15.118528 \\ -5.169561 + j25.847809 & -5.169561 + j25.847809 & -3.023705 + j15.118528 & 13.362827 - j66.672896 \end{bmatrix}$$

### *Solución del Sistema.*

Una vez que se ha obtenido la matriz de admitancias  $Y_{barra}$ , el siguiente paso para calcular los voltajes en un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) utilizando el método de Gauss-Seidel es seguir estos pasos:

1. Definir las condiciones iniciales:

- Elegir un nodo de referencia: Se selecciona un nodo al que se le asigna un valor de voltaje de referencia, para este caso la barra 1 con un voltaje de  $1.0 \angle 0^\circ$ . Este nodo sirve como base para calcular los voltajes relativos en los demás nodos.
- Establecer valores iniciales para los voltajes: Se asignan valores iniciales estimados a los voltajes en todos los nodos, excepto en el nodo de referencia. Estos valores pueden provenir de un análisis previo o de suposiciones informadas.

## 2. Implementar el algoritmo de Gauss-Seidel:

El algoritmo de Gauss-Seidel se aplica de forma iterativa para refinar los valores de los voltajes en cada nodo. El proceso consiste en:

- Recorrer los nodos: Se recorren todos los nodos del sistema, excepto el nodo de referencia.
- Actualizar el voltaje de cada nodo: Para cada nodo, se calcula un nuevo valor de voltaje utilizando la ecuación de Gauss-Seidel, la cual involucra la matriz Ybarra, las corrientes de inyección en el nodo y los voltajes estimados en los nodos adyacentes.
- Repetir el proceso: Se repiten los dos pasos anteriores hasta que se alcance un criterio de convergencia. El criterio de convergencia establece la condición para detener las iteraciones, por ejemplo, cuando la diferencia entre los valores de voltaje estimados en dos iteraciones consecutivas es menor a un umbral especificado. En este caso de  $1 \times 10^{-9}$  con un factor de aceleración  $\alpha = 1.6$

## 3. Obtener los voltajes finales:

Una vez que se alcanza el criterio de convergencia, los valores de voltaje obtenidos en la última iteración representan los voltajes finales en el SEP. Estos voltajes proporcionan información sobre el estado de voltaje en cada punto del sistema y son útiles para diversos análisis y estudios.

### *Obtención de Voltajes.*

Los voltajes obtenidos por MATPOWER, con 16 iteraciones de Gauss-Seidel, son los siguientes:

Bus Data						
Bus #	Voltage		Generation		Load	
	Mag(pu)	Ang(deg)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)
1	1.000	0.000*	185.86	66.27	50.00	30.99
2	0.982	-1.370	-	-	170.00	105.35
3	0.982	-1.294	-	-	200.00	123.94
4	1.020	0.843	318.00	209.11	80.00	49.58
Total:			503.86	275.38	500.00	309.86

*Ilustración 2. Datos de Voltaje, Generación y Cargas del Sistema en Barras.*

### Flujos de Potencia en Líneas y Pérdidas del Sistema.

Branch Data									
Brnch #	From Bus	To Bus	From Bus P (MW)	Injection Q (MVar)	To Bus P (MW)	Injection Q (MVar)	Loss ( $I^2 * Z$ )		
			P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	P (MW)	Q (MVar)	
1	1	2	51.61	19.87	-51.28	-28.28	0.331	1.66	
2	1	3	66.67	31.47	-66.25	-36.96	0.424	2.12	
3	1	3	66.67	31.47	-66.25	-36.96	0.424	2.12	
4	1	4	-49.09	-47.52	49.41	41.22	0.321	1.61	
5	2	4	-118.72	-77.07	120.22	76.80	1.501	7.50	
6	3	4	-67.51	-50.01	68.36	41.51	0.855	4.27	
Total:							3.855	19.28	

Ilustración 3. Datos del Sistema en Líneas.

### Dirección de Flujos de Potencia en Diagrama Unifilar.

Se muestra la representación gráfica del sistema con flujos de potencia y su comportamiento.

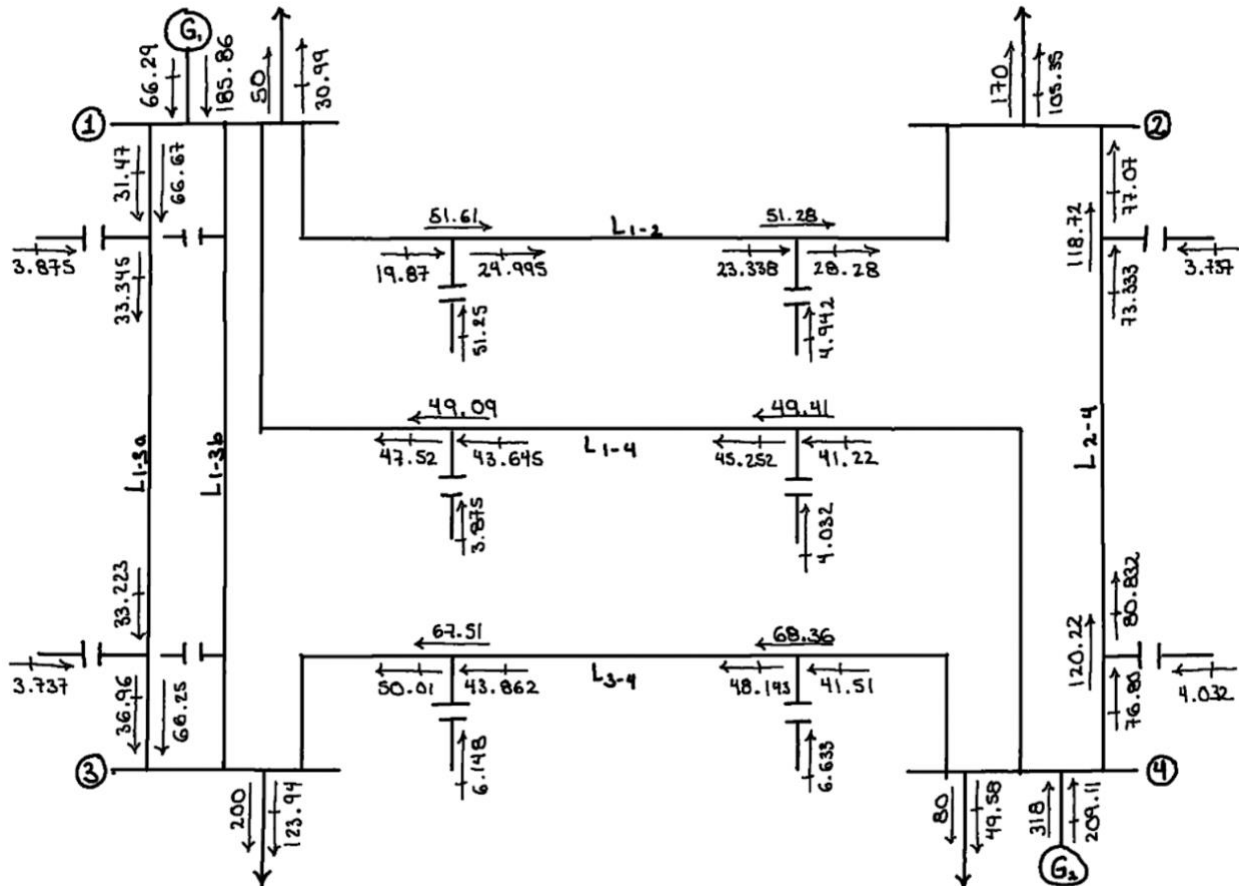


Ilustración 4. Diagrama Unifilar con Flujos de Potencia.

*Punto de Operación del Sistema.*

En la siguiente tabla (Tabla 3), se muestra de manera concentrada el comportamiento de nuestro sistema, esto resultando de las 16 iteraciones que son generadas a través de Gauss-Seidel; y que podemos comprobar en imágenes anteriores.

*Tabla 3. Datos de Operación del Sistema. (Resultados)*

Bus No.	Nombre	Volts P.U.	Generación		Carga		Línea	Flujo	
			MW	MVar	MW	MVar		MW	MVar
1	Abedul	1.0∠0°	185.855	66.29	50	30.99	2	51.61	19.87
							3(1)	66.67	31.47
							3(2)	66.67	31.47
							4	-49.09	-47.52
2	Olmo	0.982∠−1.370°	0	0	170	105.35	1	-51.28	-28.28
							4	-118.72	-77.07
3	Pino	0.982∠−1.294°	0	0	200	123.94	1(1)	-66.25	-36.96
							1(2)	-66.25	.36.96
							4	-67.51	-50.01
4	Maple	1.02∠0.843°	318	209.11	80	49.58	1	49.41	41.22
							2	120.22	76.80
							3	68.36	41.51
TOTAL			503.855	275.4	500	309.86		3.85	-34.46