



**fcfm**

Ingeniería Eléctrica  
FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE



**EM 737**

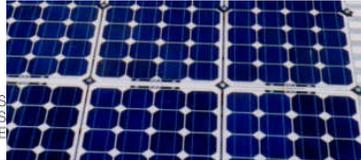
# **INTRODUCCION A LA TEORIA DE ESTABILIDAD EN SISTEMAS DE POTENCIA**

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



**fcfm**

Ingeniería Eléctrica  
FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE



# INDICE

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



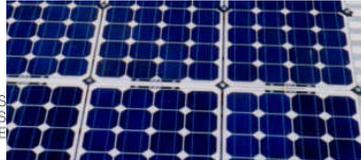
# Historia

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



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

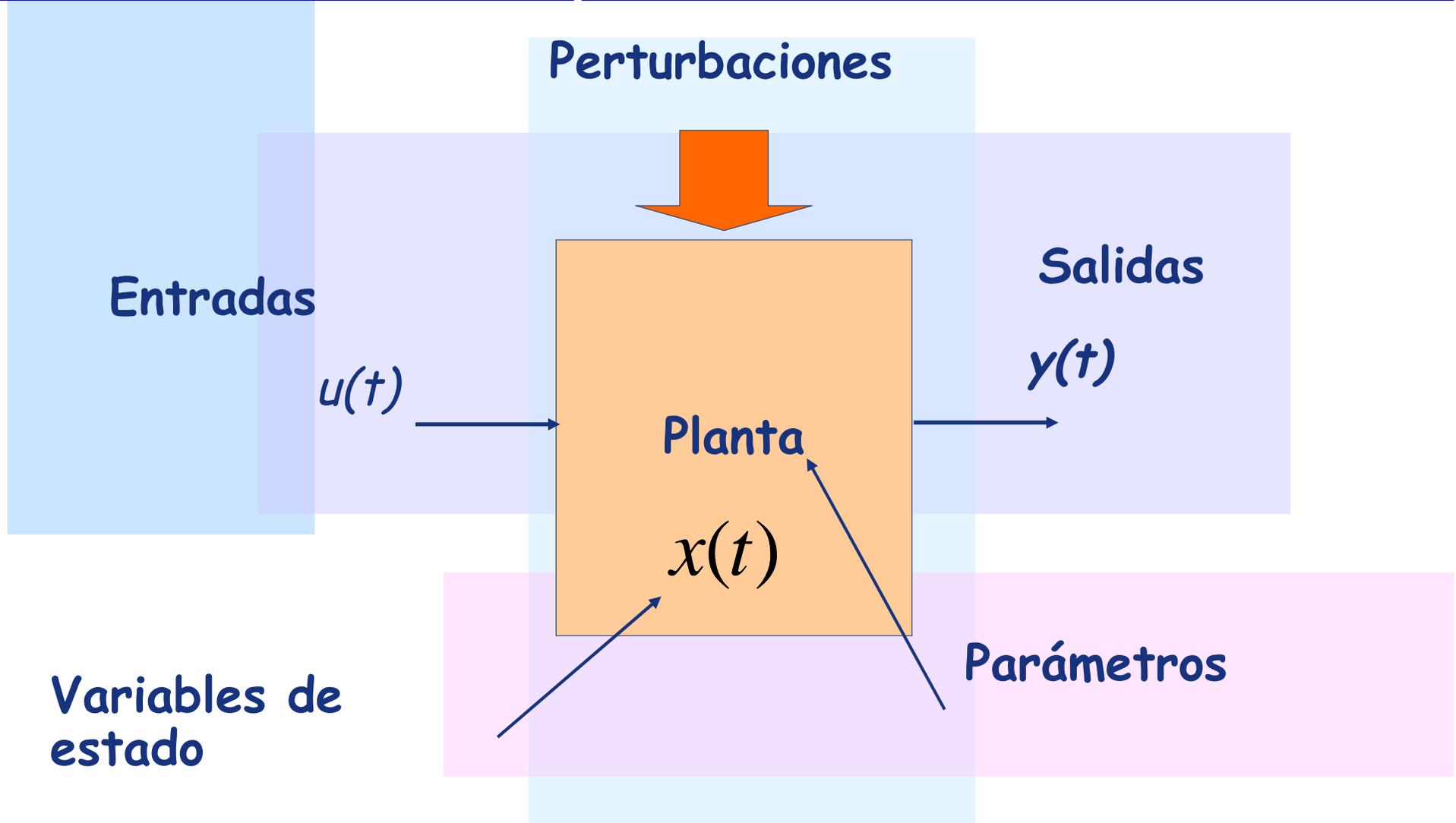


# INCIDENTES SISTEMAS SIC y SING (lista no exhaustiva)

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



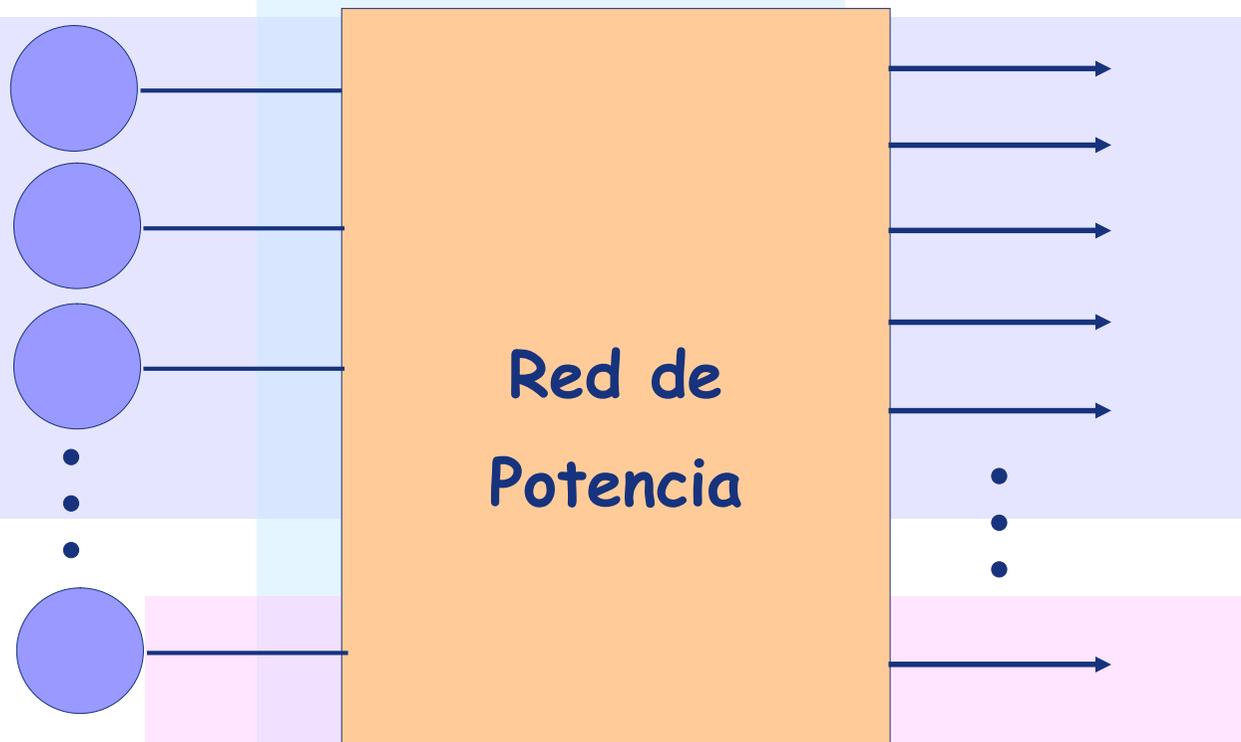
# Conceptos básicos





# Planta en un sistema eléctrico

¿Planta?





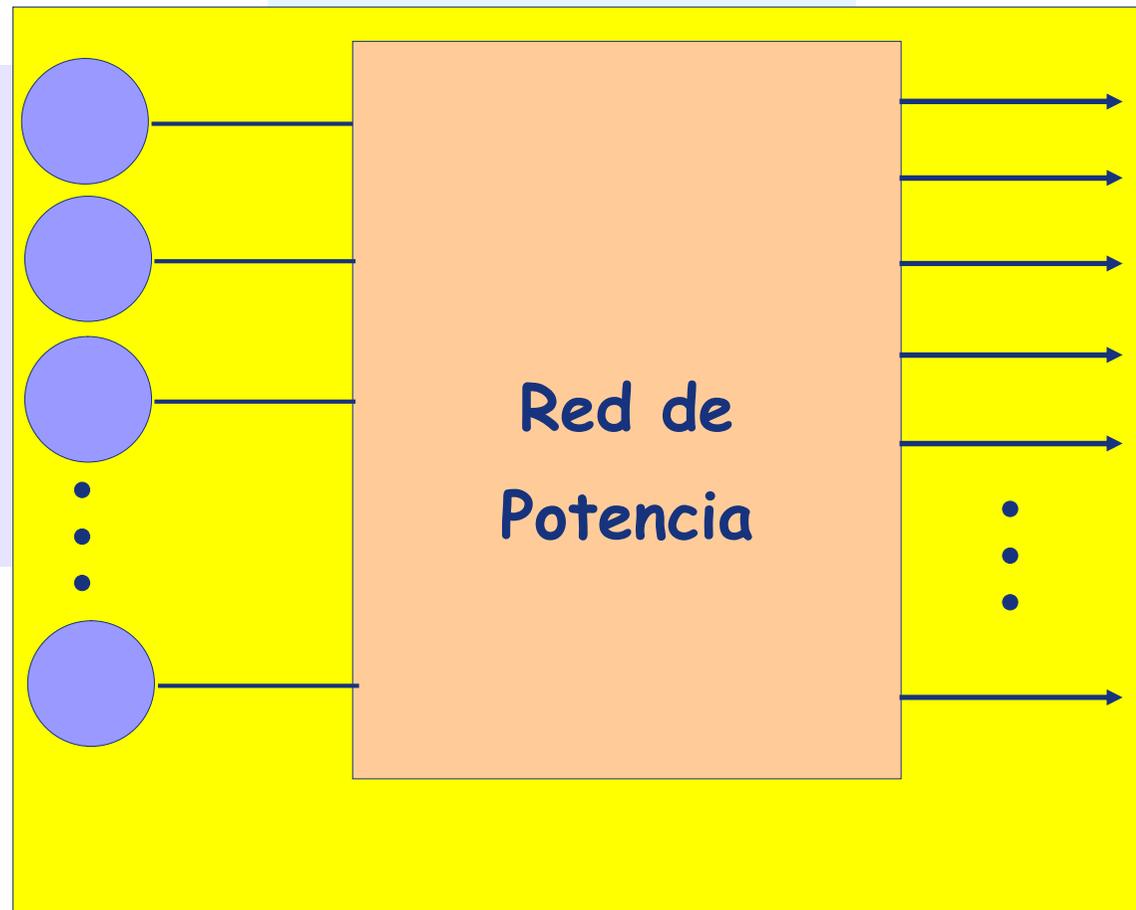
**fcfm**

Ingeniería Eléctrica  
FACULTAD DE CIENCIAS  
FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
UNIVERSIDAD DE CHILE



# El estado de un sistema

Planta: Toda la red

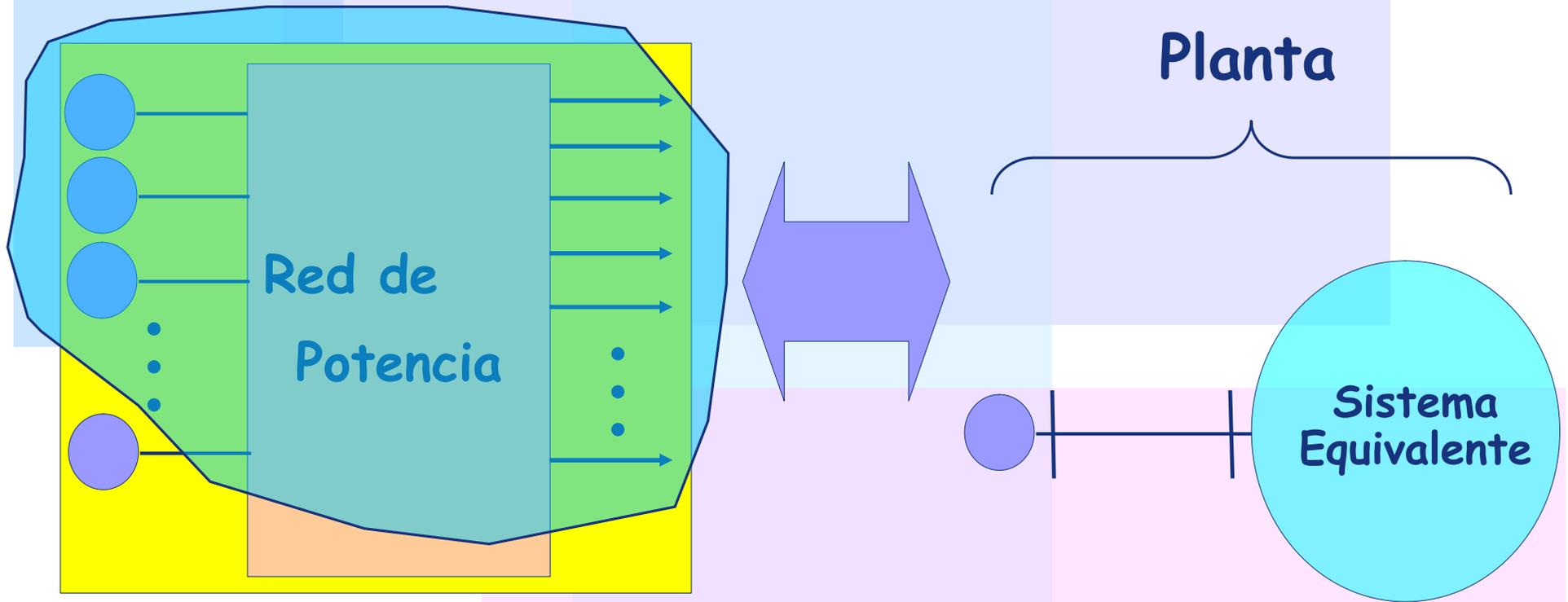


La  
mayor  
del  
mundo!



# El estado de un sistema

O sistemas reducidos de la red

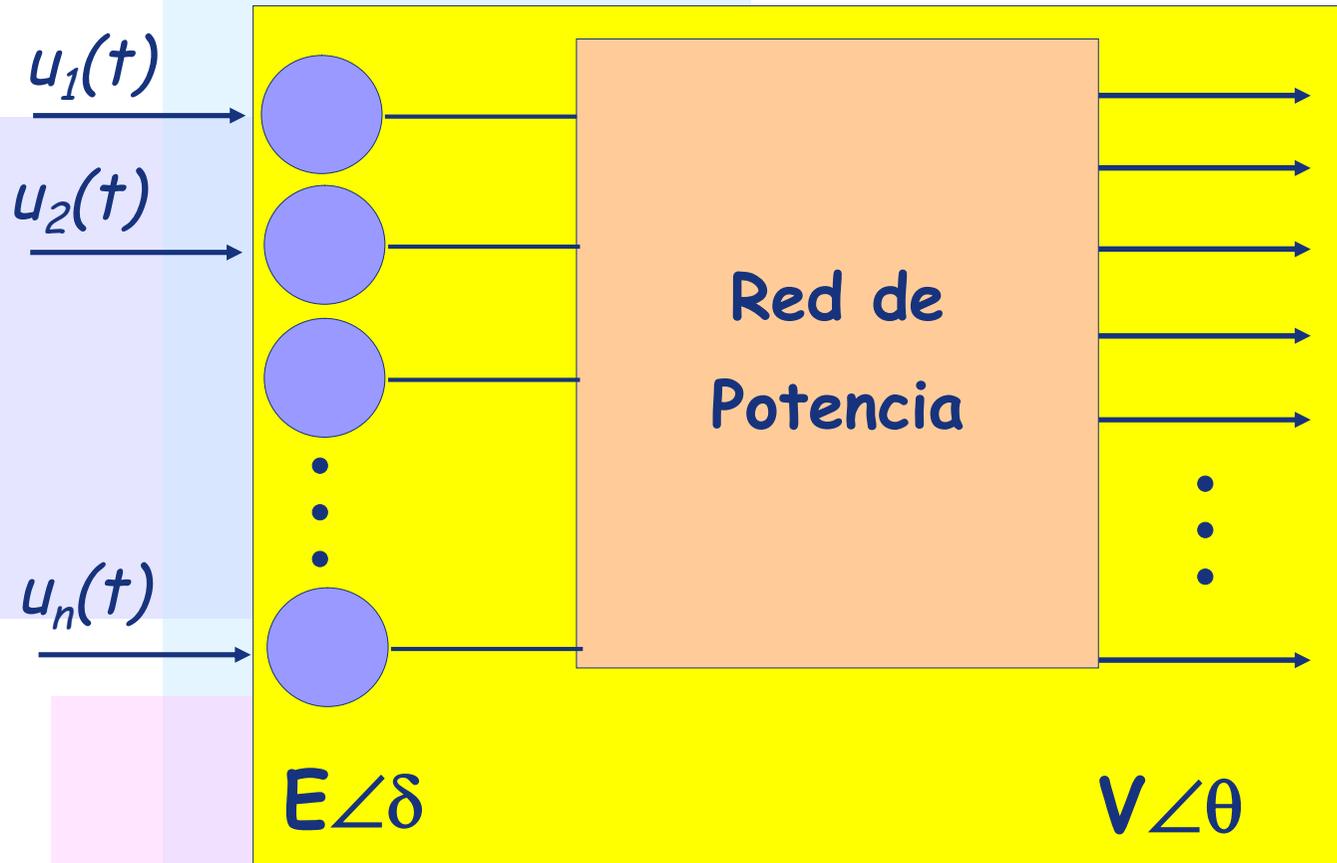


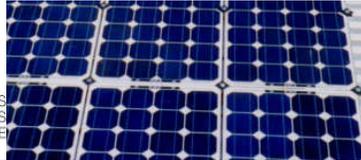


# Entradas de un sistema

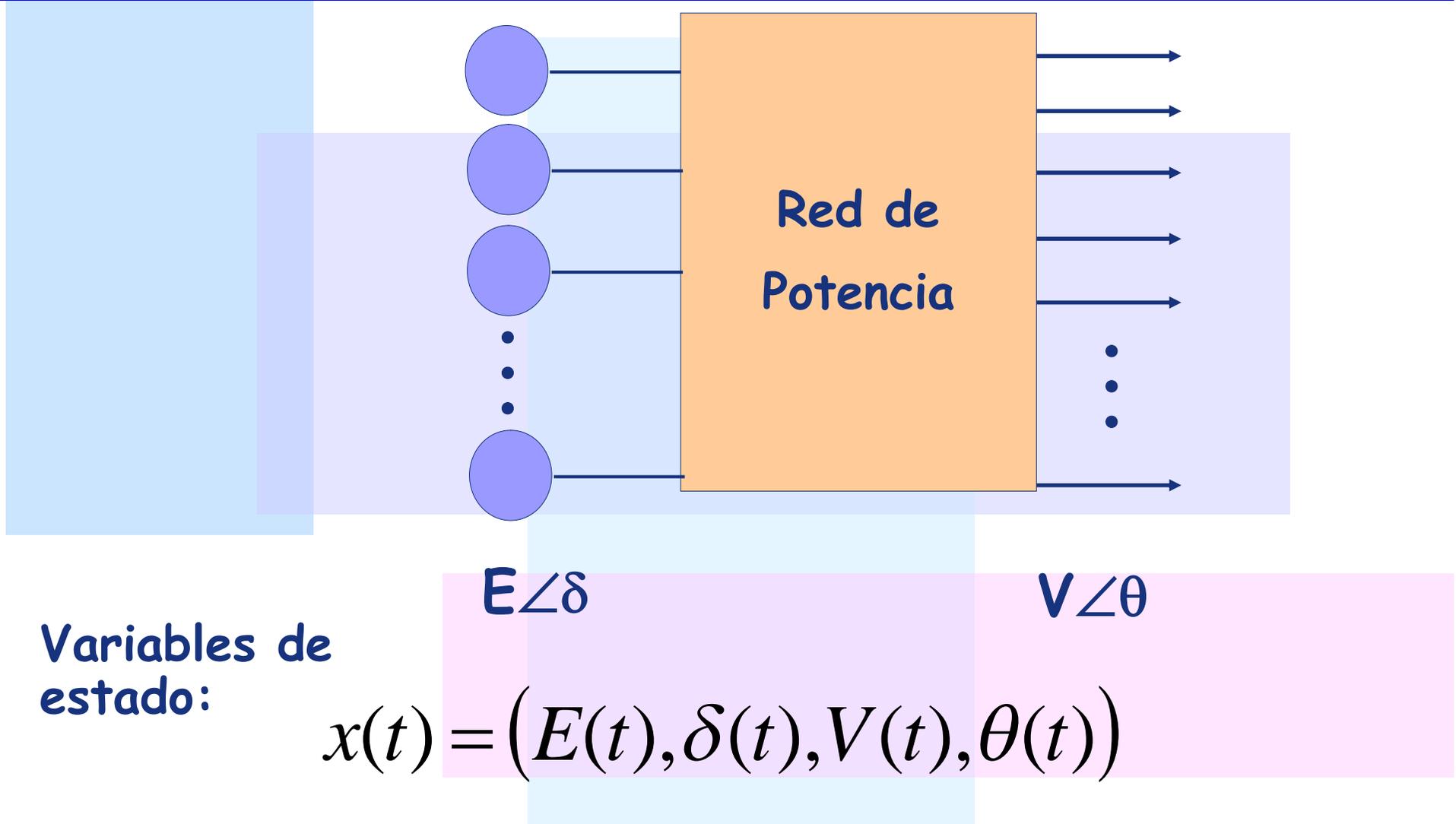
## Entradas:

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



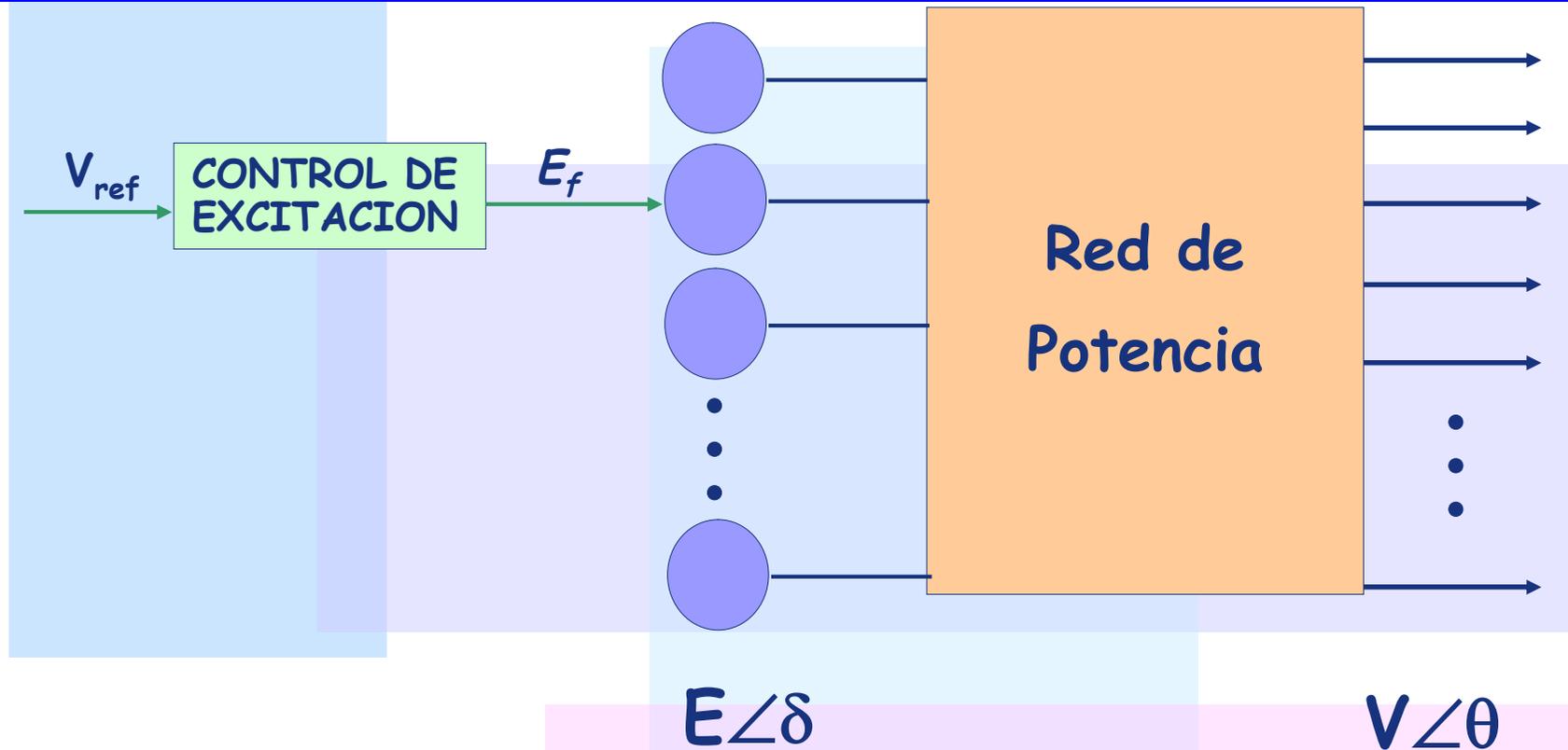


# El estado de un sistema





# El estado de un sistema



Variables de estado:

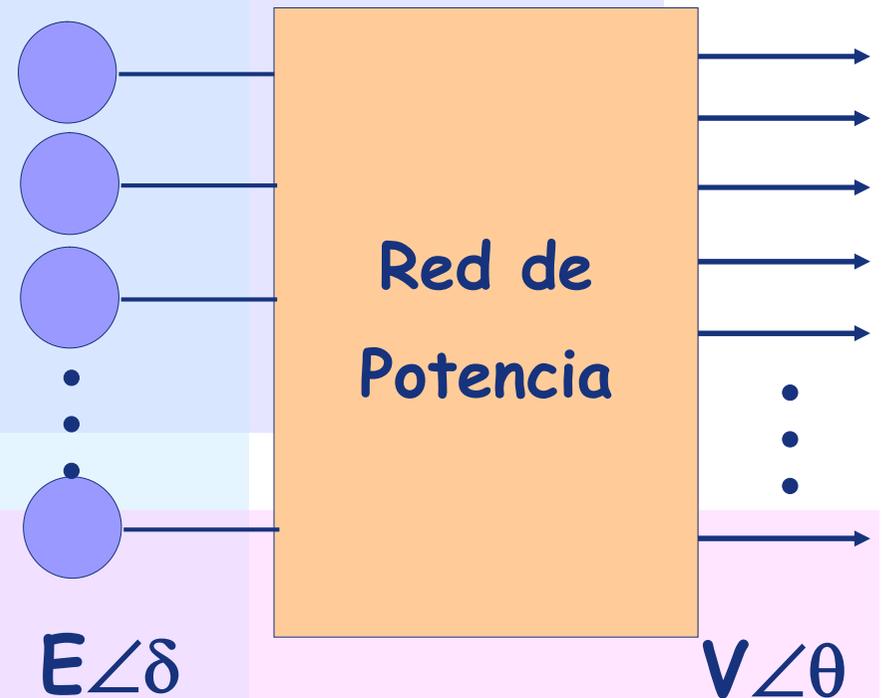
$$x(t) = \left( E_f(t), E_q(t), E_d(t), \omega(t), \delta(t), V(t), \theta(t) \right)$$

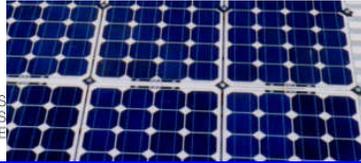


## Parámetros del Sistema

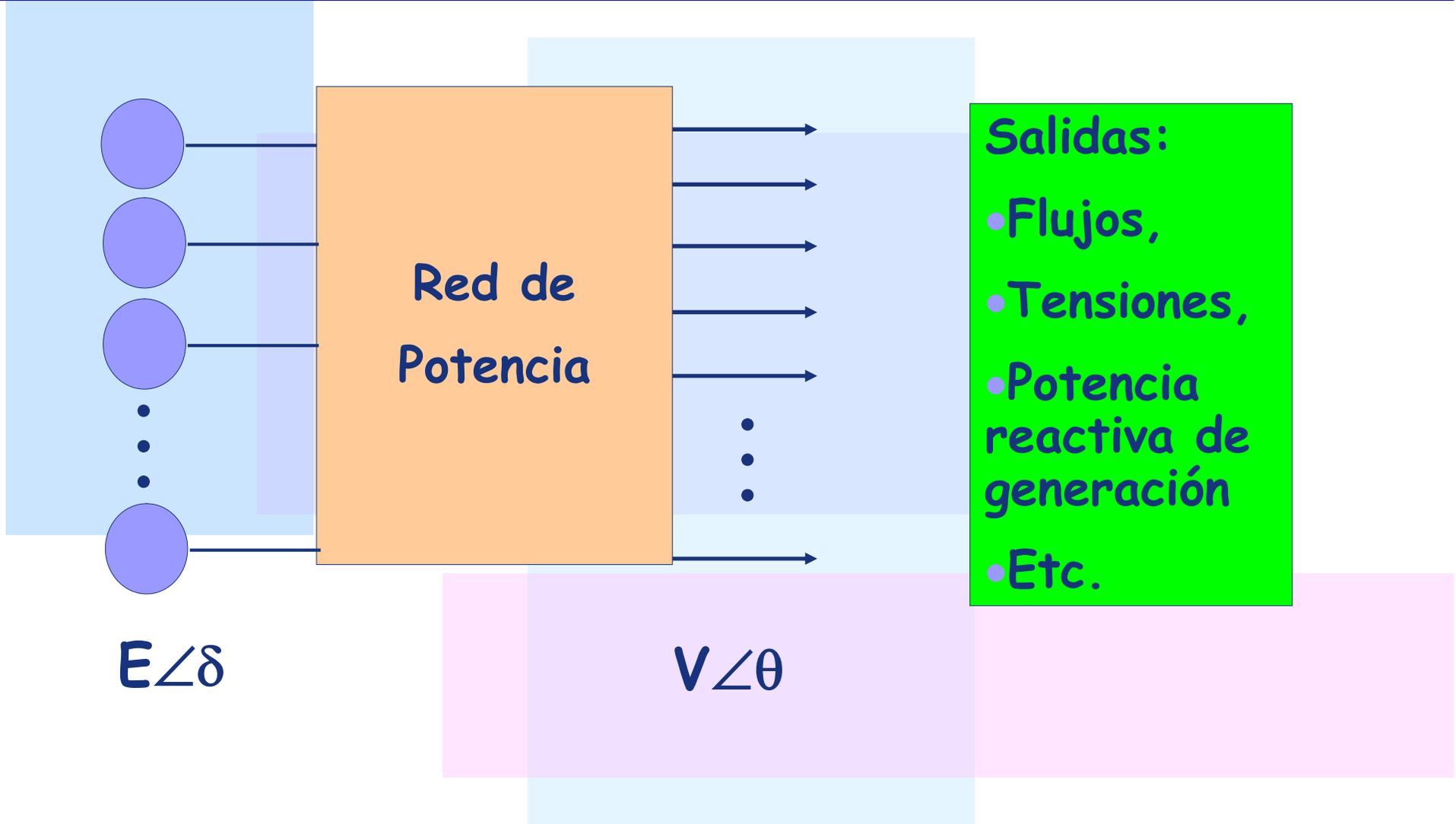
Son los valores que determinan la estructura:

- admitancias de los equipos de la red,
- los límites de operación de las máquinas y equipos,
- las 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!!!!**



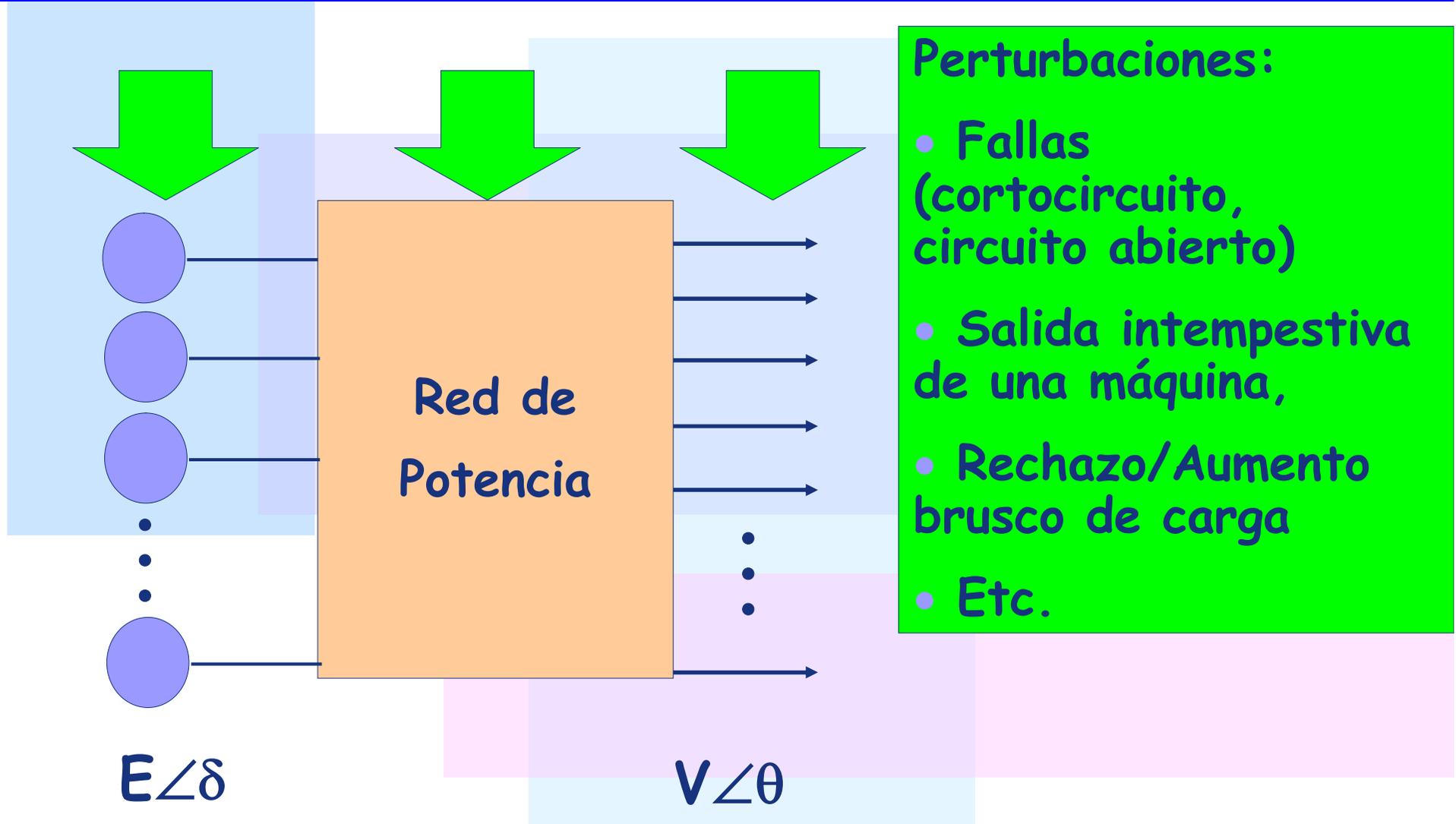


# Salidas de un sistema





# Perturbaciones de un sistema





# 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:

$$f(x_e) = 0$$

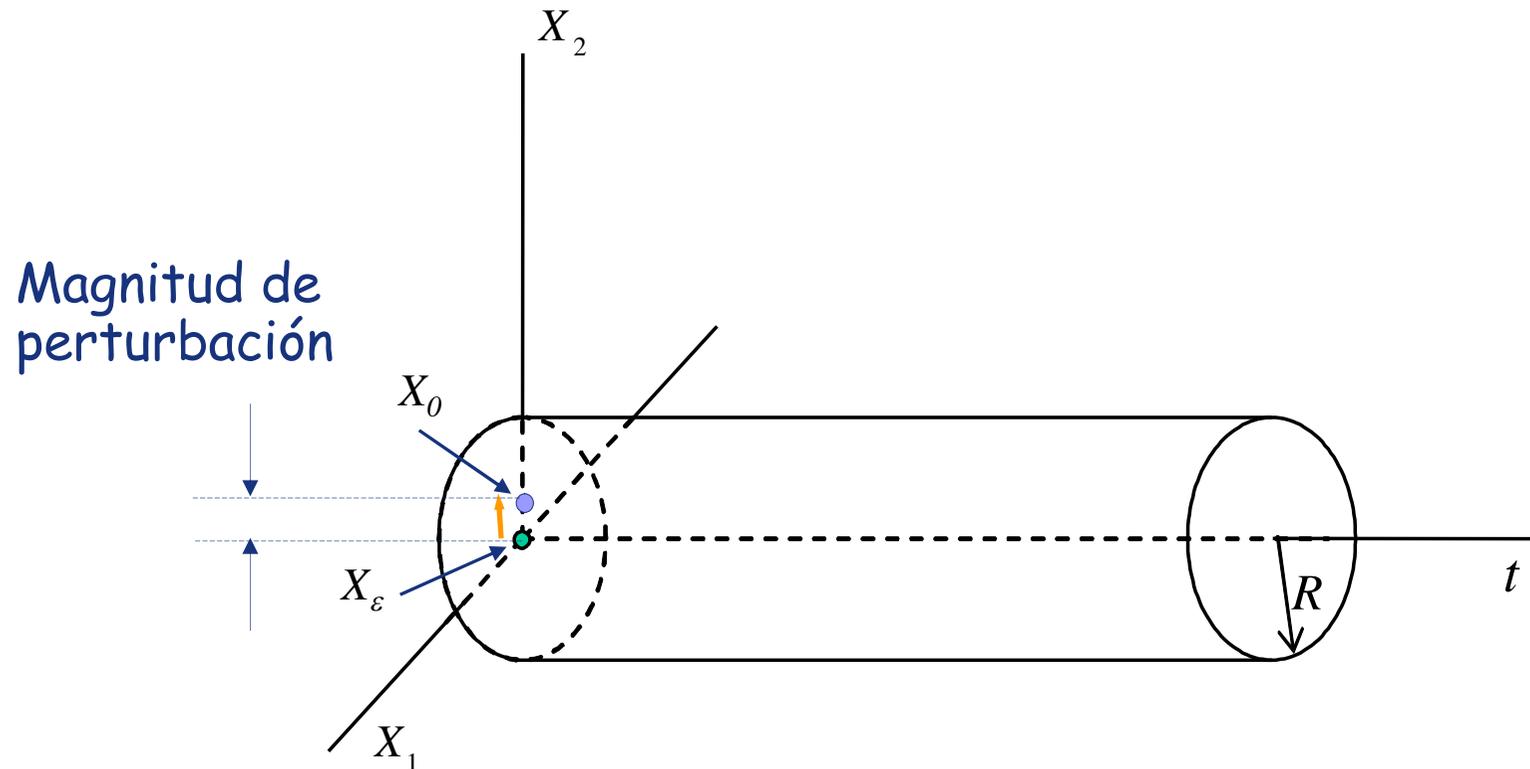
Es usual suponer que  $x_e$  es el origen

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





# Teoria de Estabilidad

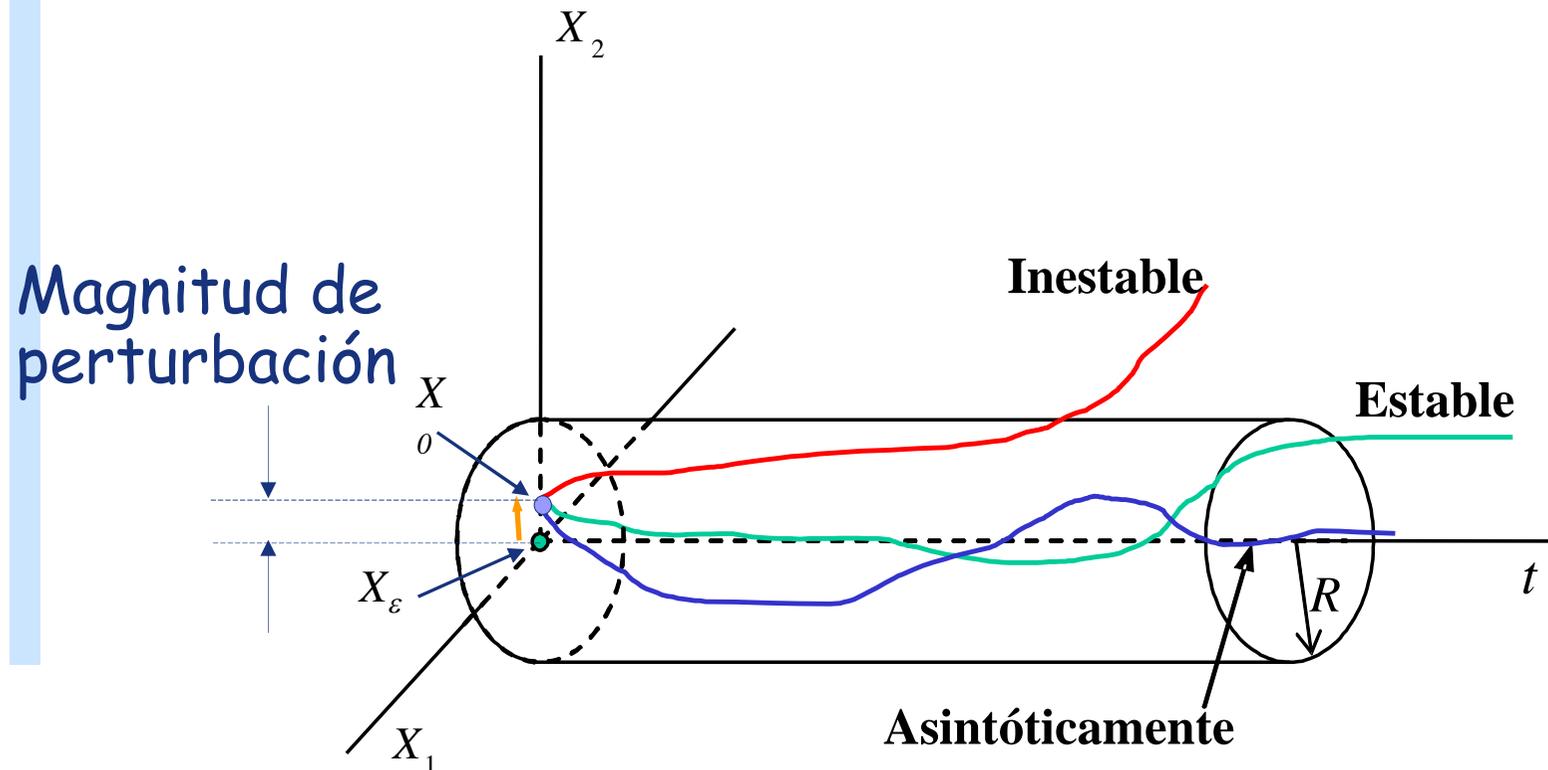


Se dirá que un estado de equilibrio  $x_\varepsilon$  es estable en el sentido de Lyapunov (ESL), si y sólo si

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



# Teoria de estabilidad

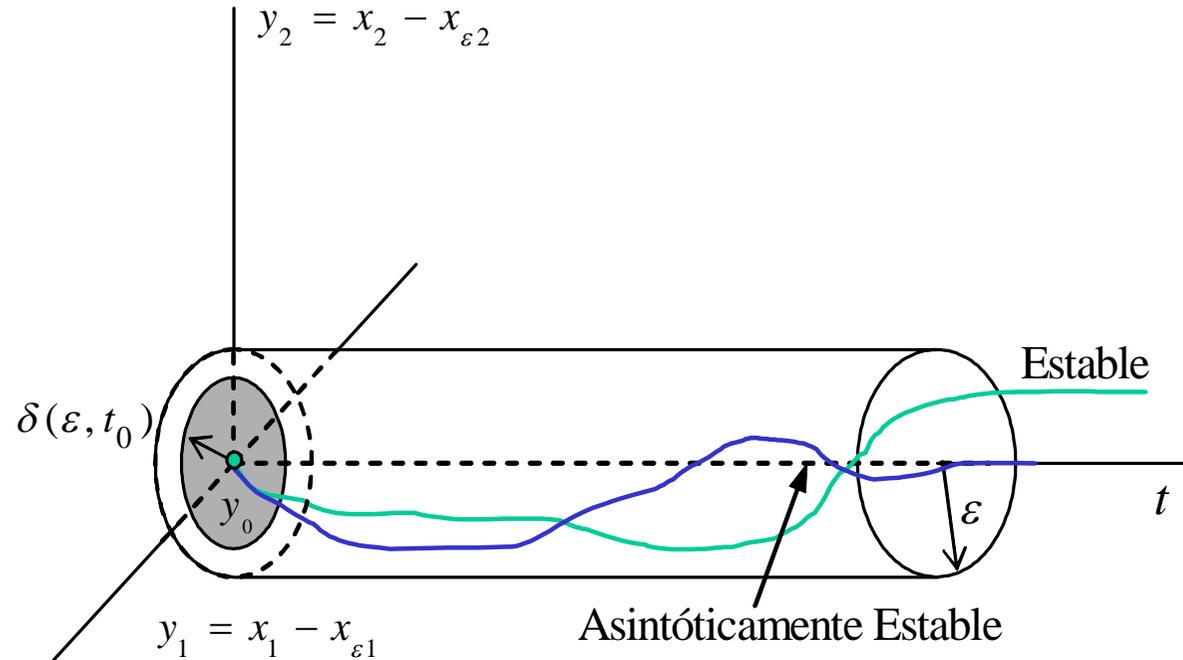


Se dirá que un estado de equilibrio  $x_\varepsilon$  es estable en el sentido de Lyapunov (ESL), si y sólo si

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



# Teoria de estabilidad



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

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



# Teoria de estabilidad

## Caso sistemas lineales

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

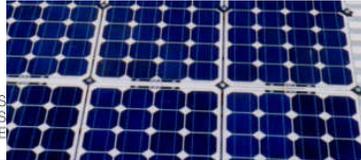
$$x(0) = x_0$$

$P(\lambda) = \det(A - \lambda I) = 0$  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  $X_\varepsilon$  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  $X_\varepsilon$

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