

Por: Ing César Chilet León

Flujo de potencia

Introducción

Introducción

- El flujo de potencia también es conocido también como flujo de carga.
- El flujo de potencia es una herramienta para el análisis de redes.

Propósito del cálculo de flujo de potencia

En tareas de planificación de redes

- Determinación del porcentaje de carga de los equipos
- Identificación de los puntos débiles
- Impacto del incremento de carga
- Investigación de la carga máxima / de la mínima carga y las condiciones de generación.
- Control de tensión, compensación de potencia reactiva
- La seguridad del suministro (criterio n-1) y la confiabilidad

Para operación de la red

- Reducción de Pérdidas
- Investigación de las configuraciones de red durante el mantenimiento

Estado inicial para

- cálculos de estabilidad
- arranque de motores

Resultados del cálculo de flujo de potencia

Corrientes de carga

- magnitud y ángulo
- Cargabilidad de los equipos, sobrecargas

Tensiones de nodo

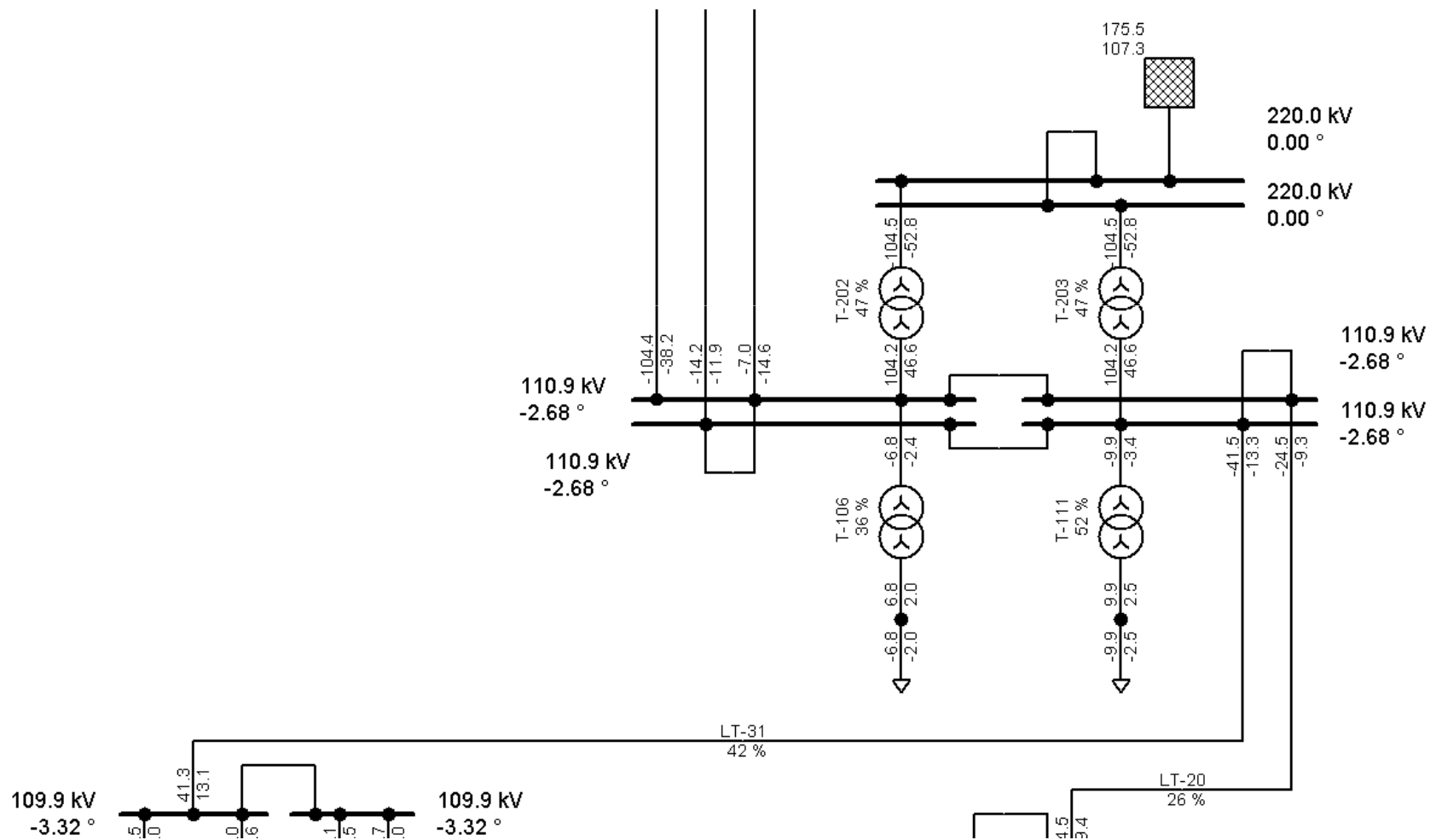
- magnitud y ángulo

Potencias.

- Balance de potencia activa y reactiva
- Potencia activa y reactiva en generadores
- Pérdidas

Ajuste del cambiador de tomas en transformadores

Resultados del cálculo de flujo de potencia - ejemplo



Evaluación de la red eléctrica

- La evaluación del desempeño de las redes de energía eléctrica en condiciones de régimen permanente senoidal es de gran importancia:
 - Para la operación en tiempo real del sistema
 - Para el planeamiento de su operación y expansión.

Resultados a obtener

- Entre las informaciones que serán determinadas para una condición definida de carga y generación se destacan las siguientes:
 - El porcentaje de plena carga de las LT y transformadores.
 - El porcentaje de plena carga de los generadores.
 - La magnitud de tensiones en barras
 - Las pérdidas de transmisión.
 - El porcentaje de carga en los equipos de compensación de reactivos (síncronos y estáticos)...

Acciones

- A partir de los resultados obtenidos, es posible definir propuestas de modificación en el sistema de potencia, con el objetivo de conseguir una operación más segura y económica.

Cambios en la operación

- Entre las modificaciones posibles en la operación del sistema se destacan:
 - Ajuste del despacho de los generadores.
 - Ajuste de los dispositivos de control de tensión (inyecciones de potencia reactiva, posición de los tap's de los transformadores y ubicar los bancos capacitores y reactores).
 - Ajuste del intercambio con los sistemas vecinos.
 - Cambios en la topología (conectar o desconectar alguna LT o transformador).

Cambios en el planeamiento de la expansión

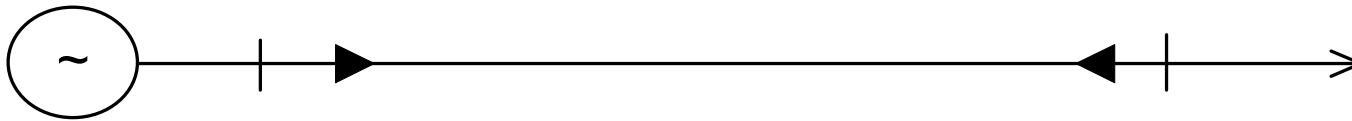
- Por otro lado, entre las modificaciones posibles en el planeamiento de expansión del sistema se destacan:
 - Instalación de nuevas plantas de generación;
 - Instalación de nuevas LT y transformadores.
 - Instalación de dispositivos de control de flujo de potencia (FACTS);
 - Interconexión con otros sistemas.

Flujo de potencia

EJEMPLO

Cálculo de red

Ejemplo 1 (impedancia constante)-dato



Fuente de
alimentación

10 kV

Cable:

N2XS2Y 3 x 35 mm²

Longitud: 4 km

Carga:

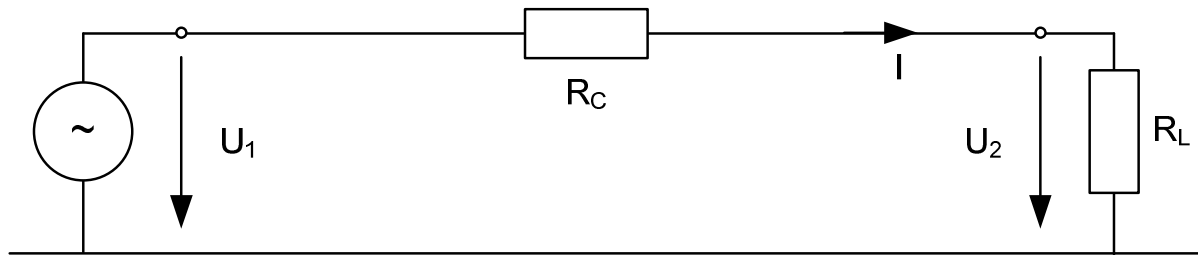
Impedancia fija

1000 kVA
 $\cos \varphi = 1.0$

a U = 10 kV

Cálculo de red

Ejemplo 1 - impedancia



Fuente de alimentación

$$U_1 = 10 \text{ kV} / \sqrt{3}$$

$$U_1 = 5.7735 \text{ kV}$$

Cable:

$$R_C = 4 \text{ km} \cdot 0.5 \text{ } \Omega / \text{km}$$

$$R_C = 2 \text{ } \Omega$$

X_C despreciable

C_C despreciable

Carga:

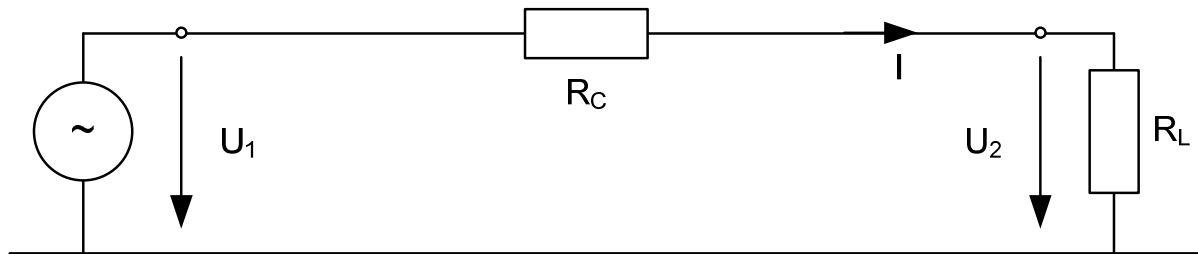
$$R_L = \frac{3 \cdot U^2}{P}$$

$$R_L = \frac{3 \cdot (5.7735 \text{ kV})^2}{1000 \text{ kVA}}$$

$$R_L = 100 \text{ } \Omega$$

Cálculo de red

Ejemplo 1 - Resultados



Cálculo de la corriente:

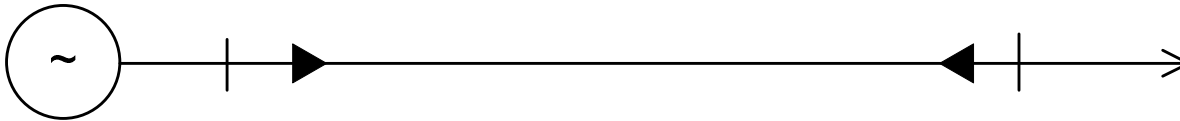
$$I = \frac{U_1}{R_C + R_L} = \frac{5.7735 \text{ kV}}{2 \Omega + 100 \Omega} = 56.60 \text{ A}$$

Cálculo de la tensión U_2

$$U_2 = I \cdot R_L = 56.60 \text{ A} \cdot 100 \Omega = 5.660 \text{ V} \quad (98\%)$$

Cálculo de red - Ejemplo 2

(potencia de la carga constante) - dato



Fuente de suministro

10 kV

Cable:

N2XS2Y 3 x 35 mm²

Longitud: 4 km

Carga:

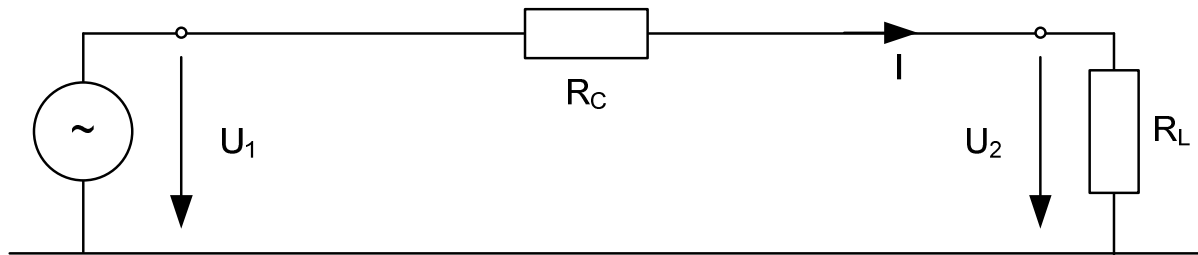
Potencia constante

1000 kVA

$\cos \varphi = 1.0$

Cálculo de red

Ejemplo 2 - impedancias



Fuente de suministro

$$U_1 = 10 \text{ kV} / \sqrt{3}$$

$$U_1 = 5.7735 \text{ kV}$$

Cable:

$$R_C = 4 \text{ km} \cdot 0.5 \text{ } \Omega / \text{ km}$$

$$R_C = 2 \text{ } \Omega$$

X_C despreciable

C_C despreciable

Carga:

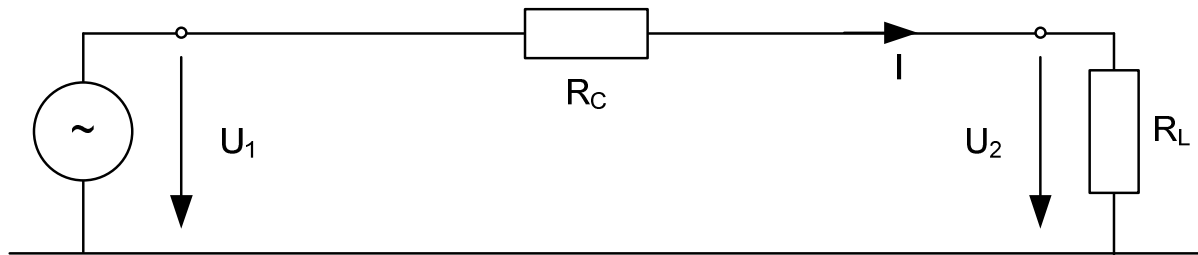
$$R_L = \frac{3 \cdot U^2}{P}$$

$$R_L = \frac{3 \cdot (5.7735 \text{ kV})^2}{1000 \text{ kVA}}$$

$$R_L = 100 \text{ } \Omega$$

Cálculo de red

Ejemplo 2 - Resultados



Cálculo de la corriente:

$$I = \frac{U_1}{R_C + R_L} = \frac{5.7735 \text{ kV}}{2 \Omega + 100 \Omega} = 56.60 \text{ A}$$

Cálculo de la tensión U_2

$$U_2 = I \cdot R_L = 56.60 \text{ A} \cdot 100 \Omega = 5.660 \text{ V} \quad (98\%)$$

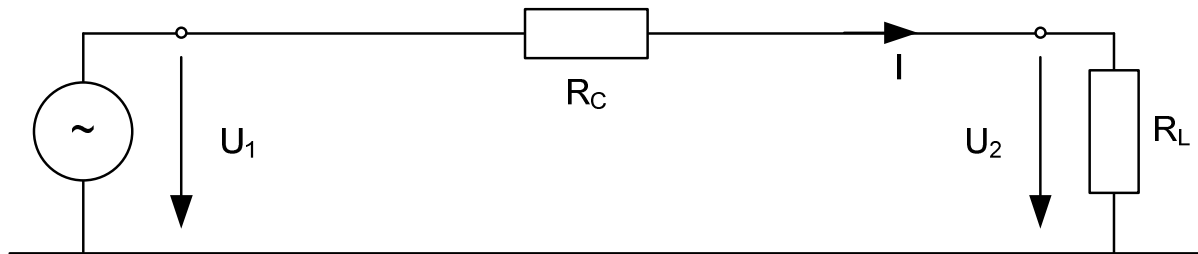
Comprobación de la potencia de la carga

$$P_L = I \cdot U_2 \cdot 3 = 56.60 \text{ A} \cdot 5.660 \text{ V} \cdot 3 = 961 \text{ kW}$$

 Iteración

Cálculo de red

Ejemplo 2 – impedancias (2da iteración)



Carga:

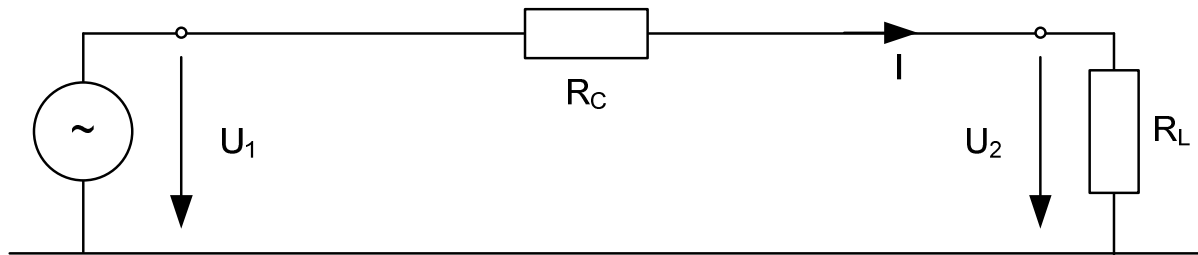
$$R_L = \frac{3 \cdot U^2}{P}$$

$$R_L = \frac{3 \cdot (5.660 \text{ kV})^2}{1000 \text{ kVA}}$$

$$R_L = 96.11 \ \Omega$$

Cálculo de red

Ejemplo 2 – Resultados (2da iteración)



Cálculo de la corriente:

$$I = \frac{U_1}{R_C + R_L} = \frac{5.7735 \text{ kV}}{2 \Omega + 96.11 \Omega} = 58.85 \text{ A}$$

Cálculo de la tensión U_2

$$U_2 = I \cdot R_L = 58.85 \text{ A} \cdot 96.11 \Omega = 5.656 \text{ V}$$

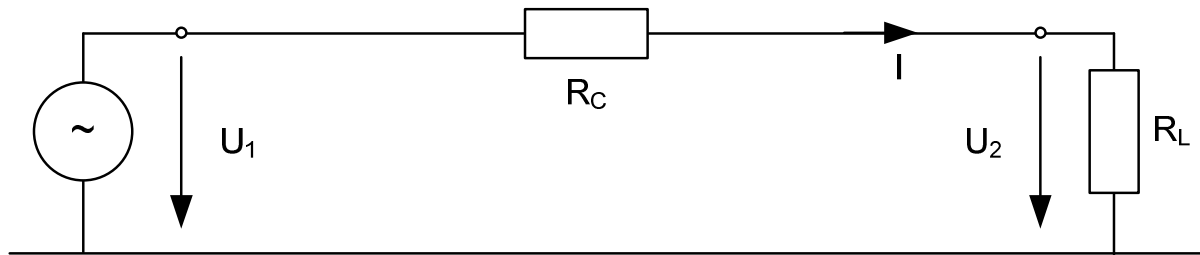
Comprobación de la potencia de la carga

$$P_L = I \cdot U_2 \cdot 3 = 58.85 \text{ A} \cdot 5.656 \text{ V} \cdot 3 = 998.6 \text{ kW}$$

Iteración?

Cálculo de red

Ejemplo 2 – impedancias (3ra iteración)



Carga:

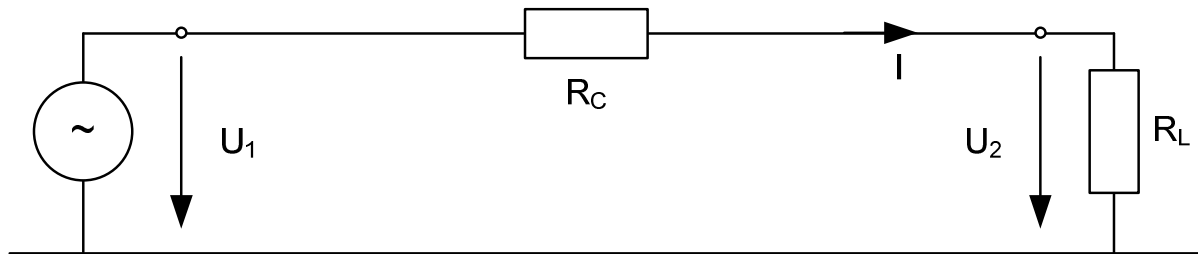
$$R_L = \frac{3 \cdot U^2}{P}$$

$$R_L = \frac{3 \cdot (5.656 \text{ kV})^2}{1000 \text{ kVA}}$$

$$R_L = 95.97 \Omega$$

Cálculo de red

Ejemplo 2 – Resultados (3ra iteración)



Cálculo de la corriente:

$$I = \frac{U_1}{R_C + R_L} = \frac{5.7735 \text{ kV}}{2 \Omega + 95.97 \Omega} = 58.93 \text{ A}$$

Cálculo de la tensión U_2

$$U_2 = I \cdot R_L = 58.93 \text{ A} \cdot 95.97 \Omega = 5.6555 \text{ V}$$

Comprobación de la potencia de la carga

$$P_L = I \cdot U_2 \cdot 3 = 58.93 \text{ A} \cdot 5.6555 \text{ V} \cdot 3 = 999.8 \text{ kW}$$

Iteración?

2. Problema del flujo de potencia

Definición

El problema de flujo de potencia (*load flow*):

- consiste en la obtención de las condiciones de operación (magnitud y ángulo de fase de los fasores tensión de cada nudo, a partir de los cuales pueden ser determinados los flujos de potencia activa y reactiva) en régimen permanente de una red de energía eléctrica con topología y niveles de generación y consumo conocidos.

Formulación

- La formulación básica del problema de flujo de potencia en sistemas eléctricos es asociada a cuatro variables por barra en la red (*que representa un nodo del circuito eléctrico equivalente*):
 - V_k -Magnitud del fasor tensión nodal de la barra k ;
 - Θ_k - Ángulo de fase del fasor tensión nodal de la barra k ;
 - P_k - Inyección neta (generación menos carga) de la potencia activa en la barra k .
 - Q_k - Inyección neta de potencia reactiva en la barra k .

Por otro lado

- Las ramas de las redes (cuyas barras extremas son k y m) se asocian a las siguientes variables:
 - I_{km} - Fasor de la corriente que sale de la barra k en dirección de la barra m ;
 - P_{km} - Flujo de potencia activa que sale de la barra k en dirección de la barra m ;
 - Q_{km} - Flujo de potencia reactiva que sale de la barra k en dirección de la barra m ;

Tipos de barras

- En el flujo de potencia convencional, se definen tres tipos de barras, en función a las variables que son conocidas (datos del problema) e incógnitas, conforme se muestra en la tabla:

Tipo de barra	Notación	Datos	Incógnitas
Barra de carga	PQ	P_k y Q_k	V_k y θ_k
Tensión controlada	PV	P_k y V_k	θ_k y Q_k
Referencia	V θ	V_k y θ_k	P_k y Q_k

Barra de carga

- En general, las barras de carga aparecen en mayor número y representan las subestaciones de energía eléctrica en las cuales están conectadas las cargas del sistema eléctrico.

Barra de tensión controlada

- Estas barras representan las instalaciones que poseen los generadores que pueden realizar el control de su tensión en bornes (*controlando su excitación*),
- Las barras cuya tensión puede ser controlada por el ajuste del *tap* de algún transformador.

Barra de referencia

- La barra de referencia es la única e imprescindible en la formulación del problema en función de dos factores:
 - Necesidad matemática de estipular un ángulo de referencia (generalmente igual a cero).
 - Para efectuar el balance de potencia de la red puesto que las pérdidas de transmisión no son conocidas a priori, o sea, no es posible definir todas las inyecciones de potencia del sistema antes de conocer las pérdidas que es función de los flujos de potencia en la red.

Modela miento de las cargas

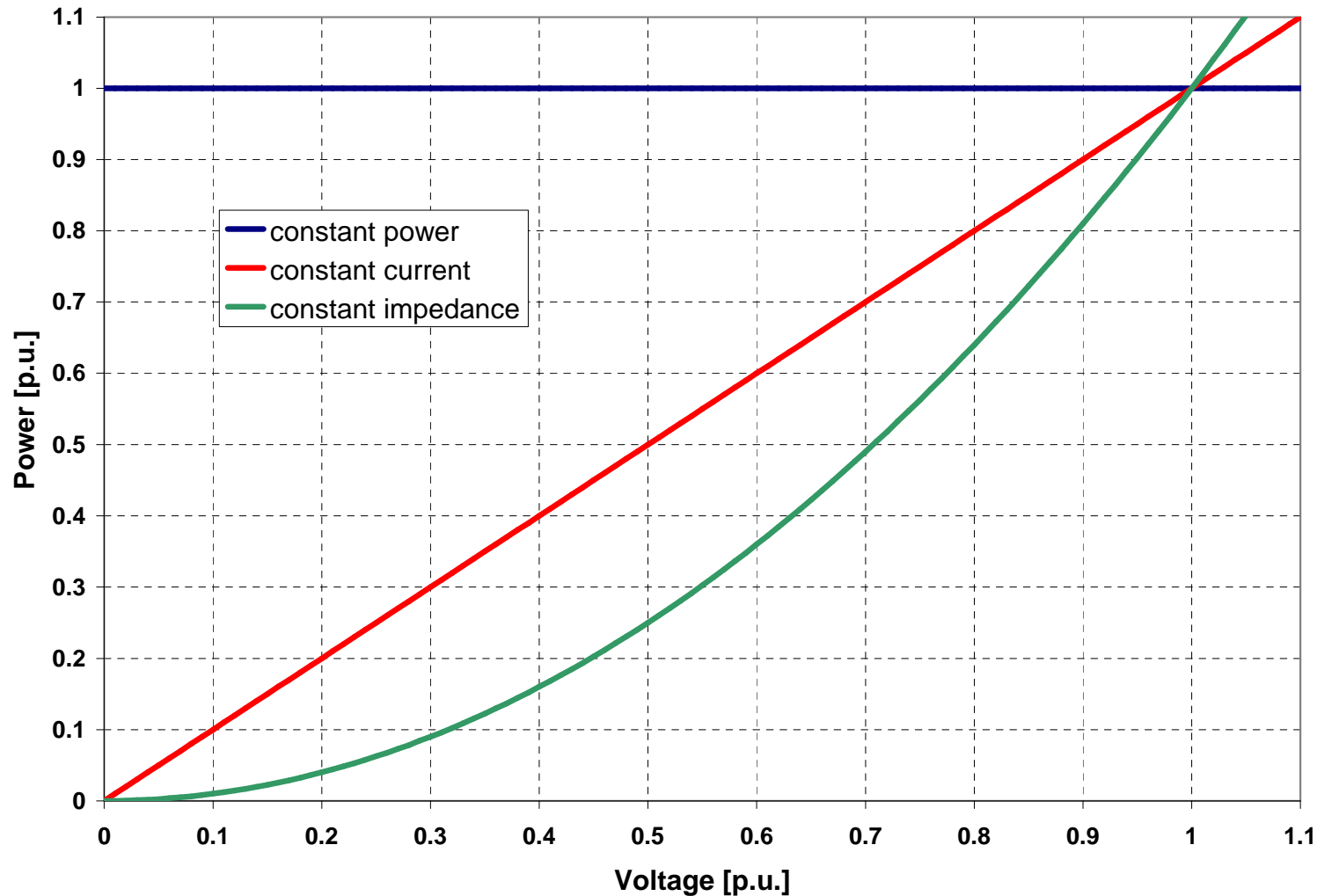
Modela miento de cargas Dependencia con la tensión

$$P = P_n \left(\frac{U}{U_n} \right)^p \quad Q = Q_n \left(\frac{U}{U_n} \right)^q$$

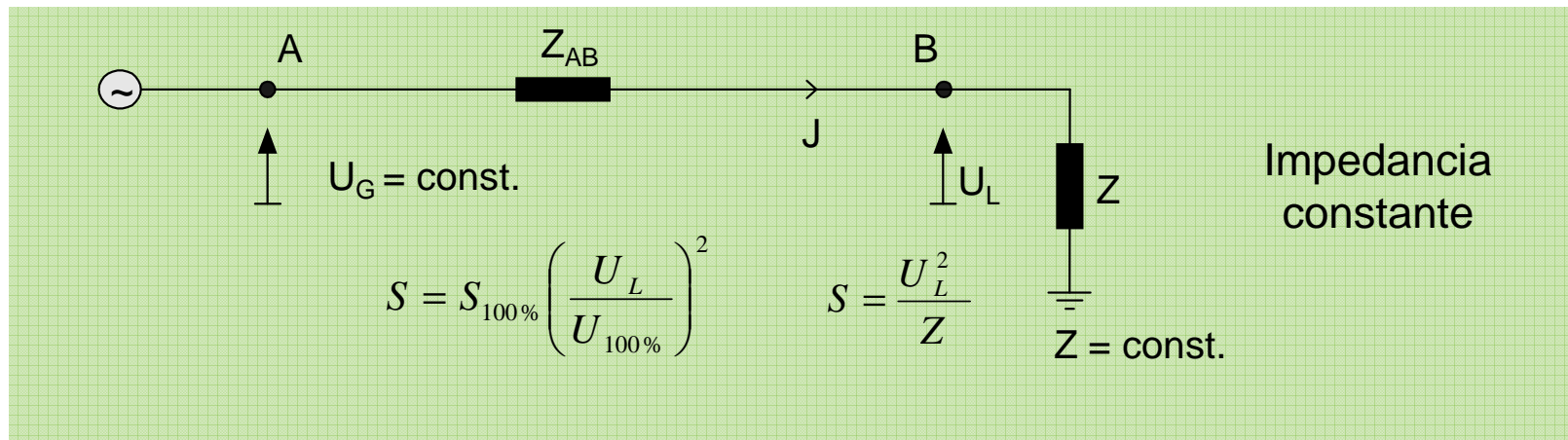
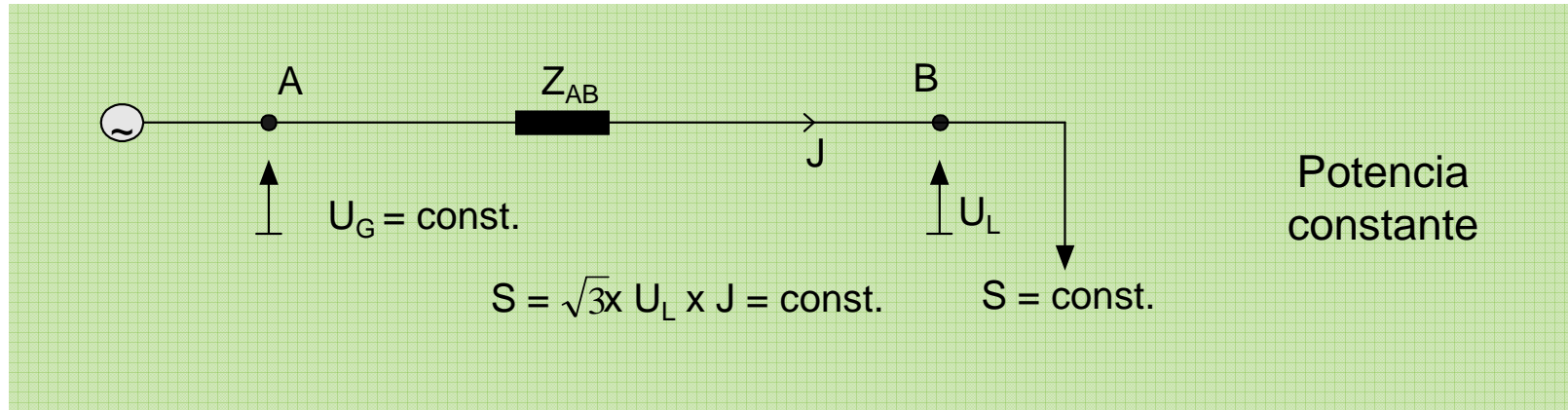
- P,Q Cargas relacionadas a la tensión actual
P_n,Q_n Cargas relacionadas a la tensión nominal
p,q Exponente de tensión para potencia activa y reactiva
U,U_n Tensión Actual, Tensión nominal

- $p = q = 0$: Carga con potencia constante ($S = \text{const.}$)
- $p = q = 1$: Carga con corriente constante ($I = \text{const.}$)
- $p = q = 2$: Carga con impedancia constante ($Z = \text{const.}$)

Modela miento de cargas Dependencia con la tensión

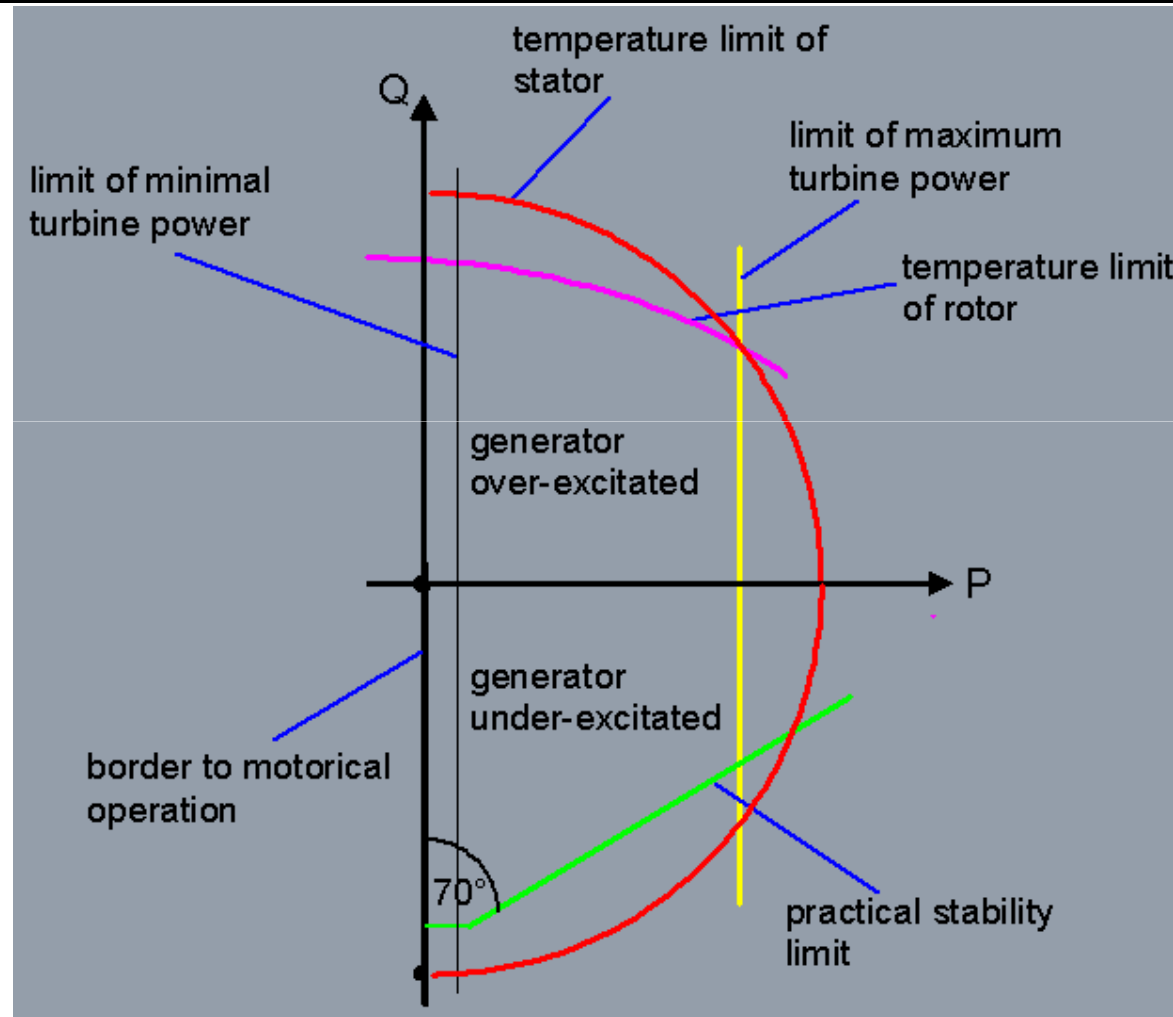


Modelando cargas



Modelando generadores

Modelando generador (curva de capacidad)

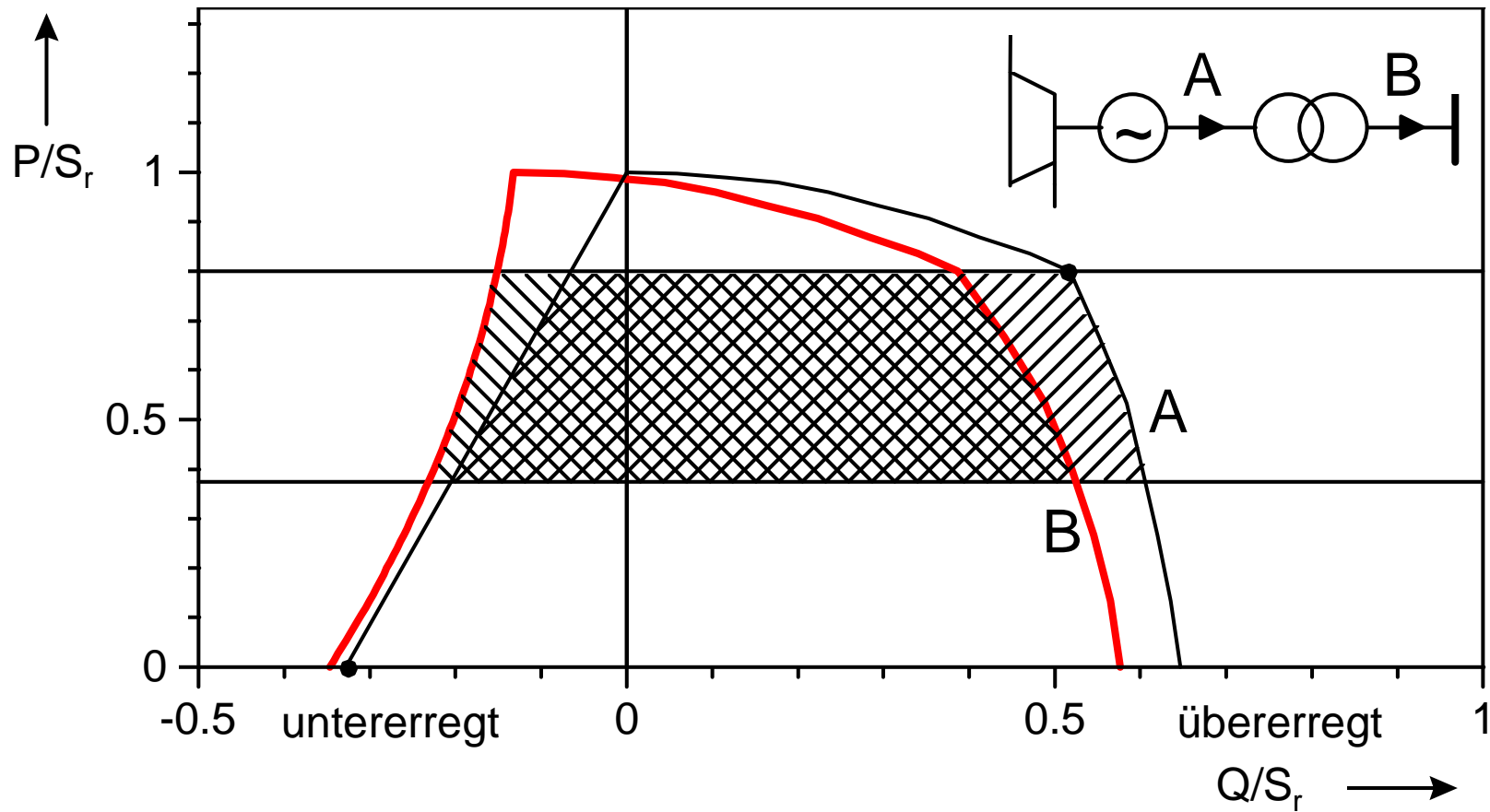


Límites de potencia reactiva del generador

- La capacidad de potencia reactiva (salida) de un generador está limitada por:
 - Límite de corriente del inducido
 - Límite de corriente de campo
 - Calefacción Límite de la parte final del núcleo
- Los límites de corriente del inducido y del campo son límites de calentamiento impuestos por el calor resultante de las pérdidas de potencia I^2R , a fin de limitar la temperatura de los conductores de la armadura y de campo.
- Los límites de calentamiento de la parte final del núcleo es a partir del calentamiento localizado en la región final de las espiras de un generador durante su operación subexcitada.

Diagrama de potencia del generador

Impacto transformador elevador



Generador

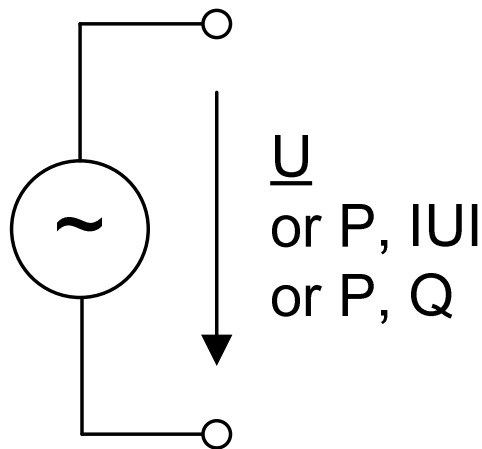
Modela miento para un flujo de potencia

Modelamiento matemático como fuente de tensión o de potencia

Barra Slack - Tensión(magnitud y ángulo) fijo,
Potencia activa y reactiva variable

Barra P-U/P-V - Tensión(magnitud) y potencia activa fija,
potencia reactiva variable
(operación normal modo de generador)

Barra P - Q - Potencia activa y reactiva fija,
Tensión (magnitud y ángulo) variable



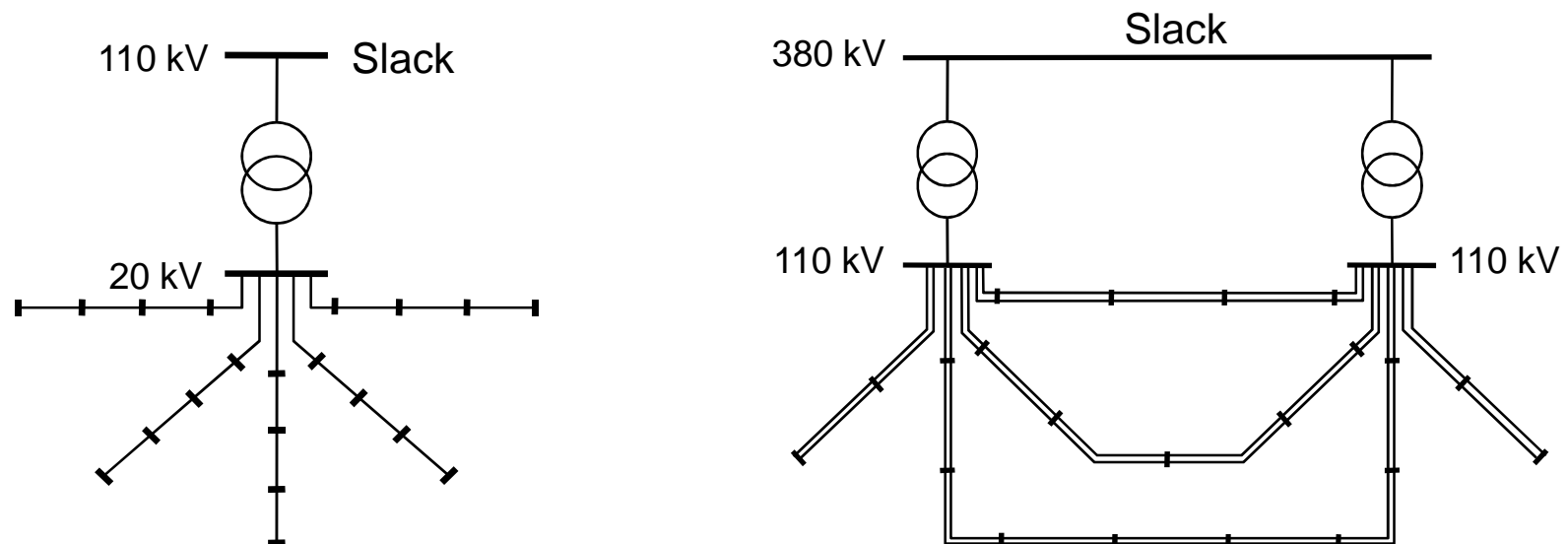
Generador

Importancia del generador Slack.

Tarea del generador amortiguadora (bus swing).

- Mantener el ángulo de tensión.
- Balancear la diferencia de potencia entre las cargas y los generadores

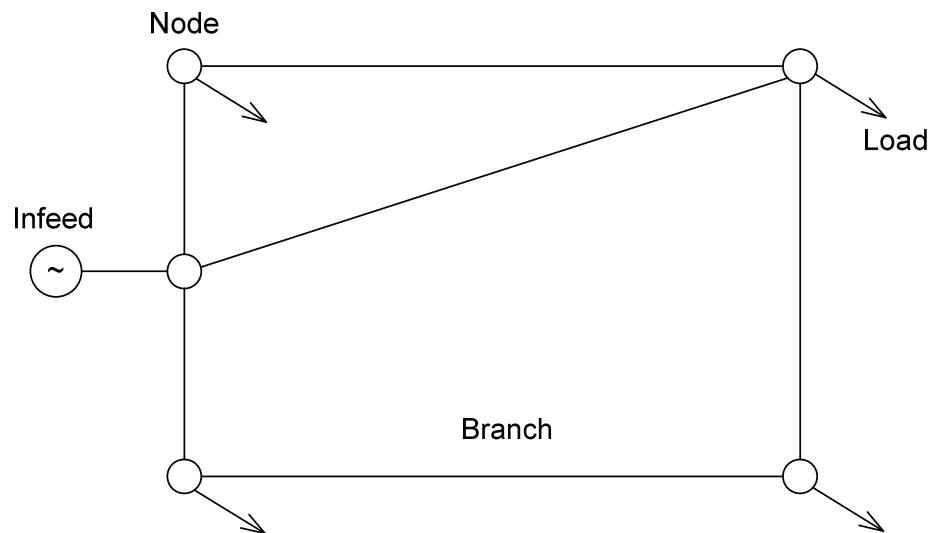
Posicionamiento de la barra slack



Procedimiento de cálculo de Flujo de Carga

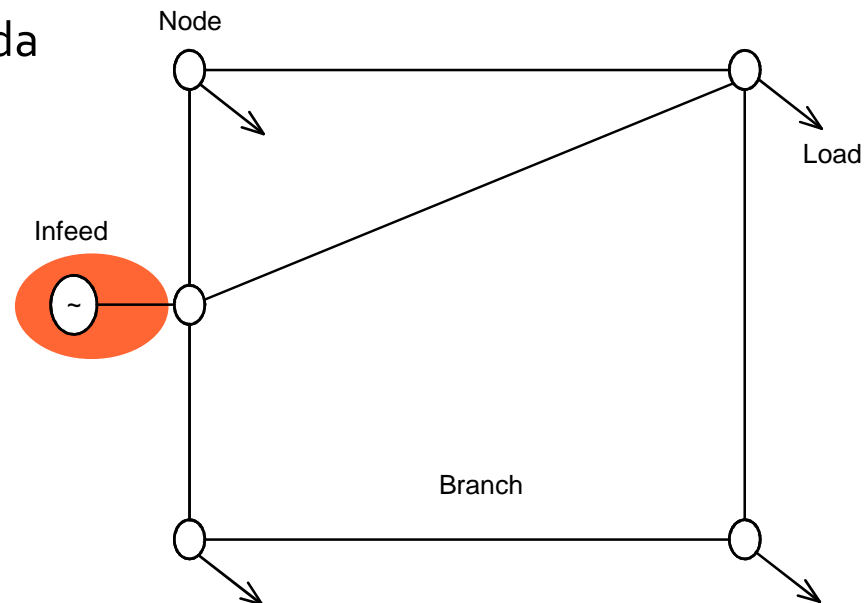
Fundamentos del cálculo de flujo de carga

- alimentaciones y cargas, barras, ramales.
- Descripción de la topología de red, es decir,
- Resolución del cálculo de flujo de carga



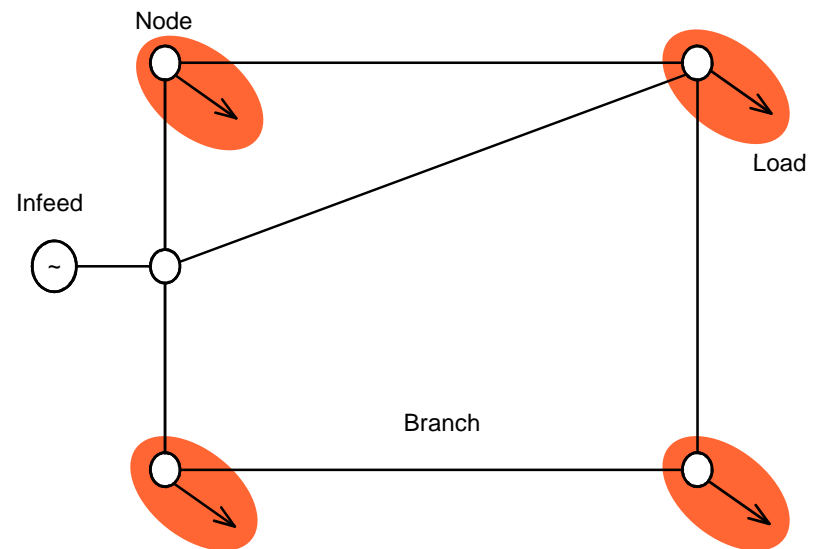
Descripción de fuentes

- Fuente Slack :
 - voltaje fijo
 - δ fijo
 - P, Q variable
 - Se requiere una barra slack en cada red para equilibrar las potencias
- Fuente P-V:
 - Tensión fija.
 - Potencia activa fija
Q, δ variable
- Fuente PQ:
 - Potencia fija
 - Potencia reactiva fija.
 - U, δ variable



Descripción de cargas

- Impedancia de carga:
 - Z fija.
- Carga P-Q:
 - potencia activa y reactiva fija descrito por:
 - P, Q
 - P, $\cos\phi$
 - S, $\cos\phi$
 - I, $\cos\phi$

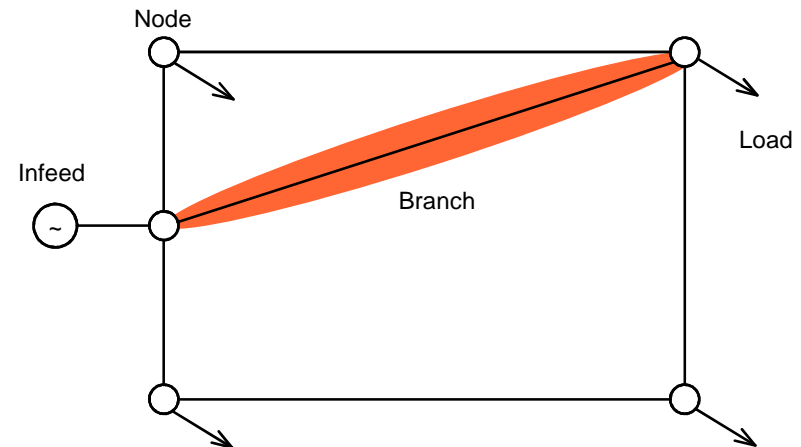
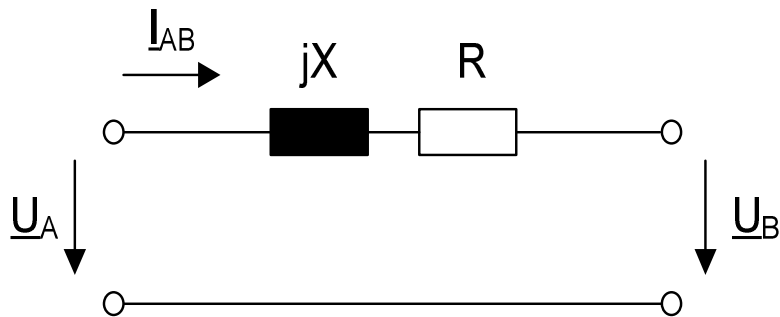


Descripción de ramales

Impedancia $Z_{AB}=R_{AB}+jX_{AB}$

o

Admitancia $\underline{Y}_{AB} = \frac{1}{\underline{Z}_{AB}} = \frac{1}{R_{AB} + jX_{AB}}$

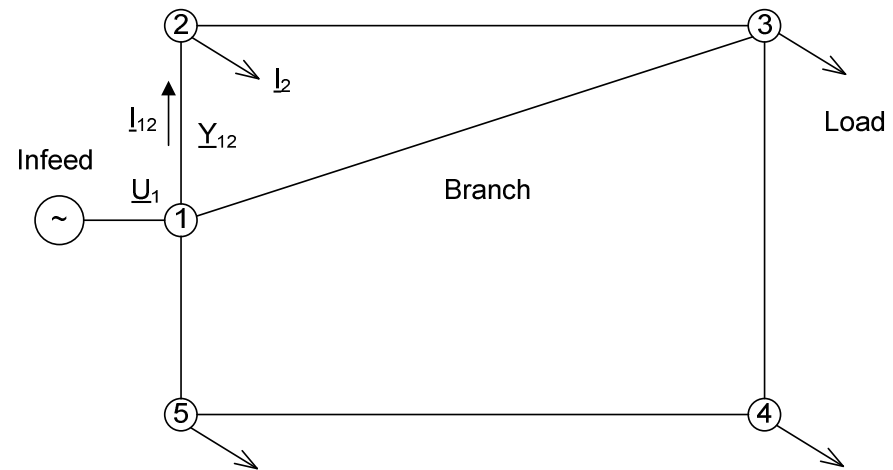


Descripción de la topología de red

$$\underline{Y} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{12} + \underline{Y}_{13} + \underline{Y}_{15} & -\underline{Y}_{12} & -\underline{Y}_{13} & 0 & -\underline{Y}_{15} \\ -\underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{21} + \underline{Y}_{23} & -\underline{Y}_{23} & 0 & 0 \\ -\underline{Y}_{31} & -\underline{Y}_{32} & \underline{Y}_{31} + \underline{Y}_{32} + \underline{Y}_{34} & -\underline{Y}_{34} & 0 \\ 0 & 0 & -\underline{Y}_{43} & \underline{Y}_{43} + \underline{Y}_{45} & -\underline{Y}_{12} \\ -\underline{Y}_{51} & 0 & 0 & -\underline{Y}_{54} & \underline{Y}_{51} + \underline{Y}_{54} \end{bmatrix}$$

Y_{ii} – suma de todas
las admitancias
conectadas al nudo

Y_{ik} – negativo de la admitancia
entre nudo i y nudo k



Propiedades de la matriz admitancia

- matriz grande
- elementos son números complejos
- escasa (para redes grandes sólo pocos elementos no-cero)
- Elementos diagonales positivos
- Elementos no diagonales cero o negativo

Problema de flujo de potencia

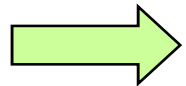
Resolver $[I] = [Y] \cdot [U]$

$[Y]$ – matriz de admitancia

$[U]$ – matriz de tensiones de nudo

$[I]$ – matriz de corrientes nudos

(es la suma de todas las corrientes
en el nudo)



problema no lineal para cargas no impedancias (típico)

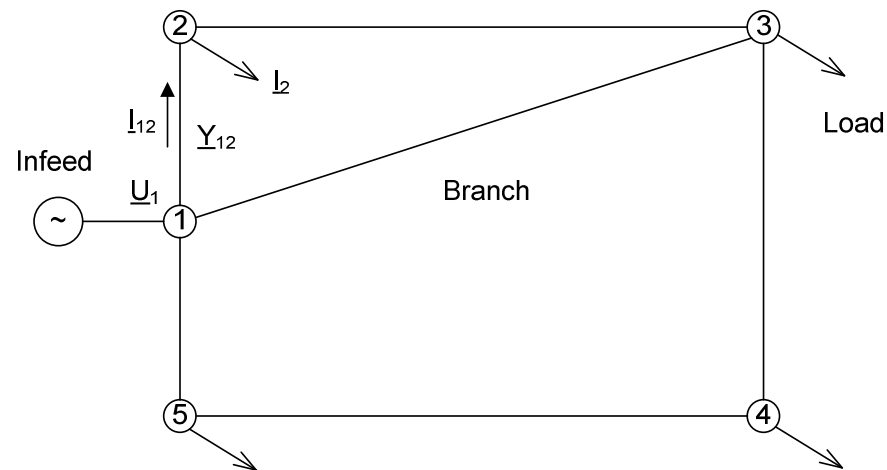
Problema de flujo de carga para red ejemplo

$$\begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_2 \\ \underline{I}_3 \\ \underline{I}_4 \\ \underline{I}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{12} + \underline{Y}_{13} + \underline{Y}_{15} & -\underline{Y}_{12} & -\underline{Y}_{13} & 0 & -\underline{Y}_{15} \\ -\underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{21} + \underline{Y}_{23} & -\underline{Y}_{23} & 0 & 0 \\ -\underline{Y}_{31} & -\underline{Y}_{32} & \underline{Y}_{31} + \underline{Y}_{32} + \underline{Y}_{34} & -\underline{Y}_{34} & 0 \\ 0 & 0 & -\underline{Y}_{43} & \underline{Y}_{43} + \underline{Y}_{45} & -\underline{Y}_{45} \\ -\underline{Y}_{51} & 0 & 0 & -\underline{Y}_{54} & \underline{Y}_{51} + \underline{Y}_{54} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_1 \\ \underline{U}_2 \\ \underline{U}_3 \\ \underline{U}_4 \\ \underline{U}_5 \end{bmatrix}$$

Y_{ik} son conocidos

U_1 es fijado

Cálculo de I_i por iteración
Luego cálculo de U_i



Problema de flujo de carga utilizando potencias

Potencia en nudos

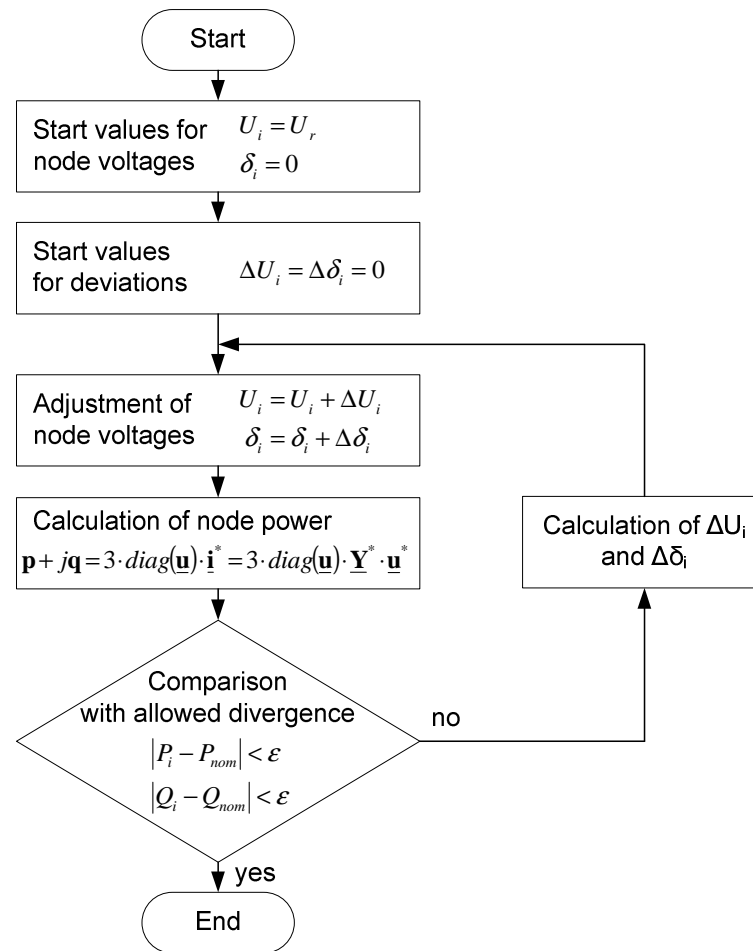
$$P_i + jQ_i = 3\underline{U}_i \cdot \underline{I}_i^*$$

Potencia en nudos, expresados como ecuación matricial

$$\mathbf{p} + j\mathbf{q} = 3 \cdot \mathit{diag}(\underline{\mathbf{u}}) \cdot \underline{\mathbf{i}}^* = 3 \cdot \mathit{diag}(\underline{\mathbf{u}}) \cdot \underline{\mathbf{Y}}^* \cdot \underline{\mathbf{u}}^*$$

Flujo de Carga como proceso de iteración

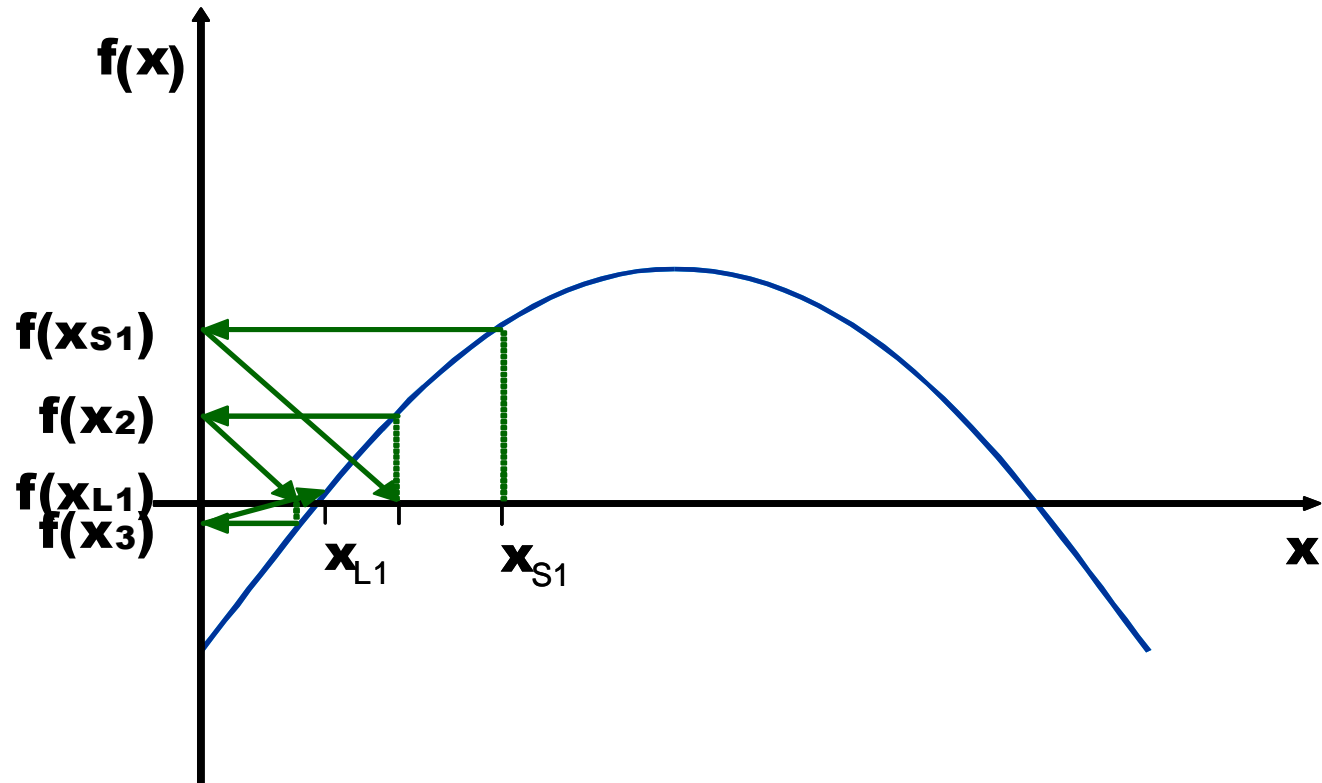
Principio procedimiento de cálculo de flujo de carga por iteración



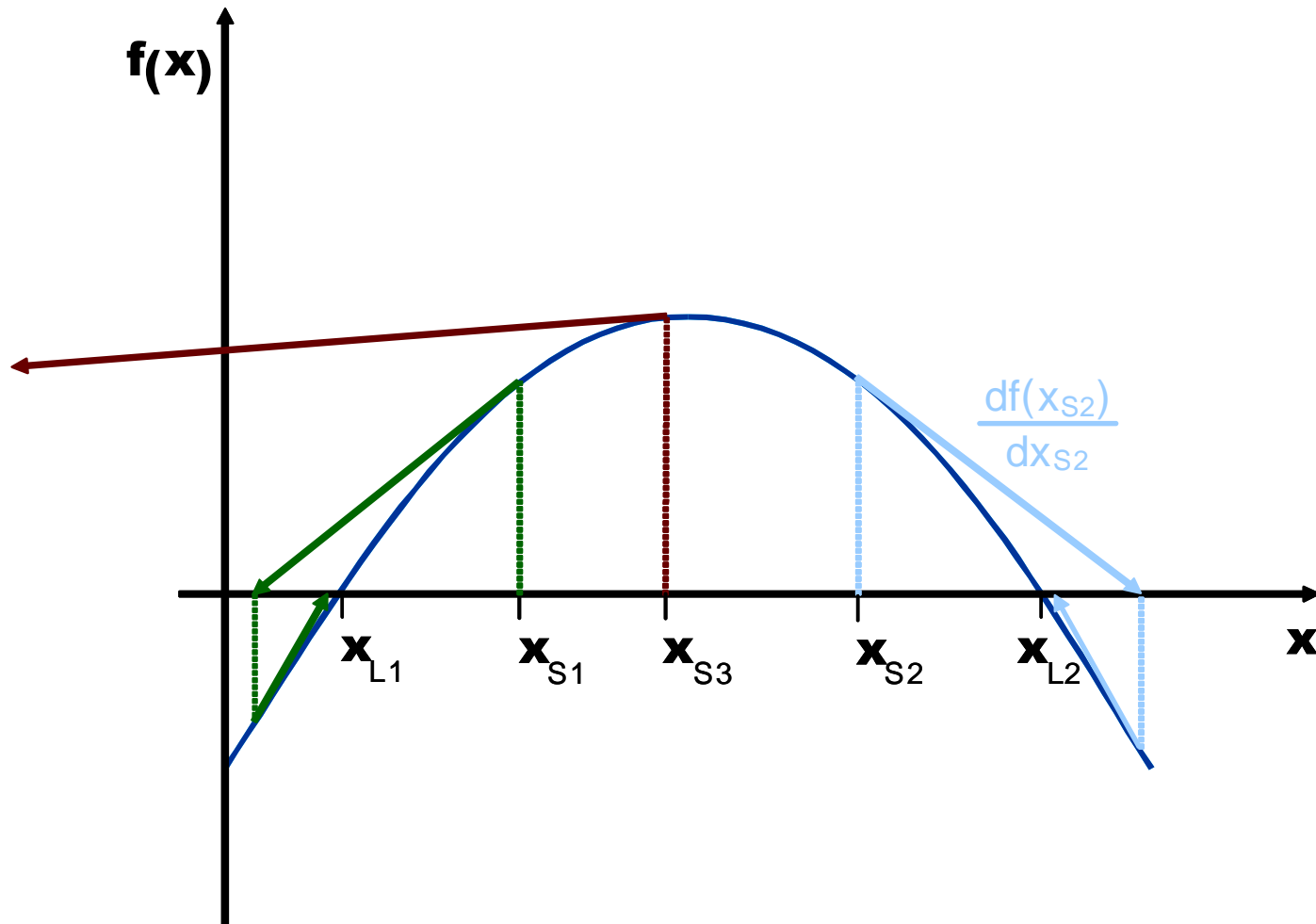
Propiedades de los algoritmos de iteración

- Iteración corriente
 - más iteraciones necesarias
 - mayor radio de convergencia
- Newton-Raphson
 - convergencia rápida
 - buenos valores iniciales si están cerca de una solución
 - malos valores iniciales puede dar lugar a la no convergencia.
 - para los malos valores iniciales el algoritmo puede converger a soluciones no-físicos -> programa debe identificar y evitar estas soluciones

Principio de la iteración corriente



Principio de Newton-Raphson



Limitaciones del cálculo de flujo de carga

- Iteración límite
 - alta precisión (y pequeño) vs. al tiempo de cálculo alto
- Carga modelo
 - Asunción de potencia constante para cargas PQ- sólo es válida cerca de la tensión nominal
 - Para bajas tensiones asumir carga demasiado alta -> colapso de tensión
- Las posibles razones de la no convergencia:
 - carga demasiado alta (carga - PQ en lugar de Z – carga)
 - problema de la energía reactiva -> colapso de tensión
 - Líneas Largas
 - Barra slack mal localizado.
- Solución de estado estacionario puede no ser alcanzable debido a problemas de estabilidad

Posibilidades de lograr la convergencia

Los siguientes consejos pueden ayudar a lograr esa convergencia. Que debe recordarse cambios en la red puede tener que invertir de nuevo y plausibilidad de los resultados debe comprobarse.

- Cambiar cargas PQ- a cargas Z- (conversión a impedancia de carga)
- Cambiar generador PV a generador PQ, relajar los límites de funcionamiento de los generadores
- Ajustar puntos de partida
- cambiar el método de cálculo (iteración corriente, Newton-Raphson)
- desconectar las líneas largas
- divide la red en subredes independientes
- probar diferentes posiciones de slack
- dependiendo de la estructura de la red inyectar potencia reactiva (capacitiva o inductiva)
- aumentar el número de iteraciones y cambio precisión requerida.
- Colocar el ajuste del cambiador de tomas a ajuste variable.