



EL 57A SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Clase 24: Estabilidad II

**Luis Vargas
AREA DE ENERGIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA**



Contenido (VII)

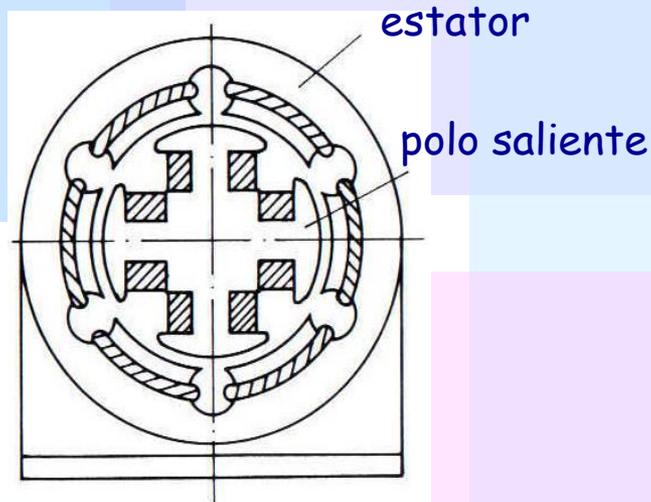
7. Estabilidad

- 7.1 Introducción
- 7.2 Estabilidad permanente
- 7.3 Estabilidad transitoria

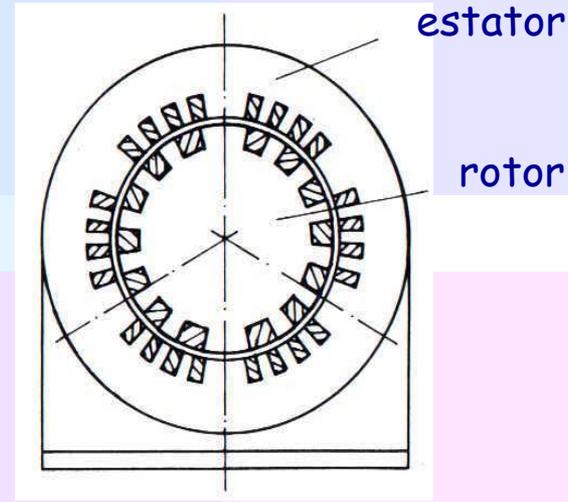


Estructura General

- Máquina eléctrica rotatoria --> Estator y Rotor
- **Estator:** devanado consistente en espiras agrupadas en tres fases separadas por 120°
- **Rotor:** espiras concentradas en torno a polos y alimentadas con corriente continua a través del colector
- **Formas constructivas:** polos salientes (gran importancia para Chile), rotor cilíndrico



Máquina de Polos Salientes

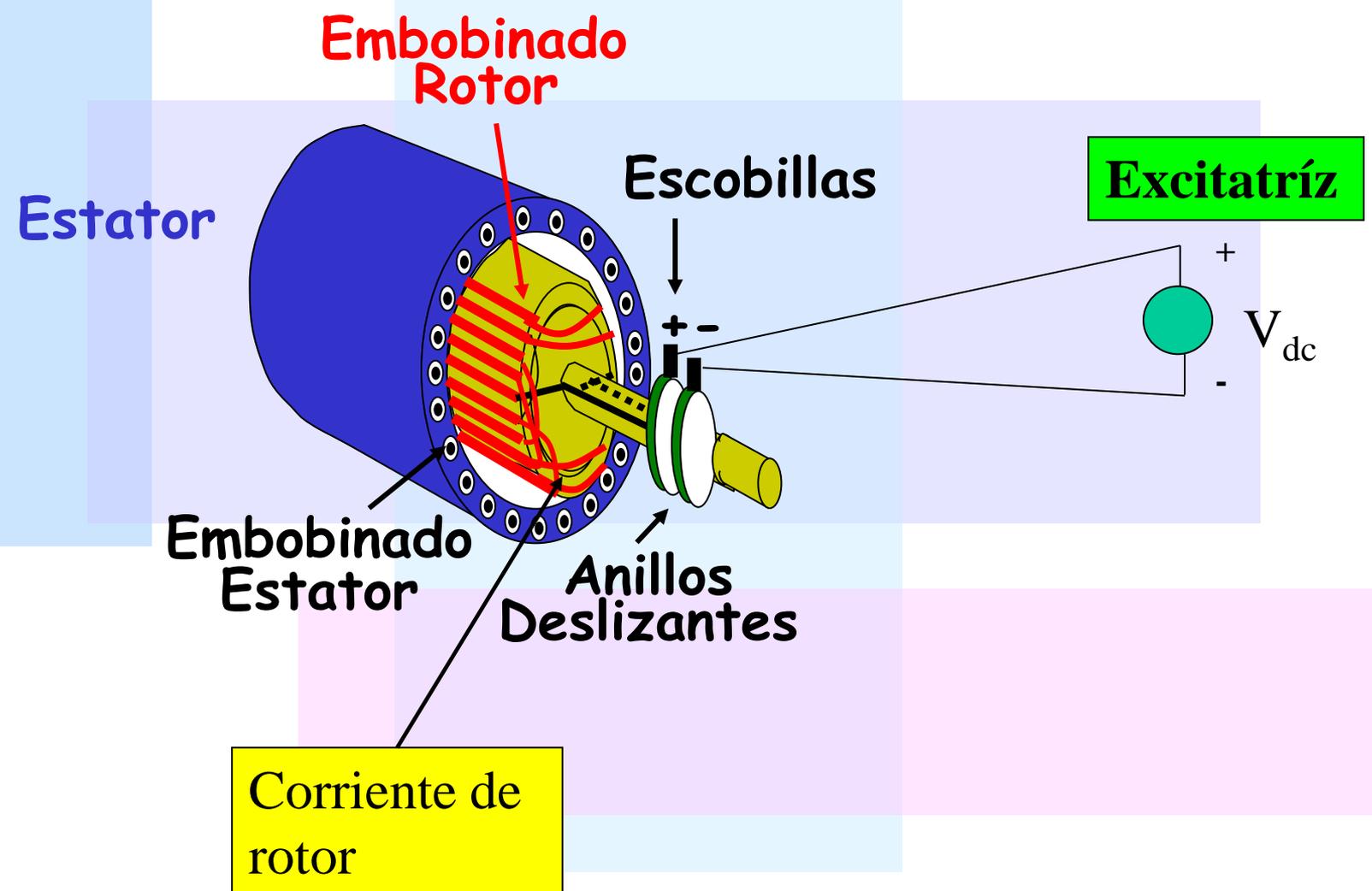


Máquina de Rotor Cilíndrico

Fuente:UNIDO



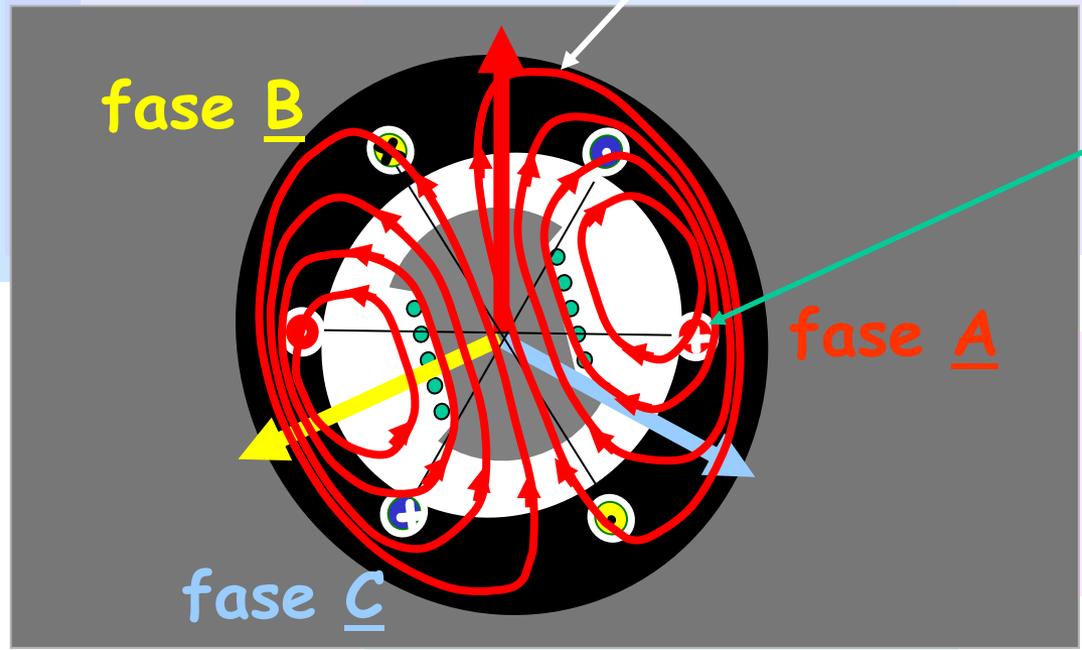
Generador Síncrono





GENERADOR

Líneas de
Campo Magnético



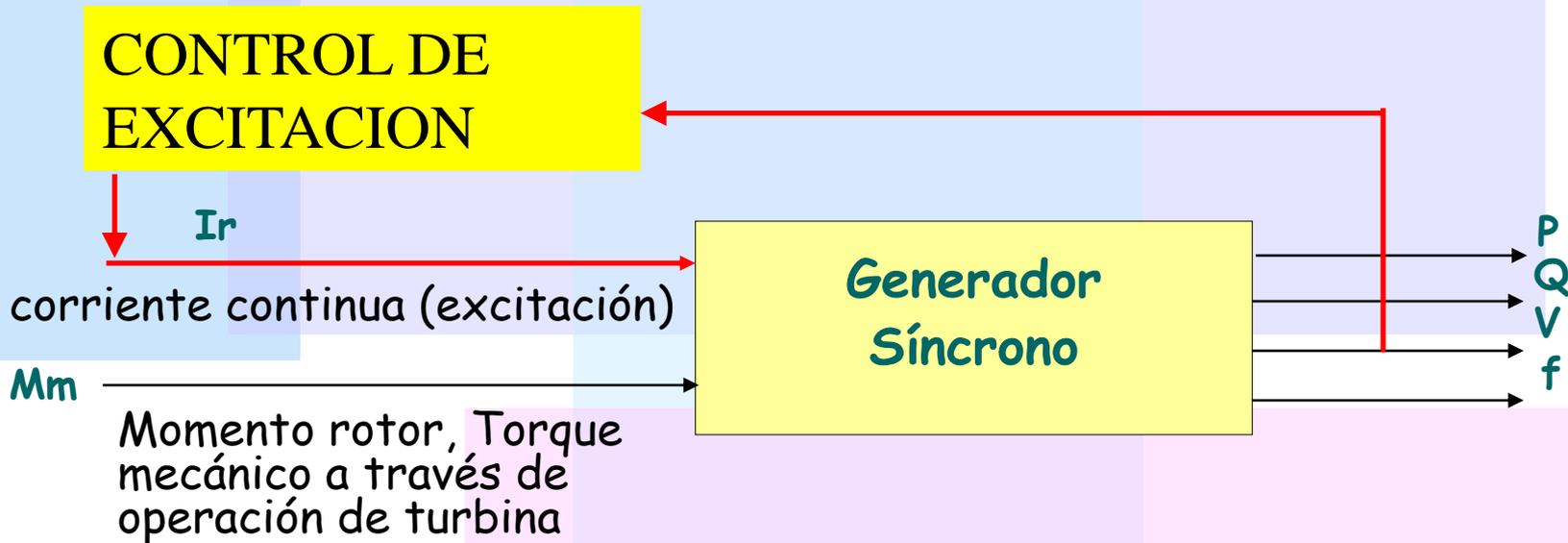
Va

Fuente: PowerLearn



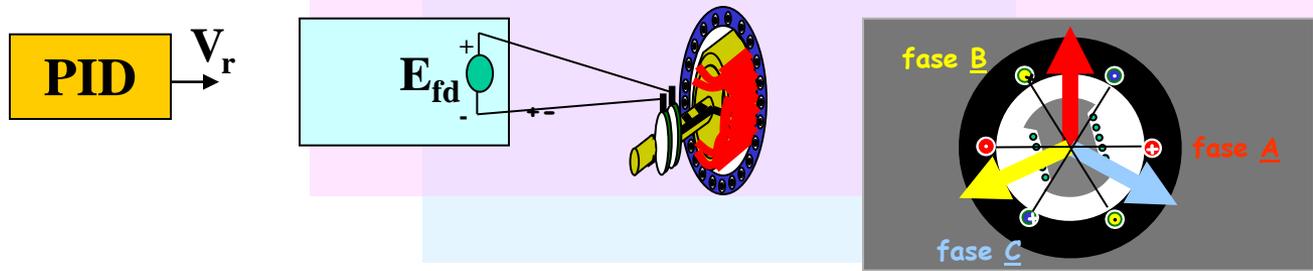
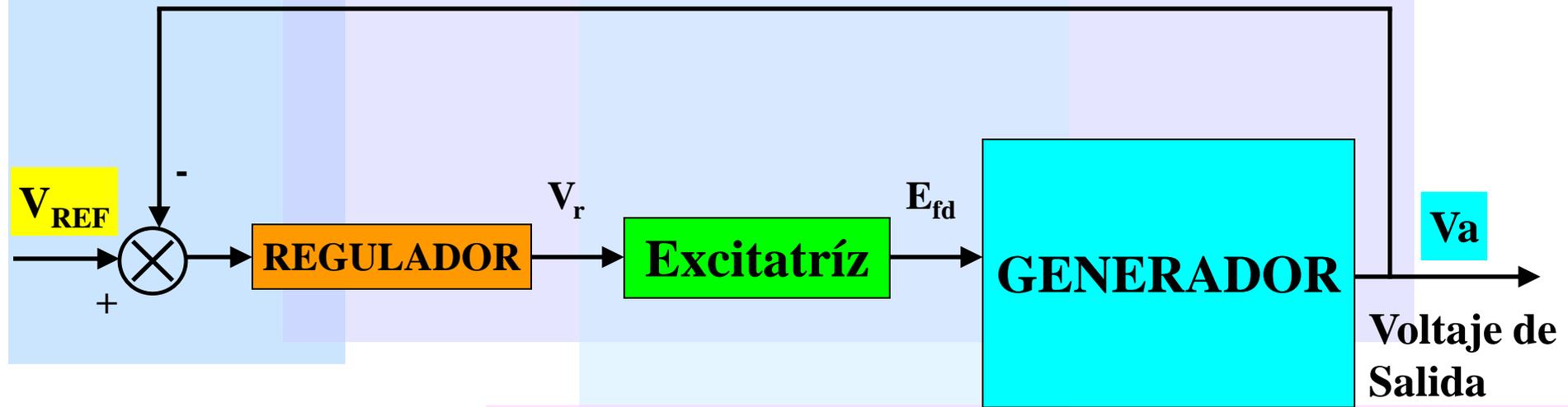
Generador Síncrono (IV)

Comportamiento Dinámico del Generador



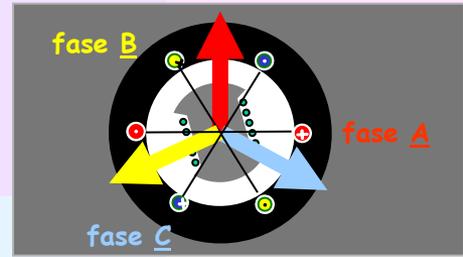
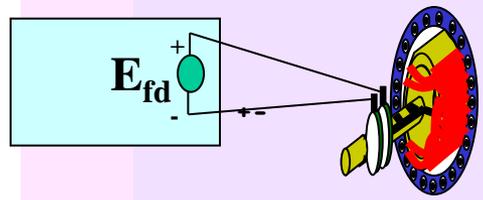
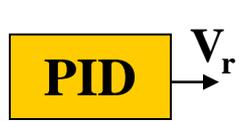
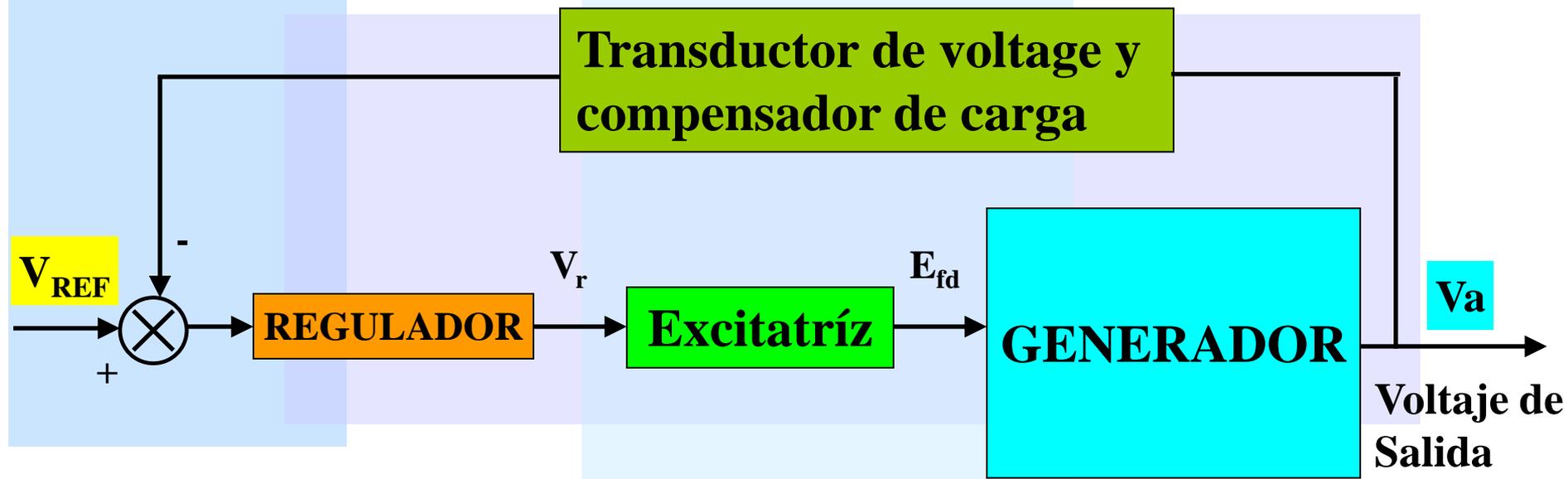


Esquema Básico de un Control de Excitación



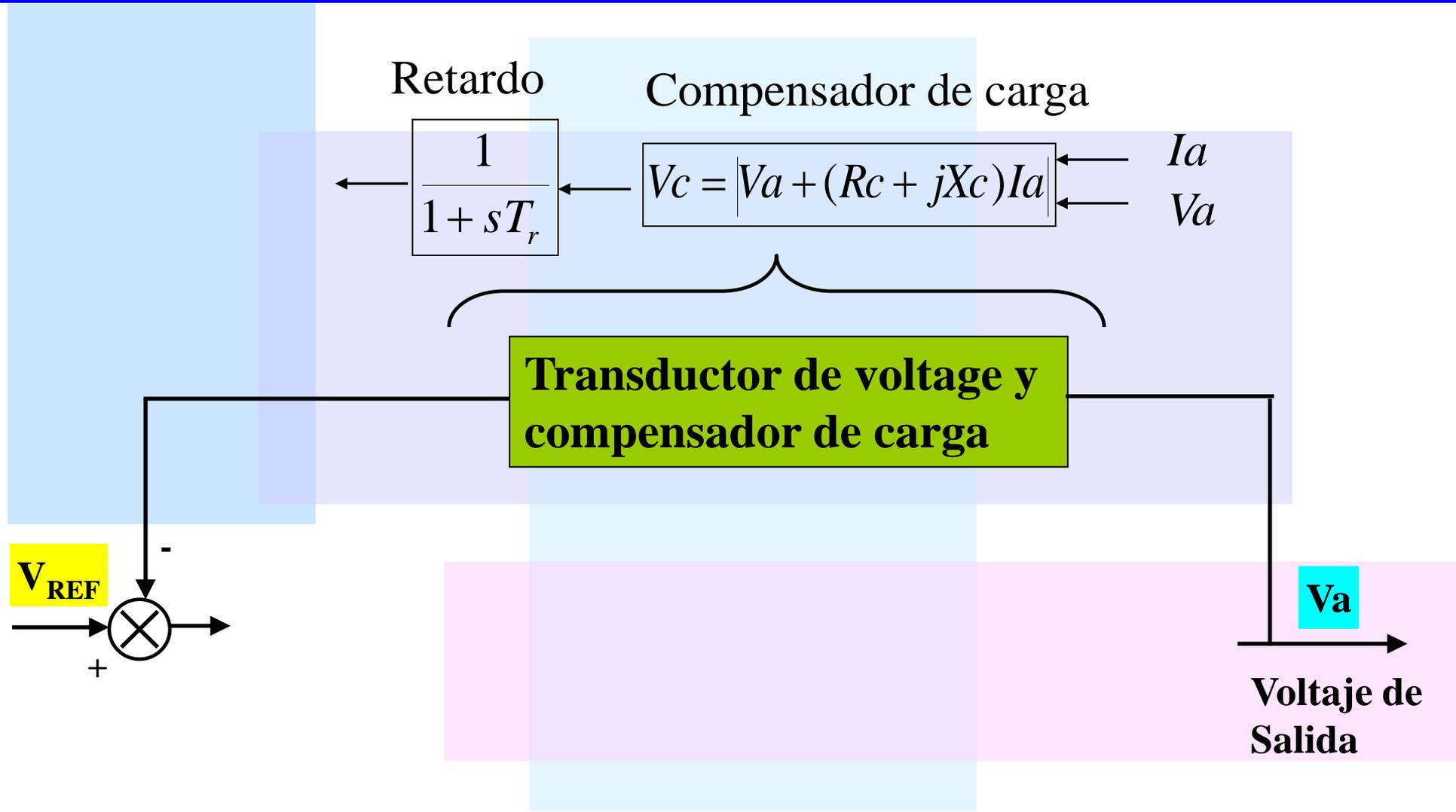


Esquema Básico de un Control de Excitación





Esquema Básico de un Control de Excitación





Limitadores y circuitos de protección

- Límites de sobreexcitación. Limita corriente de rotor
- Voltaje mínimo de salida del generador
- Protección de Volts-per-hertz. Protección de flujo máximo

$$e = d\Phi/dt, e = e_0 \cos \omega t \Rightarrow \Phi = (e_0 \sin \omega t) / \omega$$

- Corriente de armadura



Introducción (I)

Definición Clásica del Problema

El estudio de la estabilidad de sistemas eléctricos corresponde a un área de estudios muy amplia que se relaciona directamente con disciplinas de control y máquinas eléctricas. La estabilidad corresponde a la capacidad de un sistema de desarrollar fuerzas restauradoras iguales o mayores a las fuerzas perturbadoras. Un sistema se mantiene estable en la medida que sus máquinas son capaces de mantenerse en sincronismo.

Por conveniencia en el análisis el estudio de estabilidad es dividido en dos categorías mayores.



Estabilidad Permanente

Habilidad de un sistema eléctrico de potencia de volver al sincronismo (mismo estado de partida o muy cercano) frente a perturbaciones pequeñas y lentas.



Estabilidad Transitoria

Habilidad de un sistema eléctrico de potencia de responder a perturbaciones grandes e intempestivas: fallas, salida de líneas, salida o entrada de cargas importantes (paso de un estado de operación a otro, 5 seg.).

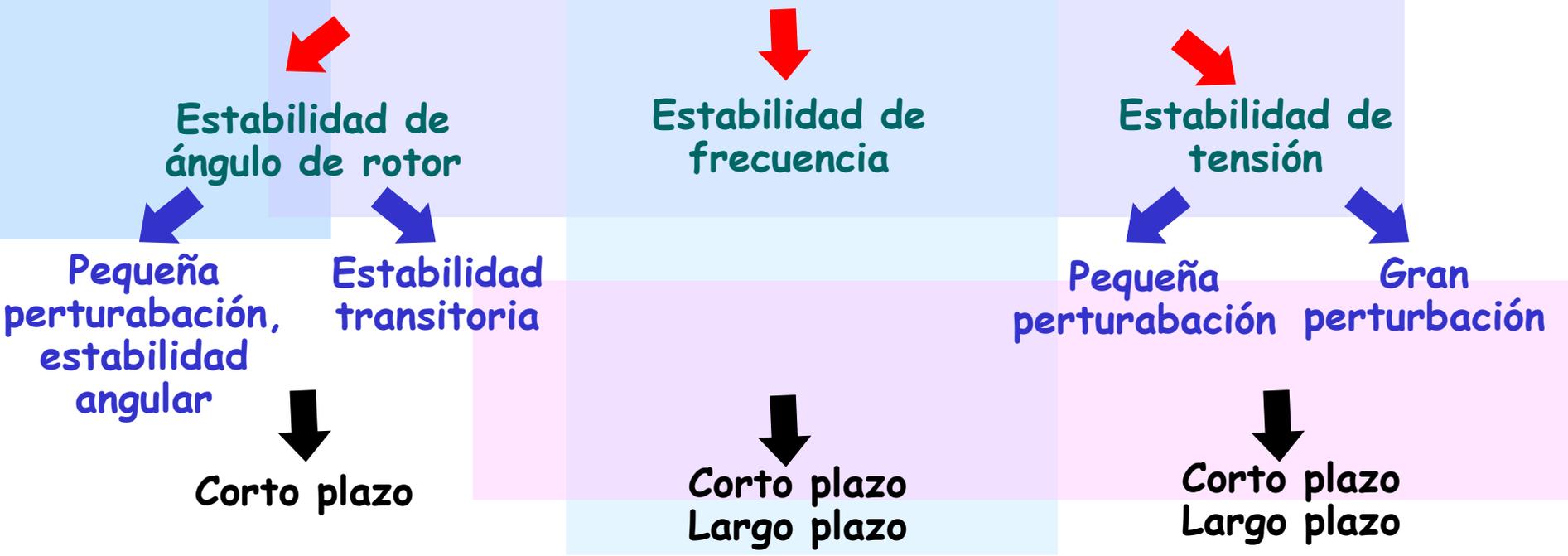
- Planificación de nuevas instalaciones de transmisión,
- Sistemas de protecciones y coordinación,
- Requerimientos de tensión y capacidad de transferencia entre sistemas,
- etc.



Introducción (Ib)

Criterios propuestos para clasificación

- Naturaleza física del modo de inestabilidad resultante, de acuerdo a lo observado en las principales variables del sistema en que se observa la inestabilidad.
- Magnitud de la perturbación observada, lo que influencia el método de cálculo.
- Los equipos, procesos y horizontes de tiempo que deben ser considerados para estimar la estabilidad.





Introducción (II)

Ecuación de Oscilación

Ecuación diferencial que describe el movimiento relativo del eje del rotor respecto de los ejes del campo magnético resultante durante una perturbación.

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_{m(pu)} - P_{e(pu)}$$

Ecuación de oscilación despreciando torque amortiguante

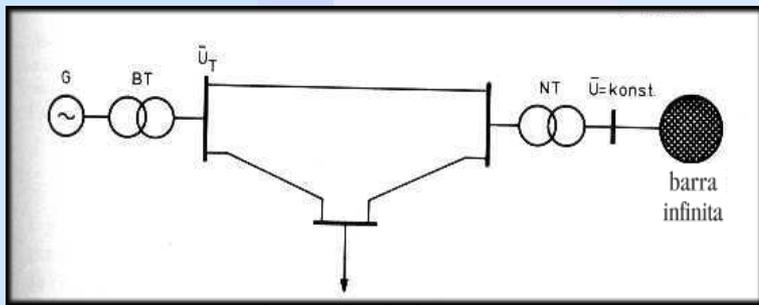
• Constante de Inercia (seg)	H	• Velocidad angular eléctrica de sincronismo (rad/seg)	ω_s
• Potencia eléctrica (pu)	P_e	• Angulo de carga (rad)	δ
• Potencia mecánica (pu)	P_m	• Tiempo (seg)	t



Introducción (III)

Modelo Equivalente de Generador Síncrono para Estudios de Estabilidad

El generador síncrono fue discutido en la sección 3.2, realizando una representación a través de una fuente de voltaje ideal y una reactancia serie, cuyo valor depende del instante de tiempo analizado.

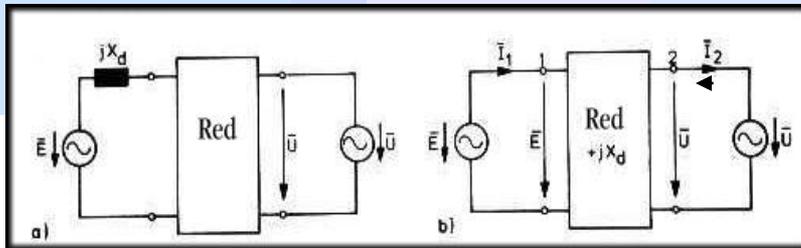


Unilineal del Sistema



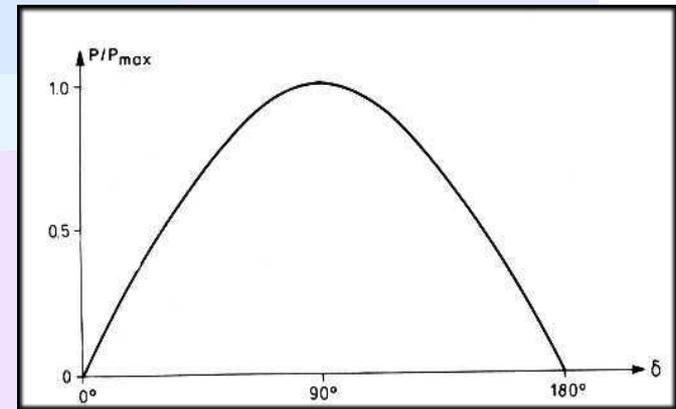
$$P = \frac{EU}{X_{12}} \sin(\delta)$$

Potencia activa entregada por Generador



Modelo Monofásico Equivalente

- Voltaje interno generador \bar{E}
- Voltaje barra infinita U
- Reactancia de rama X_{12}



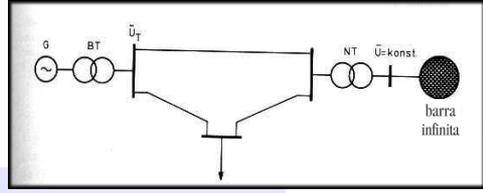
Curva de Angulo/Potencia



Estabilidad Permanente (I)

Estudio de caso particular

Se debe analizar el equilibrio entre momento mecánico y momento eléctrico en torno a un punto de operación de interés.



$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + P_s \Delta \delta = 0$$

$$P_s = P_{max} \cos(\delta_0)$$

Ecuación diferencial de 2do orden

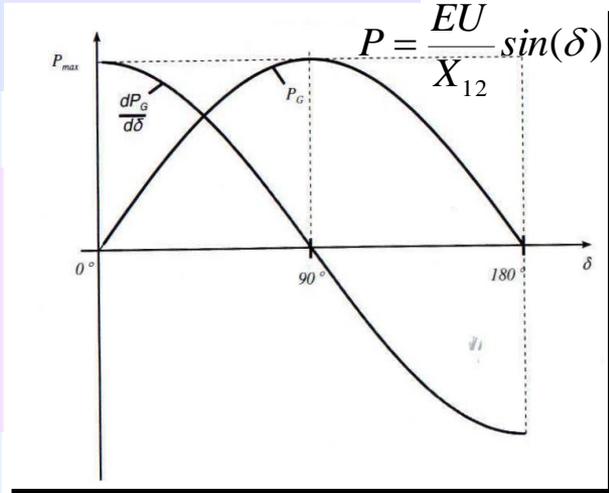
$$s^2 = -\frac{\pi f_0}{H} P_s$$

$P_s < 0$ Inestable

$P_s > 0$ Límite de estabilidad (respuesta oscilatoria no atenuada)

Simplificaciones

- No se considera acción de controladores (reg. voltaje)
- Perturbación desaparece una vez ocurrida
- Potencia mecánica permanece constante
- Aproximación lineal de ecuación de oscilación
- No se incluye torque amortiguante





Estabilidad Permanente (II)

Consideración de torque amortiguante

El torque amortiguante, expresado como potencia amortiguante (P_d), se debe a la existencia de roces mecánicos y a la aparición de corrientes inducidas en las barras amortiguadoras y en el cuerpo del rotor, en la medida que la velocidad se desvía de la sincrónica. Este torque tiende a frenar el desplazamiento del rotor volviéndolo a la posición de equilibrio permanente y crece con la velocidad relativa.

Ecuación diferencial de 2do orden

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + D \frac{d \Delta \delta}{dt} + P_s \Delta \delta = 0$$

$$P_d = D \frac{d \delta}{dt}$$

Dato de diseño o pruebas



$$\frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} + \frac{\pi f_0}{H} D \frac{d \Delta \delta}{dt} + \frac{\pi f_0}{H} P_s \Delta \delta = 0$$

$$s^2 + 2 \varepsilon \omega_n s + \omega_n^2 = 0$$



Estabilidad Permanente (III)

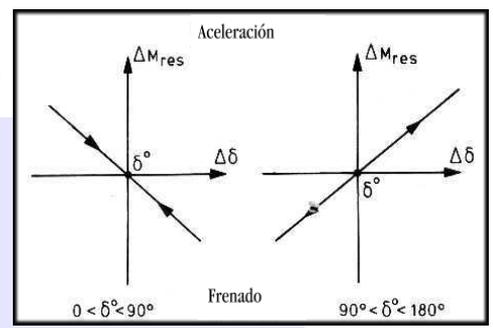
Solución en el dominio del tiempo

$$\delta = \delta_0 + \frac{\Delta\delta_0}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} e^{-\varepsilon\omega_n t} \sin(\omega_d t + \theta) = 0$$

$$\omega = \omega_0 - \frac{\omega_n \Delta\delta_0}{\sqrt{1-\varepsilon^2}} e^{-\varepsilon\omega_n t} \sin(\omega_d t) = 0$$

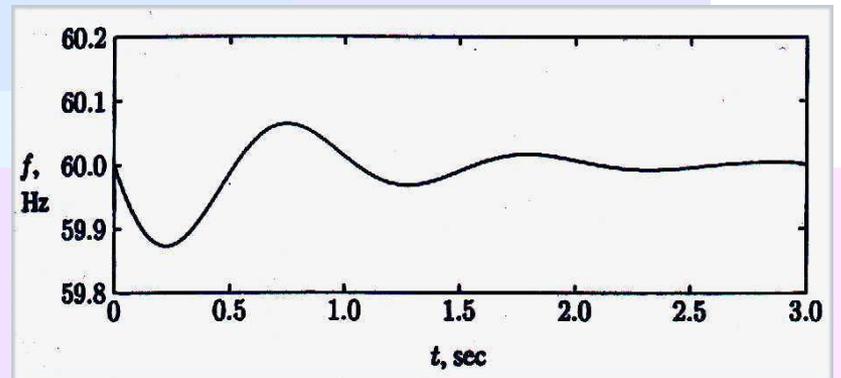
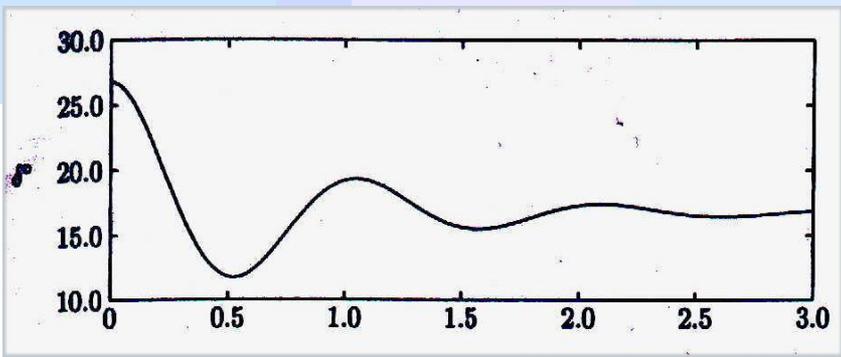
$P_s > 0$

Raíces con parte real negativa --> estable



Fuente : UNIDO

Momento de sincronización estático en operación estable e inestable



Ejemplo de respuesta del sistema en ángulo de carga y frecuencia



Estabilidad Transitoria (I)

Modelo General

- Linealización de la ecuación de oscilación no es adecuada --> necesidad de solucionar ecuación de oscilación (Métodos directos e indirectos)
- Uso de método de áreas iguales para estudios directos de estabilidad (Aplicación simplificada de teorema de Liapunov)



Estabilidad Transitoria (I)

Método de Areas Iguales

Se basa en la interpretación gráfica de la energía almacenada en las masas rotatorias como una medida (desviación de la energía cinética) para poder determinar si una máquina logra mantener su estabilidad tras una perturbación. Este método es aplicable a sistemas de 1 máquina conectada a una barra infinita o a uno de 2 máquinas, a través de una red intermedia.

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e = P_a$$

Potencia de
aceleración



$$\frac{d\delta}{dt} = \sqrt{\frac{2\pi f_0}{H} \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta}$$

Velocidad relativa de la máquina respecto
de su marco de referencia sincrónico

Para la condición de estabilidad
--> velocidad relativa debe ser
cero algún tiempo después de
ocurrida la perturbación.



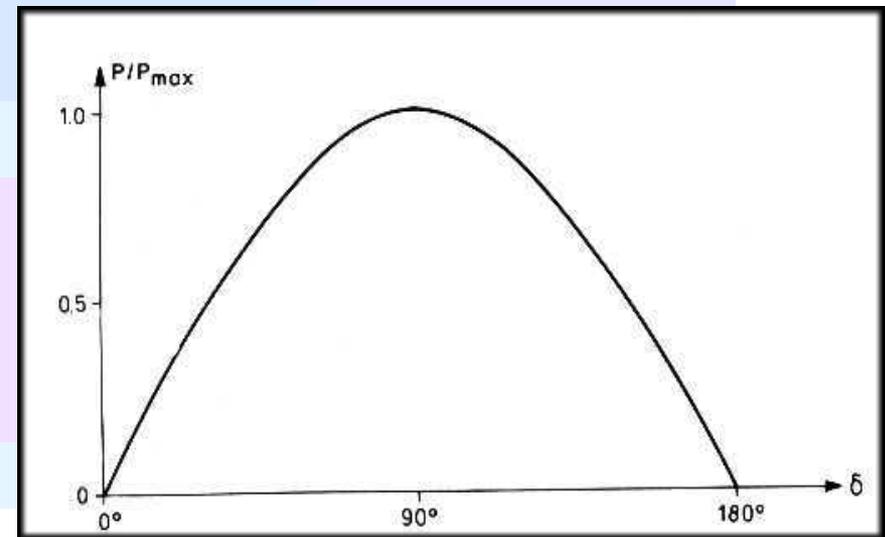
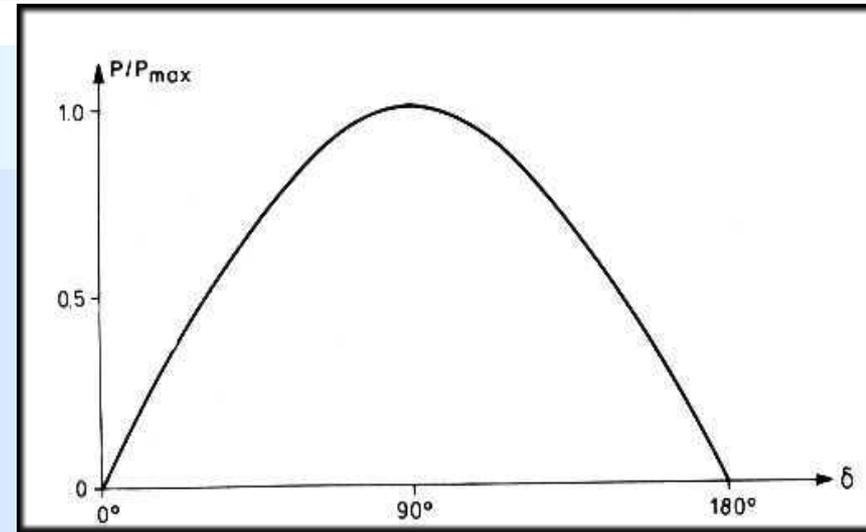
$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta = 0$$



Estabilidad Transitoria (II)

Aumento repentino de inyección de potencia P_m

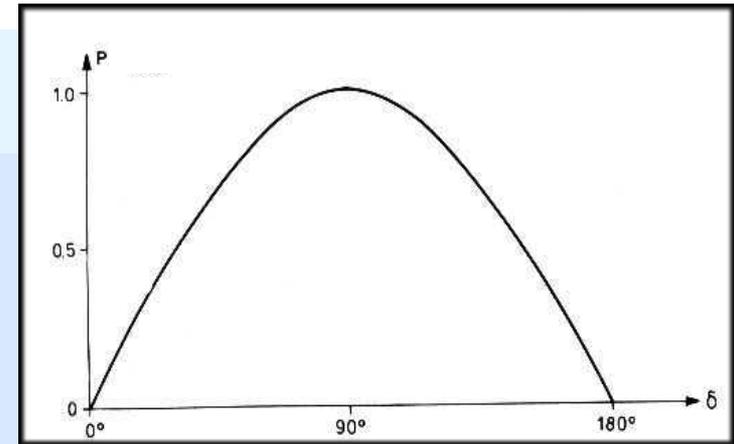
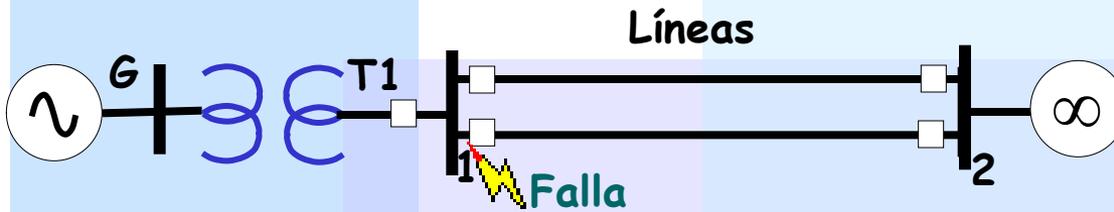
Aumento máximo de potencia P_m ?



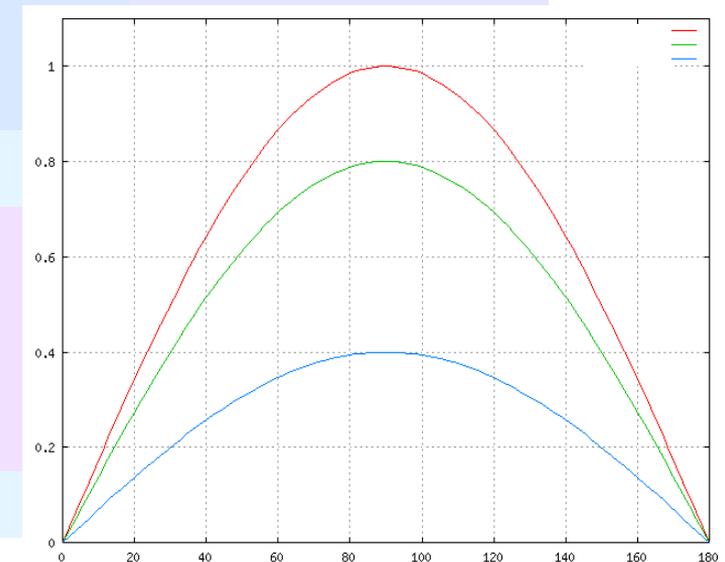
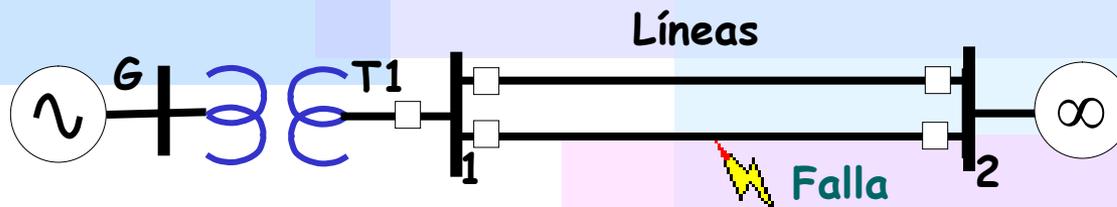


Estabilidad Transitoria (III)

Falla Trifásica (I)



Falla Trifásica (II)



FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ESTABILIDAD



Aspectos Complementarios (I)

Aspectos que mejoran la estabilidad de un sistema

- Inercias altas.
- Reactancias bajas (líneas de transmisión adicionales, menores reactancias serie, compensación serie, menor reactancia transitoria).
- Tiempos de despeje bajos.
- Tiempos de reconexión bajos.
- Potencias bajas.
- Tiempos de respuesta rápidos (controladores, válvulas)