Capítulo 5: Estabilidad Transitoria

Estabilidad transitoria

- Introducción
- Sistema máquina-bus infinito
- Sistema con varias máquinas
- Discusión

Análisis cualitativo de la respuesta temporal;

Pequeña señal;

Análisis mediante funciones de energía. Criterio de Igual Área.

Estabilidad transitoria

Introducción

Transient Stability of a Power System: A power system is transiently stable for a particular steady-state operating condition and for a particular disturbance if, following that disturbance, it reaches an acceptable steady-state operating condition.

- Respuesta no lineal frente a perturbaciones severas:
  Faltas, salidas repentinas de servicio, reconexiones, etc.

- Horizonte de simulación de varios segundos (10-20)

- Propiedad del sistema y del conjunto de faltas en consideración.

Estabilidad transitoria

Criterios UTE (Transmisión) de E.T.

- Tiempo de simulación: 20 seg;
- La diferencia angular máxima entre cada máquina y la máquina de referencia no será superior a 120 ° a lo largo de toda la simulación.
- El amortiguamiento (ζ) de las oscilaciones angulares será superior al 5 %:
- Las oscilaciones se deben amortiguar por completo a los 20 segundos.
- Las tensiones de barra deben:

  ser superiores a 0.7 pu durante toda la simulación, luego del despeje;
  ser menores de 0.8 pu sólo temporariamente (menos de 1 seg);
  respetar restricciones análogas respecto de las sobretensiones.
- La frecuencia estará:

  entre 50 +- 0.2 Hz en régimen;
  entre 47.5 y 53 Hz durante 3 seg.

Estabilidad transitoria

Escenario típico

- Sistema pre-falta: condición de equilibrio;
- Sistema en falta: hasta acción de las protecciones (despeje);
- Sistema post-falta: convergencia (o no hacia un punto de equilibrio aceptable)

Si la acción de las protecciones es escalonada, puede haber una sucesión de sistemas en falta...

Estabilidad transitoria

Herramientas

- Conocimientos y facilidades de modelado;

- Conocimiento y facilidades de simulación numérica;

PSS/E

DSATools™ Dynamic Security Assessment Software

SimuLight

DIgSILENT PowerFactory

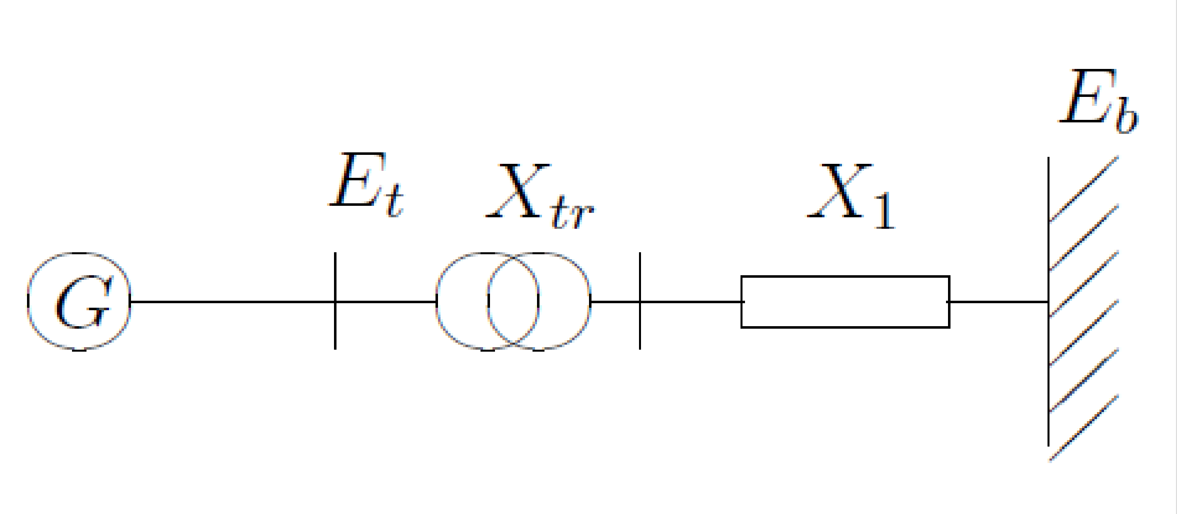
MATLAB

Transitorios electromagnéticos

- Conocimientos cualitativos de la respuesta dinámica de los sep.

Estabilidad transitoria

Ejemplo máquina-bus infinito

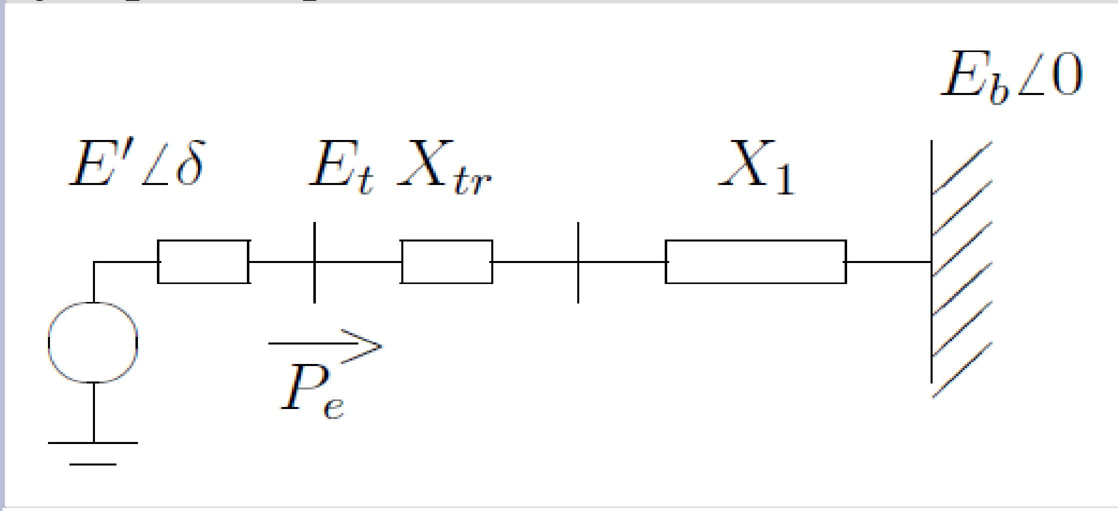


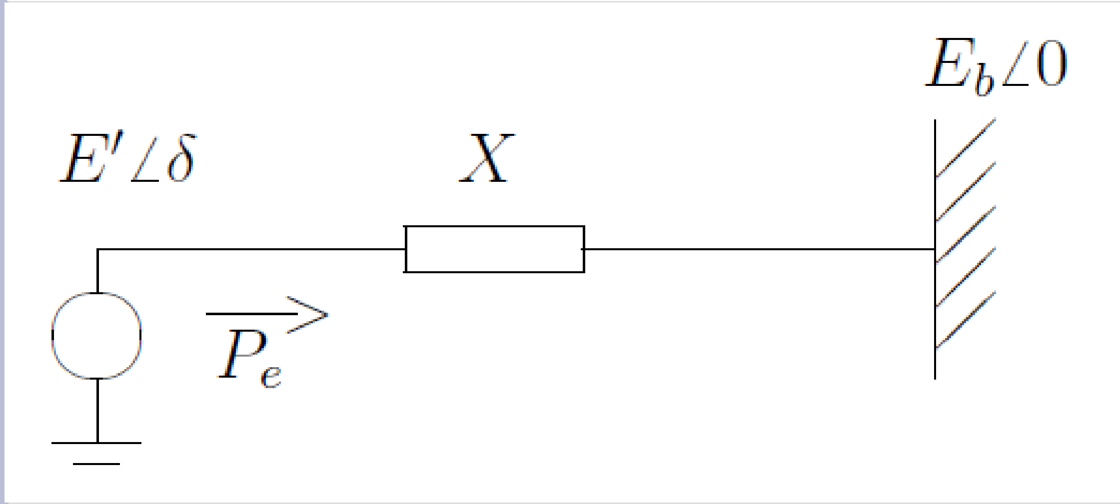
El más particular de los escenarios...

… y el más general.

Estabilidad transitoria

Ejemplo máquina-bus infinito





- Modelo fem cte. de máquina síncrona;
- Resistencias despreciadas;
- δ: ángulo entre fasor de fem E' y E_b .

$$\boxed{P_e = \frac{E' E_b}{X} sen\delta = P_{mx} sen\delta}$$

Ecuación de swing:

$$\frac{2H}{\omega_0}\frac{d\omega}{dt} + \frac{K_D}{\omega_0}\omega = P_m - P_{mx} sen\delta$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega$$

donde

- P_m: potencia mecánica, pu,
- P_{mx}: máxima potencia eléctrica de salida, pu,
- H: constante de inercia, MWs/MVA,
- δ: ángulo del rotor, r.e.,
- $\omega = \omega_r - \omega_0$: velocidad relativa del rotor, r.e./s,
- ω_0: vel. nominal, r.e./s (frec. angular nominal, r/s),
- K_D: factor de amortiguación, torque pu/ vel. pu,
- t: tiempo, s,

Tres ángulos de análisis:

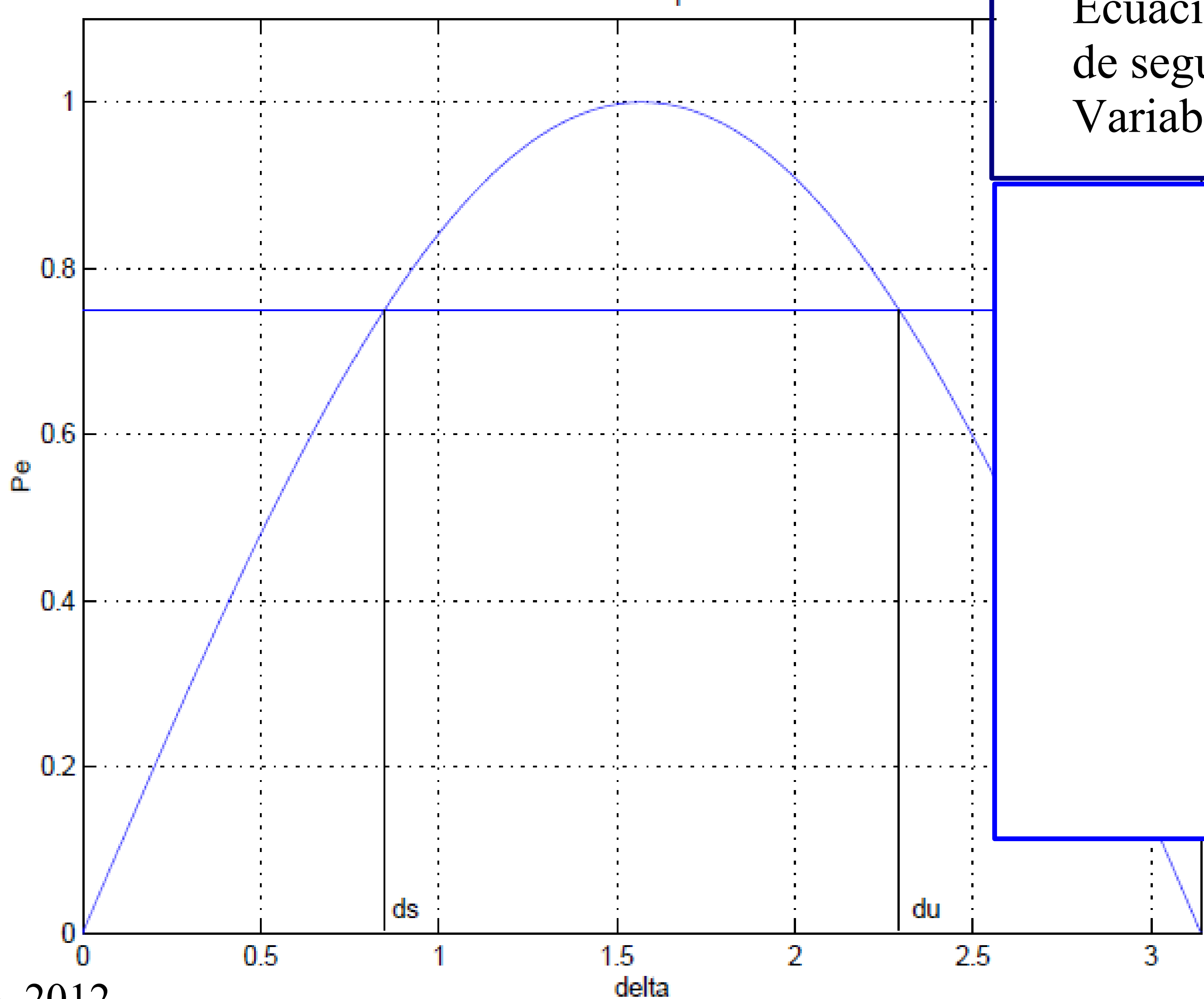
- **Análisis cualitativo de la respuesta temporal;**
- **Análisis en pequeña señal;**
- **Análisis mediante funciones de energía. Criterio de Igual Área.**

Análisis cualitativo de la respuesta temporal

Puntos de equilibrio

$$P_{mx} sen\delta = P_m$$

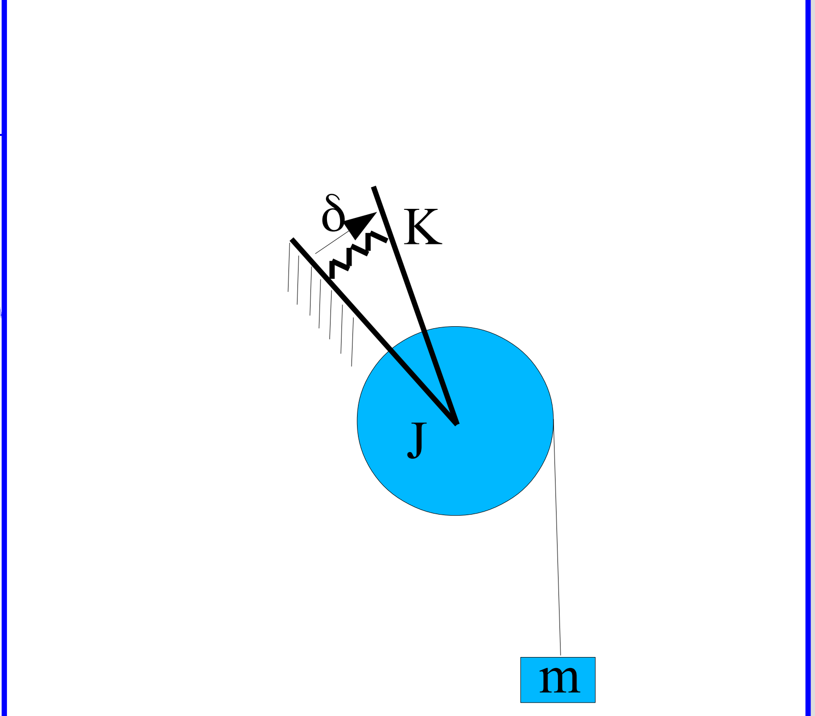
$$\omega = 0$$



$$\frac{2H}{\omega_0}\frac{d\omega}{dt} + \frac{K_D}{\omega_0}\omega = P_m - P_{mx} sen\delta$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega$$

Ecuación diferencial no lineal de segundo orden.
Variables de estado δ, ω

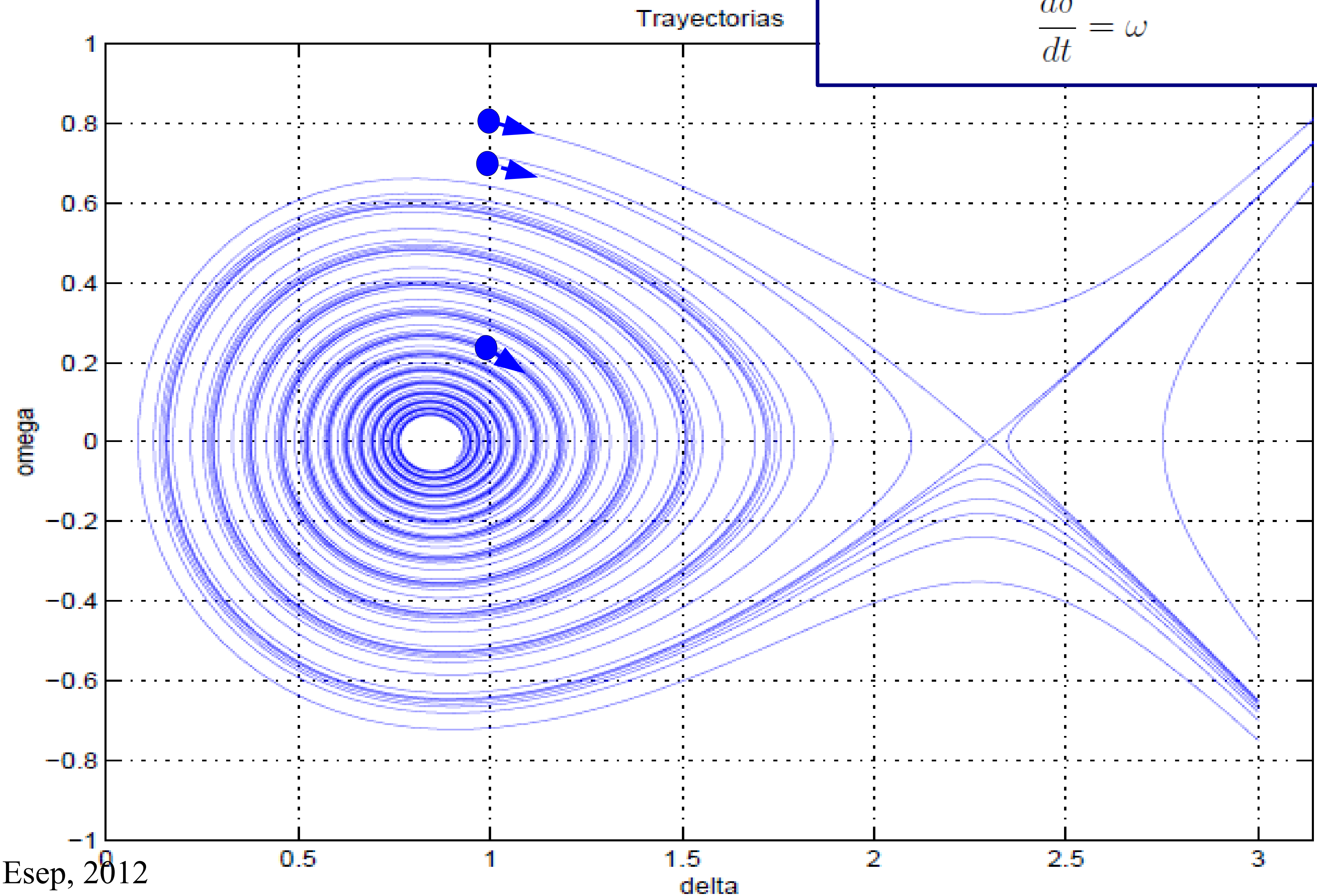


Análisis cualitativo de la respuesta temporal

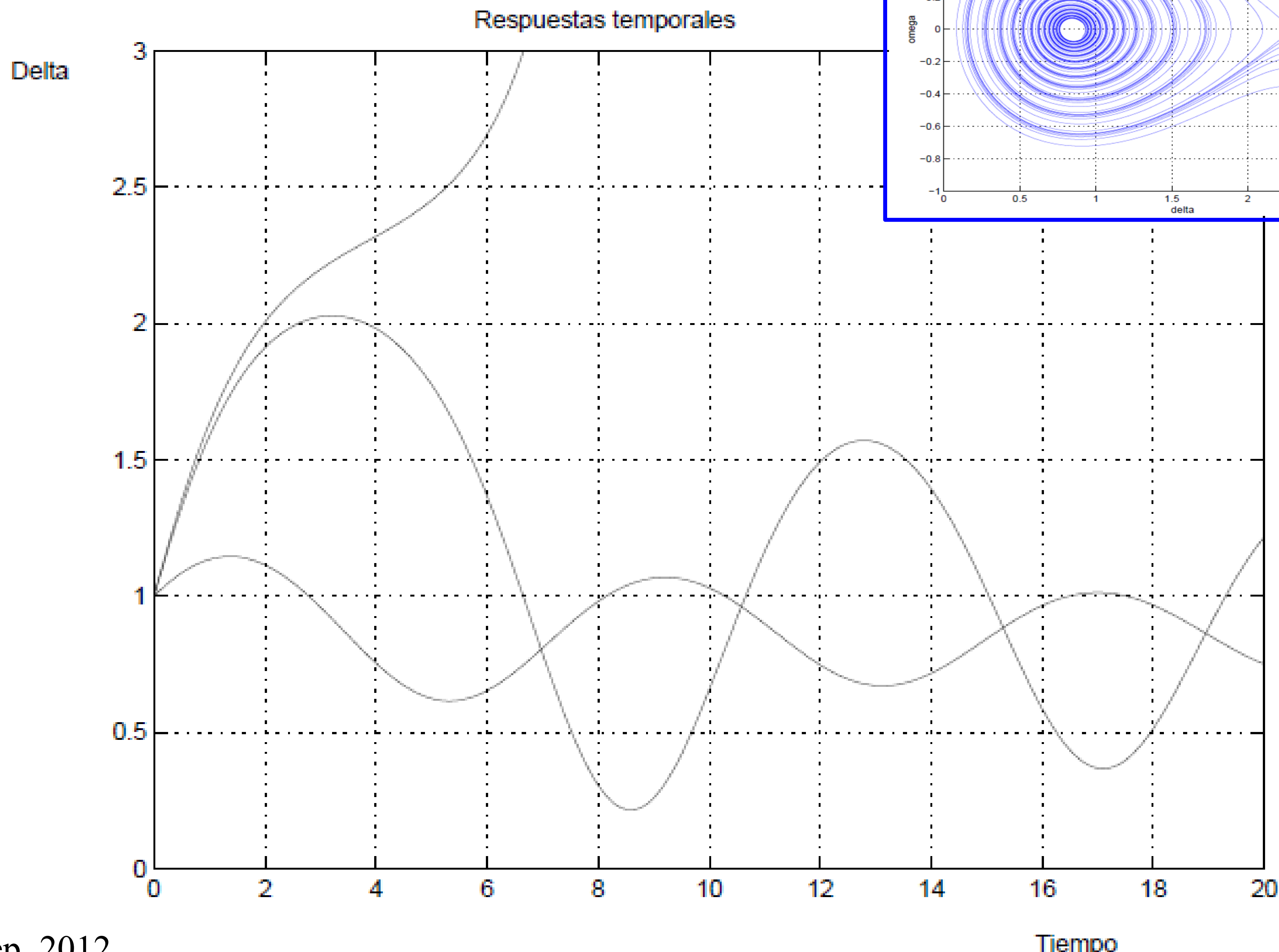
$$\frac{2H}{\omega_0}\frac{d\omega}{dt} + \frac{K_D}{\omega_0}\omega = P_m - P_{mx} sen\delta$$

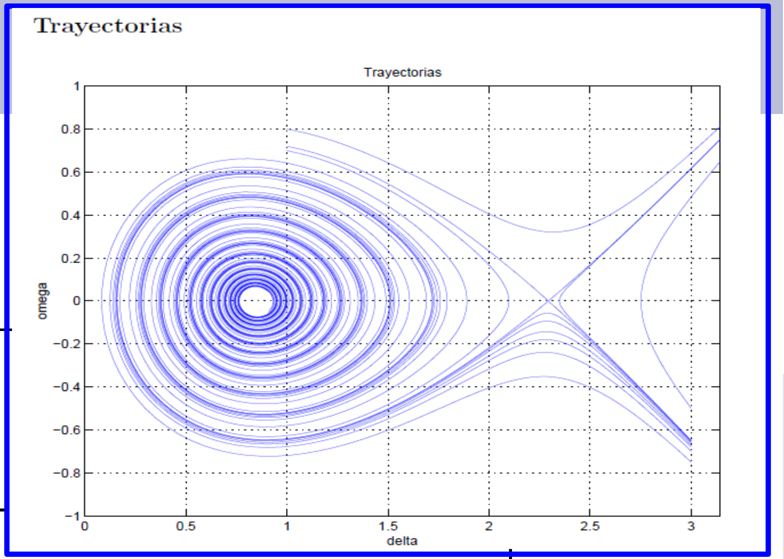
$$\frac{d\delta}{dt} = \omega$$

Trayectorias

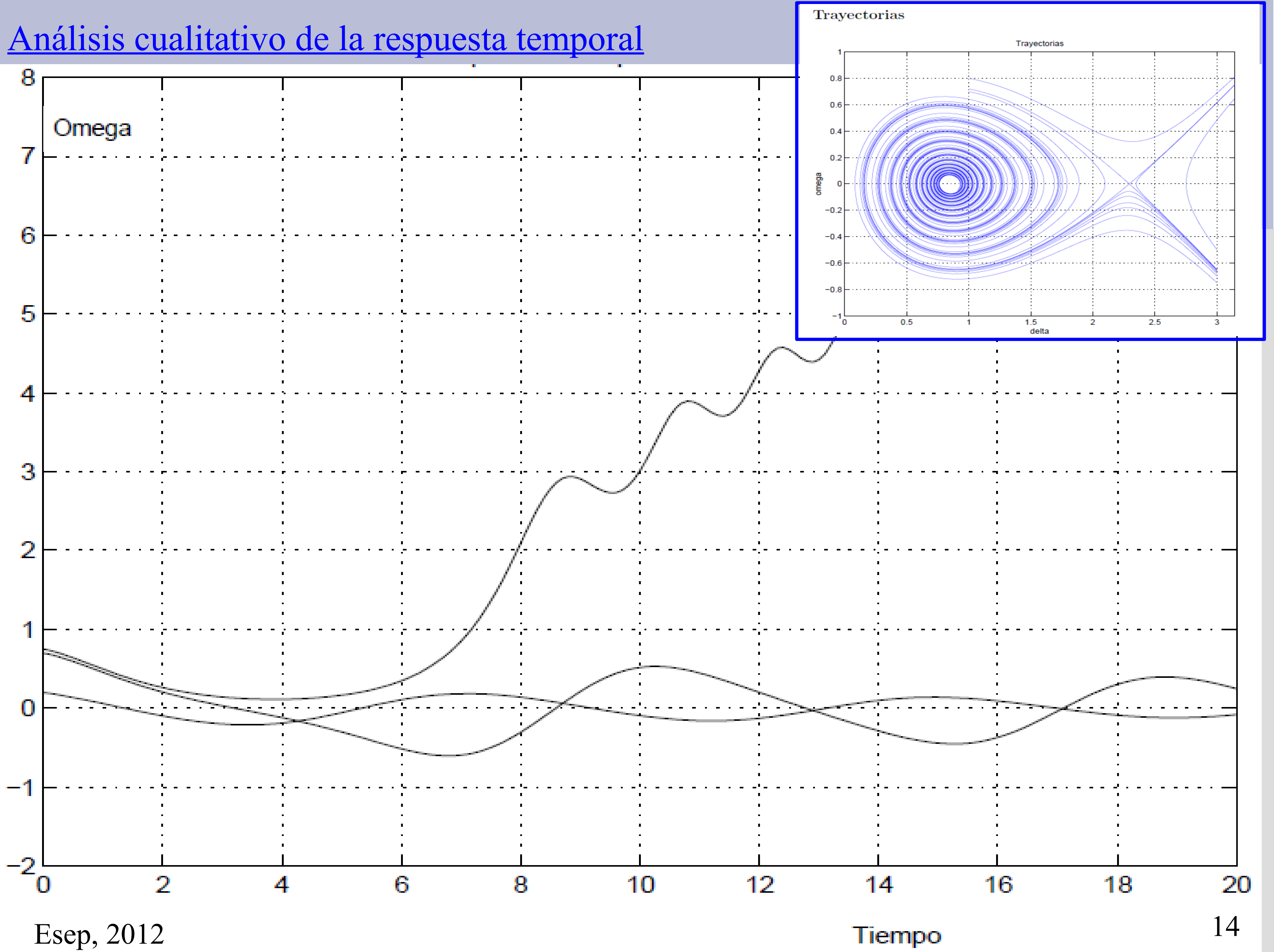


Respuestas temporales. Ángulo





Análisis cualitativo de la respuesta temporal

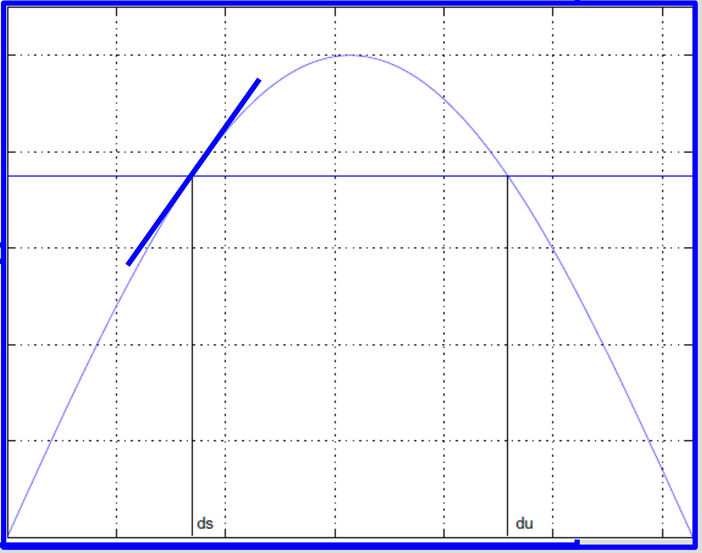


Análisis en pequeña señal

$$\frac{2H}{\omega_0}\frac{d^2\delta}{dt^2}+\frac{K_D}{\omega_0}\frac{d\delta}{dt}=P_m-P_e(\delta)$$

Modelo en pequeña señal en torno del punto de equilibrio δ_s

$$\frac{2H}{\omega_0}\frac{d^2\delta}{dt^2}+\frac{K_D}{\omega_0}\frac{d\delta}{dt}+\left.\frac{dP_e}{d\delta}\right|_{\delta_s}\delta=0$$



Par sincronizante

$$K_S(\delta_s):=\left.\frac{dP_e}{d\delta}\right|_{\delta_s}$$

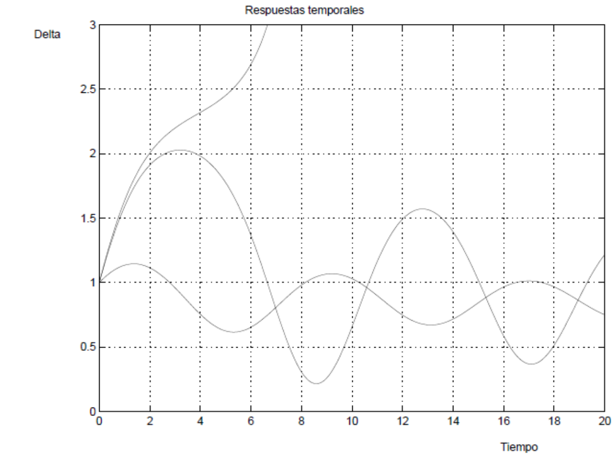
Resulta

$$\frac{2H}{\omega_0}\frac{d^2\delta}{dt^2}+\frac{K_D}{\omega_0}\frac{d\delta}{dt}+K_S\delta=0$$

Análisis en pequeña señal

$$\frac{2H}{\omega_0}\frac{d^2\delta}{dt^2} + \frac{K_D}{\omega_0}\frac{d\delta}{dt} + K_S\delta = 0$$

Respuestas temporales. Ángulo



Las respuestas son del tipo

$$\delta = A\exp^{-\zeta\omega_n t} cos(\omega_d t + \phi)$$

$$\zeta := \frac{K_D}{\sqrt{8K_S H\omega_0}}$$

$$\omega_n^2 := \frac{K_S\,\omega_0}{2H}$$

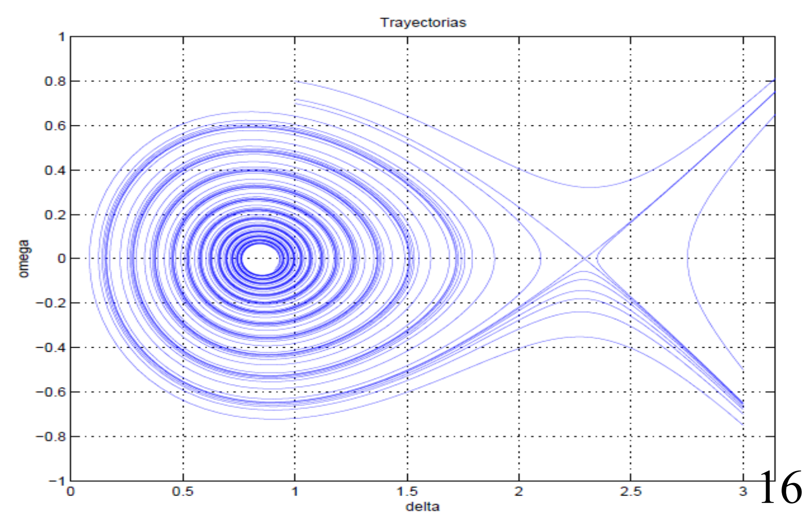
$$\omega_d := \omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$$

El período de la oscilación es

$$T = \frac{2\pi}{\omega_d} \approx \frac{2\pi}{\omega_n} = \frac{2\pi}{\sqrt{K_S}}\sqrt{\frac{2H}{\omega_0}}$$

Efecto de la inercia

Trayectorias



No perder de vista el alcance de este análisis!

Análisis mediante la función de energía

$$\frac{2H}{\omega_0}\frac{d\omega}{dt} + \frac{K_D}{\omega_0}\omega = P_m - P_e = P_m - P_{mx} sen\delta$$

$$\frac{2H}{\omega_0}\frac{d\omega}{dt}\omega + \frac{K_D}{\omega_0}\omega^2 = P_m\omega - P_e\omega = P_m\frac{d\delta}{dt} - P_{mx} sen\delta\frac{d\delta}{dt}$$

$$\frac{2H}{\omega_0}\frac{d\omega}{dt}\omega - P_m\frac{d\delta}{dt} + P_{mx} sen\delta\frac{d\delta}{dt} = -\frac{K_D}{\omega_0}\omega^2$$

Entonces

$$\frac{dV(\delta,\omega)}{dt} = -\frac{K_D}{\omega_0}\omega^2 \leq 0 \; \forall(\delta,\omega)$$

con $\quad V(\delta,\omega) = \frac{H}{\omega_0}\omega^2 - P_m(\delta - \delta_s) - P_{mx}(cos\delta - cos\delta_s)$

$V(\delta, \omega)$ es la función de energía para este sistema.

Análisis mediante la función de energía

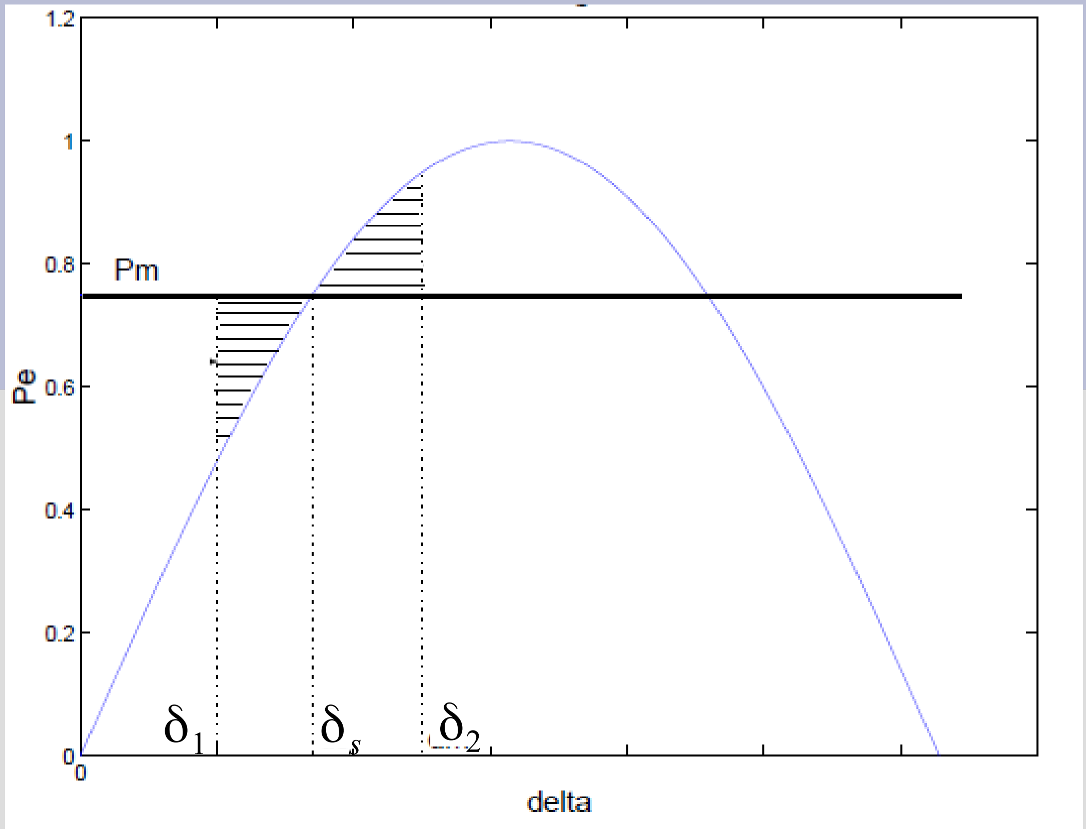
Podemos definir la función de energía de una forma un poco más general y tratando de reconocer términos clásicos de la Mecánica:

$$V(\delta,\omega) = E_c(\omega) + U(\delta) = \frac{H}{\omega_0}\omega^2 - \int_{\delta_s}^{\delta}(P_m - P_e)d\delta =$$
$$\frac{H}{\omega_0}\omega^2 - P_m(\delta - \delta_s) - P_{mx}(cos\delta - cos\delta_s)$$

Energía cinética ligada a la inercia y a la velocidad del rotor; energía potencial dependiendo únicamente de la posición.

$$\frac{dV(\delta,\omega)}{dt} = -\frac{K_D}{\omega_0}\omega^2 \leq 0 \; \forall(\delta,\omega)$$

$$\frac{dV(\delta,\omega)}{dt} = -\frac{K_D}{\omega_0}\omega^2 \leq 0 \ \forall(\delta,\omega)$$



Supongamos $K_D = 0.$

Entonces $V(\delta,\omega) = cte \ \forall \delta, \omega$

Y, para cualesquiera dos puntos P1y P2 de una trayectoria vale

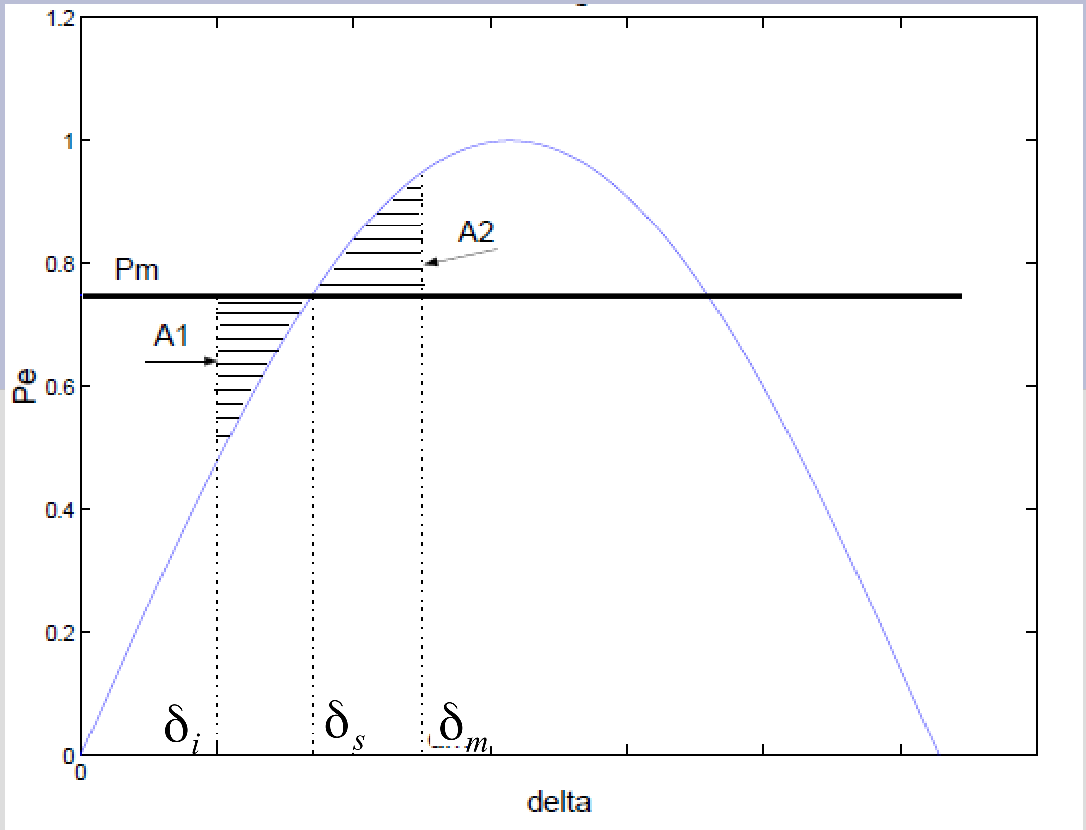
$$V(\delta_{1,}\omega_1) = V(\delta_{2,}\omega_2)$$

$$\rightarrow E_c(\omega)_{\omega_1}^{\omega_2} = -U(\delta)_{\delta_1}^{\delta_2} = \int_{\delta_1}^{\delta_2} P_m - P_e(\delta)\, d\delta$$

Así, el área bajo la curva de transferencia de potencia
es siempre igual al incremento de energía cinética entre los puntos P1 y P2

Vamos a usar esta propiedad para poder acotar el tamaño de los transitorios....

Criterio de Igual Área



Supongamos $K_D = 0$

Y consideremos un transitorio con

$(\delta_i, 0) \rightarrow (\delta_m, 0)$

sin pérdida de sincronismo.

Entonces

$$E_c(\omega)\Big|_{\omega_i}^{\omega_m} = \int_{\delta_i}^{\delta_m} P_m - P_e(\delta)\, d\delta$$

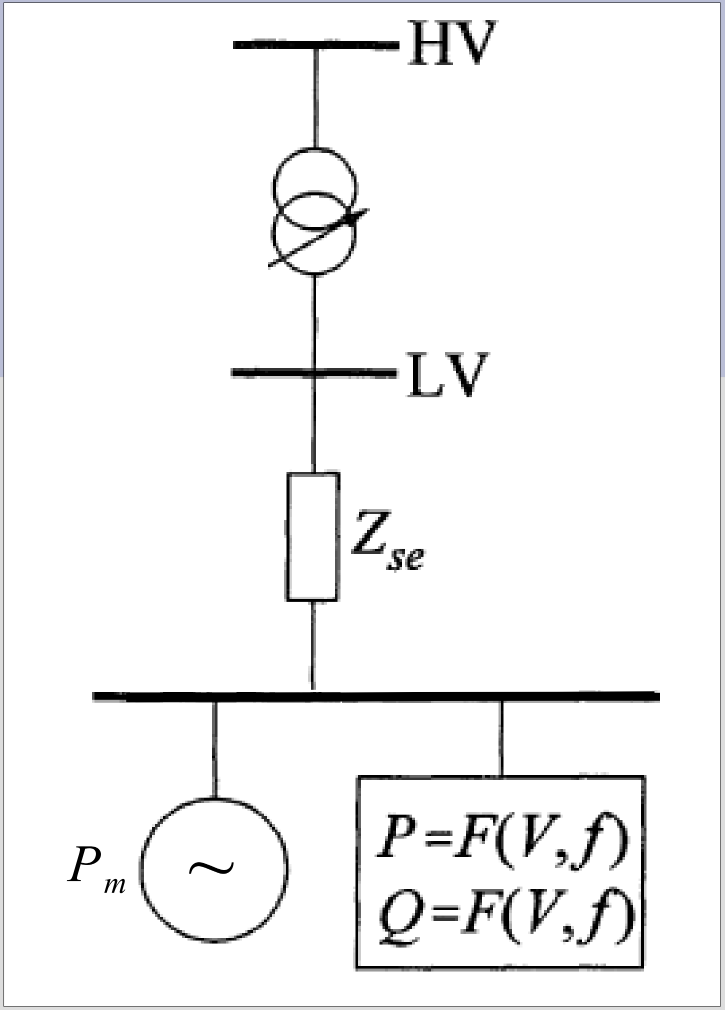
$$\rightarrow E_c(\omega)\Big|_{\omega_i}^{\omega_m} = 0 = \int_{\delta_i}^{\delta_m} P_m - P_e(\delta)\, d\delta = A_1 - A_2$$

Así, los puntos extremos de una oscilación ($\omega_i = 0$) son aquellos que satisfacen

$$A_1 = A_2$$

Caso 1: Cambio repentino de potencia

Red de distribución;
Único generador de potencia modesta (<10MVA);
Flujo de carga standard.

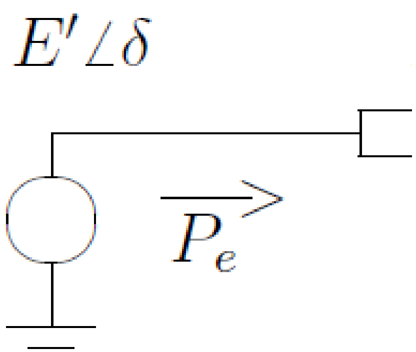


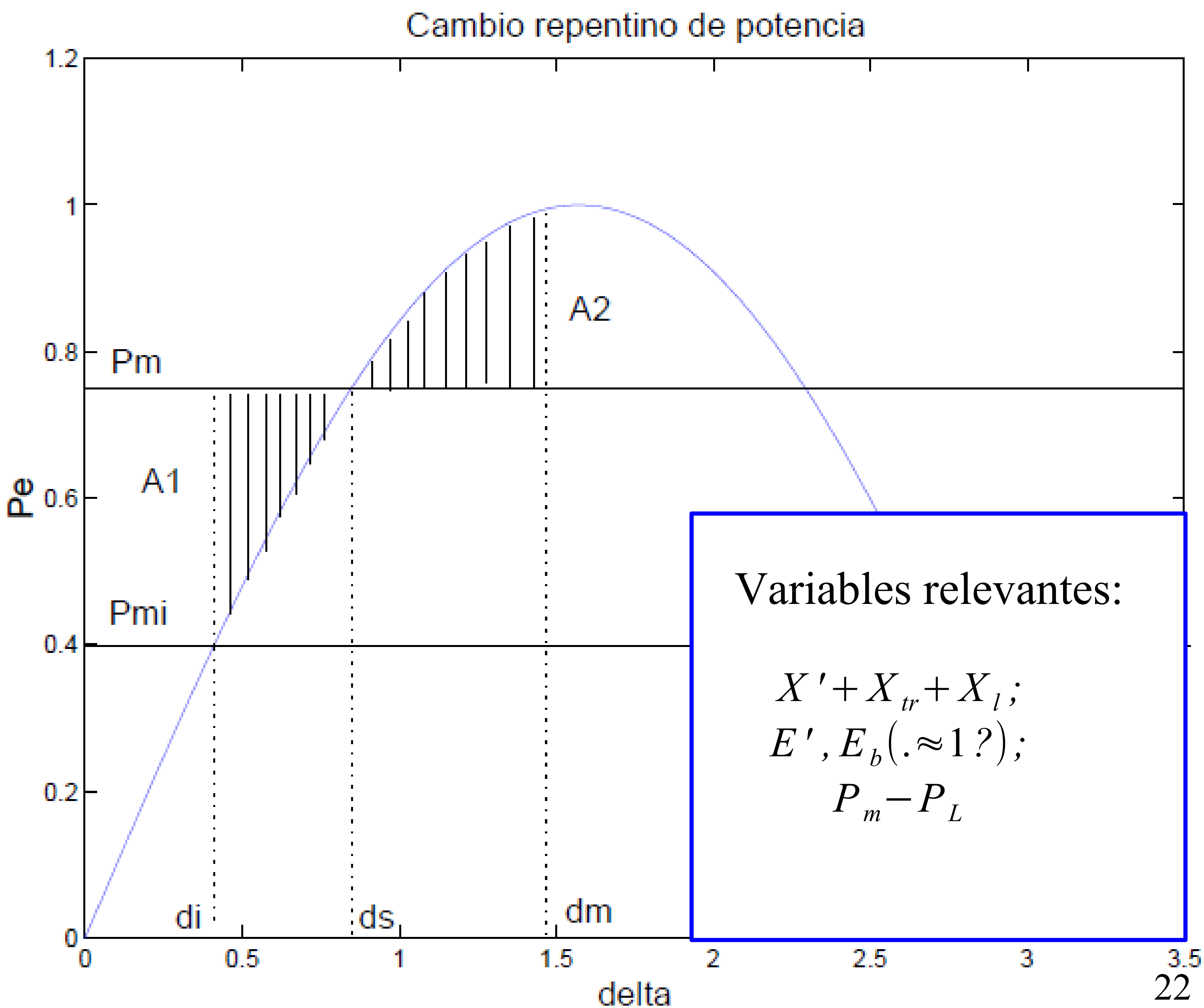
Supongamos que, repentinamente,
P_m aumenta de P_{mi} a P_m .

Luego de un transitorio, el generador pierde el paso y sale de servicio.

?

Caso 1: Cambio repentino de potencia





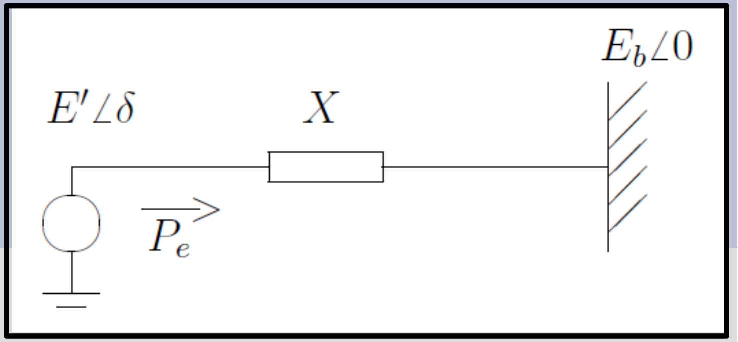
Variables relevantes:

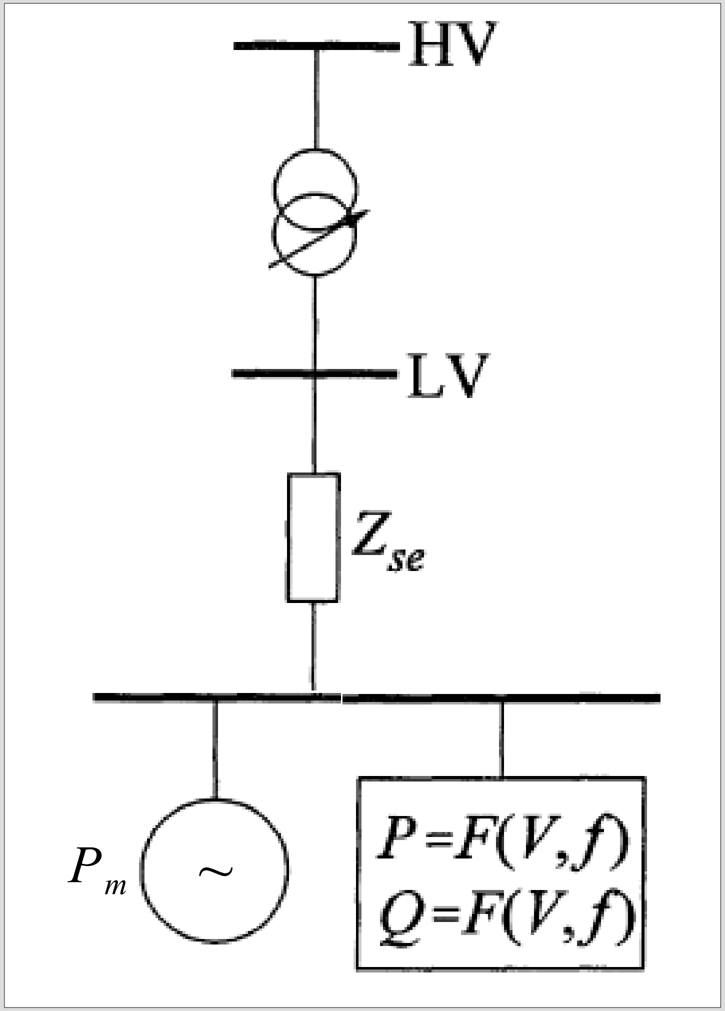
$$X' + X_{tr} + X_l;$$
$$E', E_b(. \approx 1?);$$
$$P_m - P_L$$

Caso 1: Cambio repentino de potencia

Discusión:

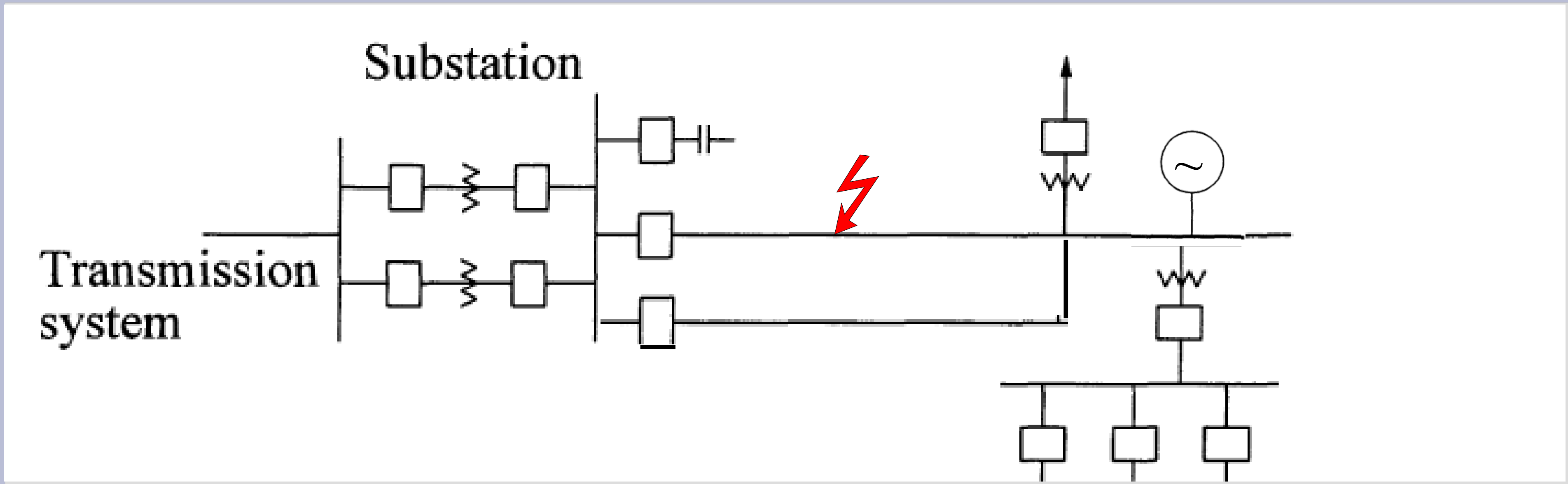
- Cómo influye cada parámetro: Pm, X, E, H?
- Qué elementos de un modelo más realista del sistema de distribución dejamos de lado?
- Cómo influyen?





Caso 2: Cortocircuito

Tenemos el sistema

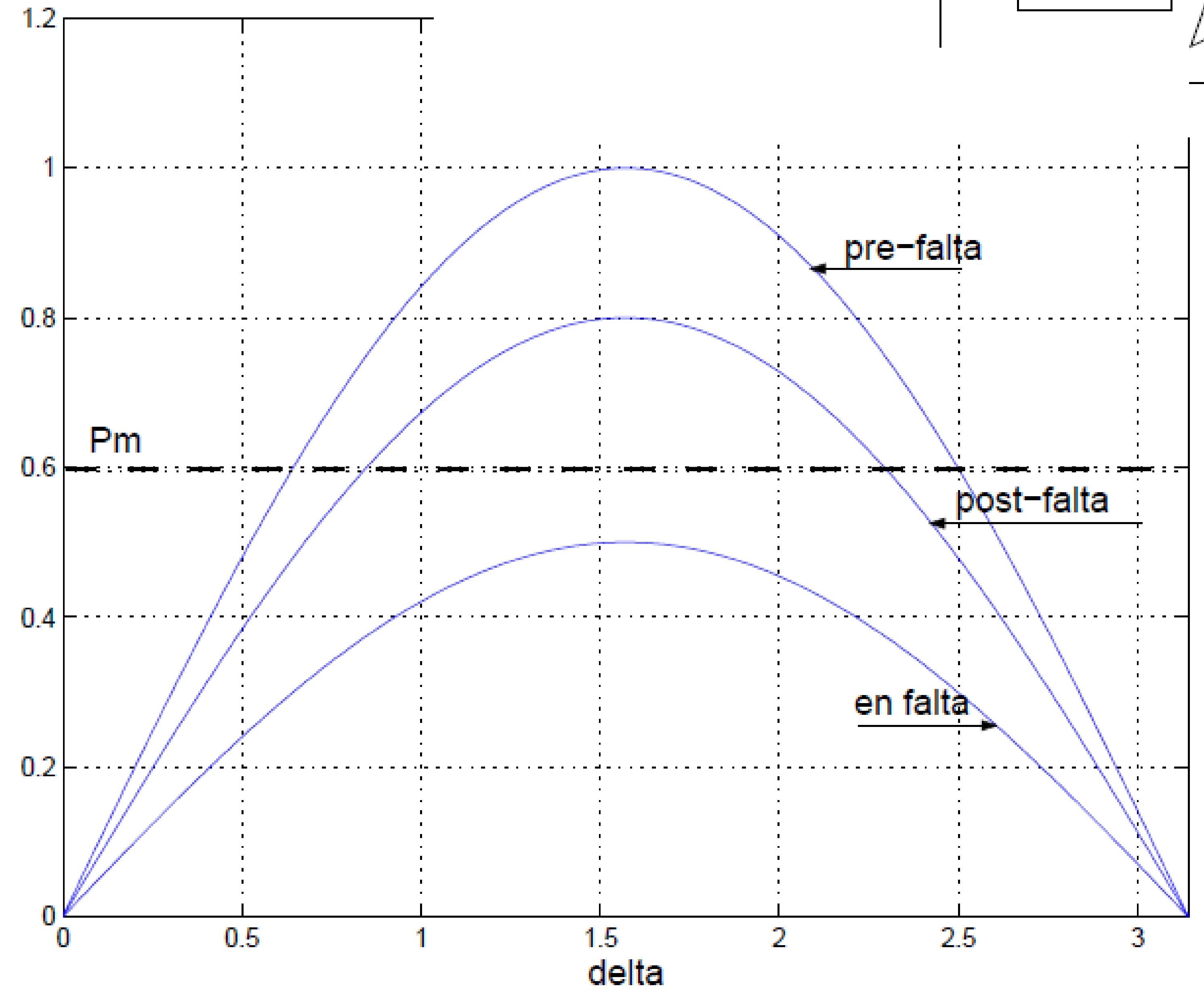


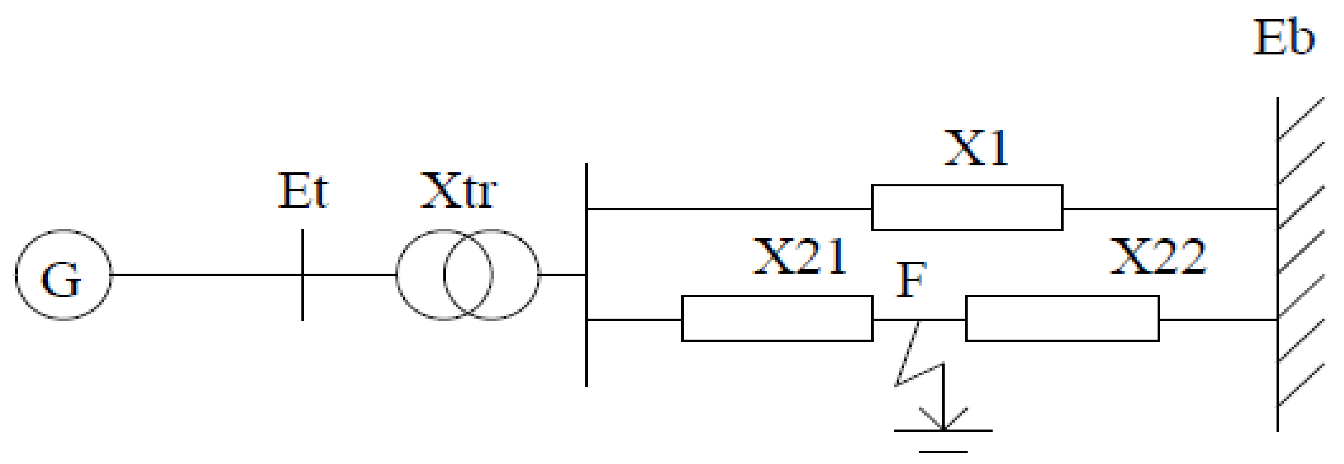
Se incorpora un generador...

Hay un corto en una línea...

El tiempo de despeje asegura la estabilidad transitoria?

Caso 2: cortocircuito



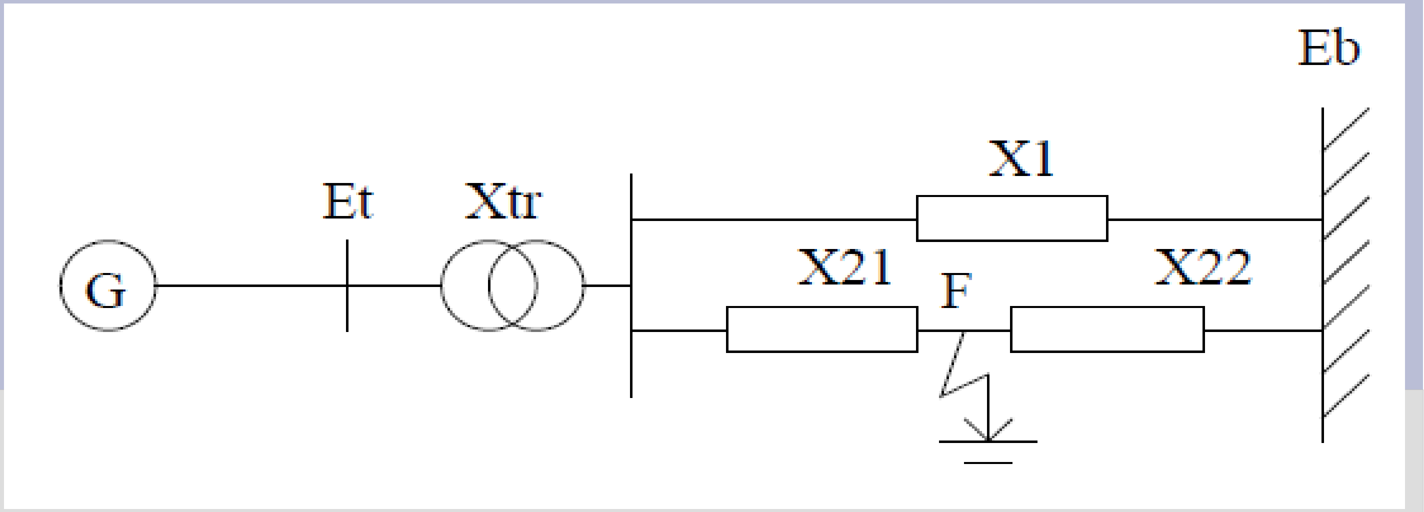


Caso 2: Cortocircuito

Variables relevantes:

$$X', X_{tr}, X_{li};$$
$$E', E_b(.\approx 1?);$$
$$P_m, H$$

Caso 2: cortocircuito



Discusión:

• Cómo influye tc, AVR?