

INTRODUCCION

ESTABILIDAD DE LOS SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA



Temario del curso

1-Introducción

2-Análisis de Sistemas de Potencia en régimen permanente (NO)

3-Modelado para estudios de estabilidad: máquina síncrona y sus controles, cargas, generadores eólicos

4-Estabilidad de sistemas dinámicos

5-Estabilidad transitoria

6-Estabilidad a las pequeñas oscilaciones

7-Estabilidad de tensión

Temas adicionales

-Introducción al PSS/E

-Generadores eólicos (características generales y modelado)

-Protecciones

-Sincrofasores



Bibliografía

Texto básico:

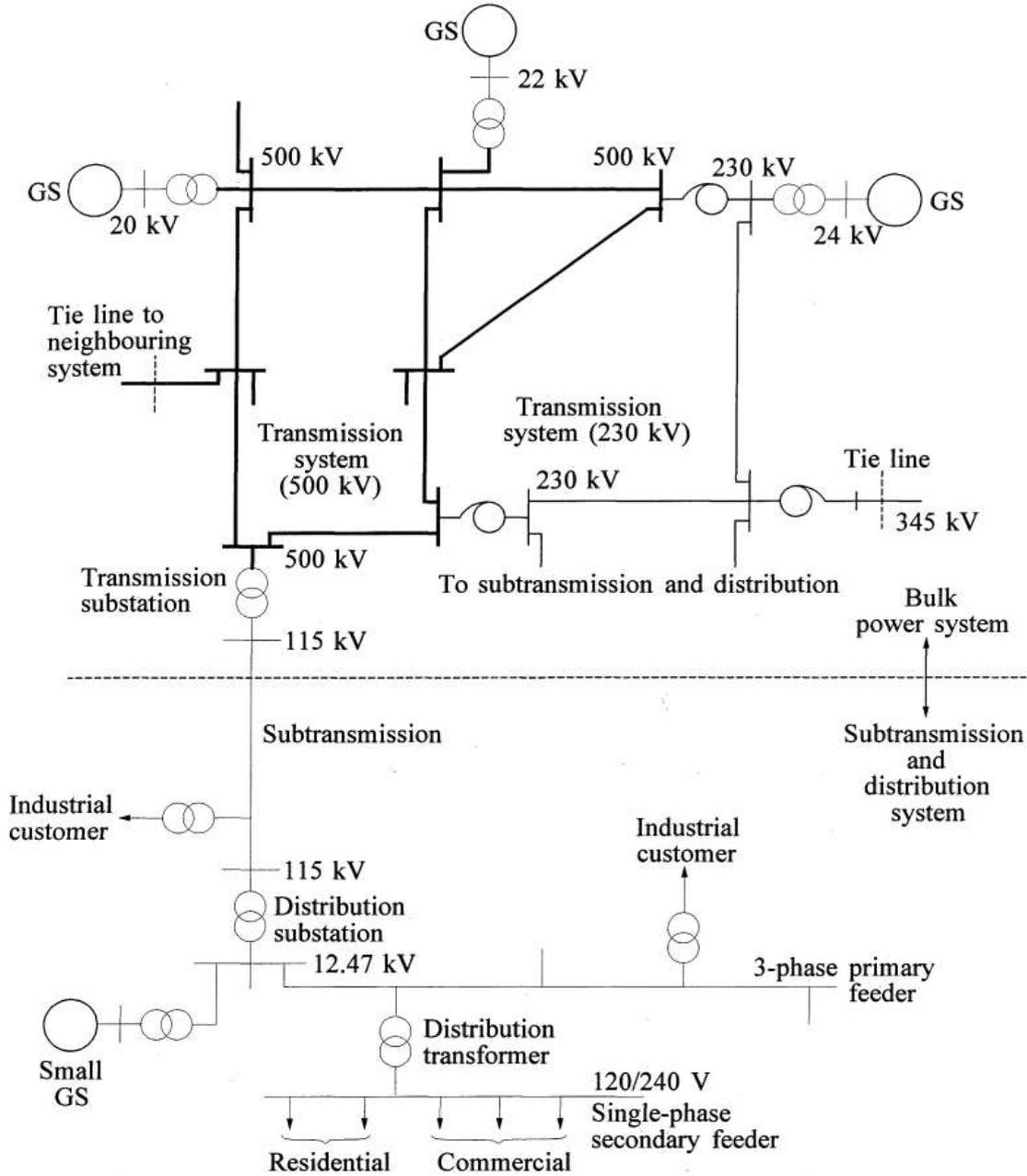
Power System Stability and Control (Prabha Kundur,1993)

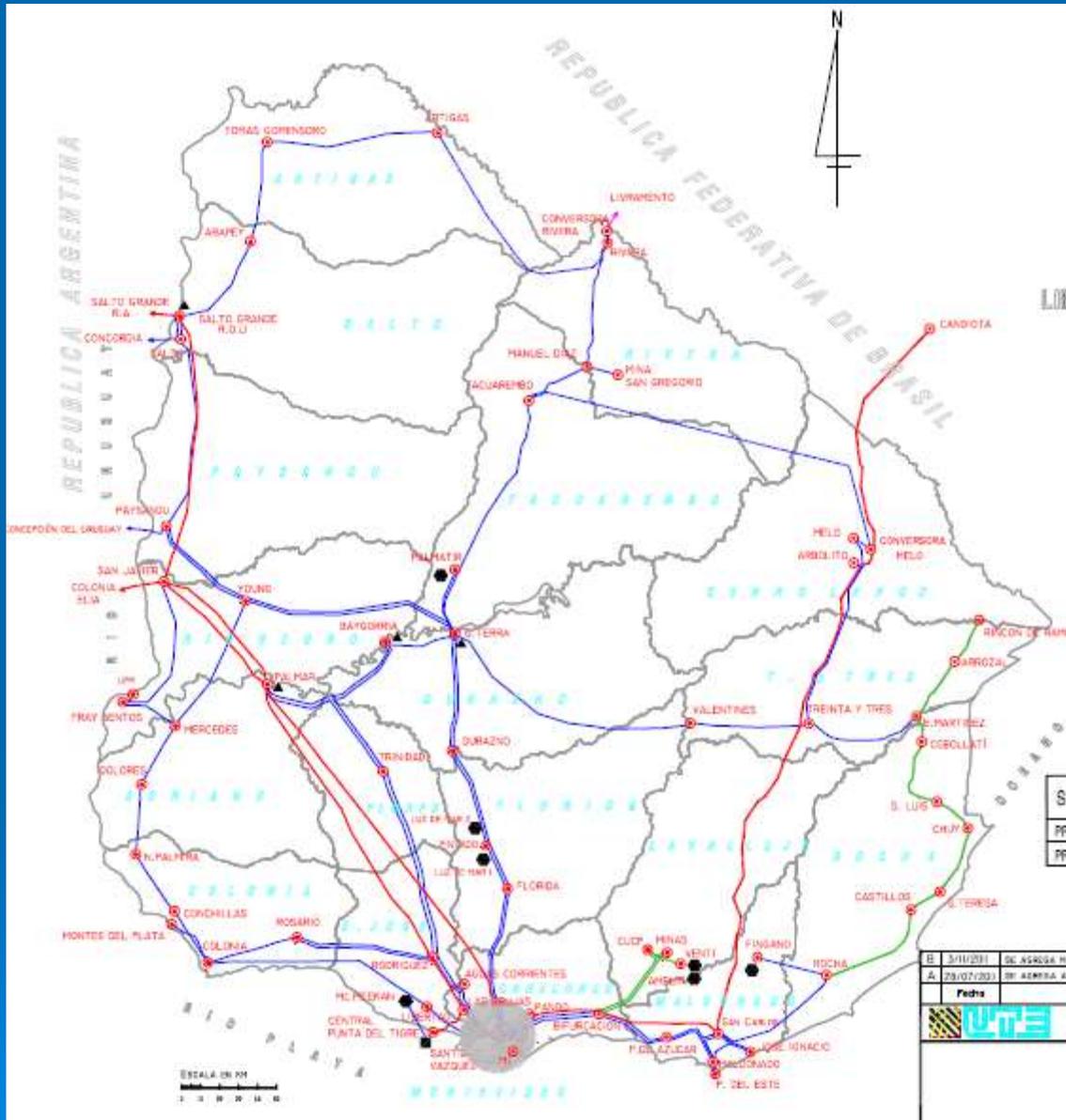
Página EVA del curso:

[/https://eva.fing.edu.uy/course/view.php?id=645](https://eva.fing.edu.uy/course/view.php?id=645)

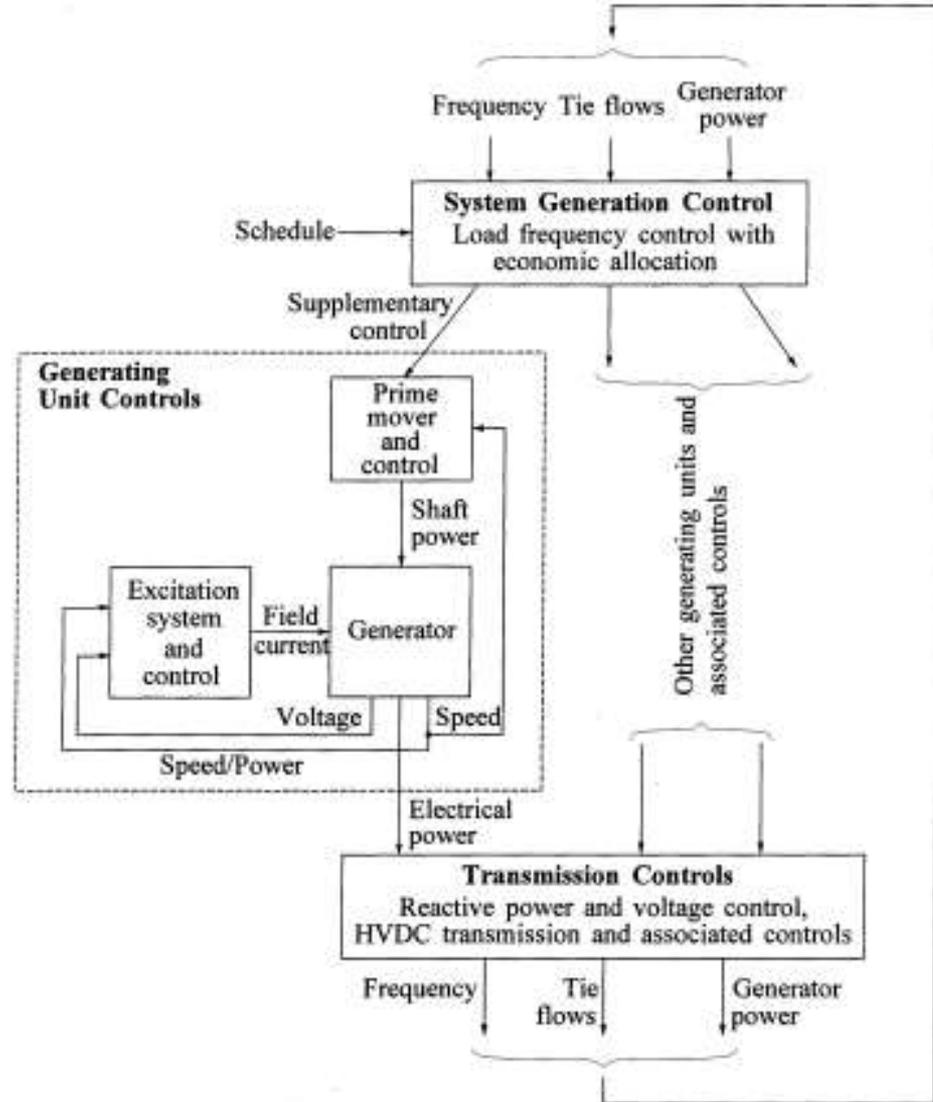
Objeto de estudio:

Sistema de Potencia...

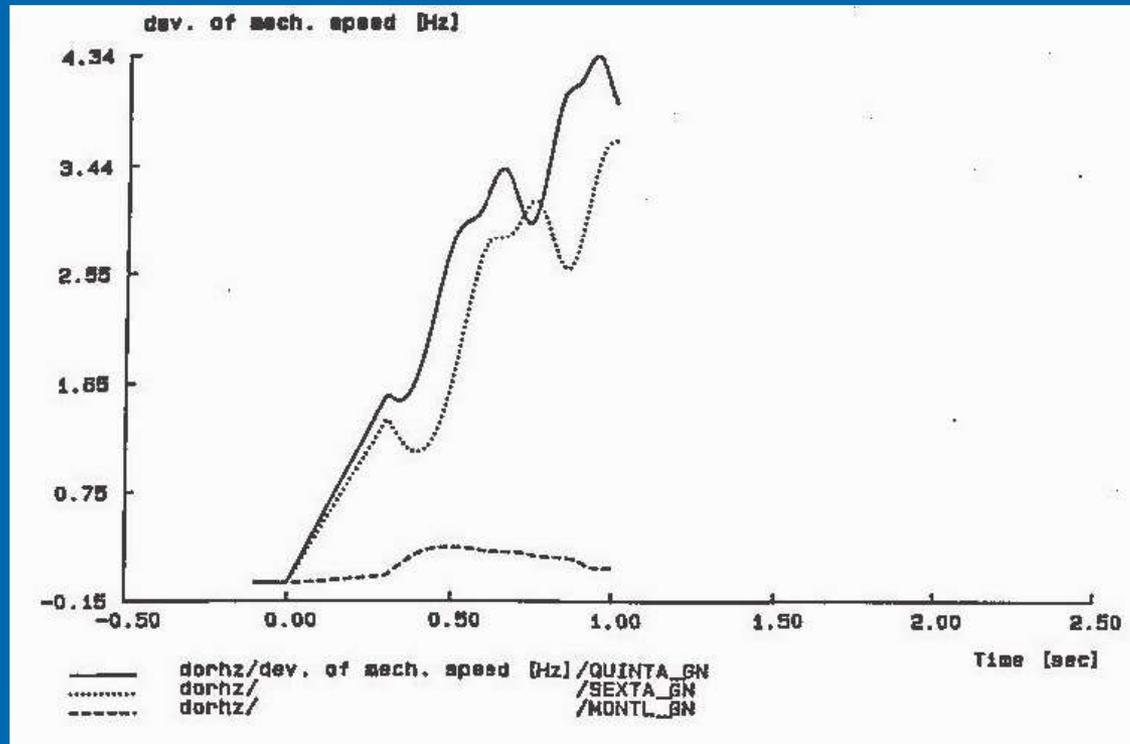




..y su Sistema de Control

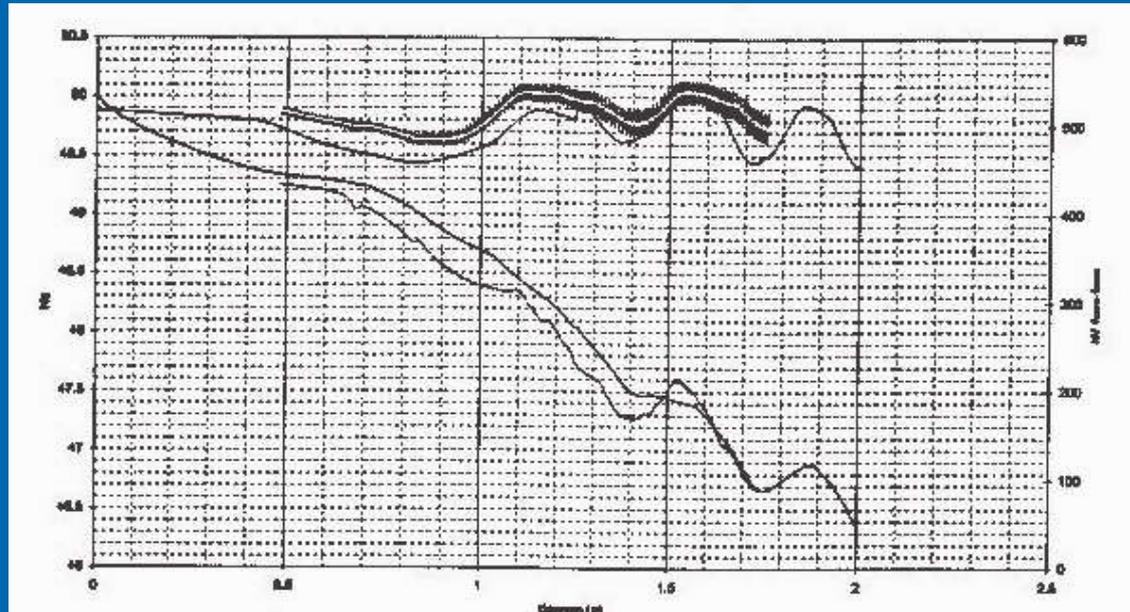


Ejemplos de Perturbaciones...



Simulación de una falta trifásica muy larga en Montevideo I 500

Ejemplos de Perturbaciones...



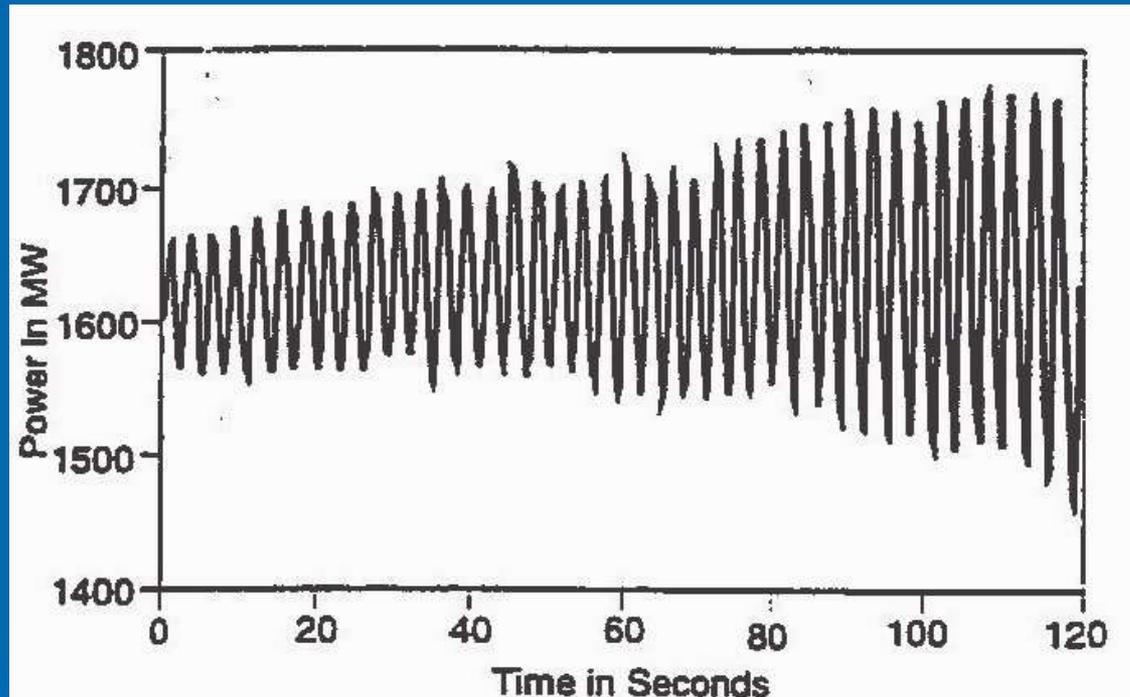
Registro de una perturbación real:sistema uruguayo
aislado del argentino (Noviembre 2001)

Gráficas superiores:tensión

Gráficas inferiores:frecuencia

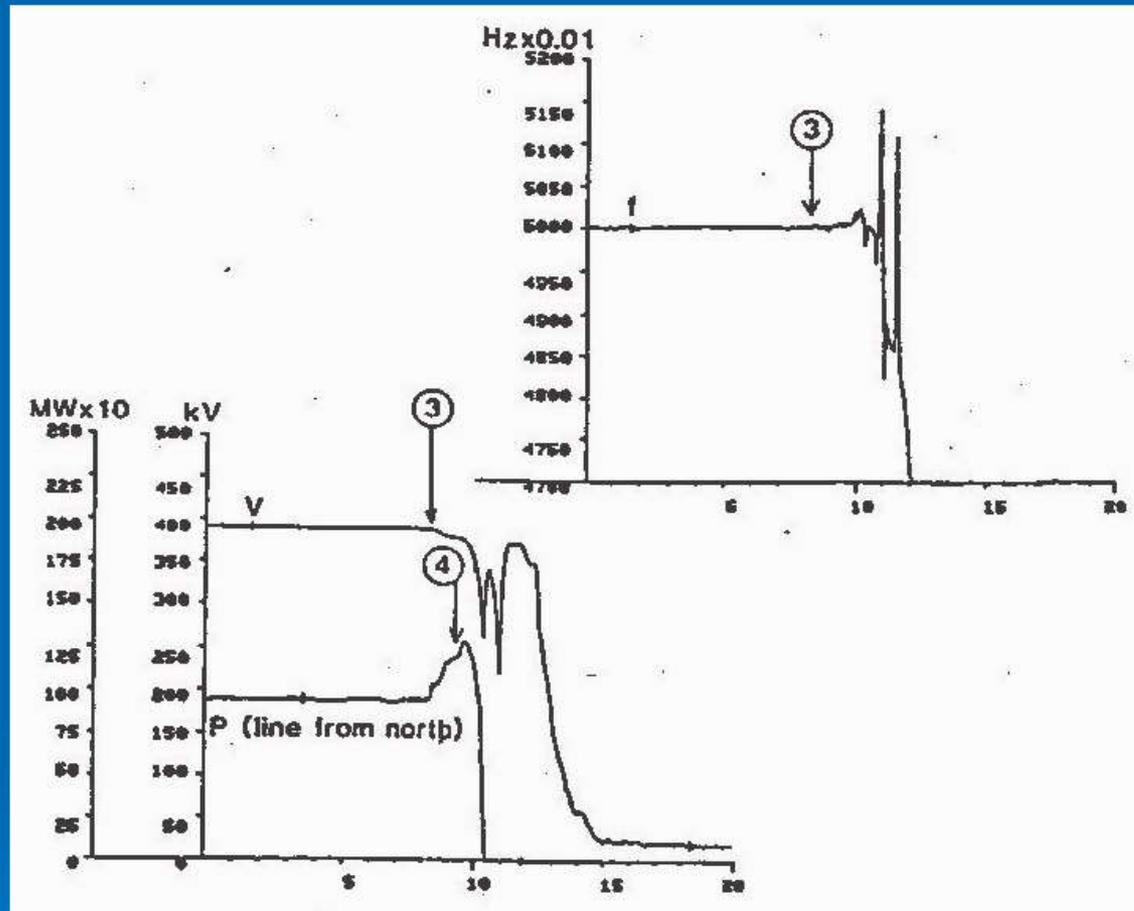
(Tiempo en seg.)

Ejemplos de Perturbaciones...



Oscilaciones de potencia en AC Pacific Intertie, 1974

Ejemplos de Perturbaciones...



**Colapso de tensión en Estocolmo, 1983
(escala de tiempo: minutos)**

Definición

Un sistema de potencia se dice que está funcionando en un estado *estable* si:

- Permanece funcionando en un estado operativo de régimen aceptable (las variables eléctricas del sistema (tensión, corriente,etc.) se mantienen constantes al pasar el tiempo y dentro de un rango de valores aceptables)
- Cuando es perturbado desde un estado operativo de régimen aceptable es capaz de retornar en un tiempo aceptable a un estado operativo de régimen aceptable

Clasificación por variables a monitorear

Las variables que se suelen monitorear para decidir si el estado del sistema es estable son:

- ✓ **Ángulos (posición) de los rotores de las máquinas síncronas (estabilidad de *ángulo*)**
- ✓ **Tensión de las barras de la red (estabilidad de *tensión*)**
- ✓ **(Frecuencia: estabilidad de *frecuencia*)**

Ejemplos de perturbaciones

✓ Variaciones de carga

✓ Salida intempestiva de generadores

✓ Cortocircuito en una línea ⇒ Actuación de protecciones ⇒
Cambio en transferencias de potencia en la red ⇒
Cambios en velocidad de rotores y tensiones de barra ⇒
Actuación de reguladores de tensión, velocidad ⇒
Variación de las potencias de las cargas ⇒
Actuación de controles centralizados potencia-frecuencia ⇒
Nuevo estado de equilibrio

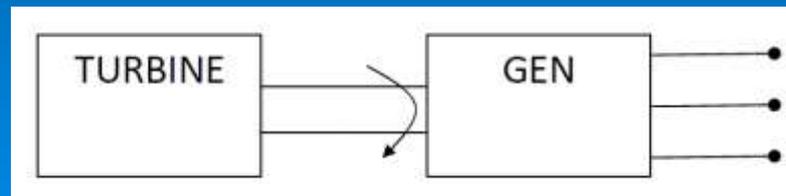
Estabilidad de ángulo

Las variables a monitorear son los ángulos (relativos a una máquina de referencia) de los rotores de las máquinas que oscilan luego de una perturbación .

(Si el sistema es estable las máquinas interconectadas permanecen *en sincronismo*)

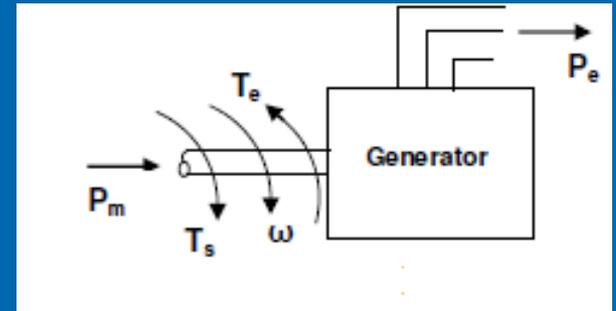
El ángulo es función del balance entre:

- Potencia mecánica aplicada al rotor (máquina primaria).
- Potencia eléctrica transferida a la red.



Ecuación de movimiento de la máquina

Ecuación de “swing” de la máquina =
Ecuación de Newton



$$K \cdot \frac{dw}{dt} + T_D \cdot w = P_m - P_e$$

K: una constante proporcional a la inercia de la máquina

$w = d\delta/dt$: velocidad de la máquina

δ : ángulo del rotor respecto a un eje sincrónico de referencia

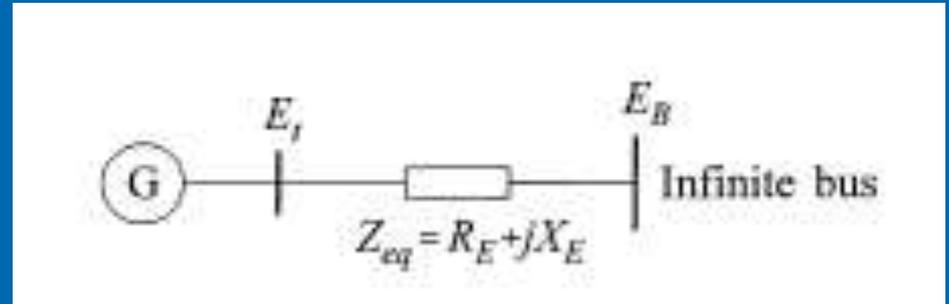
T_D : coeficiente de torque amortiguante

P_m : potencia mecánica generada por la turbina

P_e : potencia eléctrica inyectada por la máquina a la red; función de δ

Ejemplo:

Sistema máquina-barra infinita (OMIB)



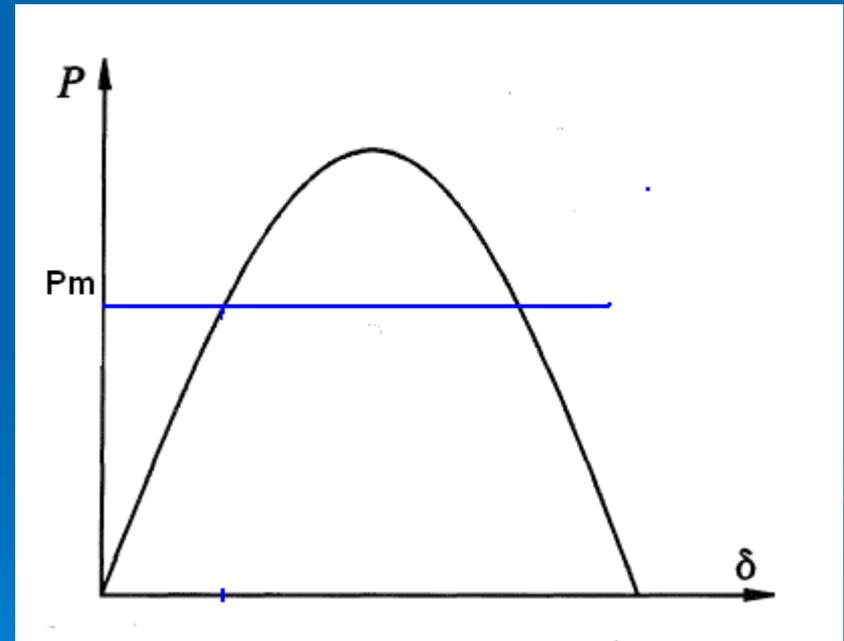
Relación potencia -ángulo

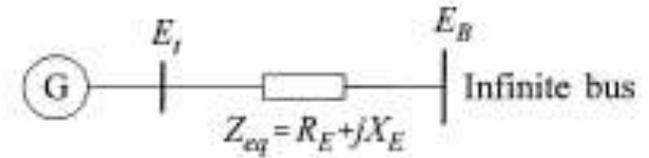
Si $R_E \approx 0$:

$$P_{\text{eléctrica}} \approx E_t \cdot E_B \cdot \frac{\text{sen}(\delta)}{X_E}$$

δ = Angulo de fase de E_t respecto a E_B

$\delta \approx$ Angulo de posición del rotor





Propiedades de la relación potencia-ángulo del OMIB

$$P_{\text{eléctrica}} \approx E_t \cdot E_B \cdot \text{sen}(\delta) / X_E$$

-Fuerte alinealidad

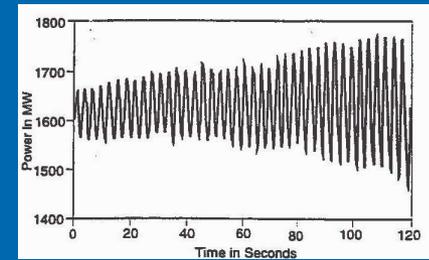
-No hay transferencia para $\delta=0$

-Transferencia máxima si $\delta=90^\circ$ (no necesariamente cierto en sistemas multimáquina)

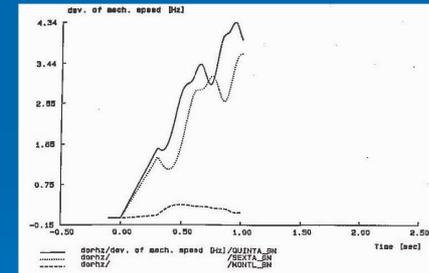
-Directamente proporcional a las tensiones, inversamente proporcional a la reactancia de la línea

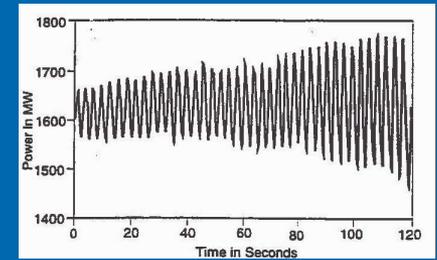
Tipos de estabilidad de ángulo

✓ Estabilidad de pequeña señal



✓ Estabilidad transitoria





Estabilidad de pequeña señal ("pequeñas oscilaciones")

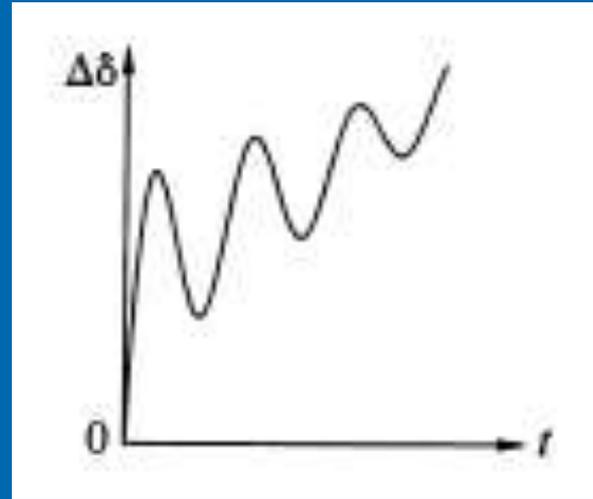
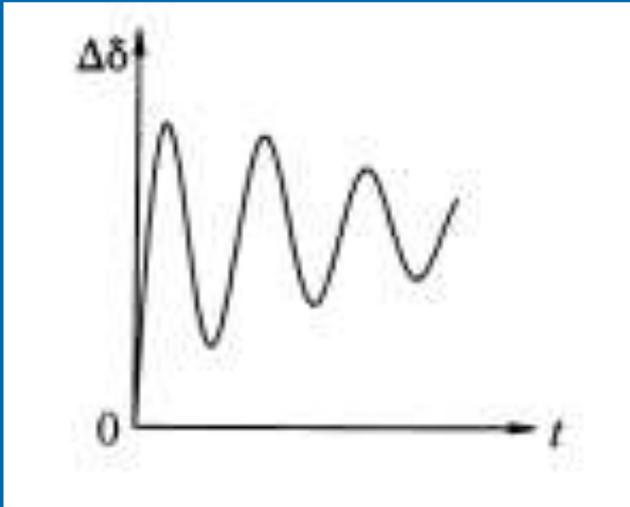
Pequeñas perturbaciones \Rightarrow Linealización (Métodos lineales)

- Suponemos que en el intervalo de estudio no cambia la potencia mecánica
- Linealizamos la ecuación de swing respecto al estado de régimen previo:

$$K \cdot \frac{d}{dt} \left(\frac{d(\Delta\delta)}{dt} \right) + T_D \cdot \frac{d(\Delta\delta)}{dt} + T_s \cdot \Delta\delta = 0$$

T_s = coeficiente de torque sincronizante

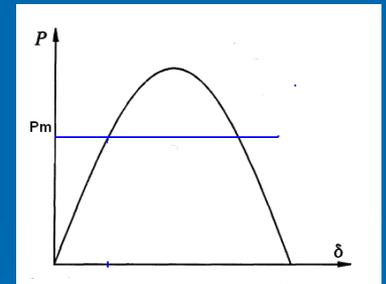
T_D = coeficiente de torque amortiguante



T_s negativo: Inestabilidad no oscilatoria

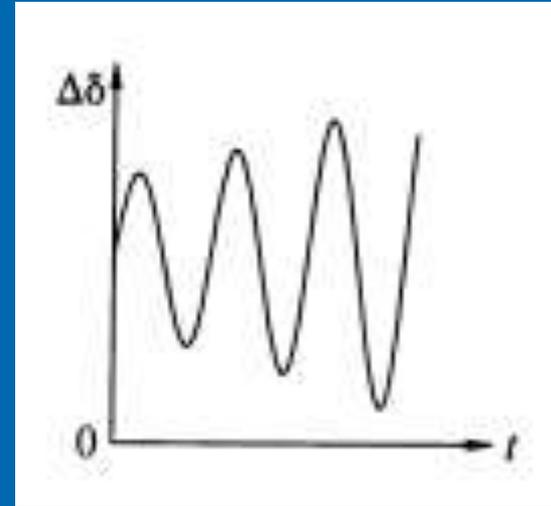
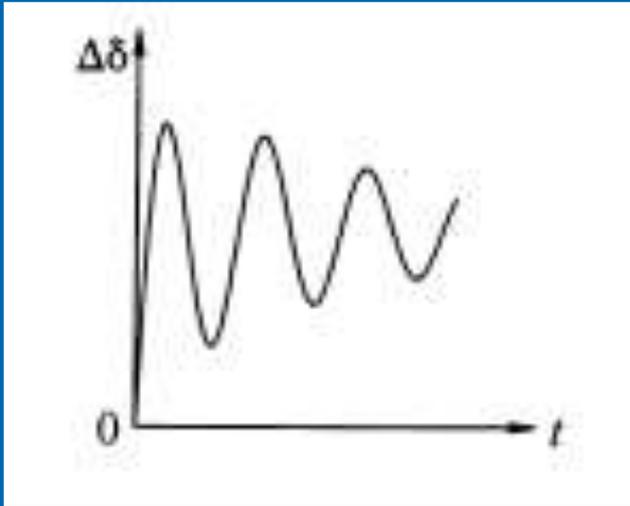
En el ejemplo máquina-barra infinita:

$T_s = E_t \cdot E_B \cdot \cos(\delta_0) / X_E$, siendo δ_0 el ángulo inicial.



$$P_e \approx E_t \cdot E_B \cdot \sin(\delta) / X_E$$

No es problema en los sistemas modernos (los reguladores de tensión "mantienen" el torque sincronizante).



T_D negativo: Inestabilidad oscilatoria.

En particular: influencia del diseño y ajuste de los sistemas de excitación.

Generalmente los criterios de diseño y operación del sistema imponen tiempos límite para que se amortiguen las oscilaciones de ángulo, aún cuando haya estabilidad oscilatoria.

Tipos de inestabilidad a las pequeñas oscilaciones:

- ✓ Modos locales (una máquina oscilando contra las restantes, asociado generalmente al ajuste del regulador de tensión)
- ✓ Modos interárea (grupos de máquinas oscilando entre sí, asociado generalmente a transferencias interárea grandes a través de redes de interconexión débiles)
- ✓ Modos de control (reguladores de tensión y velocidad, control de tensión en la red)
- ✓ Modos torsionales (influencia de las frecuencias naturales mecánicas: compensación serie, sistemas HVDC, etc.)

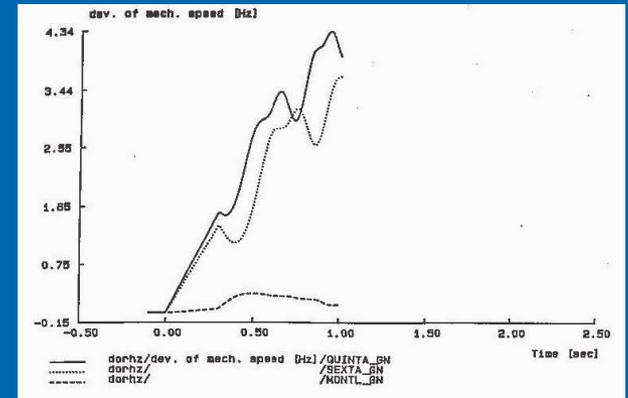
Estabilidad transitoria

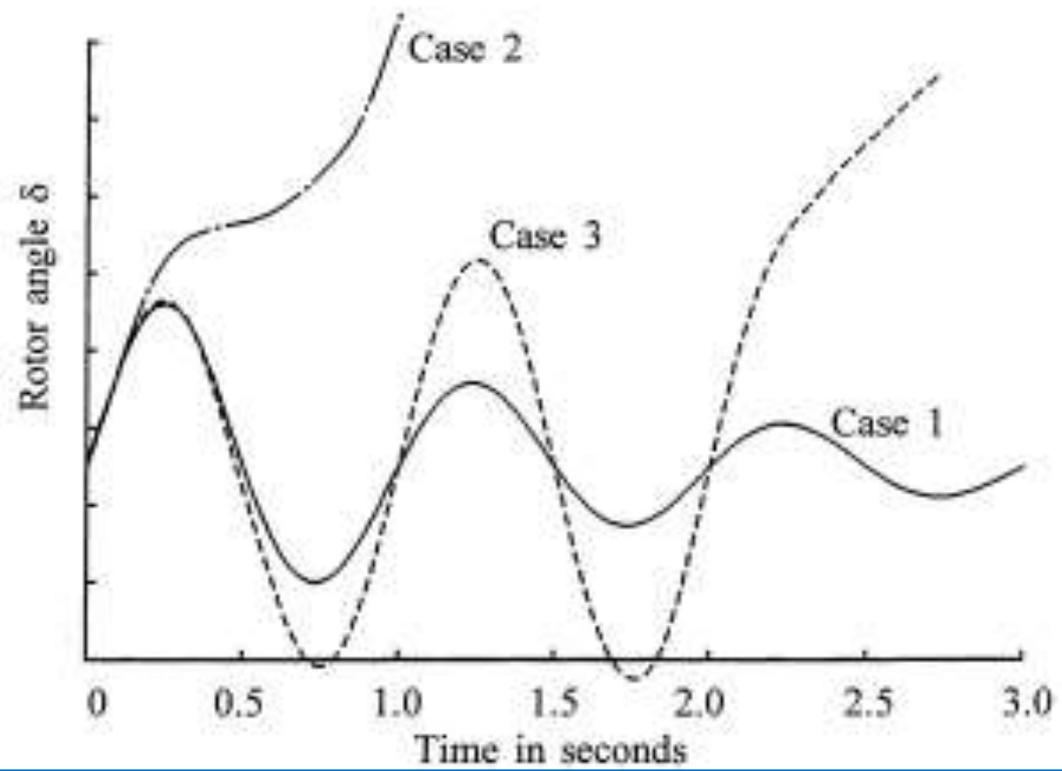
Perturbaciones severas \Rightarrow Alinealidades

(Métodos de simulación en el tiempo-
Intervalos típicos:3 a 10 seg.)

Tipos de inestabilidad transitoria:

- A la primera oscilación ("first swing"):falta de “torque sincronizante”
- Inestabilidad de pequeña señal post-perturbación





Criterios de diseño del sistema respecto a la estabilidad transitoria =

= Normalización de las grandes perturbaciones a soportar.

Ejemplo:

"Sistema estable frente a faltas con reenganche monofásico no exitoso, sin necesidad de despejar carga."



Estabilidad de tensión

Las variables a monitorear son las tensiones de las barras de la red

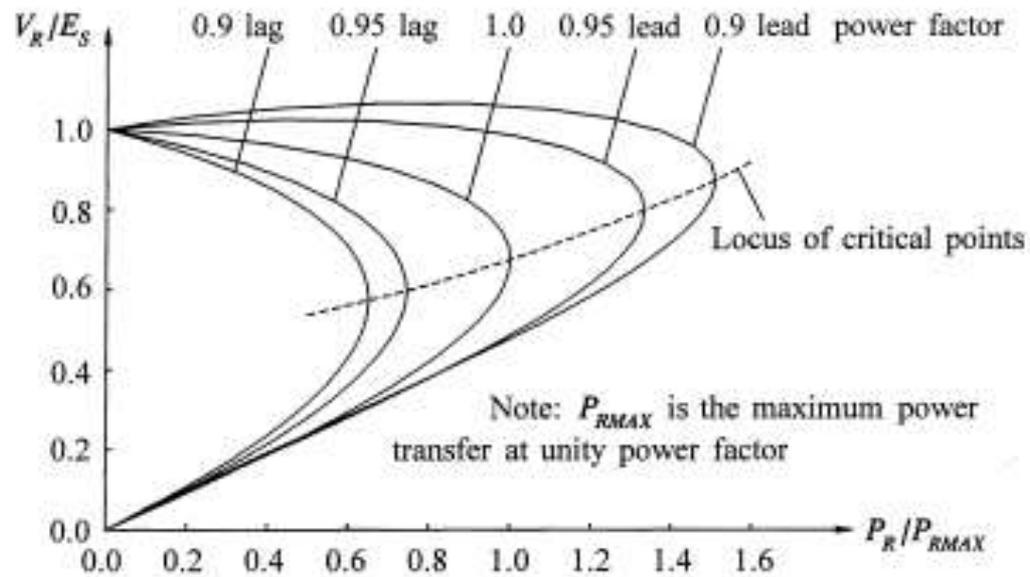
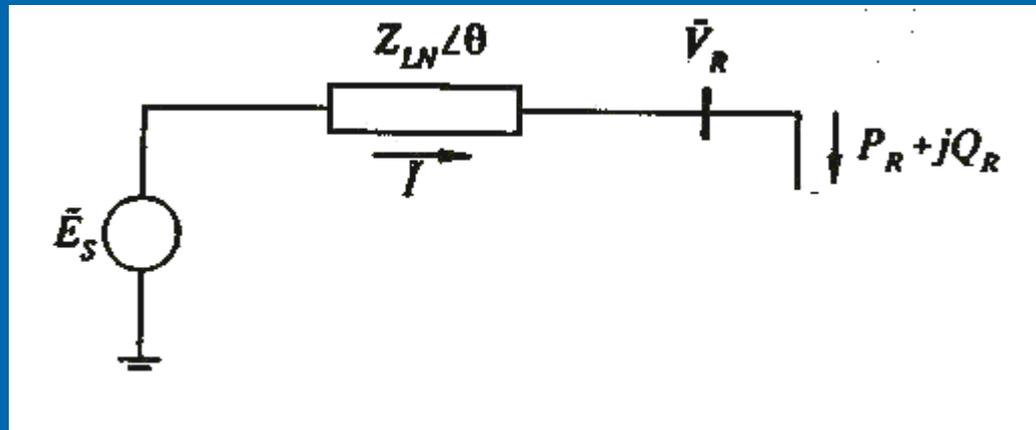
Tipos de estabilidad de tensión

a) Estabilidad a las pequeñas perturbaciones ("estática")

-Define uno de los límites de capacidad de transferencia de una red en régimen.

-Métodos de análisis: estáticos no lineales(flujo de cargas).

Ejemplo: Aumento "lento" de carga en un sistema radial (curvas PV)



b) Estabilidad a las grandes perturbaciones ("dinámica").

Métodos de análisis: simulación en el tiempo.

b.1) Transitoria: análisis conjunto con la estabilidad transitoria de ángulo

Ejemplo: cortocircuito y apertura de falta

b.2) Mediano o largo plazo: simulación en el tiempo de fenómenos de dinámica lenta (minutos)

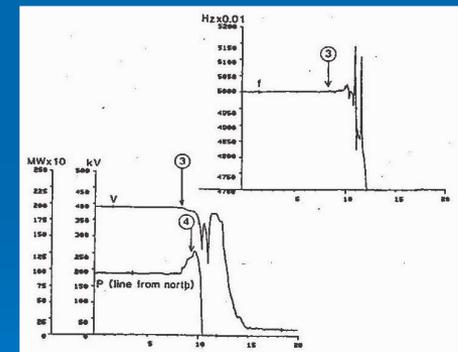
Ejemplo:

Aumento de carga \Rightarrow

Salida de generadores por actuación de limitadores térmicos \Rightarrow

Caída de tensión \Rightarrow

Aumento de cargas controladas por termostatos, actuación de reguladores bajo carga de transformadores (aumento de tensión en bornes de la carga), etc \Rightarrow Aumento de carga \Rightarrow Caída de tensión



Clasificación de acuerdo a la escala de tiempo de las perturbaciones transitorias:

Fenómenos electromagnéticos: hasta decenas de ms.

Fenómenos que comprometen la estabilidad transitoria y de pequeña señal:

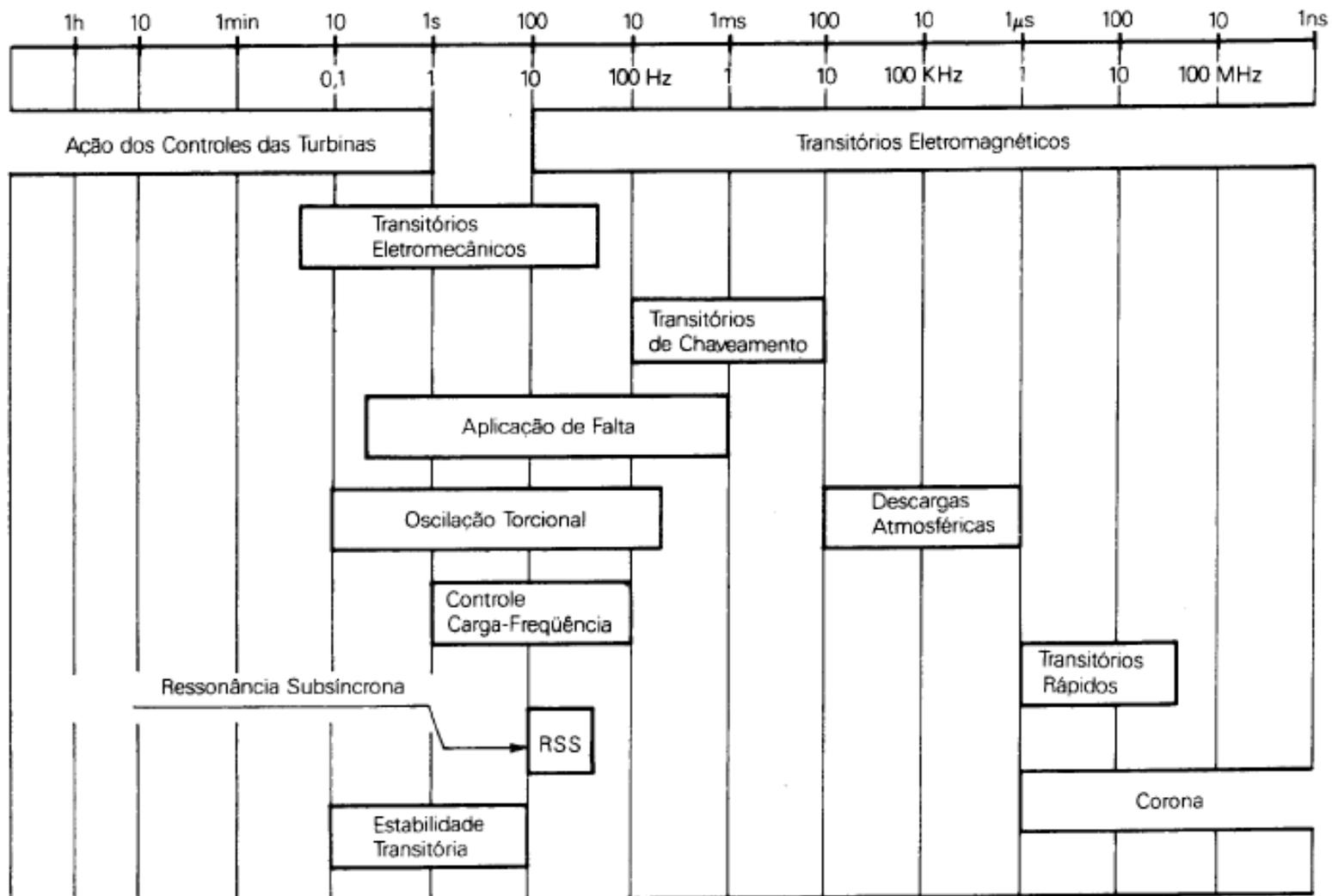
- constantes de tiempo de 10 ms a 1s
- control de excitación y de velocidad
- dinámica electromecánica de los rotores
- tiempo de despeje de protecciones
- grandes motores,

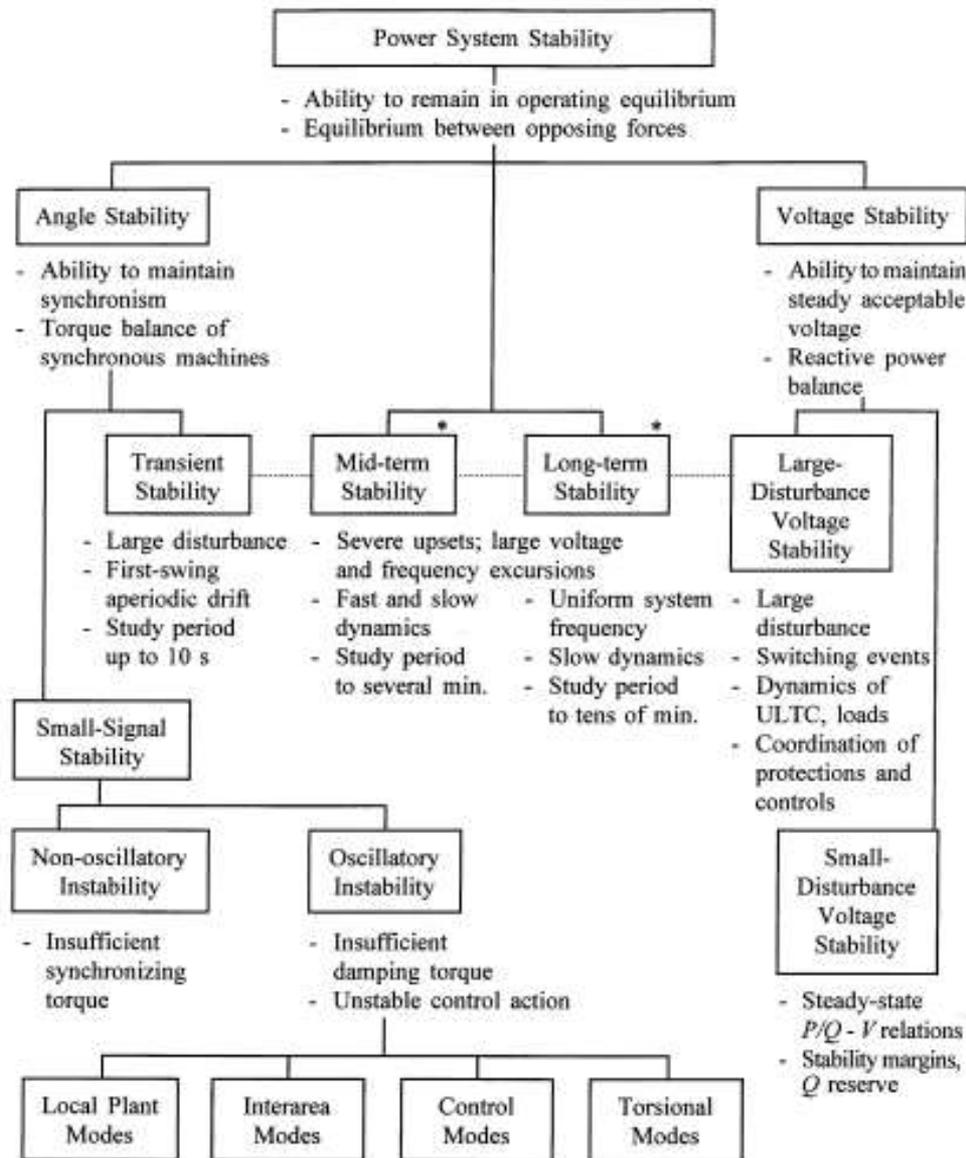
Paso de integración: 2-10 ms, horizonte: hasta 20 s.

Fenómenos que comprometen la estabilidad a mediano o largo plazo:

- control de frecuencia,
- turbinas, motores primarios
- constantes de tiempo térmicas
- cargas con termostato,
- OLTC, etc.

Horizonte de simulación: 10 s a varios minutos.





Temario del curso

1-Introducción

2-Análisis de Sistemas de Potencia en régimen permanente (NO)

3-Modelado para estudios de estabilidad: máquina síncrona y sus controles, cargas, generadores eólicos

4-Estabilidad de sistemas dinámicos

5-Estabilidad transitoria

6-Estabilidad a las pequeñas oscilaciones

7-Estabilidad de tensión

