

# Tarea N°1

Autores:

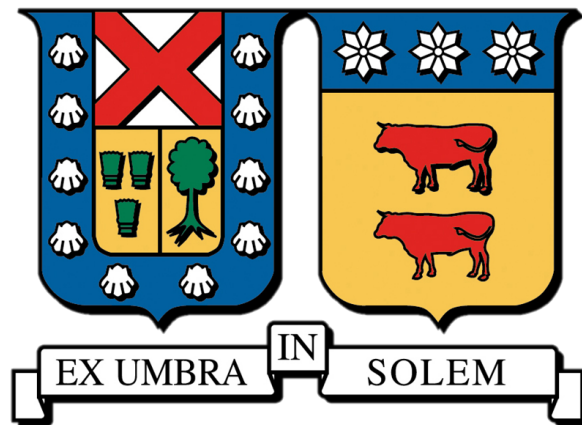
Nicolás Garrido, ROL: 202023071-4, nicolas.garridob@usm.cl

y

Juan Pérez, ROL: 202023022-6, juan.perezr@usm.cl

Valapraíso, Chile

Fecha: 21 de junio de 2024



Universidad Técnica Federico Santa María

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia ELI-246

# Índice

<b>Índice</b>	<b>1</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
<b>2. Desarrollo del Proyecto</b>	<b>2</b>
2.1. Herramientas Utilizadas . . . . .	2
2.2. Arquitectura del Proyecto . . . . .	2
2.3. Límites Admisibles de Operación . . . . .	2
2.4. Modelamiento de Línea de Transmisión . . . . .	3
2.4.1. Modelamiento con Parámetros Concentrados . . . . .	3
2.4.2. Modelamiento con Parámetros Distribuidos . . . . .	3
2.4.3. Diferencias entre Modelos de Parámetros Concentrados y Distribuidos . . . . .	3
2.4.4. Modelamiento Utilizado por la Librería Pandapower . . . . .	4
<b>3. Análisis de los Sistemas</b>	<b>4</b>
3.1. Sistema Simplificado (Figura 1(a)) . . . . .	4
3.1.1. Simulación de Tensión . . . . .	4
3.1.2. Compensación Shunt . . . . .	5
3.1.3. Pérdidas en la Línea . . . . .	5
3.2. Sistema Completo (Figura 1(b)) . . . . .	6
3.2.1. Identificación de Líneas Saturadas . . . . .	6
3.2.2. Análisis de Tensiones en Barras . . . . .	7
3.2.3. Medidas Correctivas . . . . .	8
3.2.4. Métodos de Corrección . . . . .	8
3.2.5. Línea 3A - 2B desconectada . . . . .	9
3.2.6. Sistema con un 20 % más de reactivos. . . . .	11
3.2.7. Escenarios de Carga Variable . . . . .	11
3.3. Implementación en Python . . . . .	12
Librerías Utilizadas . . . . .	12
Modelos Utilizados . . . . .	12
<b>4. Conclusiones</b>	<b>13</b>
<b>5. Referencias</b>	<b>13</b>

## 1. Introducción

El presente informe tiene como objetivo analizar dos sistemas eléctricos en estado estacionario, evaluando su comportamiento bajo diferentes escenarios de cortocircuito y compensación de reactivos en líneas de transmisión. Este análisis se lleva a cabo principalmente utilizando la librería Pandapower en Python.

## 2. Desarrollo del Proyecto

### 2.1. Herramientas Utilizadas

1. Software de programación: Pandapower en Python
2. Editor de código: Visual Studio Code con Jupyter Notebook
3. Plataforma de desarrollo: GitHub

### 2.2. Arquitectura del Proyecto

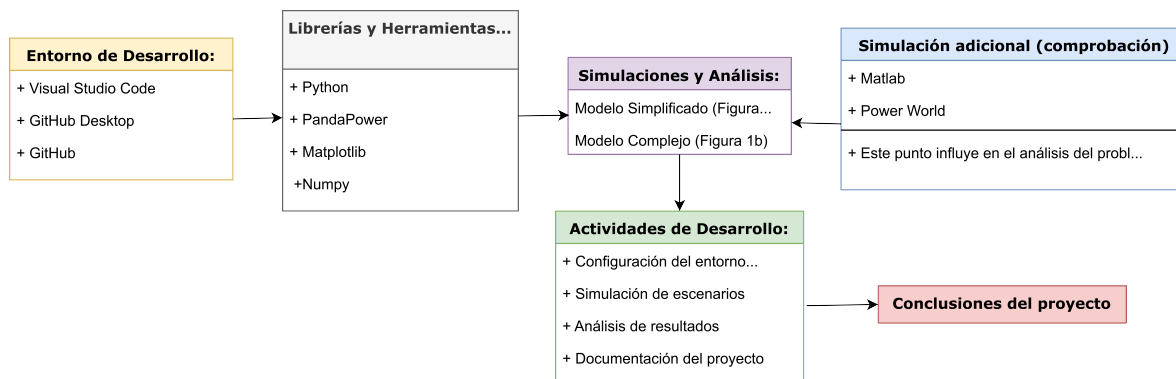


Figura 1: Esquema de arquitectura de proyecto creada en Drawio.

### 2.3. Límites Admisibles de Operación

Según la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, los límites admisibles de operación para este estudio pueden clasificarse para Sistemas de Transmisión con tensión nominal igual o superior a 500 [kV] y para Sistemas de Transmisión con tensión nominal igual o superior a 200 [kV] e inferior a 500 [kV], se ha escogido clasificarlos en la siguiente Tabla 1.

Rango de tensiones nominales [kV]	Rango para estado normal [pu]	Rango para estado de alerta [pu]
$500 \leq V_{nom}$	$0,97 \leq V_{nom} \leq 1,03$	$0,95 \leq V_{nom} \leq 1,05$
$200 \leq V_{nom} \leq 500$	$0,95 \leq V_{nom} \leq 1,05$	$0,93 \leq V_{nom} \leq 1,07$

Cuadro 1: Rangos según los artículos 5-19 y 5-23 de la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio.

## 2.4. Modelamiento de Línea de Transmisión

### 2.4.1. Modelamiento con Parámetros Concentrados

El modelamiento de una línea de transmisión con parámetros concentrados considera que todos los parámetros eléctricos de la línea (resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia) están agrupados en un único punto de la línea. Este tipo de modelamiento simplifica el análisis al representar la línea con un circuito equivalente sencillo.

En el modelamiento con parámetros concentrados, estos elementos se agrupan en secciones discretas, lo que simplifica el análisis pero puede ser menos preciso para líneas largas o de alta frecuencia.

### 2.4.2. Modelamiento con Parámetros Distribuidos

En el modelamiento de parámetros distribuidos, los parámetros eléctricos de la línea (resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia) se distribuyen a lo largo de toda la longitud de la línea. Este modelo es más complejo y realista, especialmente para líneas largas, ya que considera la variación continua de estos parámetros a lo largo de la línea.

El modelo de parámetros distribuidos se describe mediante ecuaciones diferenciales que representan el comportamiento de la tensión y la corriente en función de la posición a lo largo de la línea y del tiempo.

### 2.4.3. Diferencias entre Modelos de Parámetros Concentrados y Distribuidos

- **Precisión:** El modelo de parámetros distribuidos es más preciso para analizar líneas largas y de alta frecuencia, mientras que el modelo de parámetros concentrados es adecuado para líneas cortas y análisis simplificados.
- **Complejidad:** El modelo de parámetros concentrados es más simple y fácil de implementar, mientras que el modelo de parámetros distribuidos es más complejo y requiere el uso de ecuaciones diferenciales.
- **Aplicabilidad:** El modelo de parámetros concentrados se utiliza principalmente en estudios de redes de distribución y análisis básicos, mientras que el modelo de parámetros distribuidos se usa en el análisis detallado de líneas de transmisión largas y sistemas de comunicaciones.

#### 2.4.4. Modelamiento Utilizado por la Librería Pandapower

La librería **Pandapower** utiliza principalmente el **modelamiento con parámetros concentrados** para las líneas de transmisión. Esto se debe a que está orientada a la simulación y análisis de redes eléctricas de distribución y transmisión a nivel de sistema de potencia, donde se prioriza la simplicidad y eficiencia en el cálculo sobre el detalle absoluto de la distribución de parámetros.

### 3. Análisis de los Sistemas

#### 3.1. Sistema Simplificado (Figura 1(a))

##### 3.1.1. Simulación de Tensión

Al analizar el sistema eléctrico de dos barras [Figura 1 (a)], se modeló el comportamiento del voltaje en la Barra 2 para una carga inductiva variable. Utilizando la librería PandaPower, se modeló la red eléctrica y se ejecutó un flujo de carga para determinar el estado operativo de la Barra 2.

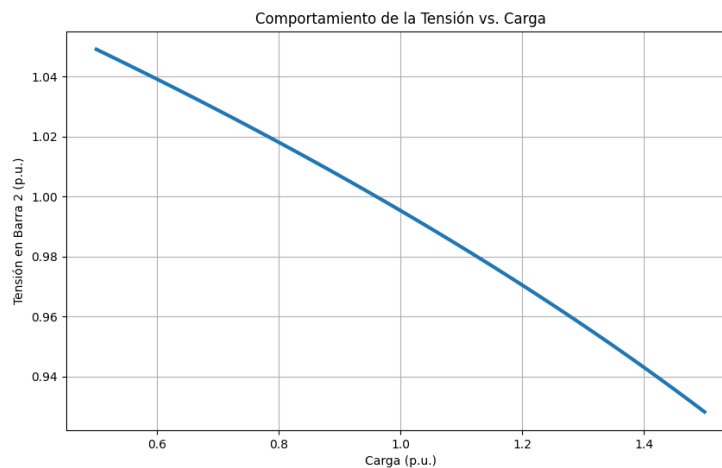


Figura 2: Voltaje en la barra 2 al variar la carga.

Se puede observar que el voltaje pasa de estar en  $1.0491[pu]$  para una carga 50 % menor a la nominal a estas en  $0.9282[pu]$  para una carga 50 % mayor a la nominal. esto se puede explicar por el efecto capacitivo de las líneas de transmisión, ya que como se explicó anteriormente, Pandapower trabaja con un modelamiento de línea con parámetros concentrados por lo que la capacitancia de las líneas puede ser interpretada como capacitores en los extremos, causando una compensación shunt involuntaria, aumentando el voltaje en la Barra 2

### 3.1.2. Compensación Shunt

En este caso como se trata de una sistema con un voltaje nominal de  $500[kV]$ , el rango para un estado normal según la norma debería oscilar entre los  $0.97[pu]$  y los  $1.03[pu]$ . Como podemos observar el sistema logra superar los  $1.03[pu]$  para una carga de  $-50\%$ , mientras que para una carga de  $+50\%$  la tensión cae por debajo de  $0.97[pu]$ , es por esto que se opta por una compensación shunt, con el objetivo de regular la tensión en los puntos anteriormente mencionados.

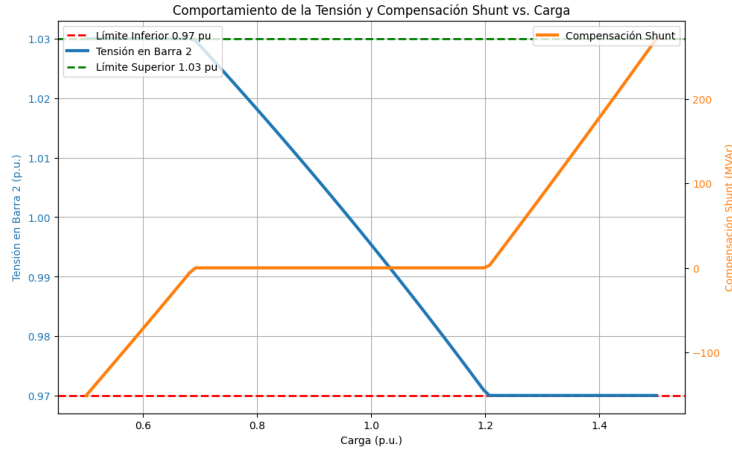


Figura 3: Compensación shunt para una carga  $\pm 50$  en la barra 2.

Se puede ver que, cuando la barra excede los  $1.03[pu]$  se necesita de una compensación inductiva tal que, esta absorba la potencia reactiva de inductiva de la carga con el fin de disminuir la tensión en la barra 2, teniendo un valor de alrededor  $-151.023[MVar]$  para un carga mínima del  $-50\%$ . En el caso cuando la tensión de la barra 2 disminuye de los  $0.97[pu]$ , esta necesitará de una compensación capacitiva, tal que sea capaz de inyectar potencia reactiva capacitiva aumentando la tensión en la barra, esto con un valor de  $271.219[MVar]$  para un carga máxima de  $+50\%$ .

### 3.1.3. Pérdidas en la Línea

Analizando el sistema cuando la carga de la barra 2 varía en un  $\pm 50\%$ , se pudo observar como se comportaban las pérdidas en la línea con y sin una compensación shunt.

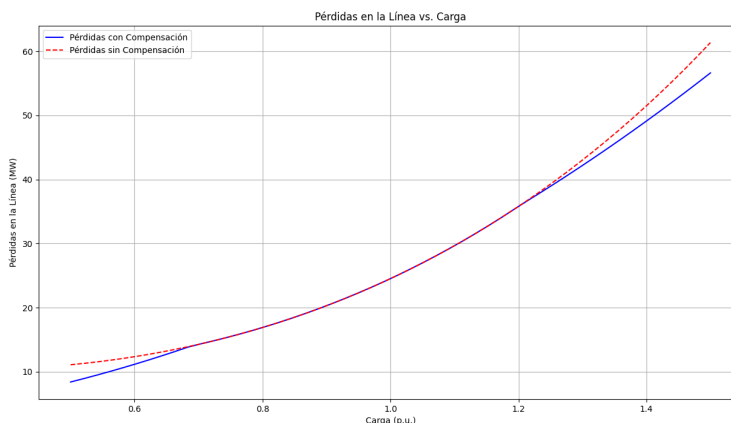


Figura 4: Pérdidas en la línea para una carga que varía  $\pm 50$  en la barra 2.

Sin compensación shunt, la potencia reactiva de las cargas debe ser proporcionada a través de las líneas de transmisión, esto resulta en corrientes más altas debido a la circulación de potencia reactiva no compensada, donde una mayor corriente implicará mayores pérdidas resistivas, esto viene representado por la curva roja en donde se evidencia mayores pérdidas. En el caso de una compensación shunt, se inyecta o se absorbe potencia reactiva directamente en la barra 2, lo que ayuda a mantener la tensión dentro de un rango deseado (0.97 - 1.03 pu), por lo que con una compensación adecuada de la potencia reactiva se puede reducir la necesidad de que esta sea transportada a través de las líneas de transmisión, lo que resulta en corrientes más bajas en las líneas, ya que solo deben transportar la potencia activa, reduciendo así las pérdidas resistivas.

## 3.2. Sistema Completo (Figura 1(b))

### 3.2.1. Identificación de Líneas Saturadas

Al analizar el sistema eléctrico de parámetros distribuidos [Figura 1 (b)], se intentó identificar la presencia de líneas potencialmente saturadas bajo las condiciones iniciales del problema. Utilizando la librería PandaPower, se modeló la red eléctrica y se ejecutó un flujo de carga para determinar el estado operativo de las líneas de transmisión.

El modelo incluye dos barras principales, Bus 1 y Bus 2, con barras intermedias Bus 1A, Bus 2A, Bus 3A, Bus 1B, y Bus 2B. Se crearon líneas de transmisión entre estas barras utilizando el tipo de línea estándar “N2XS(FL)2Y 1x185 RM/35 64/110 kV” y un transformador “100 MVA 220/110 kV” entre Bus 2 y Bus 1. Además, se definió una barra slack en Bus 1 y se asignaron cargas nominales a cada barra, proporcionalmente distribuidas según los porcentajes previamente indicados.

Se pudo visualizar un resultado positivo, indicando que el sistema se encuentra bien dimensionado y que las líneas pueden manejar las cargas actuales sin riesgo de sobrecarga.

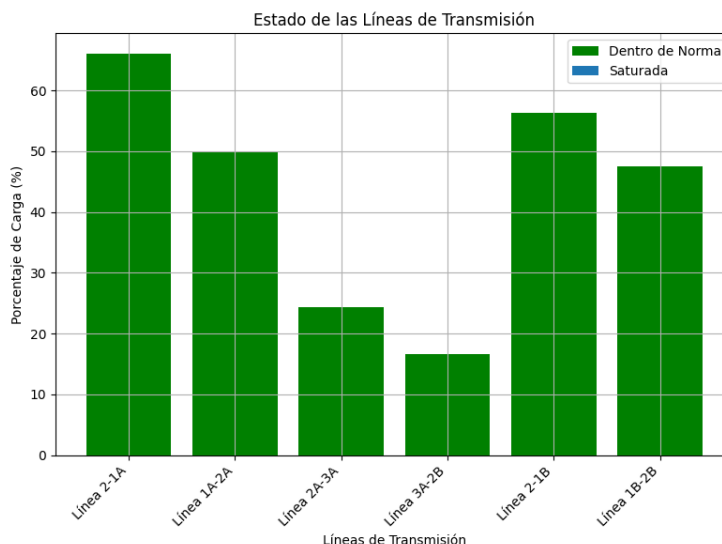


Figura 5: Estado de las Líneas de Transmisión.

Analizando cada línea se puede observar que las líneas más cargadas son las que están directamente conectadas en Bus 2 (Línea 2-1A y Línea 2-1B), y las que están menos cargadas son las que están más alejadas de la fuente (Línea 3A-2B y Línea 3A-2A), esto se debe a que las líneas más cercanas a la barra Slack deben proporcionar energía a todas las demás barras, por lo que son sometidas a mayor estrés, en cambio las últimas líneas tienden a abastecer sólo a las últimas cargas.

No obstante, es importante tener métodos en caso de que estas líneas logren saturarse debido a cambios en las cargas. Alguno de estos métodos puede ser la redistribución de las cargas en las barras tal que, el sistema pueda equilibrarse y evitar líneas saturadas o directamente aumentar la capacidad de las líneas. Otra opción efectiva es la compensación reactiva la cual mejora el perfil de tensión y disminuye la corriente que circula.

### 3.2.2. Análisis de Tensiones en Barras

A partir de la misma configuración de líneas anterior, analizaremos la tensión que se encuentran en cada barra y compararemos estas en 2 escenarios:

- Estado normal
- Estado de alerta

En este caso según el artículo 5-19 de la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, para una tensión igual o superior a los 200 [kV] y menor a los 500 [kV] la magnitud en las barras deberá estar comprendida entre los 0.95 [pu] y los 1.05 [pu] para un estado normal, mientras que para un estado de alerta según el artículo 5-23 de la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio, para el mismo rango de tensión la variación en la magnitud de tensión en las barras estará comprendido entre los 0.93 [pu] y los 1.07 [pu].

Analizando el sistema mediante el código, se podrá ver como todas las barras se encuentran dentro de la



norma, por lo que no se necesitará compensaciones para estabilizarlas.

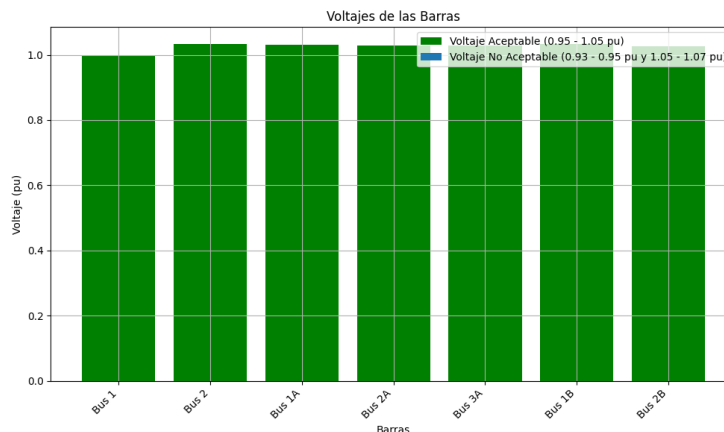


Figura 6: Tensión en barras.

### 3.2.3. Medidas Correctivas

Como se pudo ver en la sección anterior, las barras se encontraban dentro de la norma como en estado normal y estado de alerta, sin embargo, analizando un caso hipotético podremos determinar en como funcionan las compensación shunt como medida correctiva. Para esto se le aplicara una compensación inductiva serie en la barra 2, mientras que para la barra 2B se le aplicará un compensación shunt capacitiva.

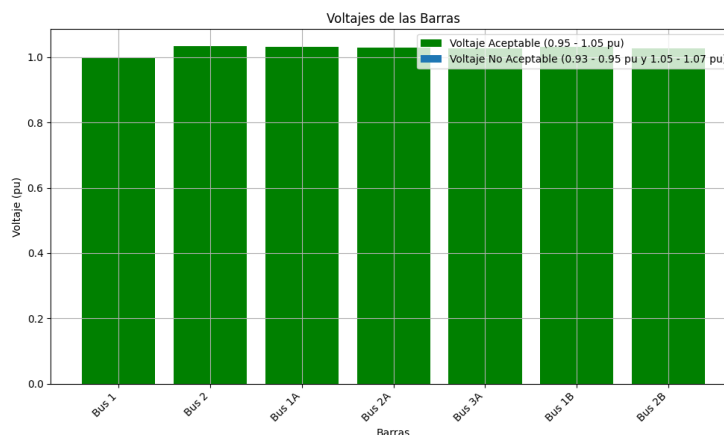


Figura 7: Compensaciones en barras 2 y 2B.

Si bien en el gráfico no se diferencia el cambio tensión en las barras 2 y 2B, estas si varían. En el caso de la barra 2 su tensión logra aumentar de  $1.033380[pu]$  a  $1.038014[pu]$ , en cambio para la barra 2B se puede ver todo lo contrario en donde su tensión pasa de  $1.027435[pu]$  a  $1.024142[pu]$ .

### 3.2.4. Métodos de Corrección

Existen varios métodos para modificar el voltaje de un sistema eléctrico a un estado normal cuando se encuentra fuera de los rangos aceptables.

- Transformadores con Regulación de Tap (Tap Changers) Los transformadores con reguladores de tap automáticos (OLTC - On Load Tap Changers) pueden ajustar el voltaje en una barra moviendo los taps del transformador mientras está en operación. Esto permite ajustar el voltaje de salida del transformador sin interrumpir el suministro de energía.

Ventajas:

- Permite la regulación fina del voltaje.
  - No requiere la desconexión del sistema.
- Reguladores de Voltaje (Voltage Regulators) Los reguladores de voltaje son dispositivos que ajustan el voltaje en tiempo real para mantener un nivel de voltaje constante. Se pueden utilizar en la distribución para mantener los niveles de voltaje dentro de los límites deseados.

Ventajas

- Responde rápidamente a las variaciones de voltaje.
  - Se pueden instalar en diferentes puntos de la red.
- Inyección de Potencia Reactiva a través de Generadores Síncronos Los generadores síncronos pueden inyectar o absorber potencia reactiva, lo que ayuda a regular el voltaje en las barras del sistema eléctrico. Al ajustar el factor de potencia del generador, se puede controlar el flujo de potencia reactiva y, por ende, el voltaje.

Ventajas:

- Aprovecha los generadores existentes.
- Puede ser ajustado dinámicamente.

### 3.2.5. Línea 3A - 2B desconectada

Para este caso desconectaremos la línea de transmisión que conecta la barra 3A con la barra 2B y analizaremos el comportamiento de las distintas variables ante este cambio de topología. Primero veremos como se comporta la tensión en las barras.

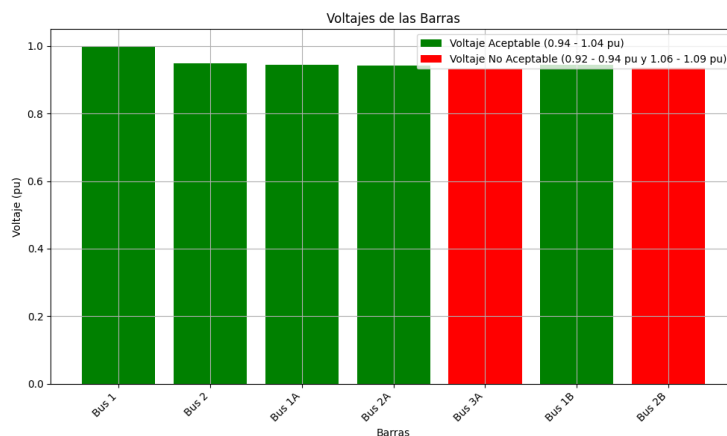


Figura 8: Tensión en barras con línea 3A-2B desconectada.

Vemos como las barras más extremas no se encuentran en un voltaje aceptable, esto porque al desconectar las barras 3A y 2B toda la potencia que se consuma en cada rama de barras pasará por una sola línea, lo que somete a las líneas más cercanas a la fuente a una mayor carga, por lo que las caídas de tensión en estas es más evidente, esto es especialmente observable en las barras más extremas, esta es la razón de que su voltaje sea menor al aceptable. En cuanto a las líneas de transmisión.

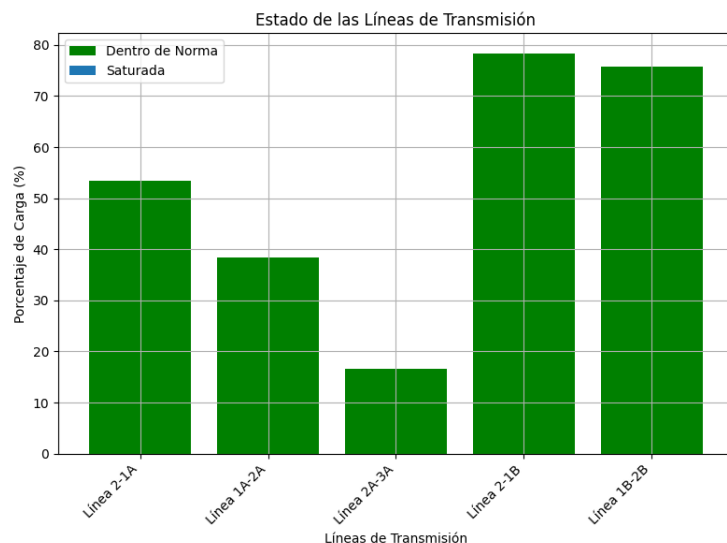


Figura 9: Porcentaje de carga en líneas con línea 3A-2B desconectada.

Observamos como las líneas de la derecha en este caso las "B" poseen más carga, esto debido a que la interrupción de la línea 3A-2B obliga a que la potencia que flúa por esa línea se redistribuya a través de las otras líneas. En este caso, la ruta alternativa principal sería a través de la línea que conecta las barras 2 y 1B y luego a la barra 2B.

### 3.2.6. Sistema con un 20 % más de reactivos.

Desde el generador se le inyectará un 20 % más de reactivos al sistema, con la línea 3A-2B conectada de nuevo y veremos como se comporta sus variables.

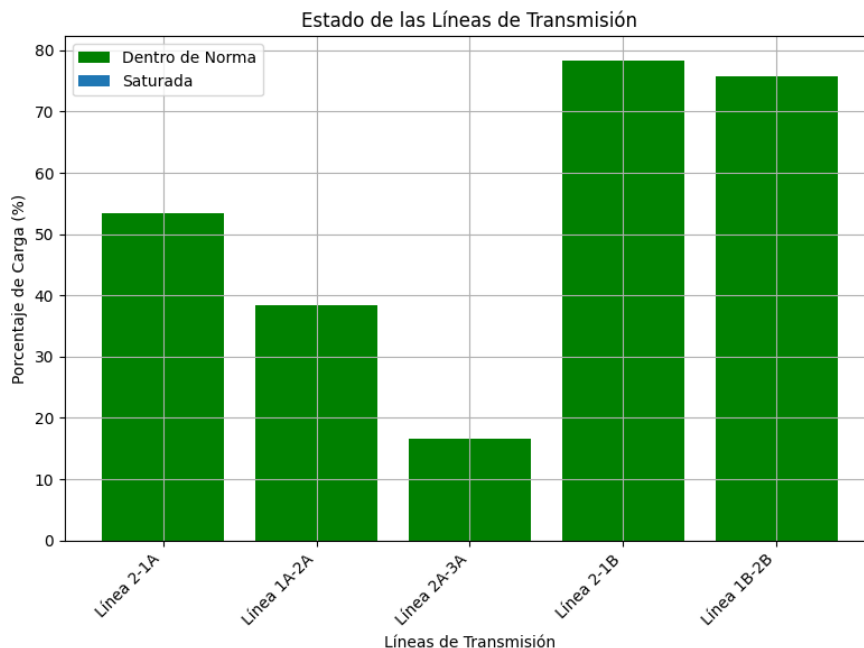


Figura 10: Variables del sistema con un 20 % más de reactivos desde el generador.

Vemos como se mantienen estas variables, esto puede deberse a que la potencia reactiva suministrada por el generador (barra slack) es ajustada automáticamente para mantener las tensiones en las barras dentro de los límites establecidos. Si no hay cambios en la demanda de potencia reactiva de las cargas o no hay nuevas condiciones que requieran más potencia reactiva, el sistema podría permanecer en equilibrio.

### 3.2.7. Escenarios de Carga Variable

Para esta sección crearemos tantos escenarios como cargas tiene el sistema, en este caso habrán 5 escenarios, donde variaremos cada carga en un  $\pm 15\%$ , observando así la variación en las variables como de tensión en las barras y la carga en las líneas de transmisión, lo que se refleja en la Tabla 2.

Como se puede observar, la variación de una carga provoca cambios significativos en todas las barras y líneas del sistema. Estos cambios son particularmente notables en los voltajes de las barras donde se aplica la carga. Al aumentar la carga, el voltaje disminuye, y al disminuir la carga, el voltaje aumenta. Estos resultados concuerdan con los análisis realizados en secciones anteriores.

Variab.	Est. inic.	C 1A		C 2A		C 3A		C 1B		C 2B	
X	X	+15 %	-15 %	+15 %	-15 %	+15 %	-15 %	+15 %	-15 %	+15 %	-15 %
$V_1$	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
$V_2$	1.0334	1.0240	1.0424	1.0163	1.0493	1.0261	1.0404	1.0287	1.0379	1.0029	1.0603
$V_{1A}$	1.0315	1.0218	1.0408	1.0140	1.0477	1.0241	1.0386	1.0267	1.0360	1.0005	1.0588
$V_{2A}$	1.0292	1.0195	1.0386	1.0113	1.0460	1.0217	1.0365	1.0245	1.0338	0.9976	1.0571
$V_{3A}$	1.0284	1.0186	1.0377	1.0105	1.0450	1.0206	1.0359	1.0236	1.0331	0.9962	1.0568
$V_{1B}$	1.0324	1.0229	1.0415	1.0151	1.0485	1.0250	1.0395	1.0276	1.0371	1.0013	1.0597
$V_{2B}$	1.0274	1.0177	1.0368	1.0097	1.0440	1.0198	1.0348	1.0226	1.0321	0.9949	1.0562
$L_{2-1A}$	66.091	68.518	63.853	69.881	62.801	67.324	64.928	66.406	65.788	70.412	62.676
$L_{1A-2A}$	49.789	49.846	49.751	53.128	46.984	50.843	48.807	50.017	49.571	53.442	47.018
$L_{2A-3A}$	24.364	24.169	24.556	23.784	24.934	24.694	24.132	24.359	24.374	25.598	24.091
$L_{3A-2B}$	16.690	16.400	16.974	15.518	17.845	15.818	17.564	16.797	16.584	19.832	14.046
$L_{1B-2}$	56.392	56.712	56.111	57.472	55.512	57.094	55.749	57.249	55.589	60.528	53.555
$L_{2B-1B}$	47.573	48.407	46.775	49.884	45.612	49.001	46.180	47.687	47.464	54.921	43.484

Cuadro 2: Variables del sistema variando cada una de sus cargas en un  $\pm 15\%$ .

### 3.3. Implementación en Python

#### Librerías Utilizadas

- pandapower
- pandapower.plotting
- matplotlib.pyplot
- numpy

#### Modelos Utilizados

- Línea personalizada para sistema simplificado
- Línea "N2XS(FL)2Y 1x185 RM/35 64/110 kV" para sistema de parámetros distribuidos.
- Transformador "100 MVA 220/110 kV" para sistema de parámetros concentrados.

## 4. Conclusiones

El análisis y modelamiento de sistemas eléctricos de potencia utilizando la librería Pandapower en Python ha permitido evaluar el comportamiento de dos sistemas eléctricos bajo diferentes escenarios, incluyendo variaciones de carga, compensación shunt, y la desconexión de líneas de transmisión. Se pudo ver como la tensión en las barras puede variar significativamente con cambios en la carga, como la compensación shunt es una medida efectiva para regular la tensión y mantenerla dentro de los rangos aceptables definidos por norma, se comprobó como en el sistema simplificado, la compensación shunt logró mantener la tensión dentro de los límites deseados, reduciendo las pérdidas en la línea y mejorando la eficiencia del sistema, además de investigar algunos otros métodos de corrección ocupados en la industria.

Es por esto que el uso de herramientas de simulación nos permite realizar un análisis detallado y preciso de sistemas eléctricos de potencia, proporcionando conocimientos valiosos para la planificación, operación y mantenimiento de redes eléctricas y como las medidas correctivas y métodos de compensación reactiva son esenciales para asegurar la estabilidad y eficiencia del sistema bajo diversas condiciones de operación.

## 5. Referencias

- : Pág. 83. Artículo 5-19 "Variación de tensión en estado normal para voltajes nominales sobre 500[kV] y voltajes de entre 200[kV] y 500[kV]
- Pág. 84. Artículo 5-23 "Variación de tensión en estado de alerta para voltajes nominales sobre 500[kV] y voltajes de entre 200[kV] y 500[kV]
- : Librería de transformadores y líneas de Pandapower.