

# **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:

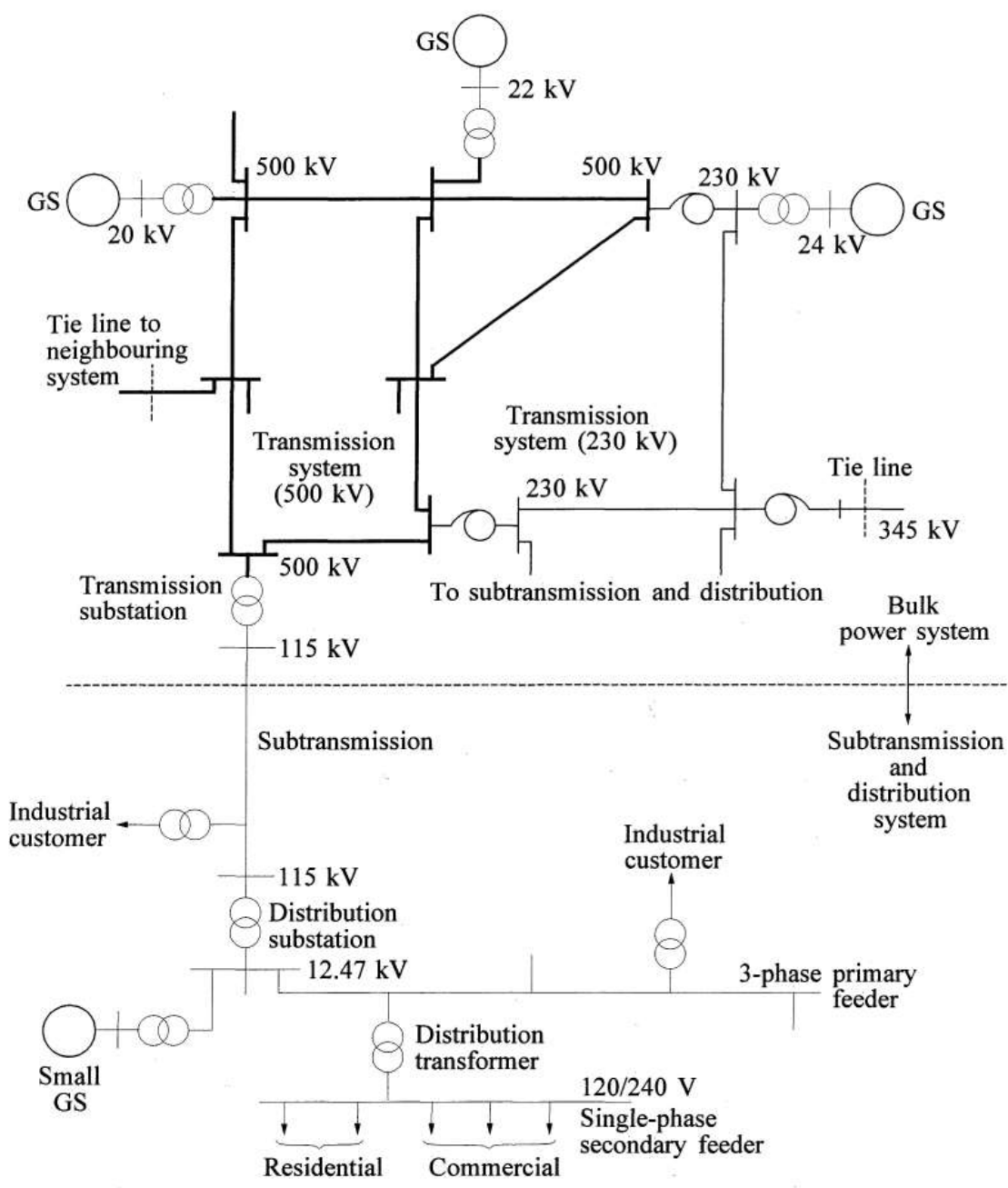
**Power System Stability and Control (Prabha Kundur,1993)**

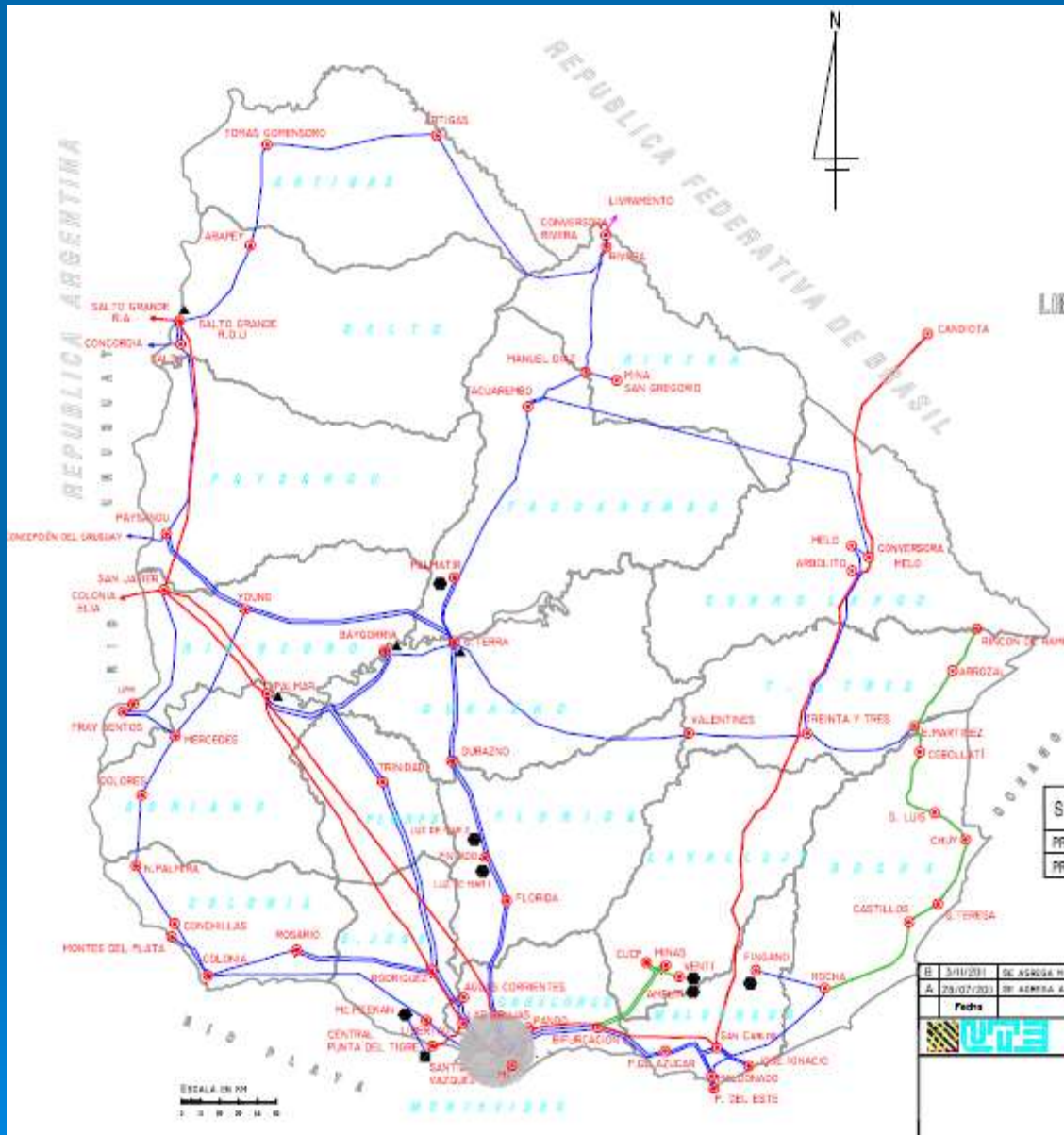
### Página EVA del curso:

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

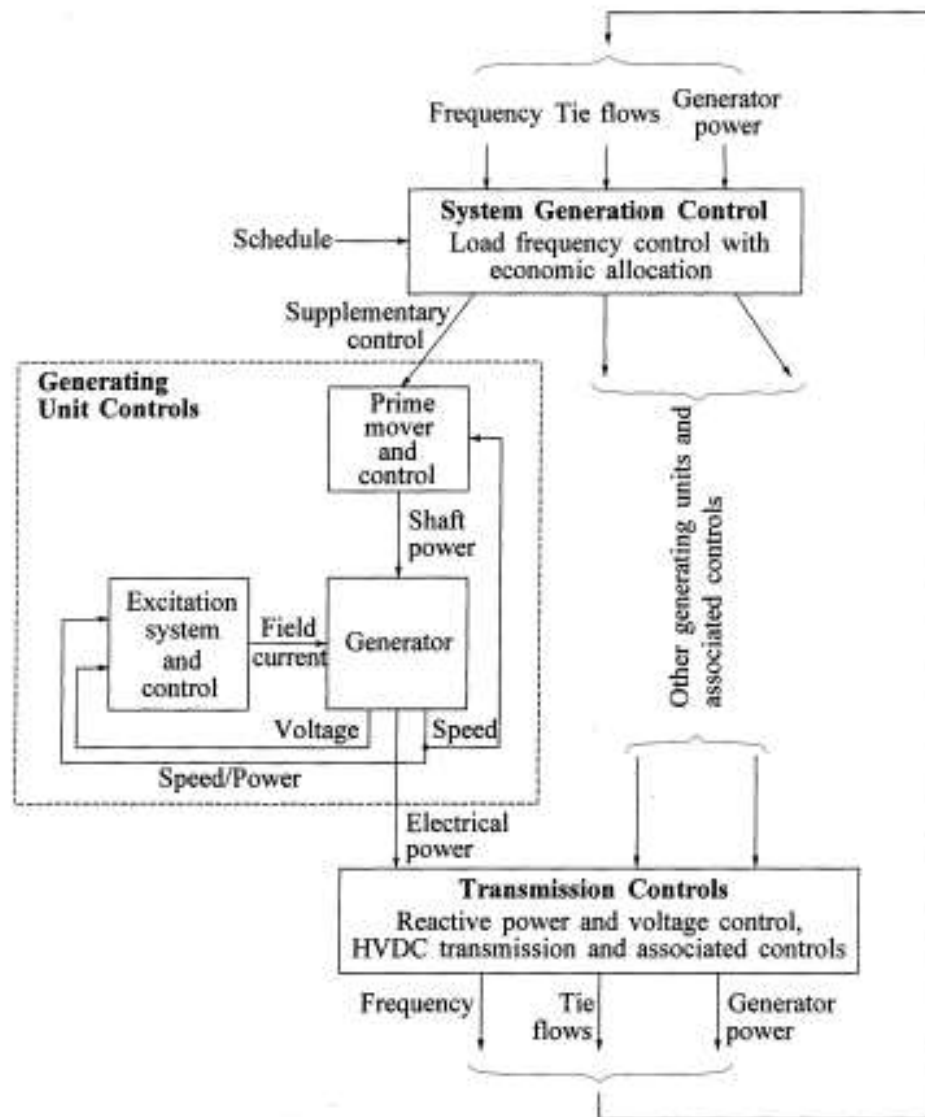
# Objeto de estudio:

# Sistema de Potencia...

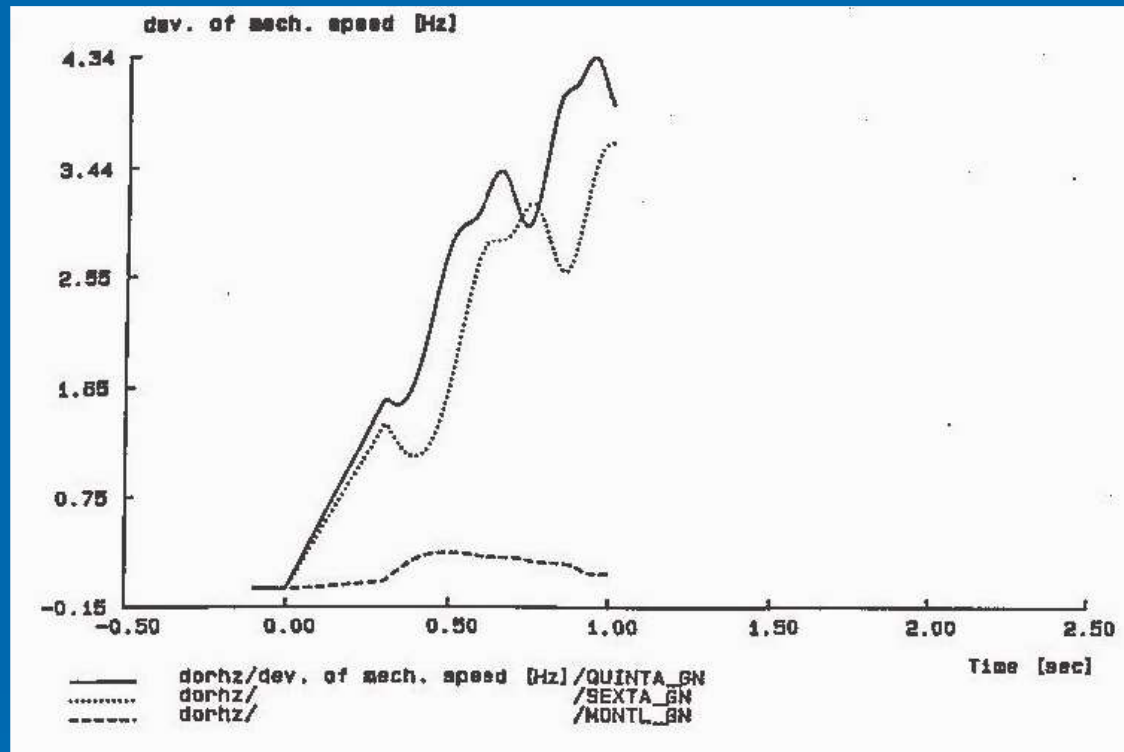




# ..y su Sistema de Control



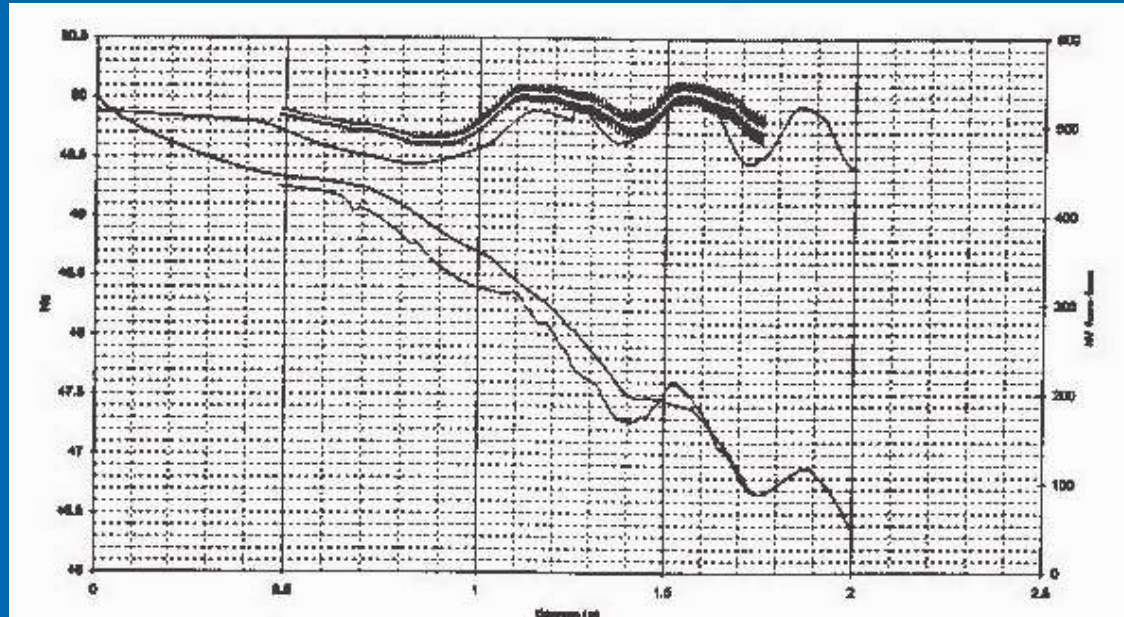
# Ejemplos de Perturbaciones...



Simulación de una falta trifásica muy larga en Montevideo I 500



# Ejemplos de Perturbaciones...



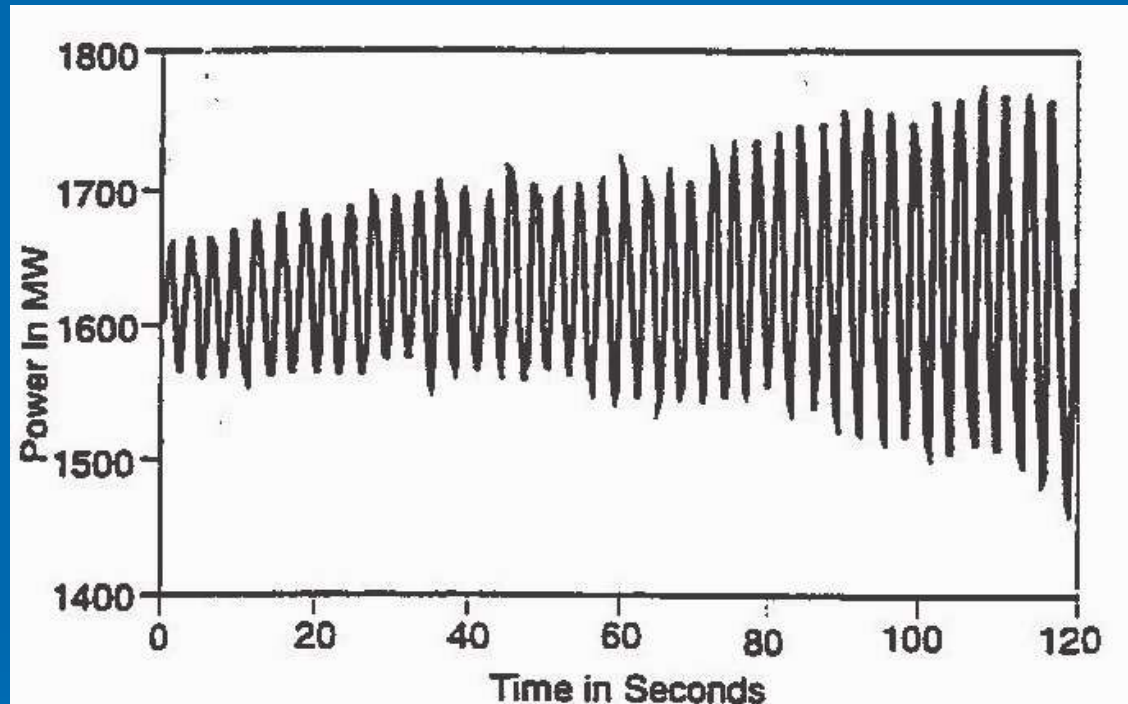
Registro de una perturbación real:sistema uruguayo  
aislado del argentino (Noviembre 2001)

Gráficas superiores:tensión

Gráficas inferiores:frecuencia

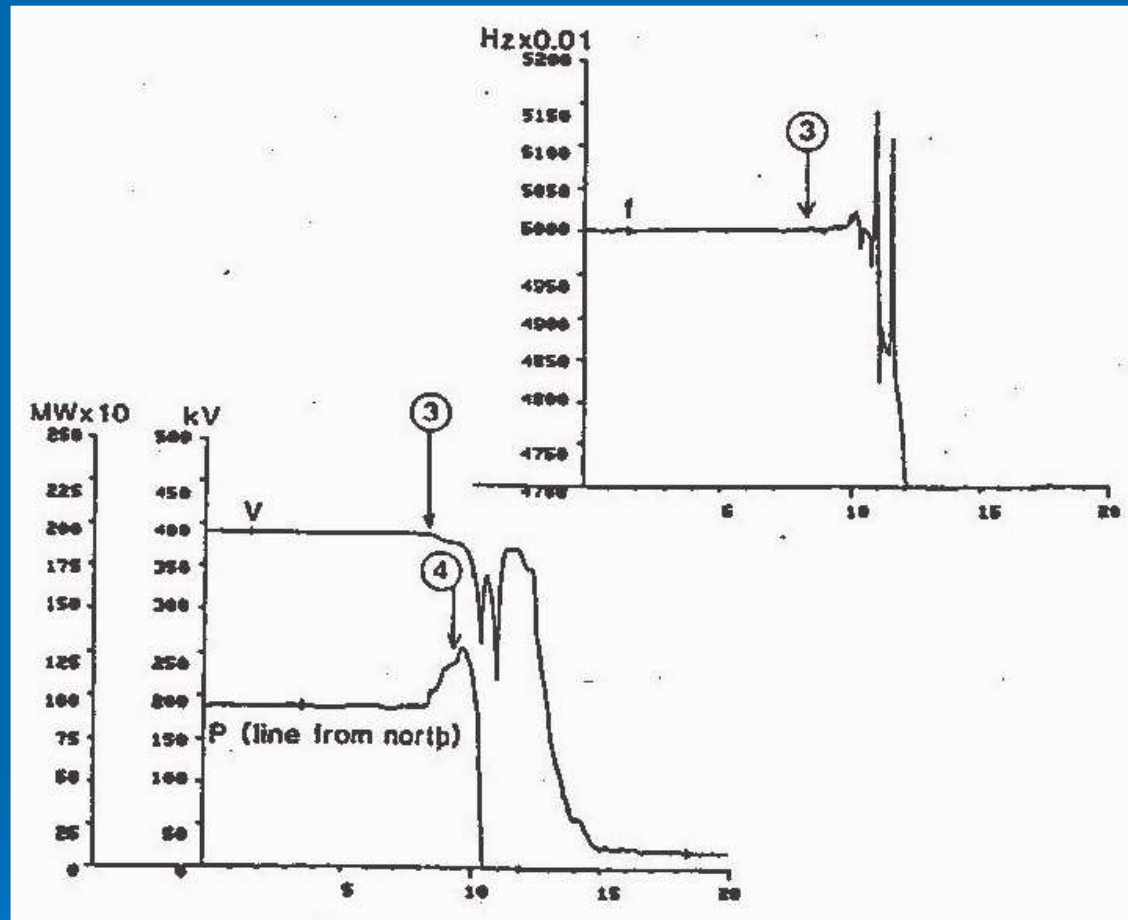
(Tiempo en seg.)

## 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

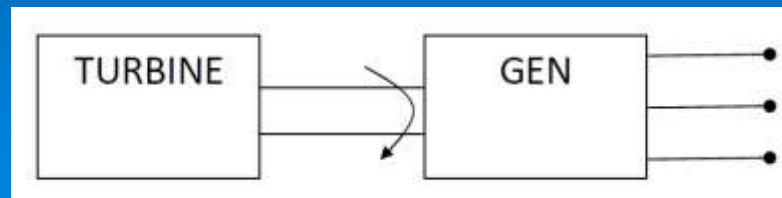
## Estabilidad de ángulo

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*)

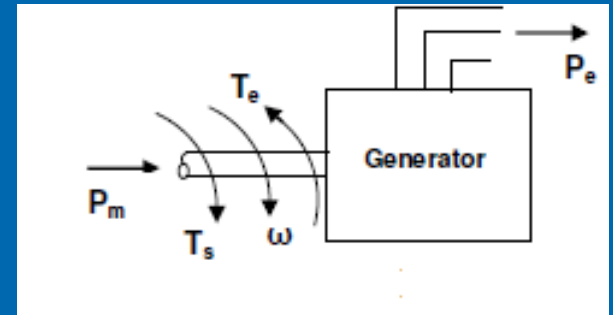
El ángulo es función del balance entre:

- 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

$\delta$ : ángulo del rotor respecto a un eje sincrónico de referencia

$T_D$  : coeficiente de torque amortiguante

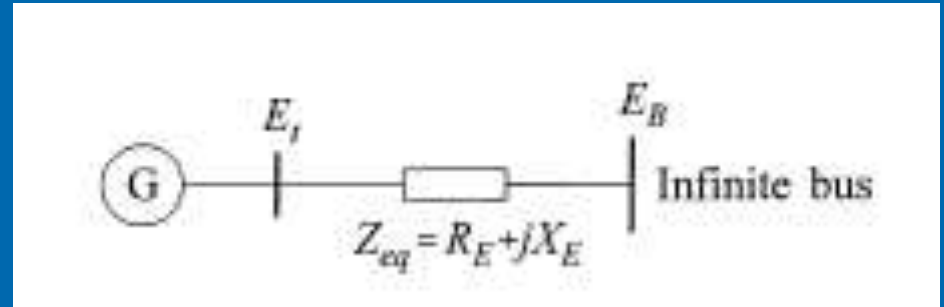
$P_m$  : potencia mecánica generada por la turbina

$P_e$  : potencia eléctrica inyectada por la máquina a la red; función de  $\delta$



Ejemplo:

Sistema máquina-barra infinita (OMIB)



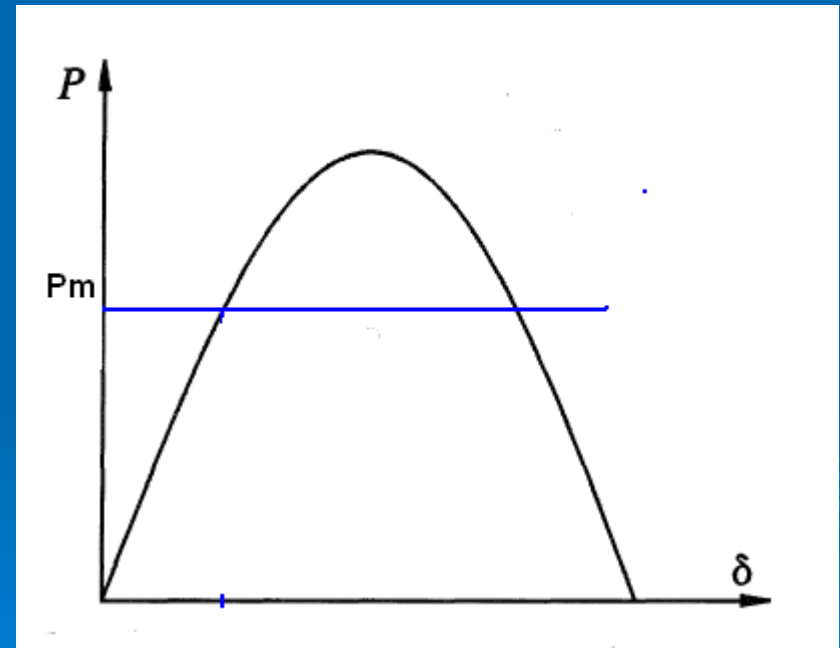
Relación potencia -ángulo

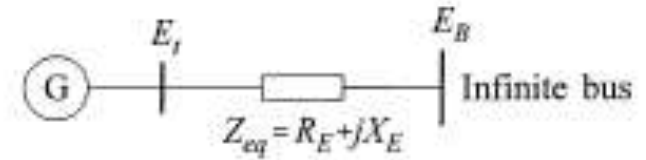
Si  $R_E \approx 0$ :

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

$\delta$  = 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

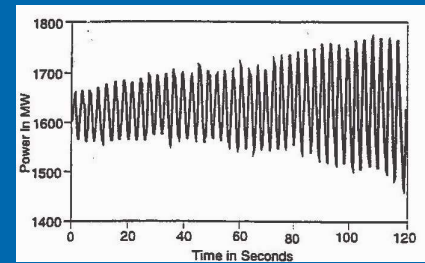
-No hay transferencia para  $\delta=0$

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

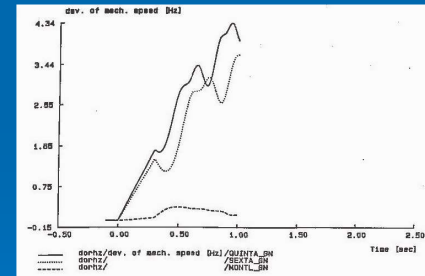
-Directamente proporcional a las tensiones, inversamente proporcional a la reactancia de la línea

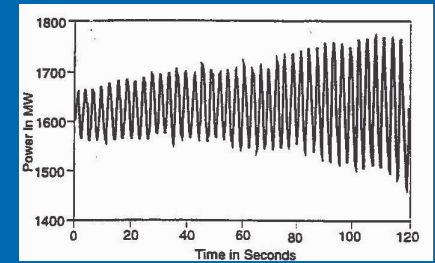
## Tipos de estabilidad de ángulo

✓ Estabilidad de pequeña señal



✓ Estabilidad transitoria





## Estabilidad de pequeña señal ("pequeñas oscilaciones")

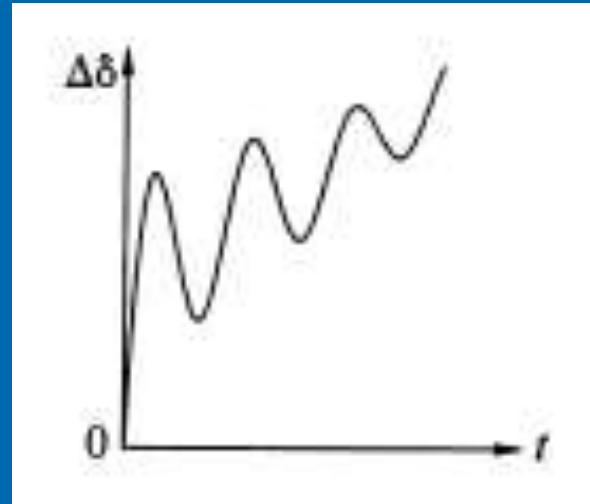
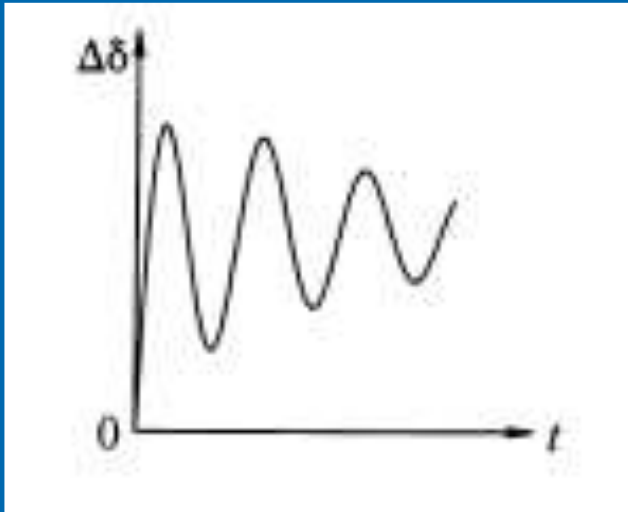
Pequeñas perturbaciones  $\Rightarrow$  Linealización (Métodos lineales)

- 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

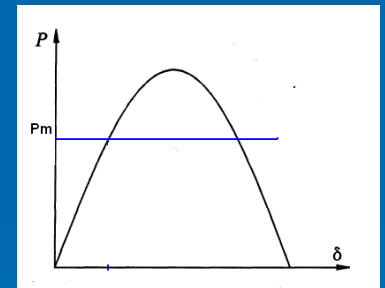
$T_D$  = coeficiente de torque amortiguante



$T_s$  negativo: Inestabilidad no oscilatoria

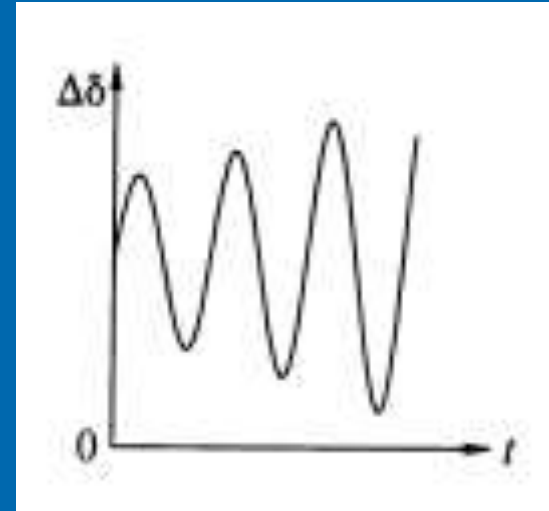
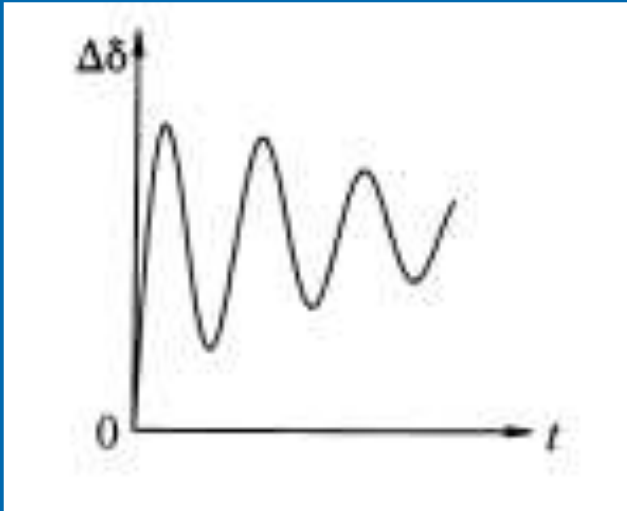
En el ejemplo máquina-barra infinita:

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

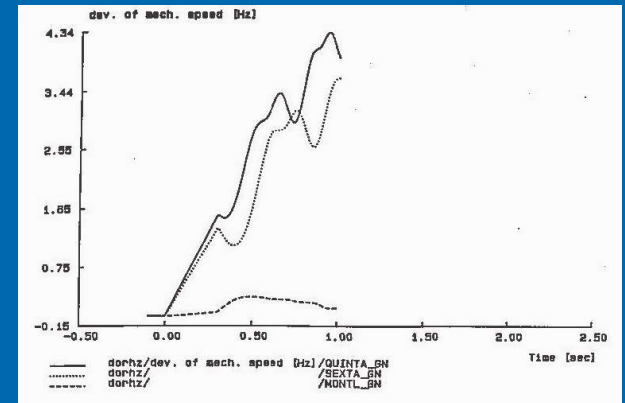
## Estabilidad transitoria

Perturbaciones severas  $\Rightarrow$  Alinealidades

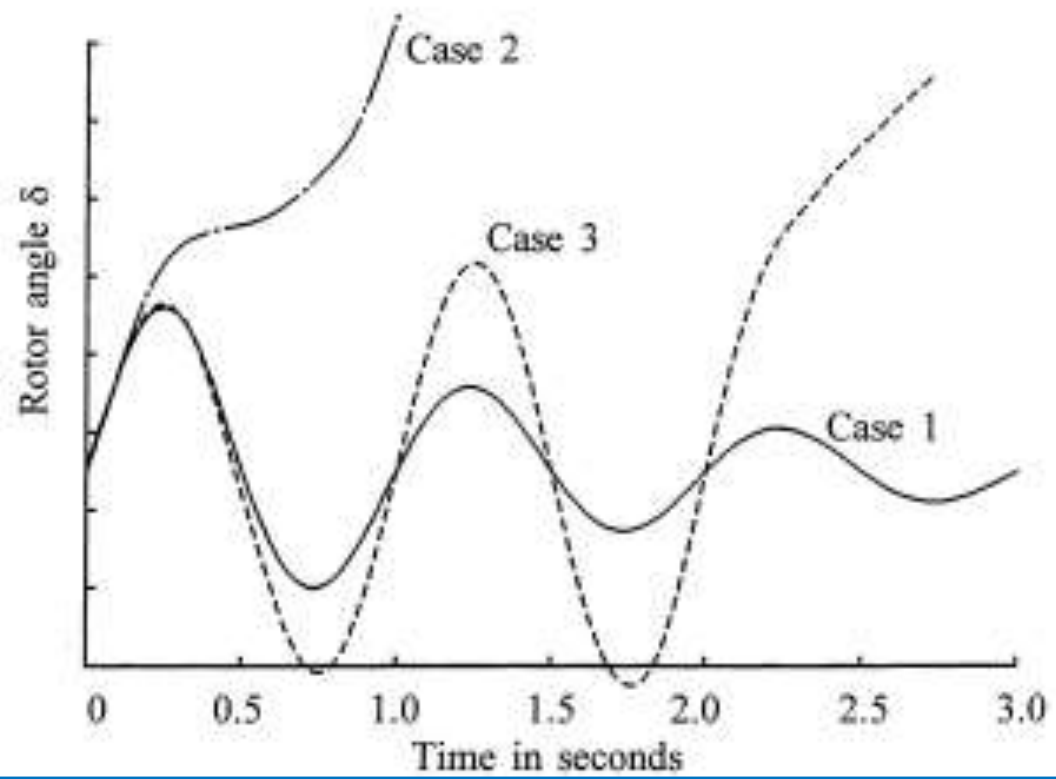
(Métodos de simulación en el tiempo-  
Intervalos típicos: 3 a 10 seg.)

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

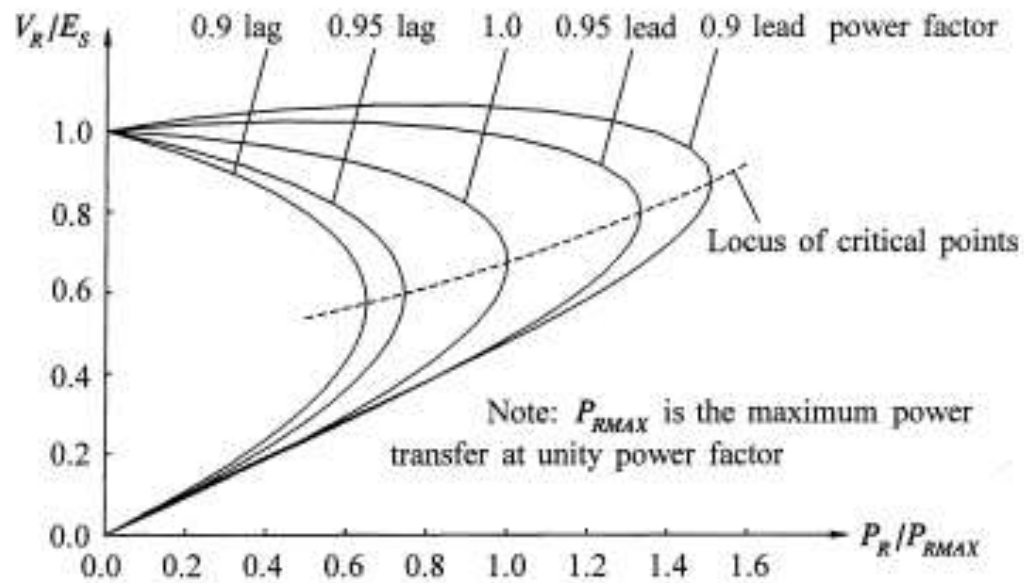
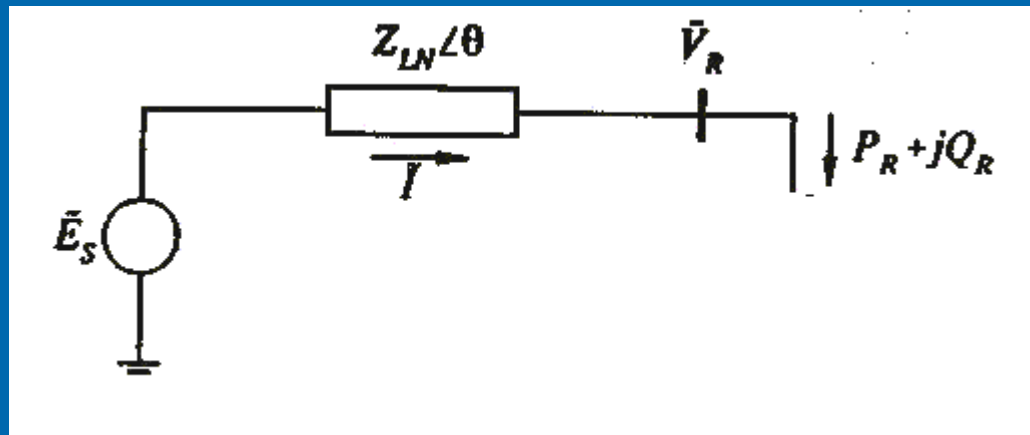
## Tipos de estabilidad de tensión

### 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)

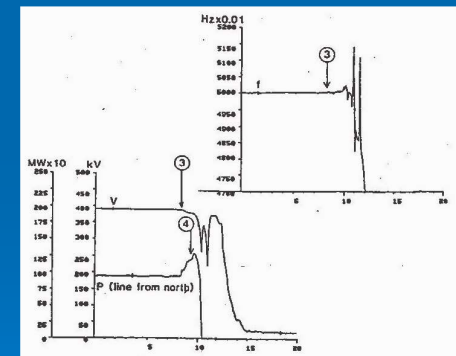
Ejemplo:

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:

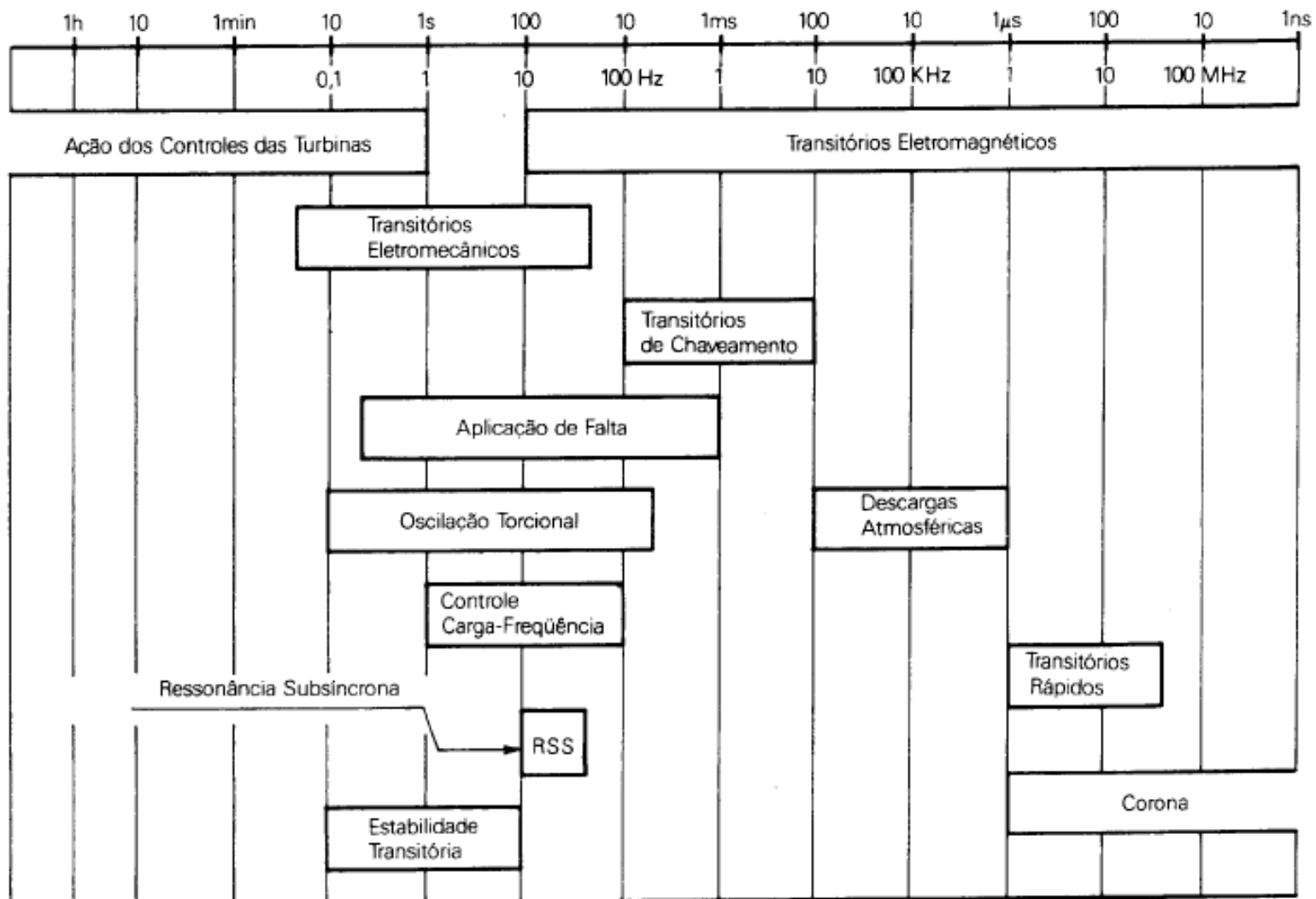
- constantes de tiempo de 10 ms a 1s
- control de excitación y de velocidad
- dinámica electromecánica de los rotores
- tiempo de despeje de protecciones
- grandes motores,

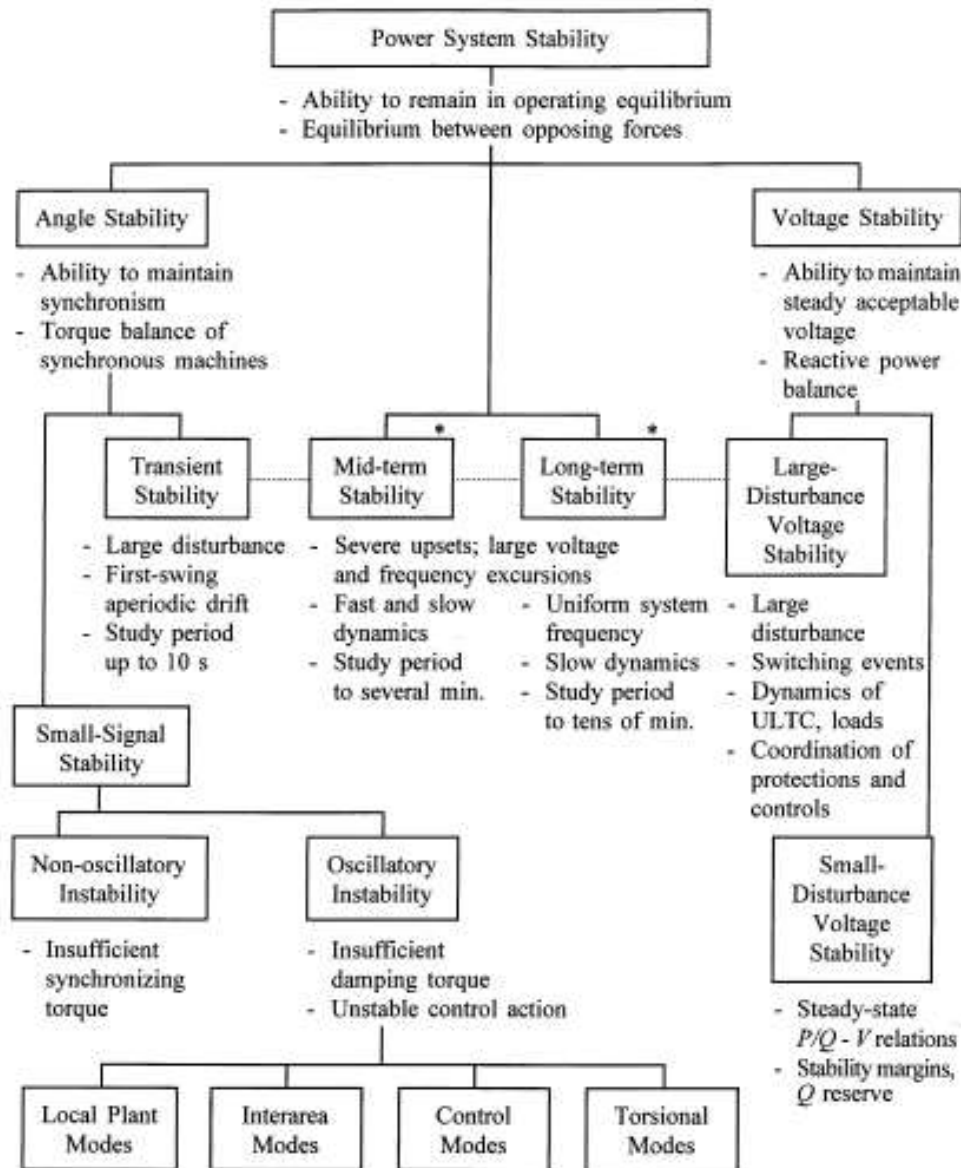
Paso de integración: 2-10 ms, horizonte: hasta 20 s.

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**

