



EM 737

INTRODUCCION A LA TEORIA DE ESTABILIDAD EN SISTEMAS DE POTENCIA

LUIS S. VARGAS
Area de Energía
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Universidad de Chile



INDICE

- **Introducción general al estudio de estabilidad en sistemas dinámicos**
- **Conceptos básicos: Planta, entrada, estado, salida, perturbaciones**
- **Teoría de estabilidad**



Historia

Fecha	Sistema/ Lugar	Tiempo de du- ración	Evento iniciador	Acción reversa OLTC	Salida de Líneas	Salida de Gener.	Pérdi-da de carga
08/22/87	Western Tennessee	15 seg	Falla prolongada	No	Si	No	Si
07/23/87	Tokyo, Japón	20 min	Incremento de Carga 400 MW/min	No	Si	No	Si
01/12/87	Francia	55 min	Salida de generador(3 unit)	Si	Si	Si	Si
05/20/86	Inglaterra	5 min	Pérdida de 6 líneas de 400 kV	No	No	No	No
05/17/85	Florida	1 min	Pérdida de 3 líneas de 500 kV	No	Si	Si	Si
12/27/83	Suecia	50 seg	Pérdida de una SS/EE de 400 kV	Si	Si	Si	Si
12/28/82	Florida	3 min	Salida de Generador	No	Si	Si	Si
07/ -/79	British Columbia	2 min	Rechazo de carga (100 MW)	No	Si	Si	No
12/19/78	Francia	27 min	Incremento de carga 77 MW/min	Si	Si	Si	Si



INCIDENTES SISTEMAS SIC y SING (lista no exhaustiva)

FECHA	SISTEMA	DESCRIPCION	PRINCIPALES EVENTOS
05-04-95	SIC	Falla sistema 154 kV S/E Itahue. Salida de casi totalidad generadores	<ul style="list-style-type: none"> Salida Sistema 154 kV Oscilación de frecuencia Bajas de tensión (80%) Salida líneas troncales
01-05-97	SIC (total) 1:49 minutos	<ul style="list-style-type: none"> Falla Sistema 154 kV Perdida casi total de consumos <p>COLAPSO DE TENSION</p>	<ul style="list-style-type: none"> Salida sistema 154 kV Itahue Pehuenche copa capacidad reactiva Apertura sistema 500 kV
13-10-97	SIC Parcial (1 hora)	Falla en líneas de 220 kV Colbun-Maipo e inestabilidad de tensión en proceso de recuperación del sistema	<ul style="list-style-type: none"> Salida línea 220 kV Colbun -Maipo (tormenta eléctrica) Disminución de tensión en proceso de recuperación Inestabilidad de tensión
13-11-97	Region Metropolitana (36 min)	Desconexión intempestiva línea 220 Colbun-Maipo	<ul style="list-style-type: none"> Salida línea 220 kV Colbun -Maipo (tormenta eléctrica) Actúan reles de baja frecuencia Perdida de 340 MW de consumos



INCIDENTES SISTEMAS SIC y SING (lista no exhaustiva)

FECHA	SISTEMA	DETONANTE	PRINCIPALES EVENTOS
11-11-98	SIC (parcial todo el sistema)	Falla central San Isidro Deficit de Generacion	<ul style="list-style-type: none"> Falla <i>propia de la puesta en marcha de una central nueva</i> Deficit de generacion
12-11-98 (20 dias)	SIC (parcial todo el sistema)	Racionamiento SEQUIA	<ul style="list-style-type: none"> Bajas de voltaje Corte de suministro Fallas en Nehuenco y San Isidro.
30-11-98	SIC (no hubo interrupcion de suministro)	Falla Central Bocamina	<ul style="list-style-type: none"> Salida inesperada 125 MW Fuera de operación una semana
Abril, mayo, junio 99	SIC (total)	Racionamiento SEQUIA	<ul style="list-style-type: none"> Cortes de 1, 2 y 3 horas Nehuenco

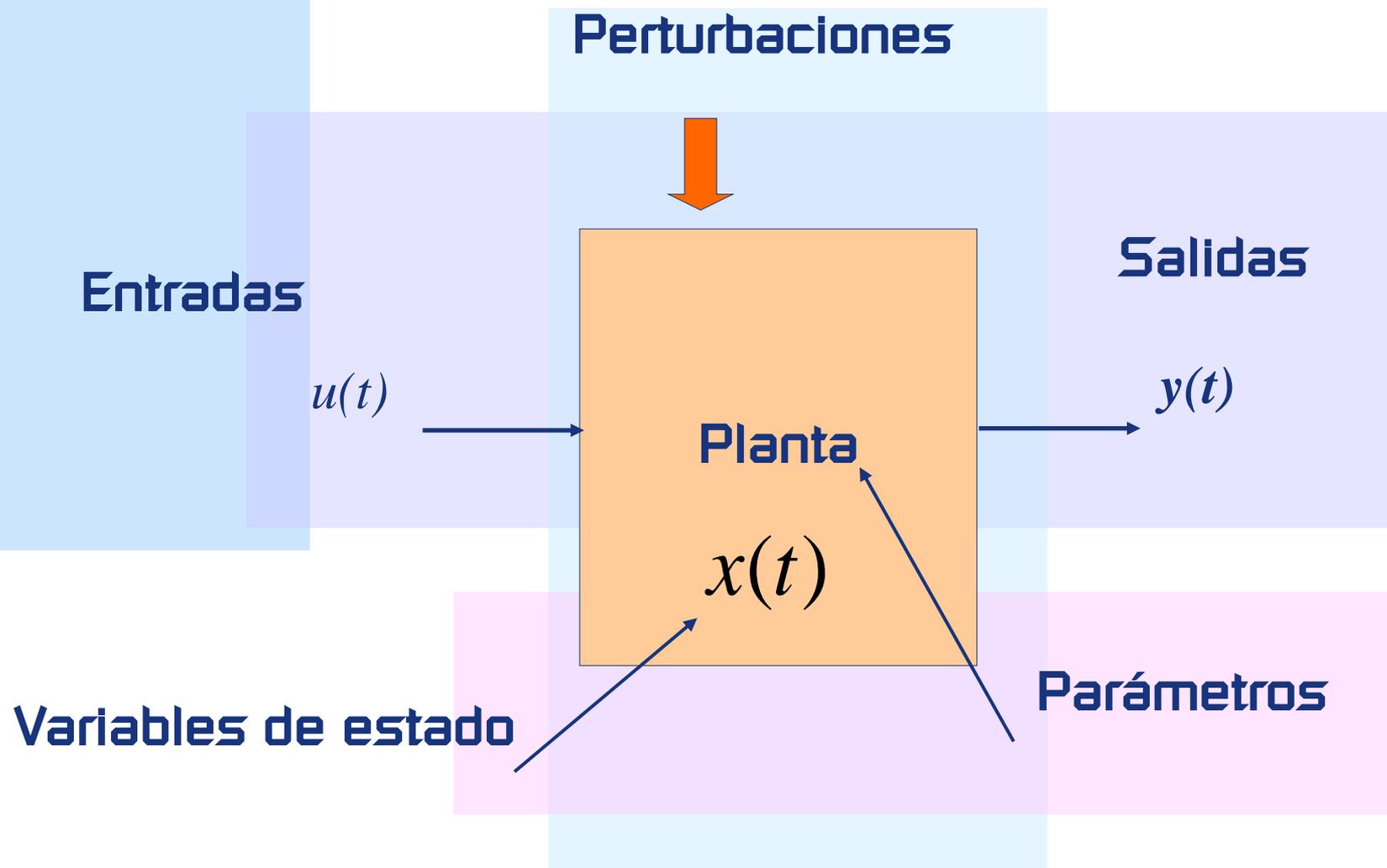


INCIDENTES SISTEMAS SIC y SING (lista no exhaustiva)

FECHA	SISTEMA	DETONANTE	PRINCIPALES EVENTOS
22-06-99	SIC (parcial Stgo.)	Falla central Pangué (6 min)	<ul style="list-style-type: none"> • Apertura líneas • Perdida del 22% carga en Santiago.
14-07-99	SIC (parcial todo el sistema)	Falla Central San Isidro (16 minutos)	<ul style="list-style-type: none"> • Falla compresor de gas • Perdida de 200 MW de Generacion. • Nueva Renca presenta problemas
25-07-99	SING (total)	Falla Central Nopel (duracion indefinida caso Collahuasi 24 hrs.)	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de aire comprimido • Perdida de 370 MW
21-09-99	SING (total)	Falla Central Nopel (duracion aprox. 6 hrs.)	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de control • Problema de Regulacion de frecuencia



Conceptos básicos





Planta en un sistema eléctrico

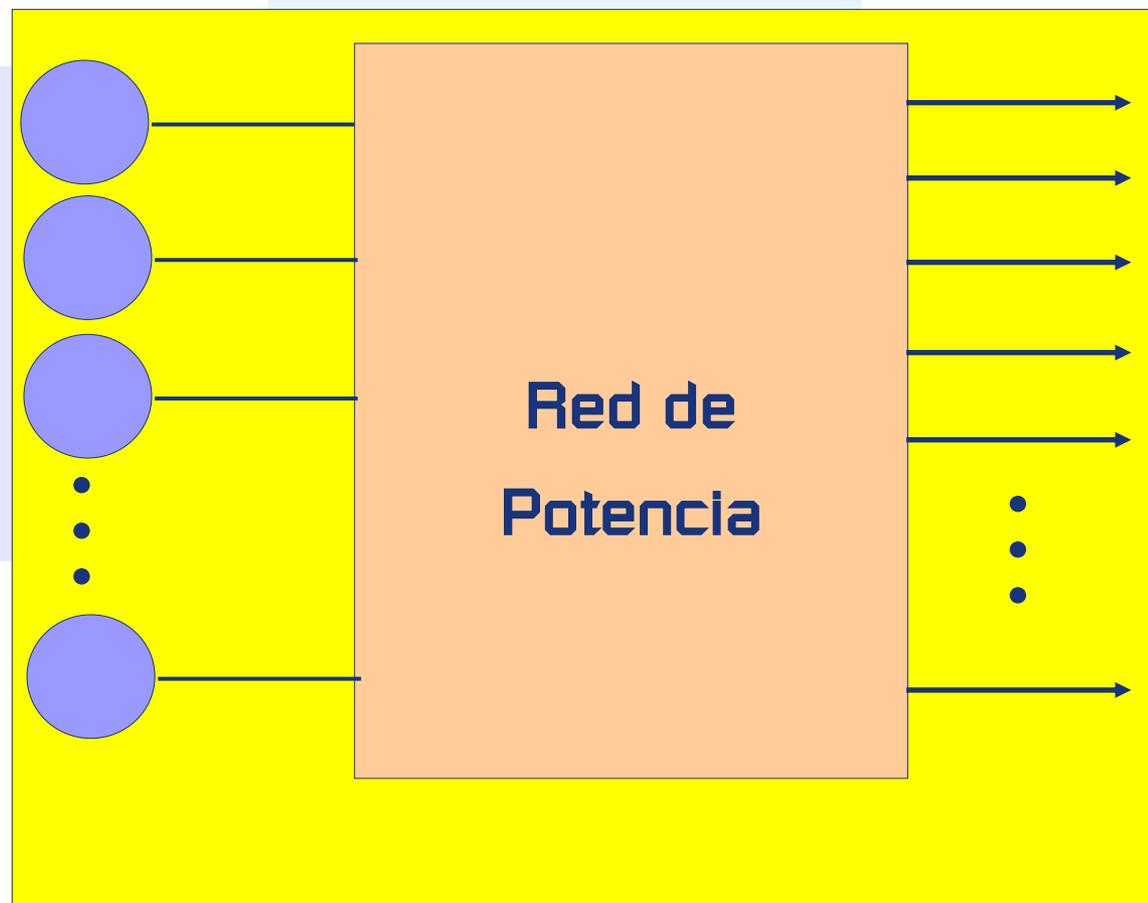
¿Planta?





El estado de un sistema

Planta: Toda la red

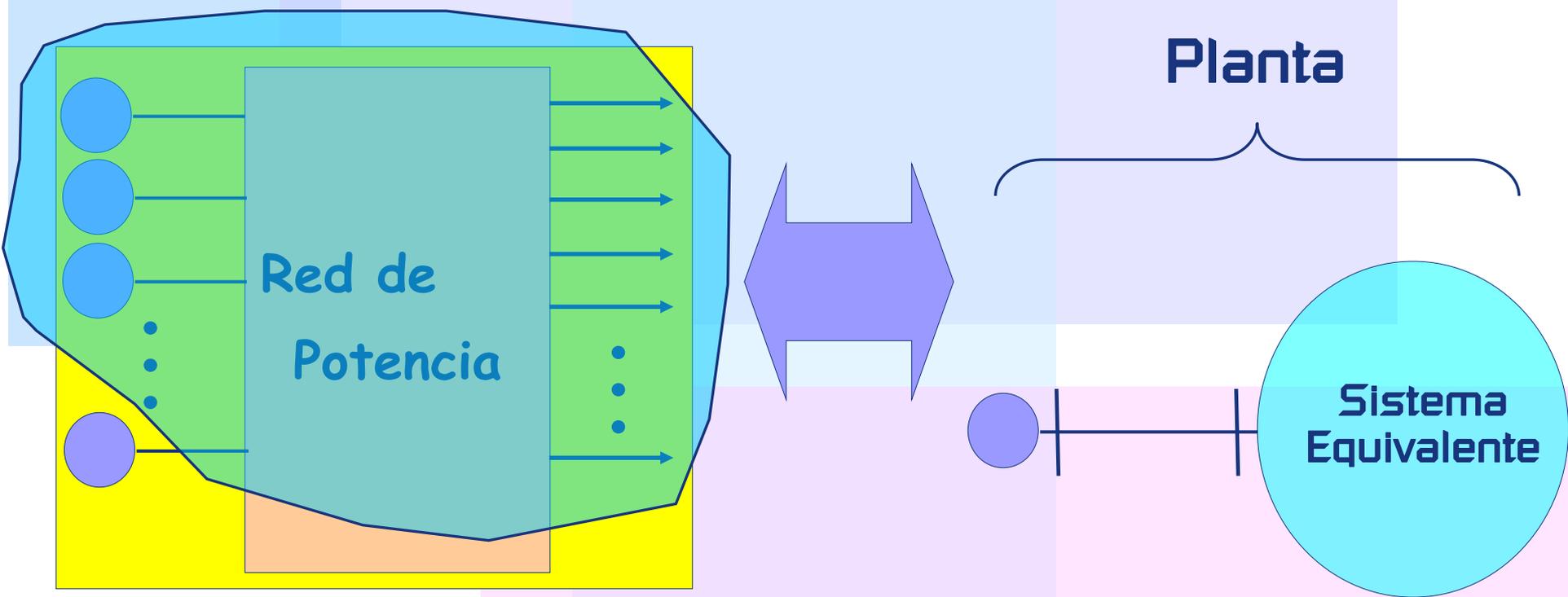


La
mayor
del
mundo!



El estado de un sistema

0 sistemas reducidos de la red

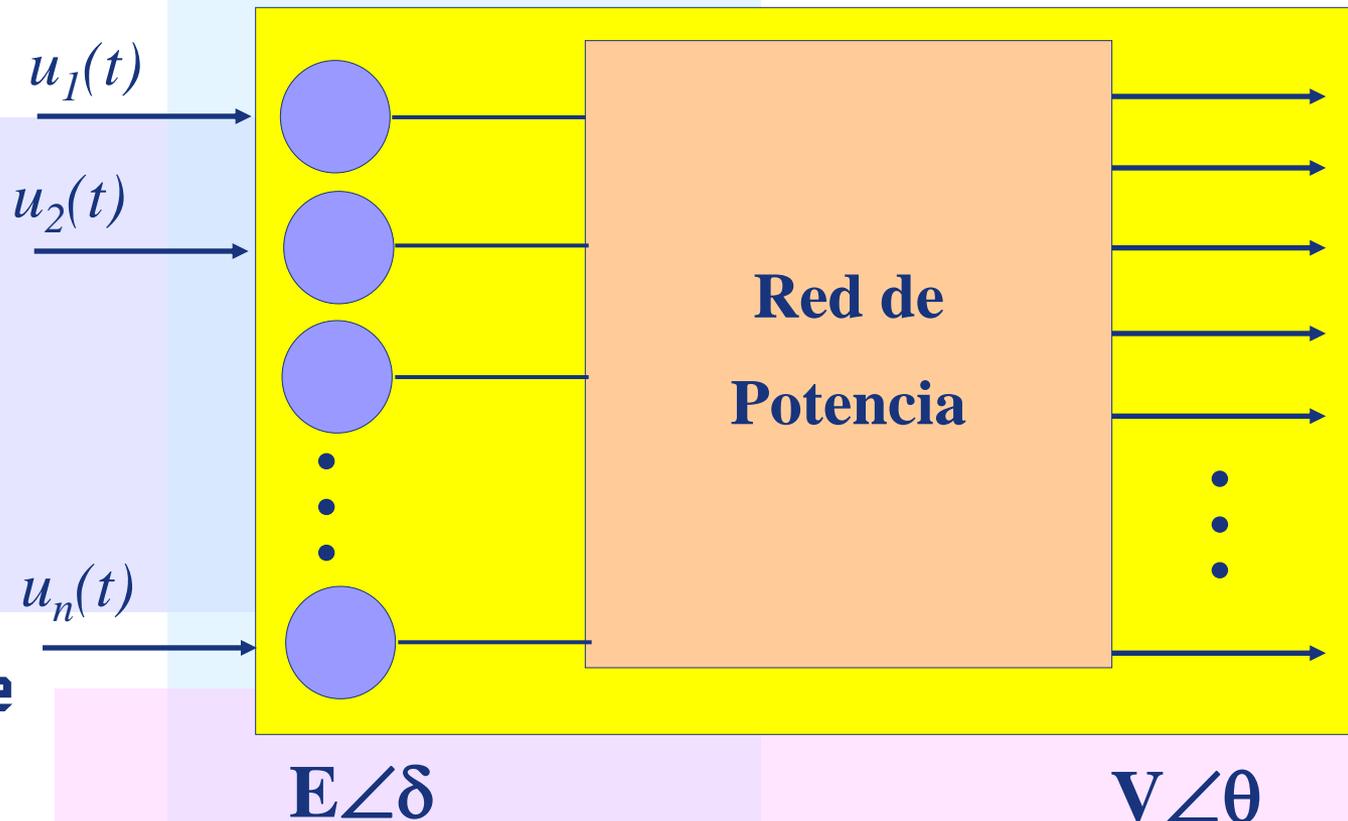




Entradas de un sistema

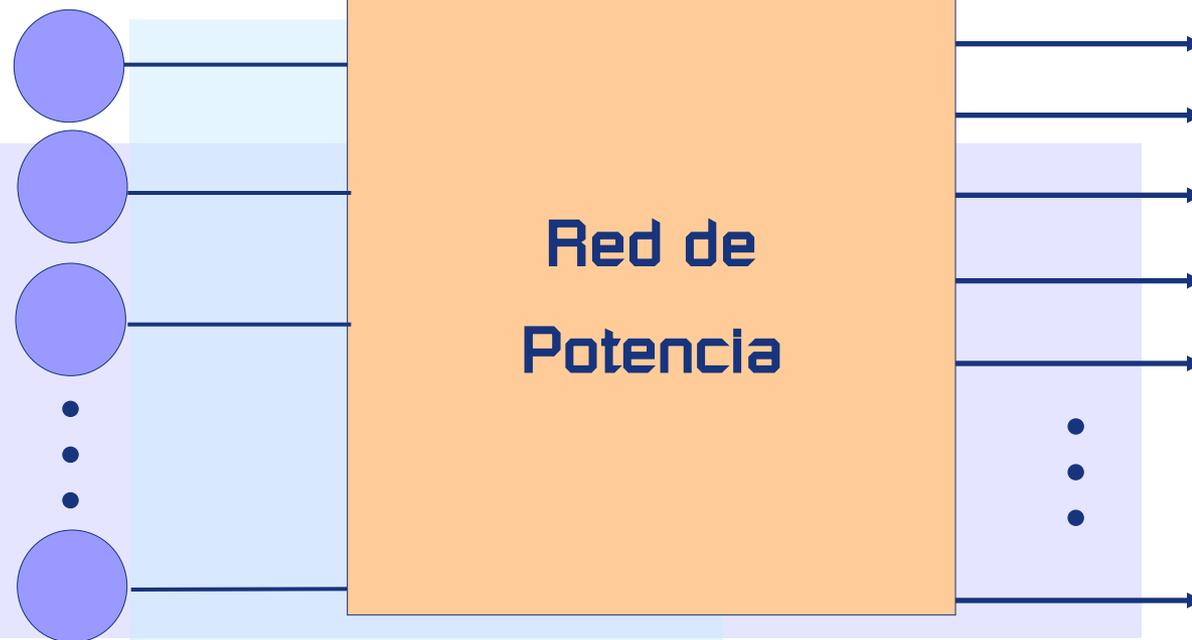
Entradas:

- Potencias mecánicas entregadas por las turbinas,
- Voltaje inducido de los generadores,
- Referencias de los lazos de control, etc





El estado de un sistema



$E \angle \delta$

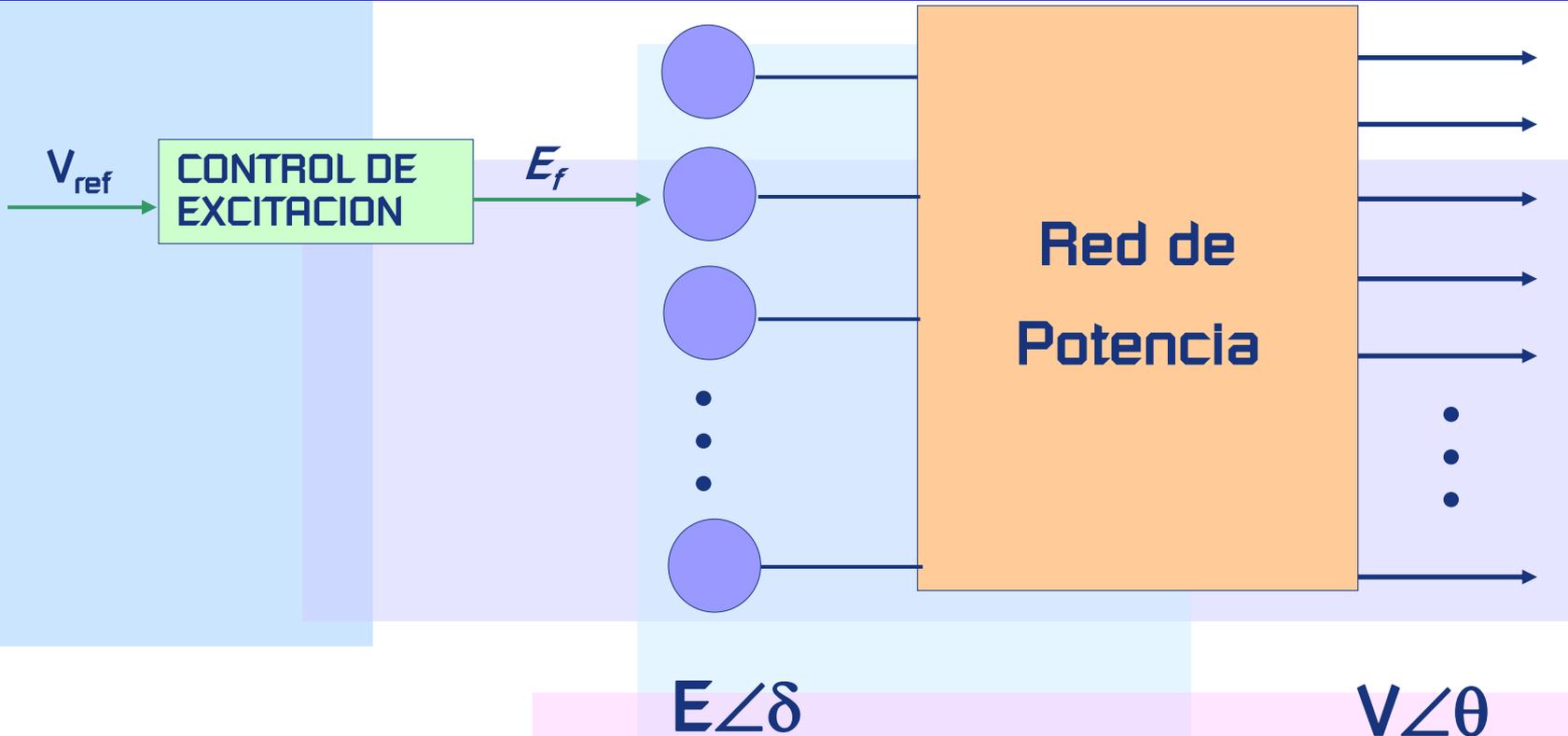
$V \angle \theta$

Variables de estado:

$$x(t) = (E(t), \delta(t), V(t), \theta(t))$$



El estado de un sistema



Variables de estado:

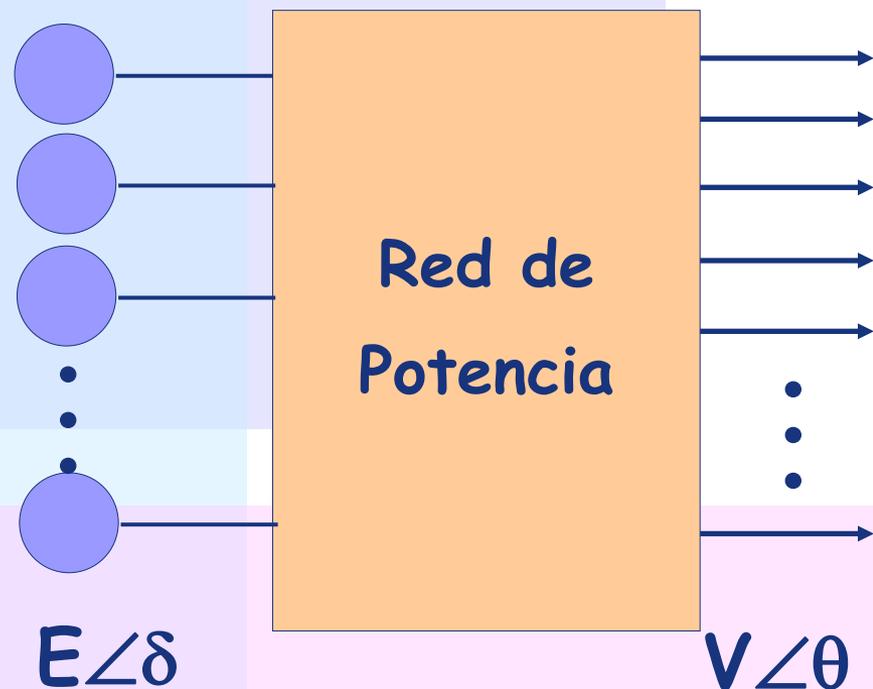
$$x(t) = (E_f(t), E_q(t), E_d(t), \omega(t), \delta(t), V(t), \theta(t))$$



Parámetros del Sistema

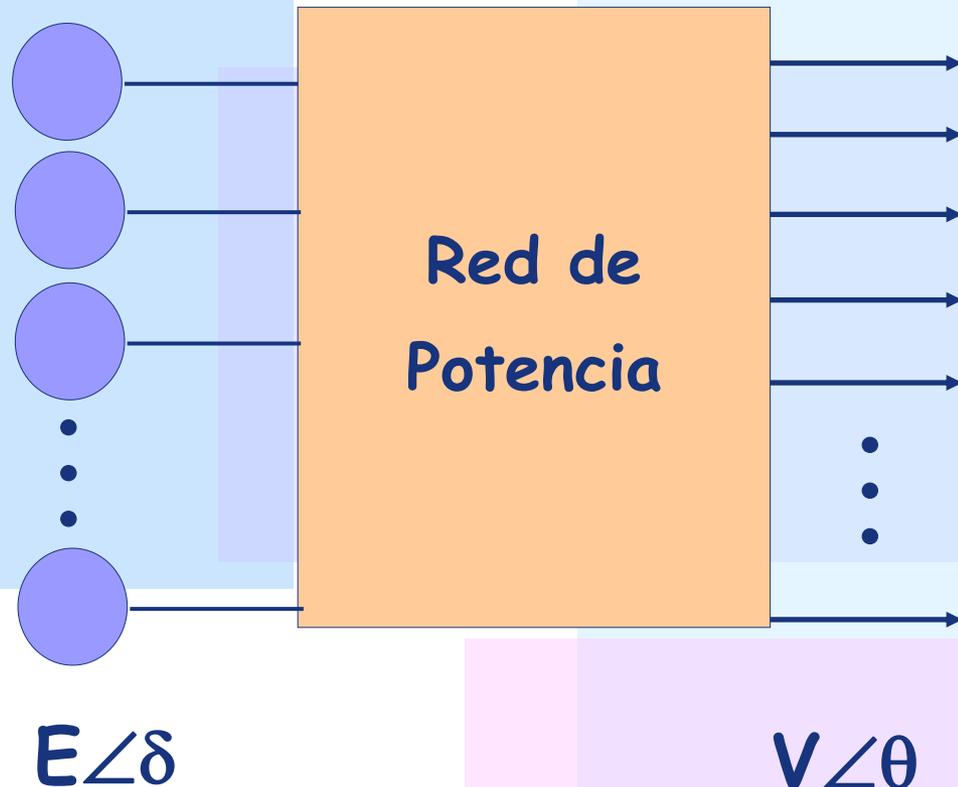
Son los valores que determinan la estructura:

- admitancias de los equipos de la red,
- límites de operación de las máquinas y equipos,
- admitancias permanente, transitoria y subtransitoria de los generadores,
- razón de transformación de los transformadores,
- constantes de tiempo de los reguladores, los retardos de operación de los equipos de control
- **CARGAS!!!!**





Salidas de un sistema

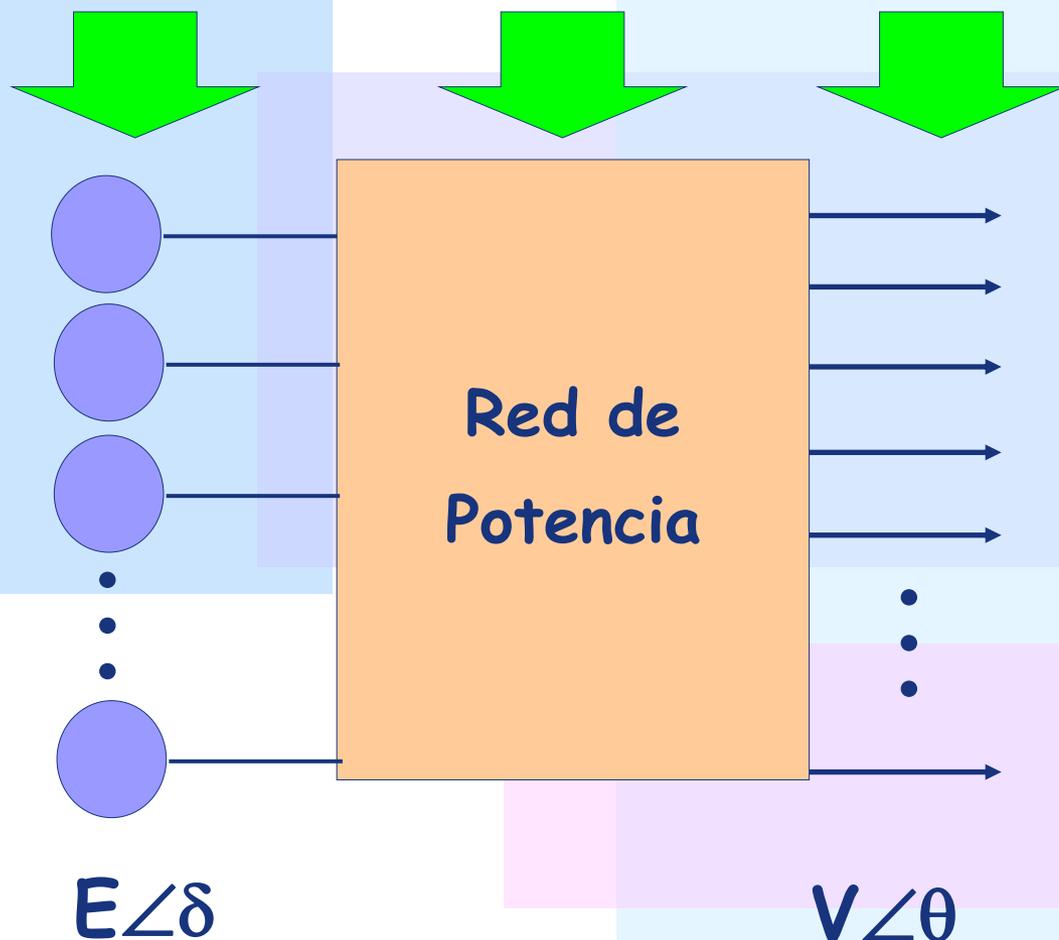


Salidas:

- Flujos,
- Tensiones,
- Potencia reactiva de generación
- Etc.



Perturbaciones de un sistema



Perturbaciones:

- Fallas (cortocircuito, circuito abierto)
- Salida intempestiva de una máquina,
- Rechazo/Aumento brusco de carga
- Etc.



Teoría de estabilidad

Sistema dinámico es aquel sistema que puede ser representado por un conjunto de n ecuaciones diferenciales de primer orden:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x(t), u(t), t) \\ x(t_0) &= x_0\end{aligned}$$

OJO: En sistemas de potencia se asume sistema sin entrada (ya que entradas constantes son tratadas como parámetros)

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x) \\ x(t_0) &= x_0\end{aligned}$$



Teoría de estabilidad

$$\dot{x}(t) = f(x)$$

$$x(t_0) = x_0$$

Un punto de equilibrio es aquel en que todas las derivadas valen simultáneamente cero:

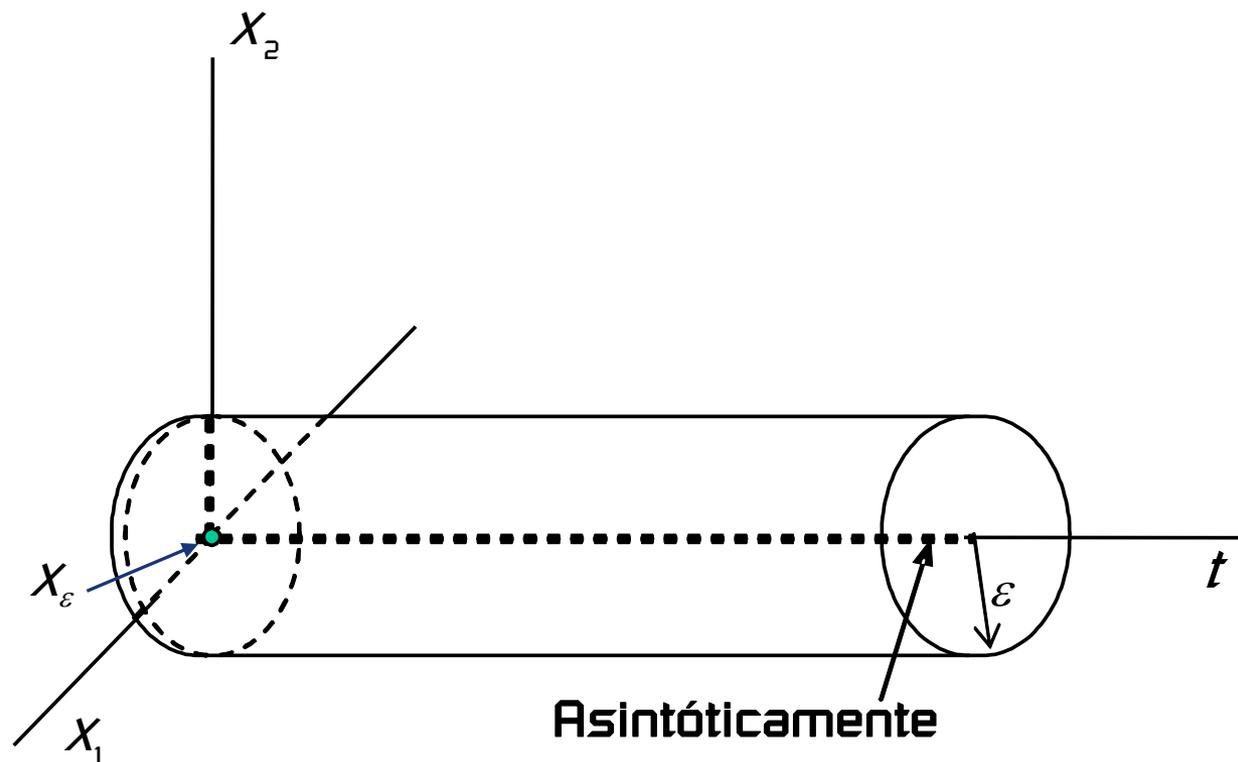
$$f(x_e) = 0$$

Es usual suponer que x_e es el origen

$$0 = f(x = 0)$$



Teoría de estabilidad



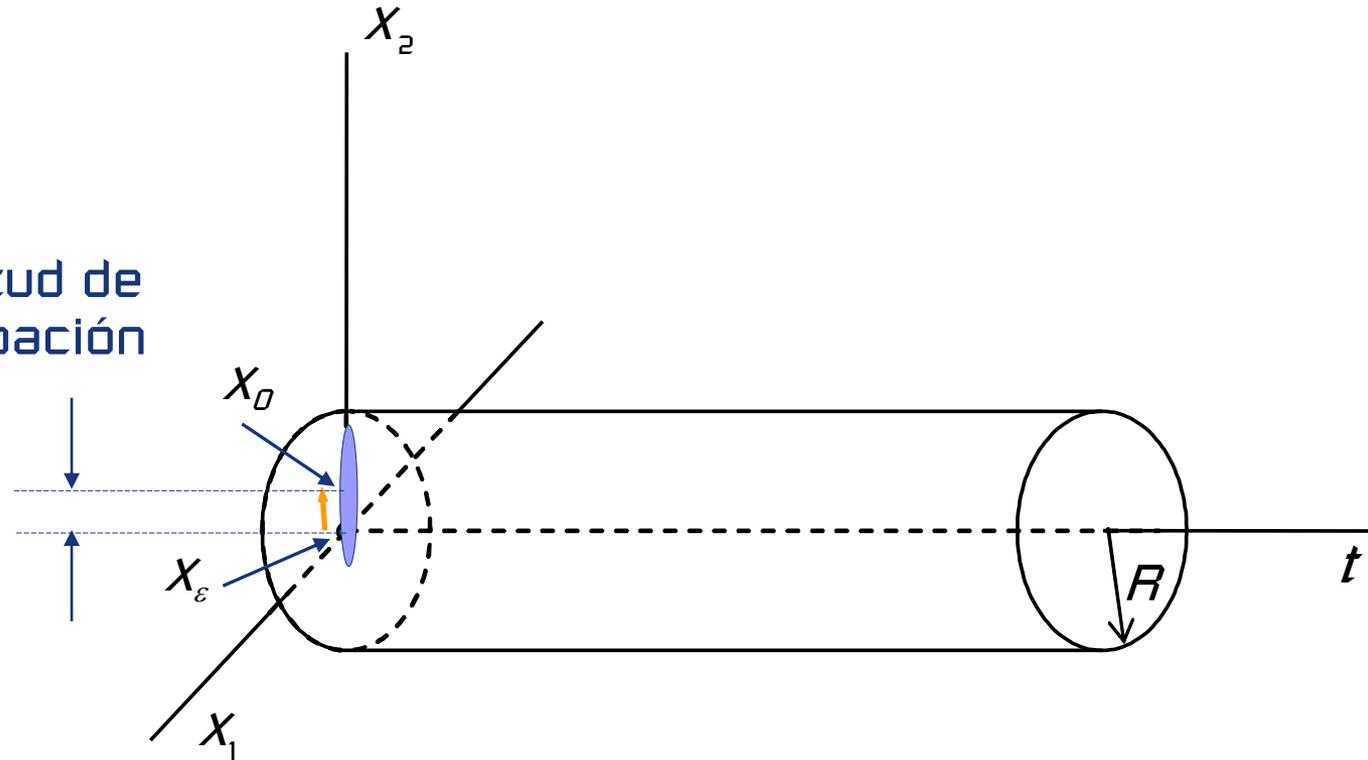
Se dirá que un estado de equilibrio x_ε es estable en el sentido de Lyapunov (ESL), si y sólo si

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0, \text{ tal que } \|x(t_0) - x_\varepsilon\| < \delta \Rightarrow \|x(t) - x_\varepsilon\| < \varepsilon, \forall t.$$



Teoría de Estabilidad

Magnitud de perturbación



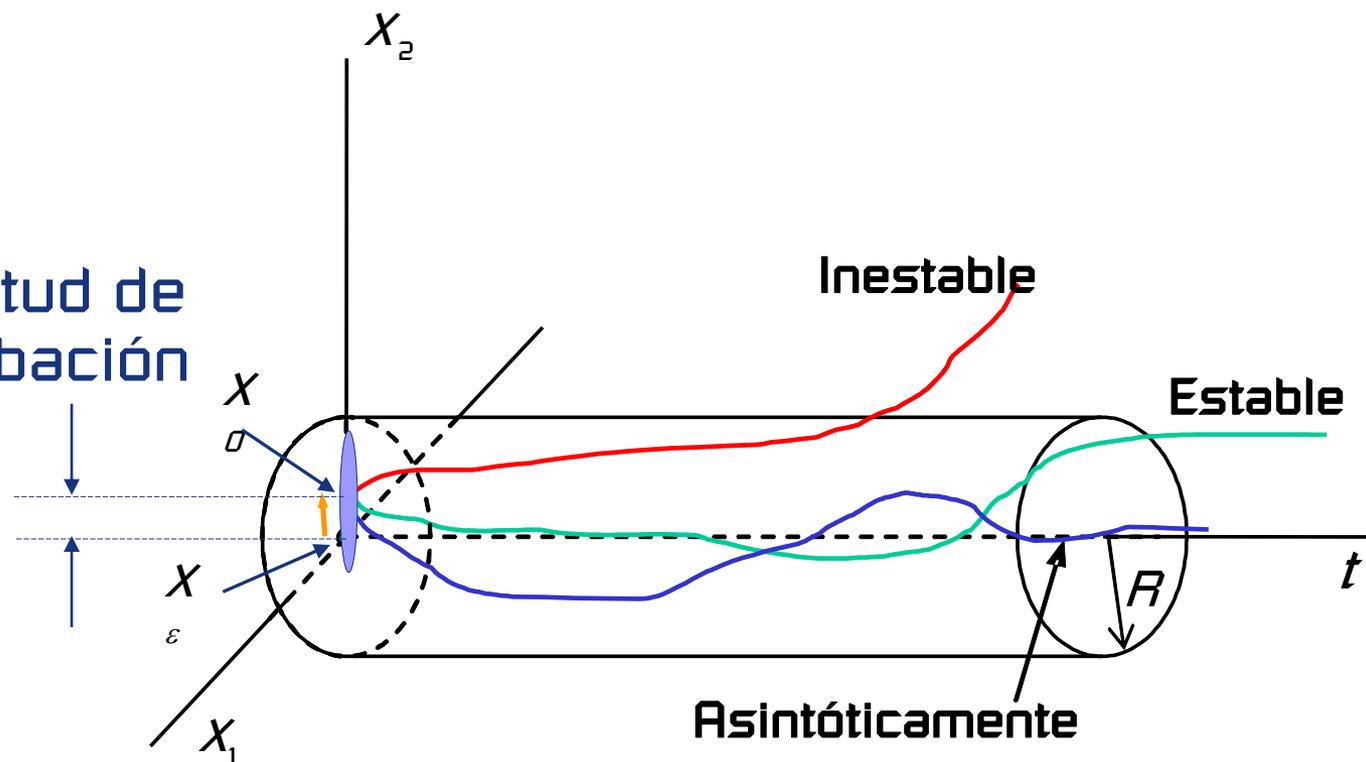
Se dirá que un estado de equilibrio x_ϵ es estable en el sentido de Lyapunov (ESL), si y sólo si

$$\forall \epsilon > 0 \exists \delta > 0, \text{ tal que } \|x(t_0) - x_\epsilon\| < \delta \Rightarrow \|x(t) - x_\epsilon\| < \epsilon, \forall t.$$



Teoría de estabilidad

Magnitud de perturbación

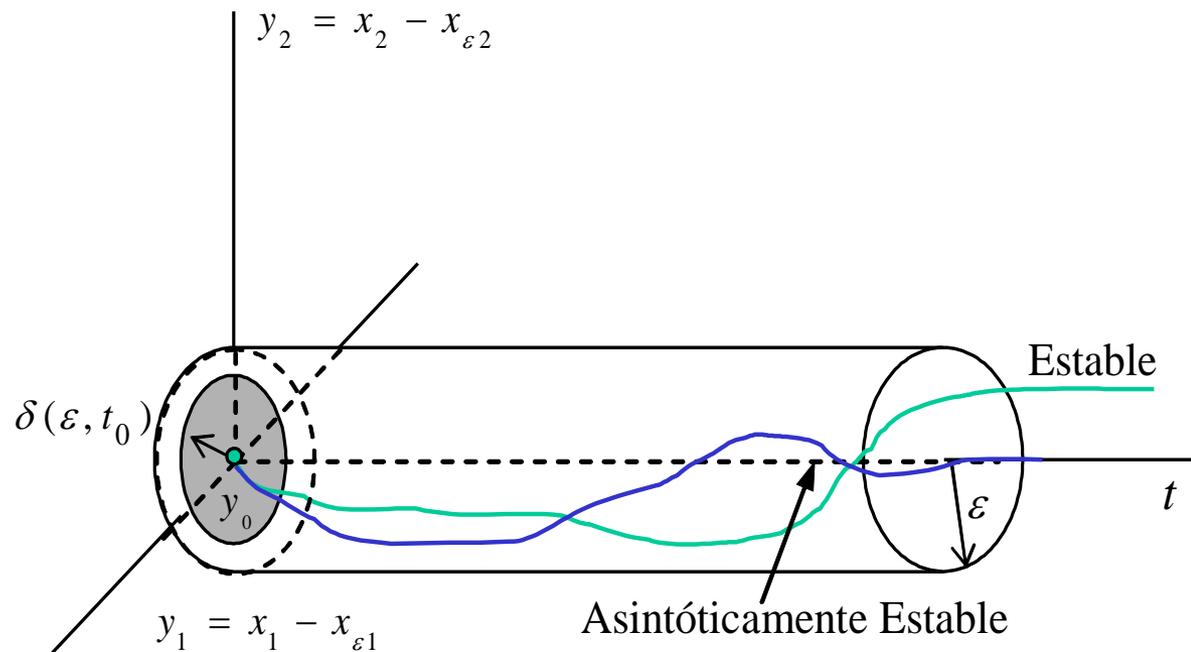


Se dirá que un estado de equilibrio x_ε es estable en el sentido de Lyapunov (ESL), si y sólo si

$$\forall \varepsilon > 0 \exists \delta > 0, \text{ tal que } \|x(t_0) - x_\varepsilon\| < \delta \Rightarrow \|x(t) - x_\varepsilon\| < \varepsilon, \forall t.$$



Teoría de estabilidad



Cuando el punto de equilibrio no está en el origen se puede hacer el cambio de variable

$$y(t) = x(t) - x_{\epsilon}$$



Teoría de estabilidad

Caso sistemas lineales

$$\dot{x}(t) = Ax(t)$$

$$x(0) = x_0$$

$P(\lambda) = \det(A - \lambda I) = 0$ Las raíces pueden ser todas distintas o pueden existir raíces múltiples.

$\forall i, \operatorname{Re}(\lambda_i) < 0 \Rightarrow$ Sistema asintóticamente estable

$\operatorname{Re}(\lambda_i) > 0 \Rightarrow$ Sistema inestable (para a lo menos un i)

$\operatorname{Re}(\lambda_i) = 0 \Rightarrow$ Sistema estable pero no asintóticamente estable



1er Método de Lyapunov

Primer Método de Lyapunov.

Sea el sistema

$$\dot{x}(t) = f(x)$$

$$x(t_0) = x_0$$

Si X_ε es un punto equilibrio

$$f(x_\varepsilon) = 0$$

Usando el cambio de variable

$$y(t) = x(t) - x_\varepsilon$$

Desarrollando en serie de Taylor en torno a X_ε

$$\dot{y}(t) = \left. \frac{\partial f}{\partial x'} \right|_{x_\varepsilon} y(t) + g(t)$$