



Escuela de verano de potencia 2014



“Estabilidad de Voltaje en Sistemas de Potencia: Uso de técnicas basadas en flujos de carga”

Dr. Ramón Octavio Jiménez Betancourt
Facultad de Ingeniería Electromecánica
Universidad de Colima
rjimenez@ucol.mx

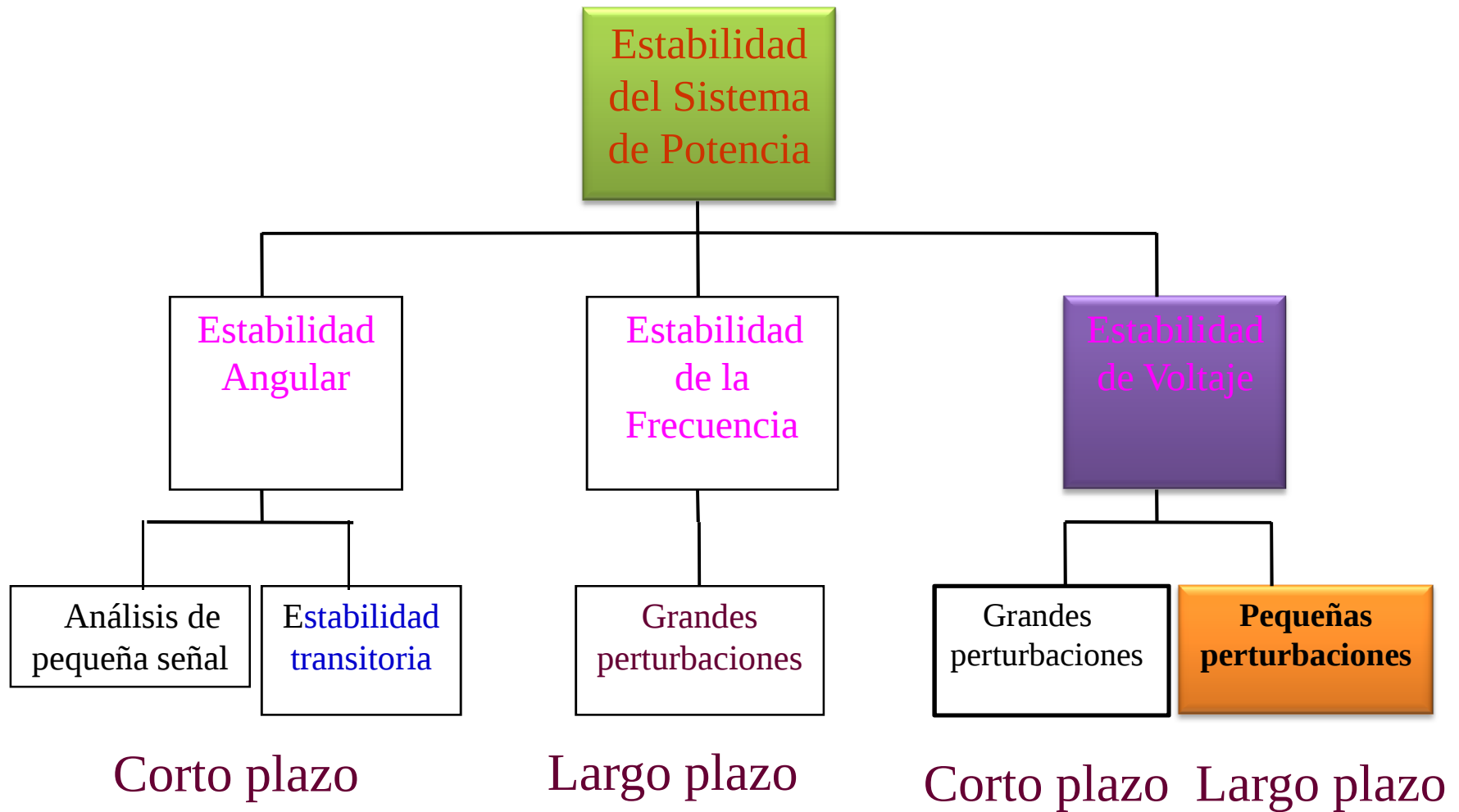
Agosto 2014



Estructura de la presentación

- Introducción
 - Clasificación de estabilidad
 - Definición de estabilidad de voltaje
 - Principales mecanismos de inestabilidad
- Comprendiendo el fenómeno desde un punto de vista estático
 - Un caso simple generador carga
 - Curva Q-V para el voltaje en la carga y sus características principales
 - Aplicación
- Aproximación por linealización
 - Linealización y comparación con curva Q-V
 - Sistema de gran escala y análisis modal
 - Aplicación
- Conclusiones y discusión

Clasificación de estabilidad IEEE/CIGRE ¹



1. P. Kundur, J. Paserba, V. Ajjarapu, G. Andersson, A. Bose, C. Canizares, N. Hatziargyriou, D. Hill, A. Stankovic, V. Taylor, T. Van Cutsem, V. Vittal, "Definitions and Classification of Power System Stability", IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions, IEEE transactions on Power Systems, Volume 19, Issue 3, pp. 1387-1401 August 2004

Estabilidad de Voltaje

- Es la habilidad que posee un sistema de potencia para mantener los voltajes en estado estacionario en todos los buses después de haber sido sometido a una perturbación.
- La inestabilidad se manifiesta como un aumento/disminución progresivo del voltaje en uno o varios buses.

Estabilidad de Voltaje ...

- Eventos que pueden conducir a la inestabilidad :
 - Pérdida de carga en un área o región
 - Disparo de líneas de transmisión u otros elementos que conduzcan a salidas en cascada
 - Pérdida de sincronismo de algunos generadores como resultado de la salida de estos elementos o una condición de operación que viole los límites de la corriente de campo.

Estabilidad de Voltaje Cont..

- Motivos principales para inestabilidad de voltaje (usualmente las cargas):
 - La potencia consumida por las cargas es reestablecida por:
 - Reguladores de voltaje en los sistemas de distribución
 - Transformadores con cambio de tap
 - Cargas controladas por termostato
 - La inestabilidad de tensión se produce cuando la dinámica de la carga intenta restaurar el consumo de energía más allá de la capacidad de la red de transmisión y la generación conectada

Estabilidad de Voltaje Cont..

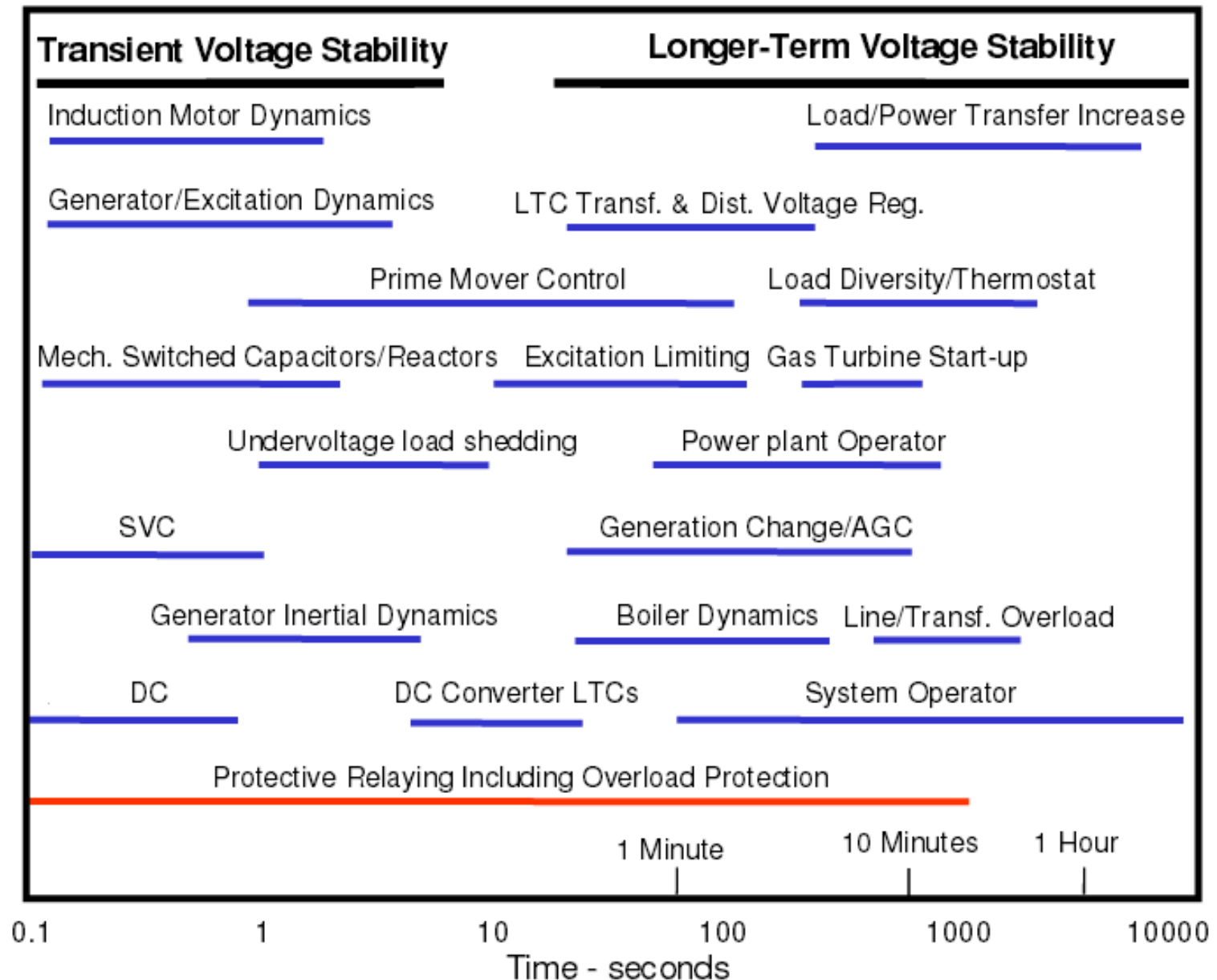
- En el fenómeno están involucradas pequeñas y grandes perturbaciones en escalas de tiempo grandes y pequeñas
 - Corto plazo: Se involucran cargas rápidas: motores de inducción, cargas electrónicamente controladas, y convertidores estáticos
 - Corto circuito cerca de cargas importantes

Estabilidad de Voltaje ..

– Largo plazo:

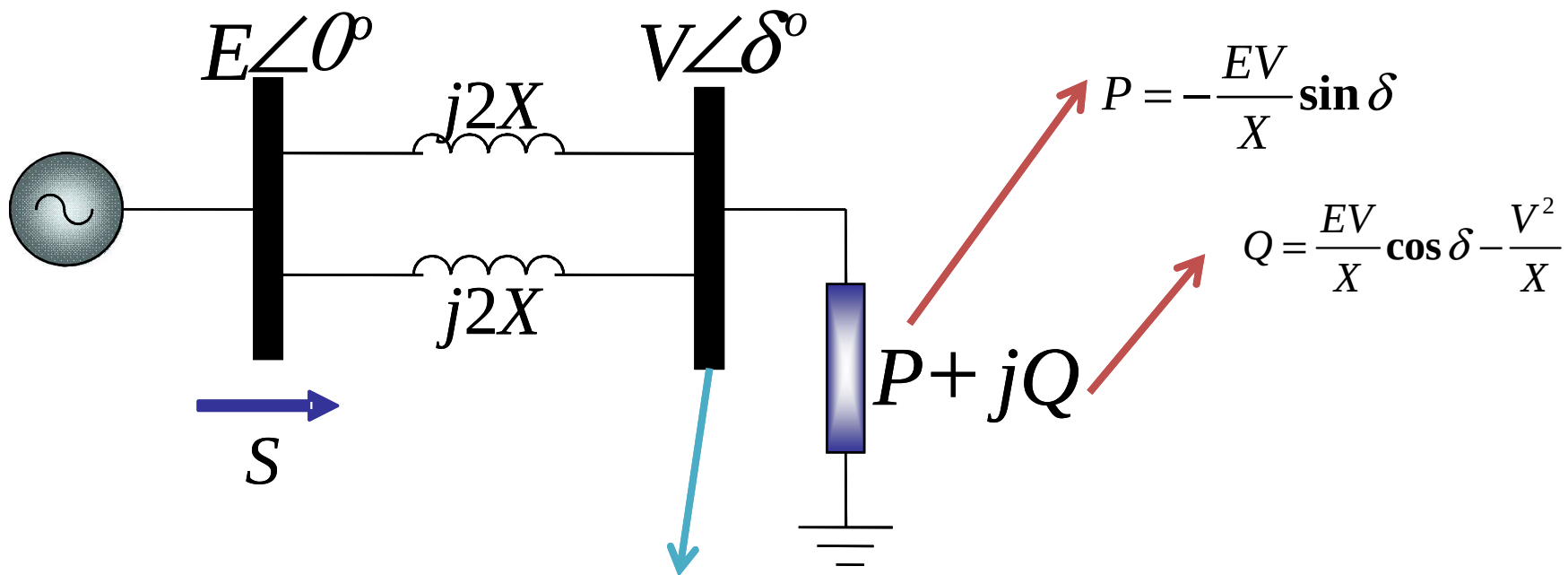
- Se involucran los equipos de respuesta lenta:
 - Transformadores con cambio de tap
 - Cargas controladas por termostato
 - Limitadores de corriente en Generadores
- La inestabilidad es debida a la pérdida de equilibrio de largo periodo.
- En muchos casos, el análisis estático puede ser utilizado.

Escalas de tiempo del fenómeno



Comprendiendo el fenómeno desde el punto de vista estático

Consideremos un sistema de potencia de dos buses, enlazados por dos líneas paralelas idénticas. A través de un balance de potencia en el bus de carga se puede comprobar que:

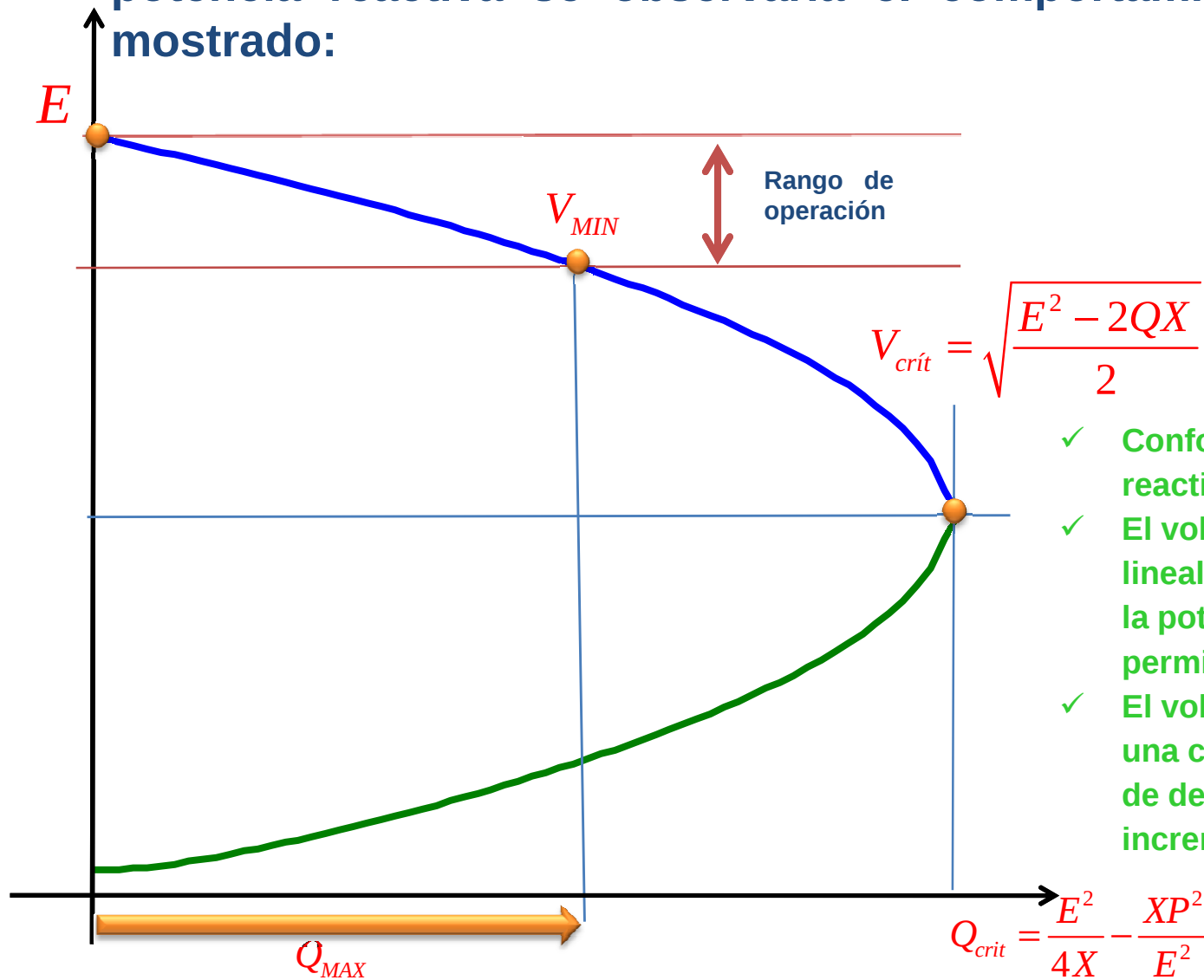


Manipulando apropiadamente las expresiones anteriores, se puede encontrar la siguiente relación para el voltaje en términos de los parámetros del sistema y la carga:

$$V = \left[\frac{E^2 - 2QX}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{(2QX - E^2)^2 - 4X^2 (P^2 + Q^2)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Voltaje vs Potencia Reactiva

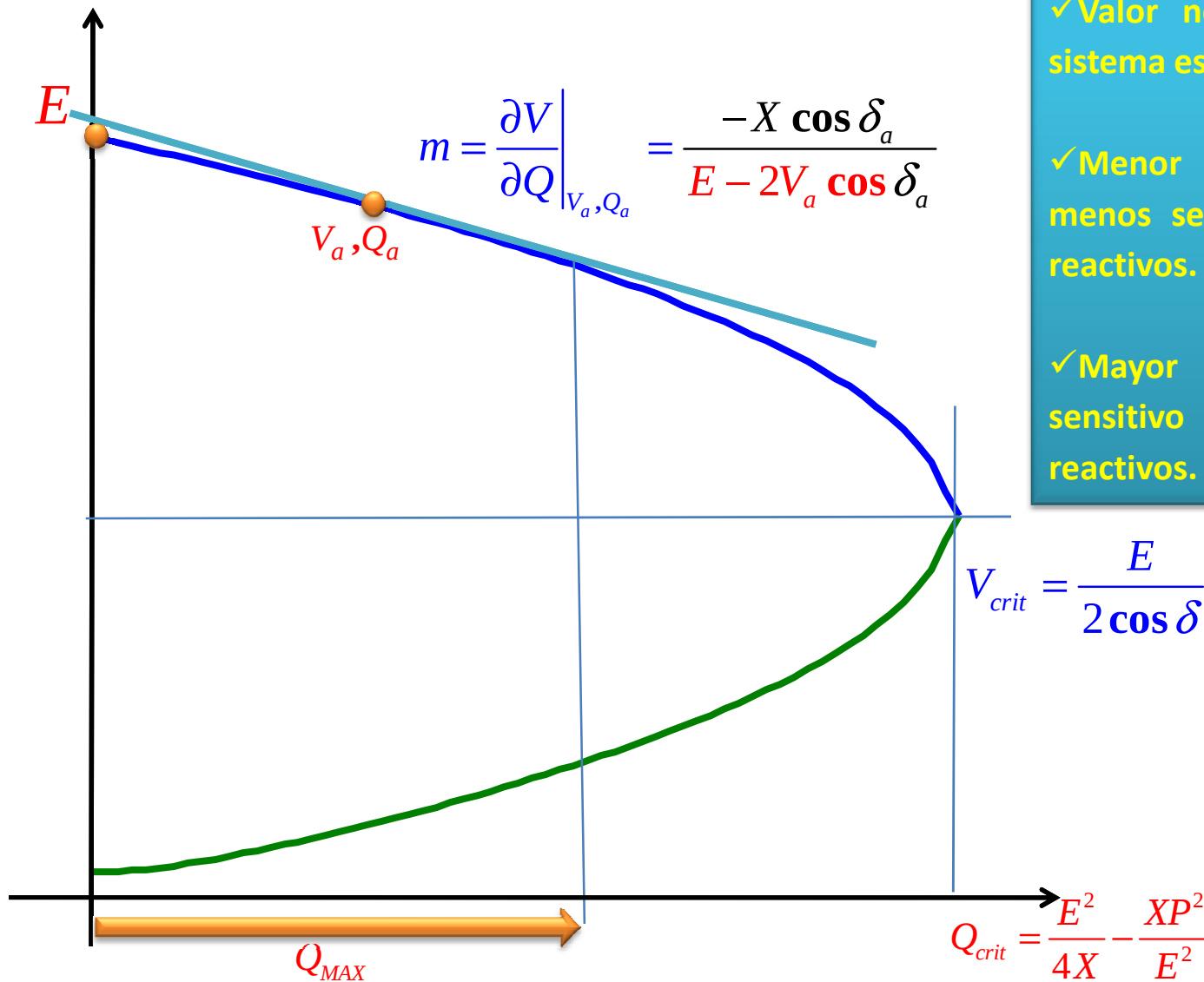
Si es mantenida fija la potencia activa y hacemos variar la potencia reactiva se observaría el comportamiento del voltaje mostrado:



- ✓ Conforme aumenta la potencia reactiva el voltaje disminuye
- ✓ El voltaje disminuye quasi linealmente conforme aumenta la potencia reactiva en el rango permitido de voltaje
- ✓ El voltaje podría descender con una característica no lineal si la de demanda de reactivos incrementa.



Aspectos cuantitativos de la curva V-Q



✓ Valor negativo de la pendiente sistema estable.

✓ Menor pendiente, el voltaje es menos sensible al incremento de reactivos.

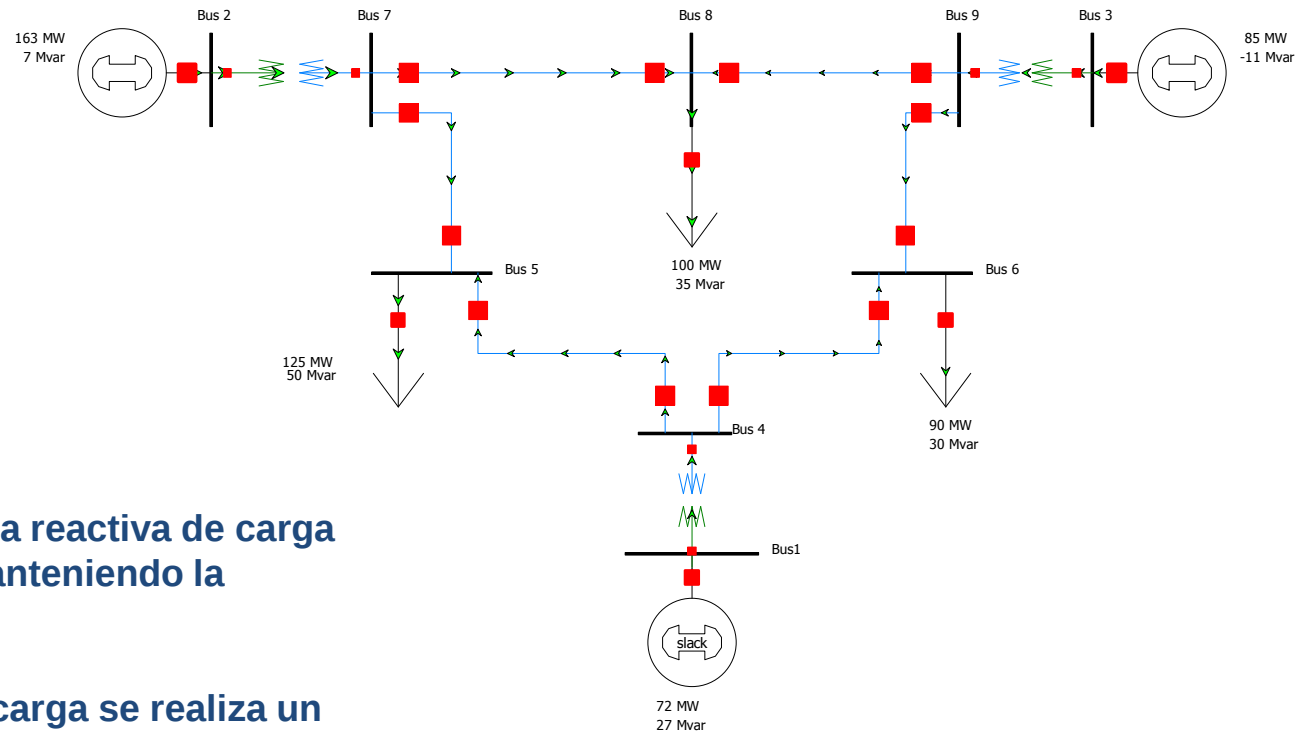
✓ Mayor pendiente, voltaje mas sensible al incremento de reactivos.

Aplicación



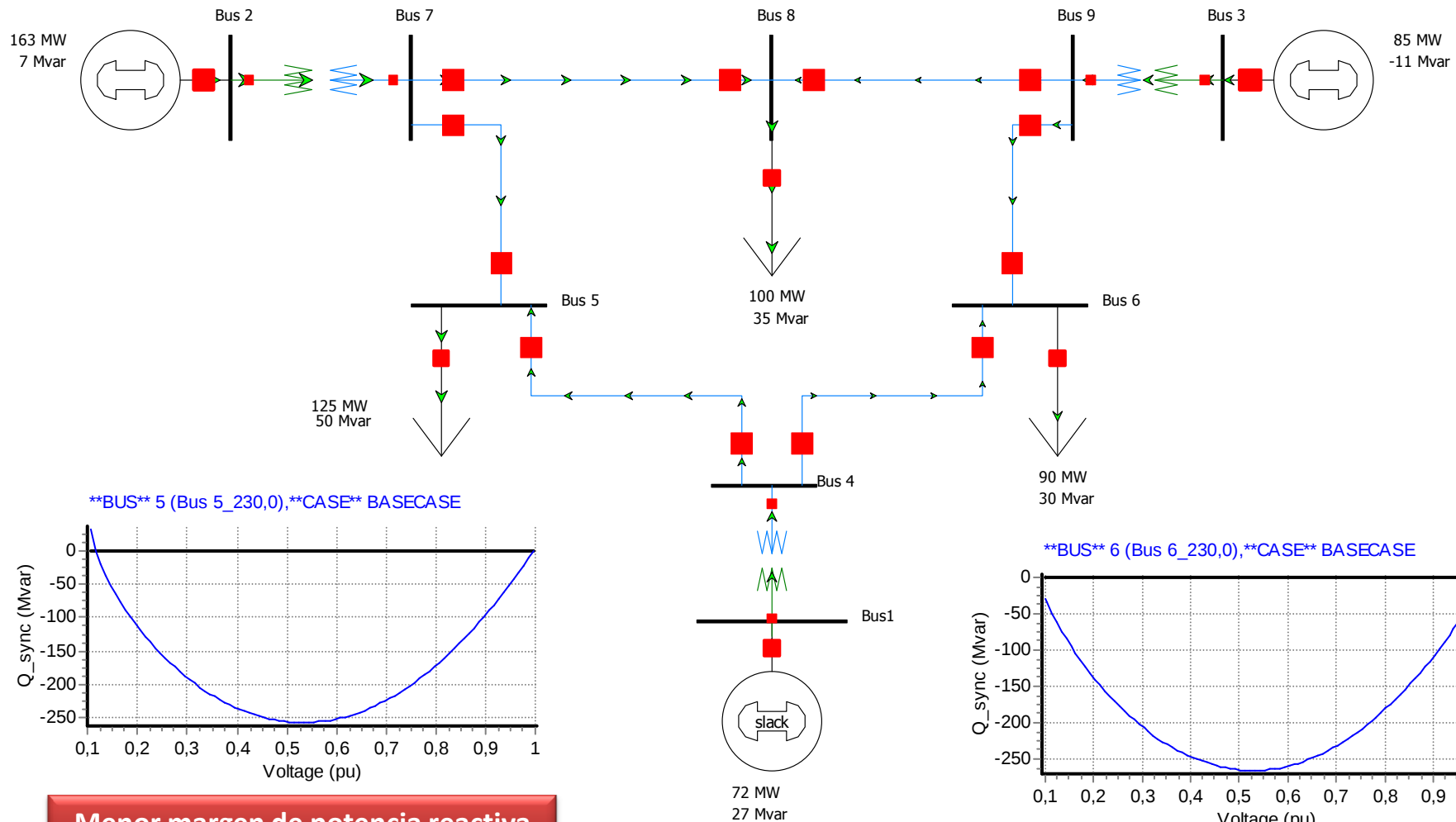
Algoritmo

1. Se hace variar la potencia reactiva de carga en cada bus de carga manteniendo la potencia activa fija.
2. Para cada condición de carga se realiza un estudio de **flujo de carga**.
3. Se grafica el voltaje observado contra la potencia reactiva de ese bus.



This IEEE 9 Bus Test Case represents a portion of the Western System Coordinating Council (WSCC) 3-Machines 9-Bus system. [1] Basically, this 9 bus system contains 3 generators, 9 buses and 3 loads.

Curvas V-Q



Menor margen de potencia reactiva

Observaciones

- Esta metodología esta incorporadas en la mayoría de las herramientas de software comercial (PSS/E, DSATools, Powerworld.
- Se requieren una gran cantidad de simulaciones.
- La información obtenida es local.
- No proporciona información de mecanismos de inestabilidad.

Identificación de características por linealización

Asumamos ahora que las ecuaciones de flujos de carga son expresadas en forma lineal alrededor de una solución por la primera aproximación en serie de Taylor, esto es:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial \delta} \\ \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial \delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E}{X} \sin \delta^o & \frac{EV^o}{X} \cos \delta^o \\ 2\frac{V^o}{X} - \frac{E}{X} \cos \delta^o & \frac{EV^o}{X} \sin \delta^o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \delta \end{bmatrix}$$

Donde la solución para el voltaje y ángulo estará dada por:

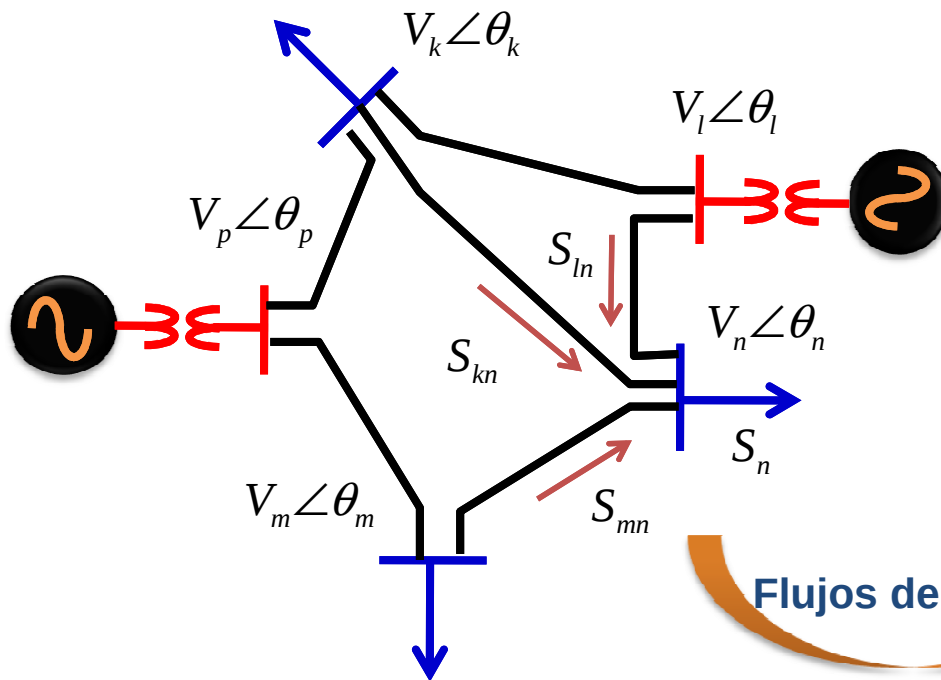
$$\begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X \sin \delta^o}{E - 2V^o \cos \delta^o} & \frac{-X \cos \delta^o}{E - 2V^o \cos \delta^o} \\ \frac{XE \cos \delta^o - 2XV^o}{EV^o (E - 2V^o \cos \delta^o)} & \frac{X \sin \delta^o}{V^o (E - 2V^o \cos \delta^o)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

La singularidad de la matriz Jacobiana coincide con la pendiente en el punto crítico de la curva Q-V

$$\frac{\Delta V}{\Delta Q} = \frac{-X \cos \delta^o}{E - 2V^o \cos \delta^o}$$

Pendiente de la curva

Extensión de este enfoque para sistemas de gran escala: Análisis modal del modelo linealizado



$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial \delta} \\ \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial \delta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \delta \end{bmatrix}$$

$$\Delta P \approx 0$$

$$\Delta Q = J_R \Delta V$$

$$J_R = \frac{\partial Q}{\partial V} - \frac{\partial Q}{\partial \delta} \frac{\partial P^{-1}}{\partial \delta} \frac{\partial P}{\partial V}$$

Se obtiene una relación múltiple entrada-salida en donde todas las cargas reactivas afectan simultáneamente a los voltajes

Interpretación del sistema reducido

$$\Delta Q = J_R \Delta V$$

J_R es la Matriz de sensibilidades.

Los elemento de la diagonal representan la pendiente de la curva V-Q.

Es un sistema acoplado,

No se puede obtener mayor información.

Interpretación mediante análisis modal

Coordenadas físicas

$$\Delta V = J_R^{-1} \Delta Q$$

Sistema acoplado

Descomposición en eigenvalores

$$\Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$$

$$J_R^{-1} = \xi \Lambda \eta$$

Sistema desacoplado

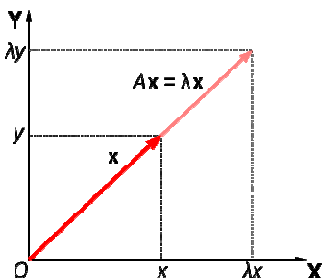
$$\lambda_1 > \lambda_2 > \dots > \lambda_n > 0$$

Eigenvalores
dominantes

Coordenadas modales

$$\Delta v_i = \lambda_i \Delta q_i$$

Coordenadas físicas

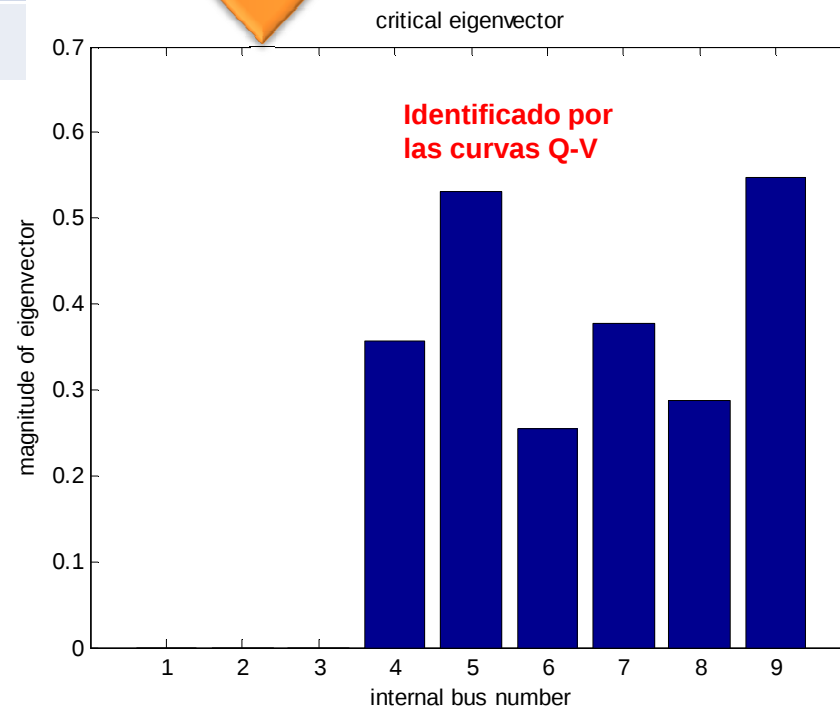
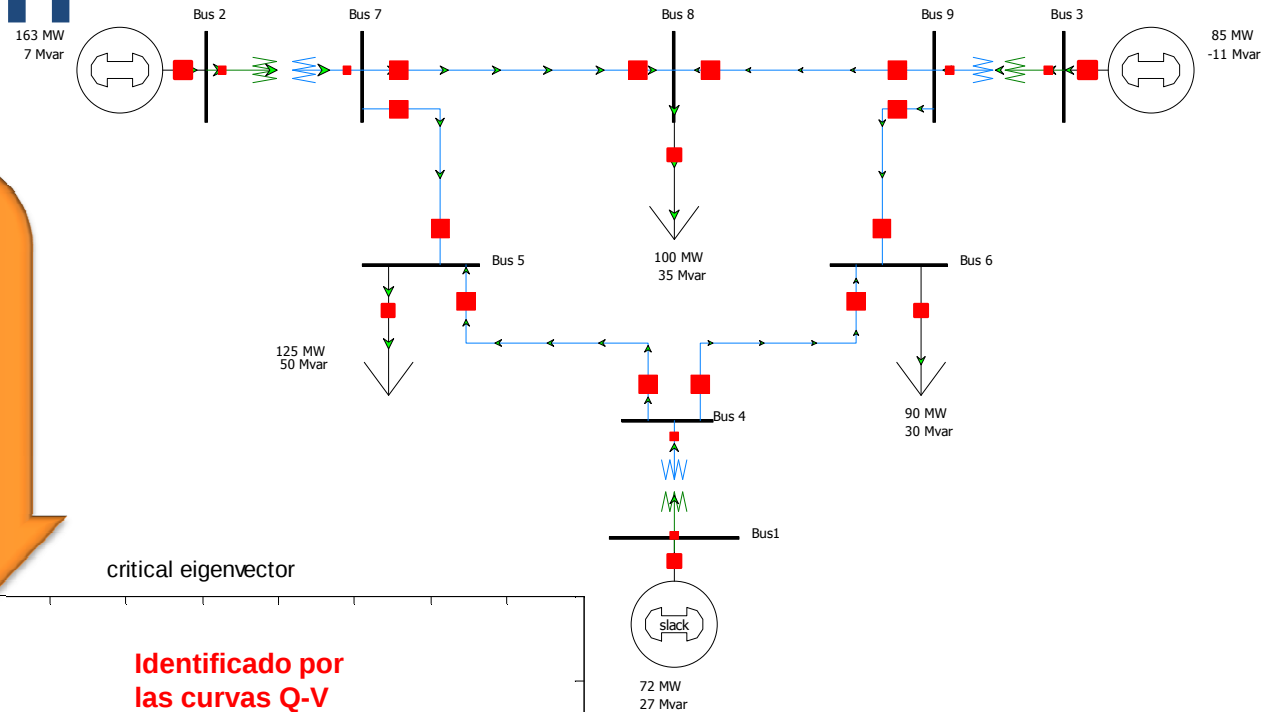


$$\Delta V = \sum_i \lambda_i \varepsilon_i \eta_i \Delta Q$$

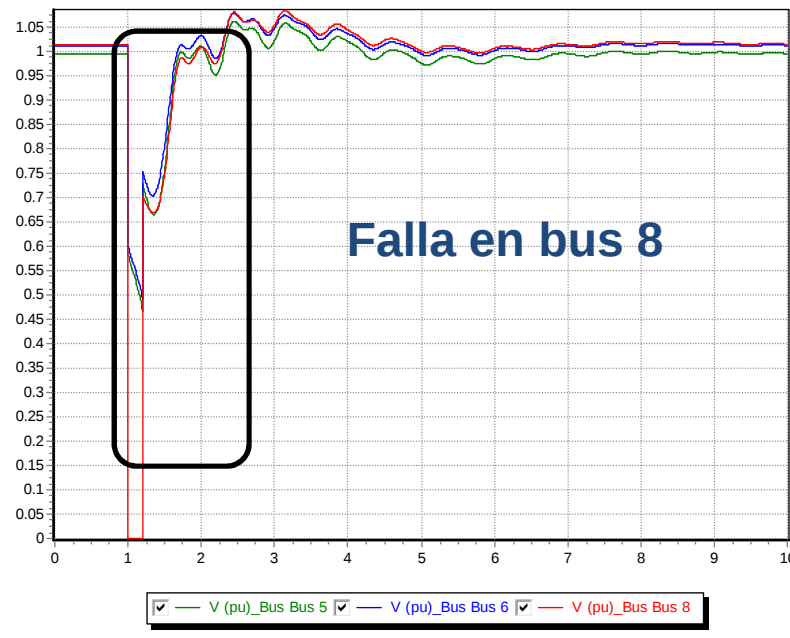
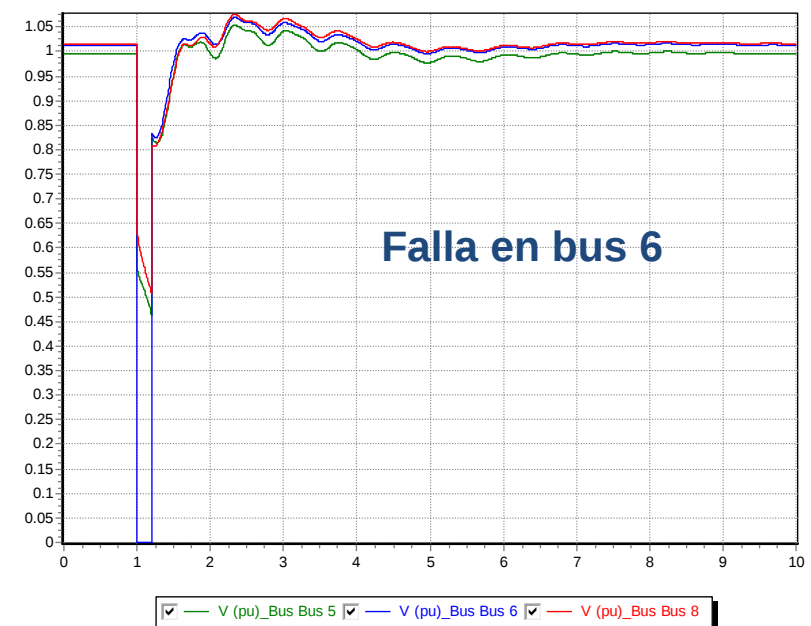
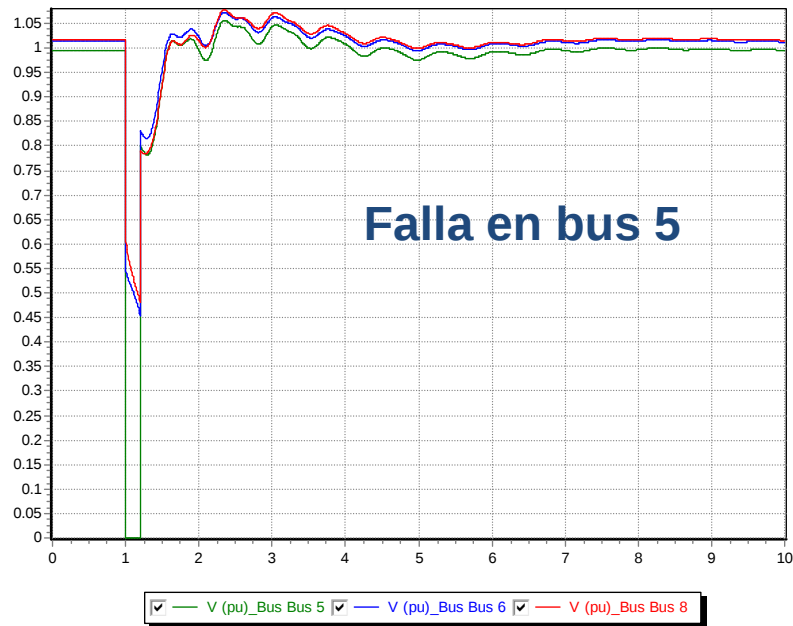
Sistema acoplado

Validación

No	λ
1	0.1678
2	0.0773
3	0.0671
4	0.0196
5	0.0214
6	0.0275



Recuperación del voltaje ante fallas



Recuperación transitoria más lenta

Aplicación a Red Mexicana simplificada

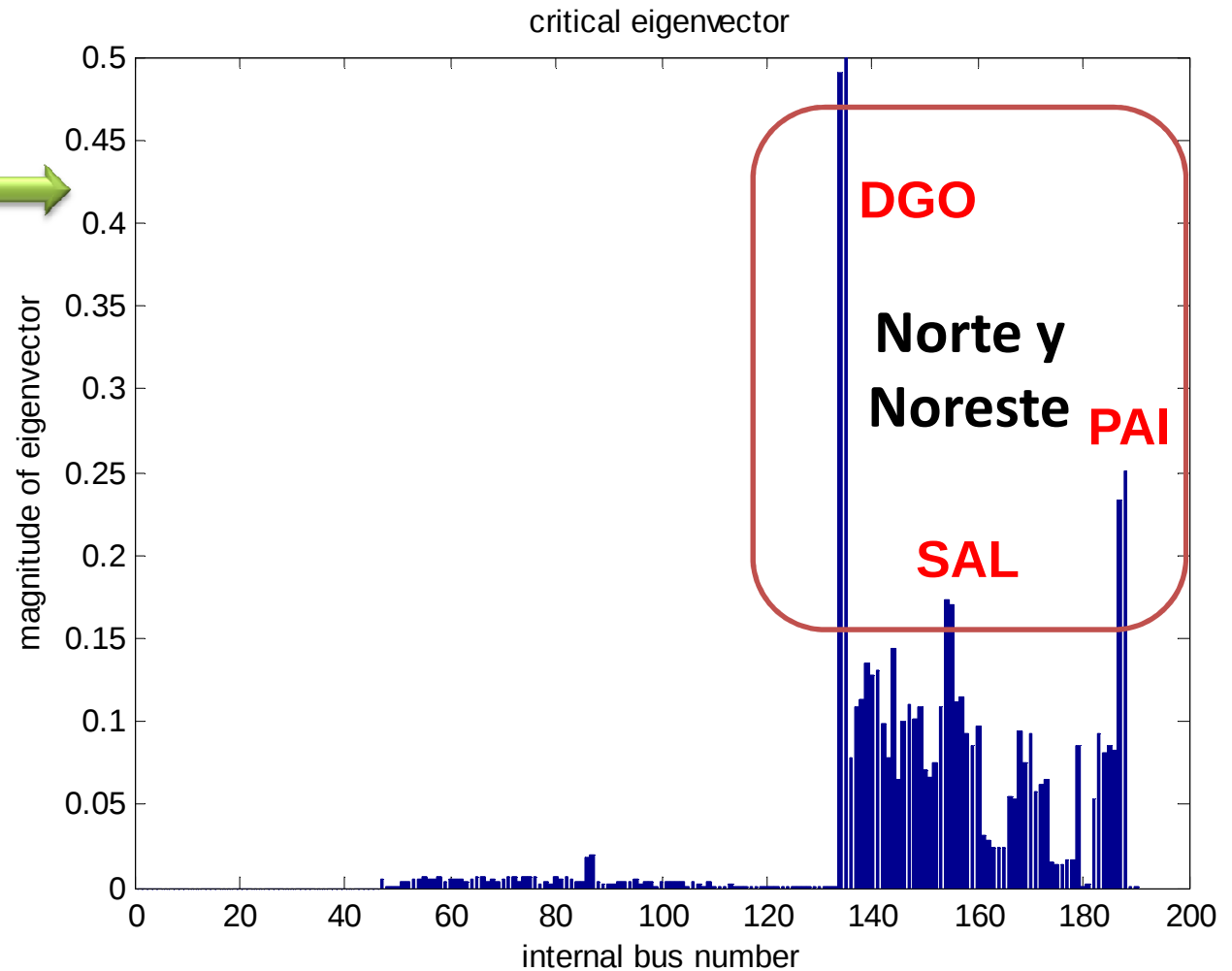
The system represents a five areas model of the Mexican Interconnected System (MIS) which includes parts of the 400,230,138 and 115 kV transmission network.

190 buses, 46 Generators



Resultados

No	λ
1	0.2690
2	0.2269
3	0.2110
4	0.1981
5	0.1793
6	0.1189
7	0.1185



Conclusiones

- Información importante de la estabilidad de voltaje se encuentra embebida en el estudio de flujos de carga.
- El uso de herramientas matemáticas puede proporcionar información cualitativa y cuantitativa.
- Los estudios realizados deben ser complementados con análisis dinámico del fenómeno.



Ramón Octavio Jiménez Betancourt, Ingeniero Electricista por el Instituto Tecnológico de Tepic en 1994, Maestro en Ciencias en 1999 y Doctor en Ciencias en el 2007 , ambos por el Cinvestav del IPN, desde 1999 funge como profesor investigador en la Facultad de Ingeniería Electromecánica de la Universidad de Colima, su área de interés comprende la estabilidad y control de los sistemas de potencia, ha publicado alrededor de 25 artículos de investigación en revistas especializadas y congresos nacionales e internacionales.