ÁREA DE ELECTRÓNICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
U.N.C.P.B.A.

Sistemas de Control

apuntes capítulo IV (controladores industriales)

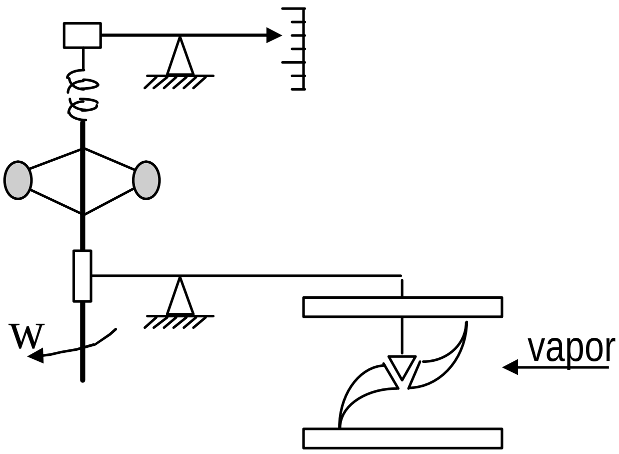
Facultad de Ingeniería - UNCPBA

Dto. de Ingeniería Electromecánica

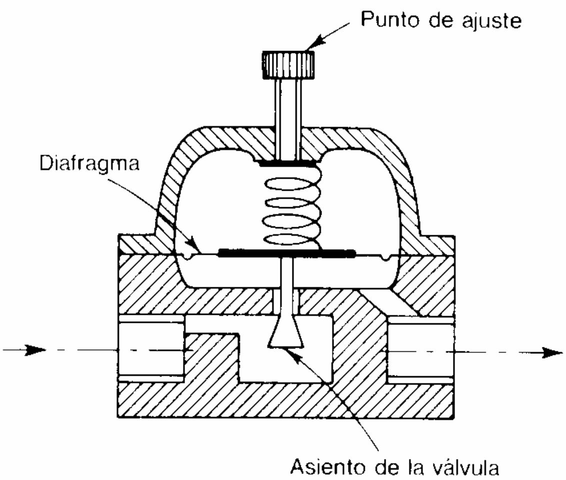
Prof: Dr. Gerardo Acosta

Controladores auto-operados

- sensor y actuador integrados en una misma pieza
  - ✓ *emplean la energía desarrollada por el sensor*
  - ✓ *simples y económicos*
- Ejemplos:
  - ✓ *regulador de velocidad de Watt*



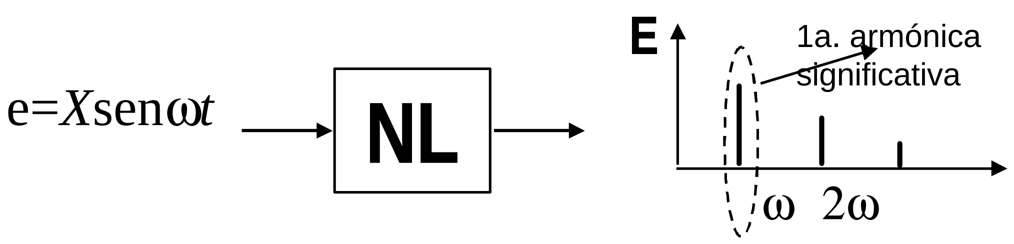
  - ✓ *regulador de presión de gas*



Control no lineal

- no es válida la superposición
- no son aplicables las herramientas hasta ahora estudiadas (TL, estudio de estabilidad por Bode, Nyquist y LR)
- estabilidad antes que resolver la Ec. Dif. no lineal
- el problema se aborda mediante:
  - ✓ *función descriptiva*
  - ✓ *2o. método de Liapunov*
  - ✓ *simulación en computadora*

Función Descriptiva:



$$N = \frac{Y_1}{X} \angle \Phi_1$$

donde: Y_1 amplitud de la fundamental de salida
Φ_1 desfasaje de la fundamental de salida

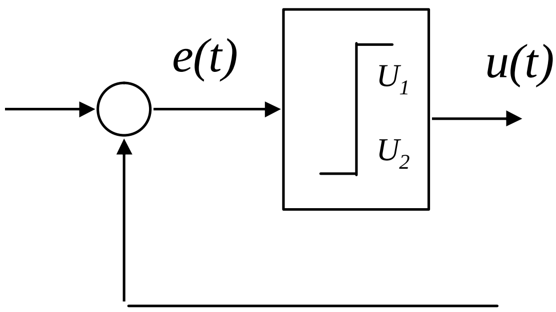
Control no lineal

- N es función de
  - ✓ *amplitud*
  - ✓ *frecuencia*

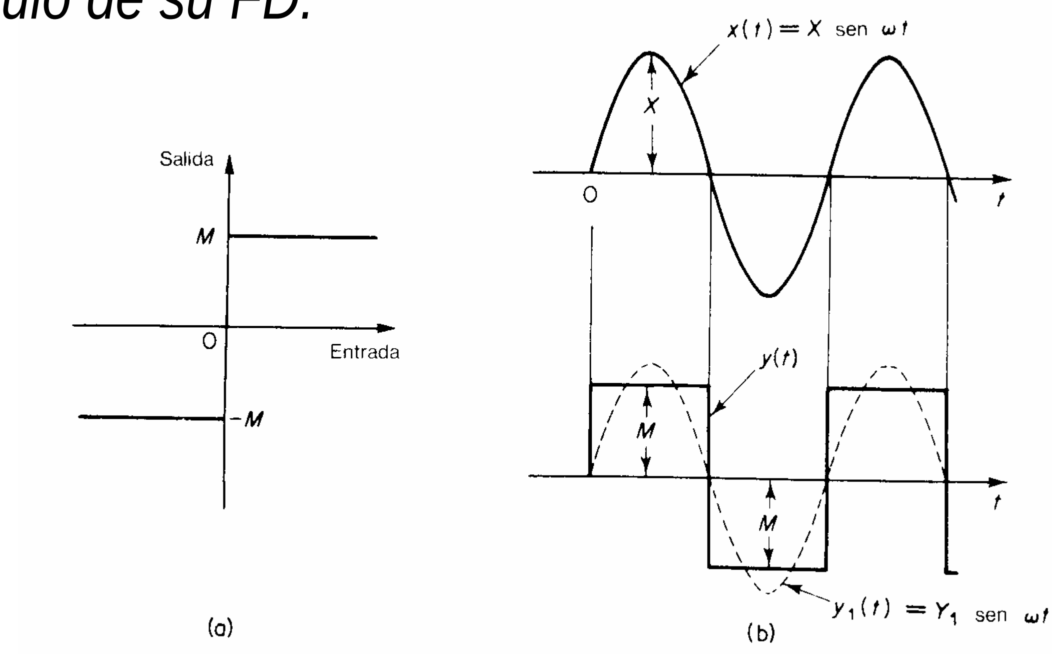
de la entrada salvo que la NL no posea almacena-dores de energía

- Caso de aplicación: **Controlador SI-NO**

$$u(t) = \begin{cases} U_1 \text{ si } e(t) > 0 \\ U_2 \text{ si } e(t) \leq 0 \end{cases}$$



- ❑ *En general* $U_2 = 0$ *ó* $-U_1$
  - ✓ *cálculo de su FD:*



Controlador SI-NO

$$y(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos nwt + B_n \sin nwt)$$

$$y(t) = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \sin nwt$$

siendo la armonica funtamental:

$$y(t) = B_1 \sin wt = Y_1 \sin wt$$

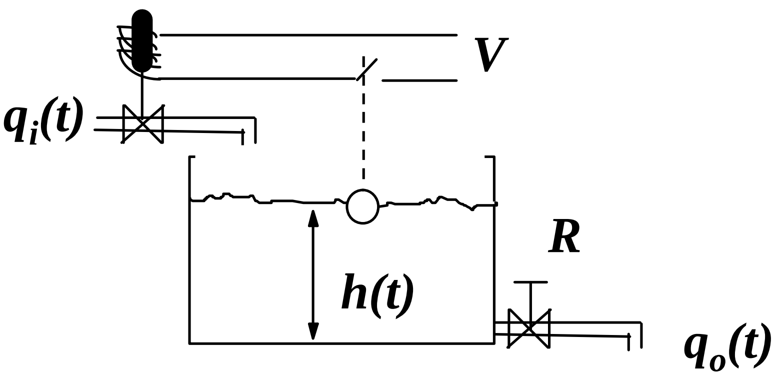
donde

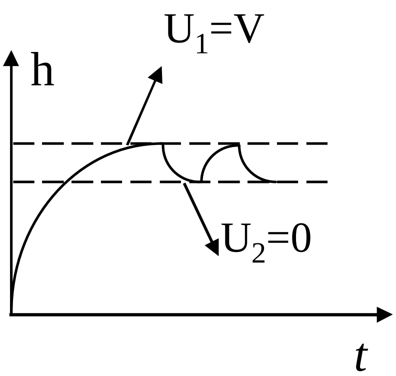
$$Y_1 = \frac{1}{p} \int_0^{2p} y(t) \sin wt\, d(wt) = \frac{2}{p} \int_0^{p} y(t) \sin wt\, d(wt)$$

$$= \frac{2M}{p} \int_0^{p} \sin wt\, d(wt) = \frac{4M}{p}$$

$$\boxed{N = \frac{Y_1}{X} \angle 0° = \frac{4M}{pX}}$$

- Ejemplo:
  - *en situaciones prácticas no siempre es necesario hallar* **N** *sino simplemente encontrar rangos de funcionamiento*

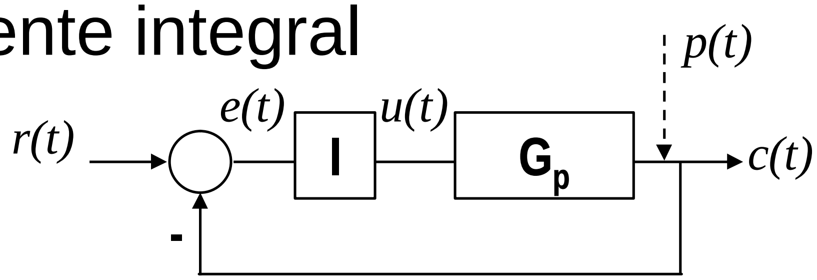




- ✓ *compensadores en el lazo directo*

➢ Acción puramente integral

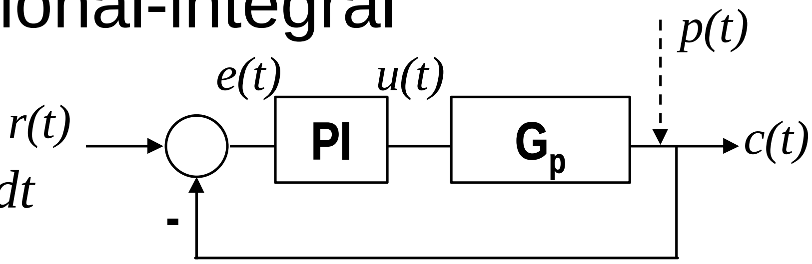
$$u(t) = k1\int_0^t e(t)dt$$



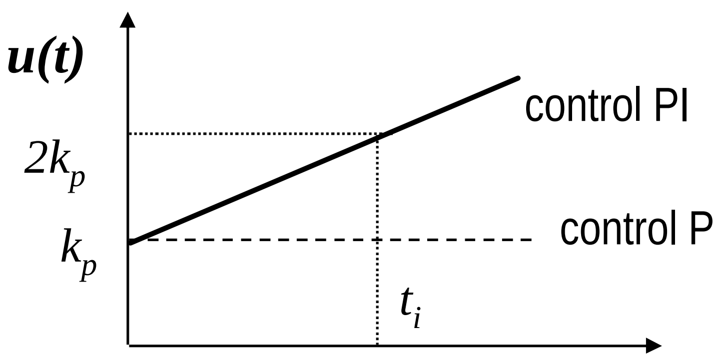
- ✓ c(t) *sin error en estado estacionario* E_{ss} (*aun con* $p(t)$)
- ✓ u(t) = *cte. si* E_{ss} *=0*
- ✓ *retraso de fase (-90): desestabiliza*

➢ Acción proporcional-integral

$$u(t) = kpe(t) + k1\int_0^t e(t)dt$$



- ✓ *se añade un cero en la transferencia*
- ✓ *caso particular de compensador por retraso*
- ✓ *en t para error tipo escalón*



Acción PID

- *anticiparse al error futuro (señal de control en función de la variación del error)*
- *se incrementa la estabilidad relativa, aunque sólo se usa en los transitorios*

$$u(t) = k_p \left[e(t) + \frac{1}{t_i} \int_0^t e(t)dt + t_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

- *donde:* k_p=*ganancia proporcional*
  t_i=*tiempo integral*
  t_d=*tiempo derivativo*
- *@ Laplace:*

$$PID(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p \left[1 + \frac{1}{t_i s} + t_d s \right] = \frac{k_p (1 + t_i s + t_i t_d s^2)}{t_i s}$$

$$PID(s) = k_p \left[1 + \frac{1}{t_i s} + \frac{t_d s}{1 + (t_d / N) s} \right]$$

➢ Casos especiales

$t_d = 0 \rightarrow PI \rightarrow$ compensador por retraso

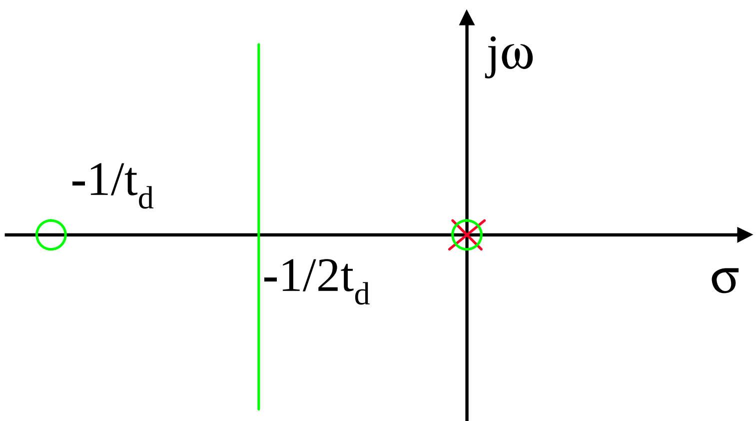
$t_i = \infty \rightarrow PD \rightarrow$ cero en $-1/t_d$

$t_i >> t_d \rightarrow PID \rightarrow$ 2 polos y 2 ceros reales

➢ Lugar de raíces

$$z_{1-2} = \frac{-1}{2t_d} \pm \frac{\sqrt{t_i^{\,2} - 4t_i t_d}}{2t_i t_d}$$

- ✓ *tomando* t_i *como parámetro*
  - ❑ *ceros reales para* $t_i >= 4t_d$
    - ❑ si t_i -> infinito $z1=0$; $z2=-1/t_d$



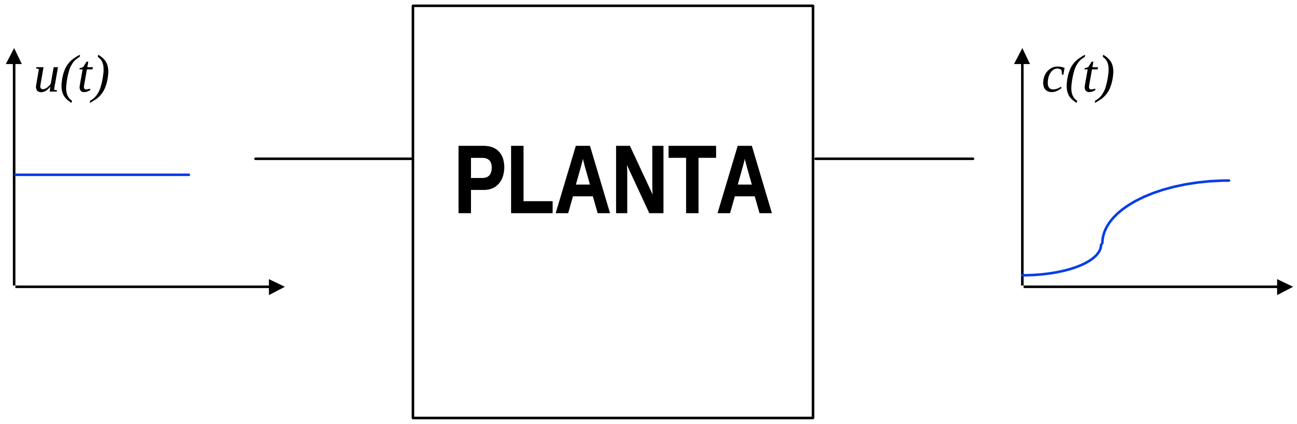
- ✓ *la respuesta transitoria se ajusta con* t_d
  - ❑ *prácticamente independiente*

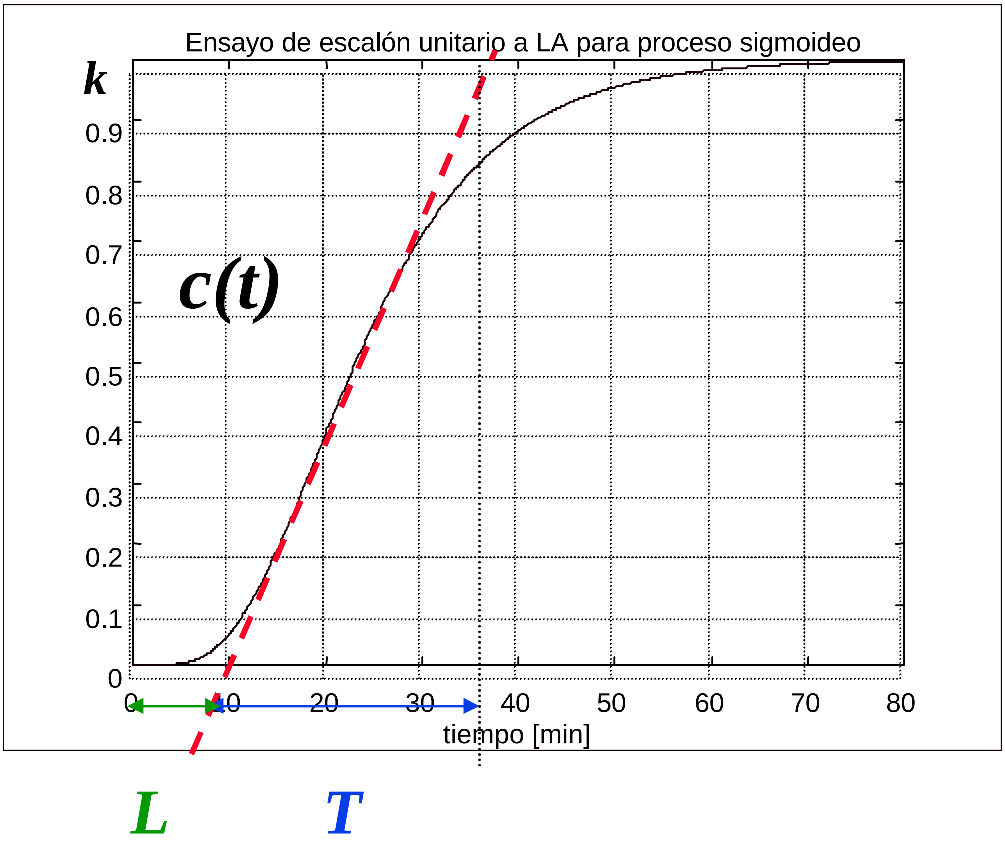
Sintonía de PID

- Métodos iterativos de prueba y error

- Métodos directos
  - ✓ *Margen de fase (diag. de Bode)*
  - ✓ *Asignación de polos y ceros (diag. de Evans)*
    - ❑ *ambas requieren modelo de la planta*
  - ✓ *Reglas de Ziegler y Nichols*
    - ❑ *empíricas, aunque surgen de optimizar el IAE sobre plantas integradoras*
    - ❑ *la respuesta de la planta debe ser sigmoidea (sin integradores puros ni polos complejos conjugados dominantes)*
    - ❑ *dos métodos básicos: a L.A. y L.C.*

- ***Z&N*** a lazo abierto:



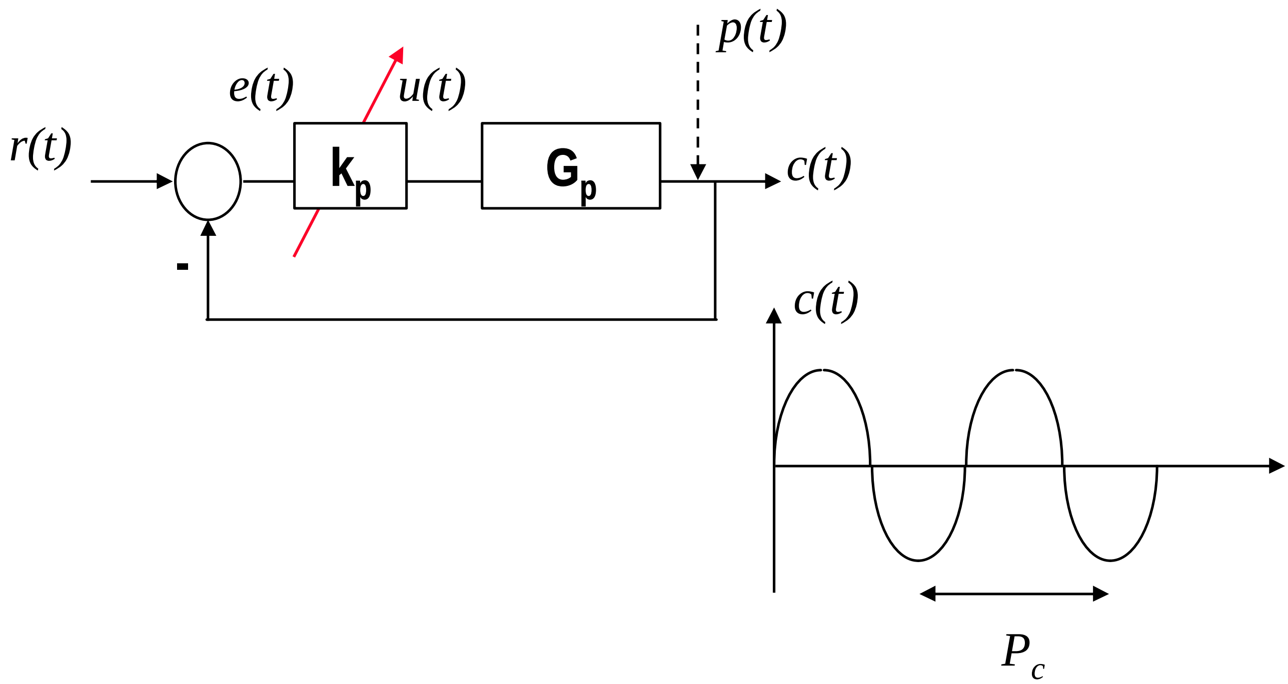


Sintonía de PID

PID	PI	P
kp=1,2T/L	*kp=0,9T/L*	*kp=T/L*
ti=2xL	*ti=L/0,3*	*ti=¥*
td=0,5xL	*td=0*	*td=0*

Z&N a lazo cerrado:

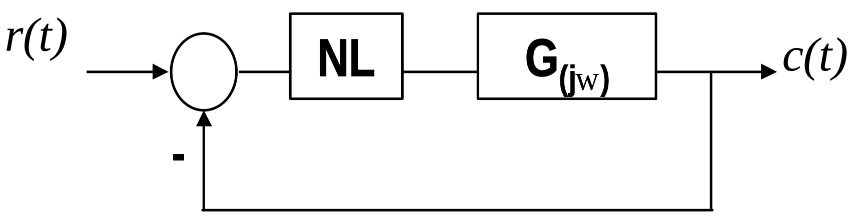
- ✓ *o de ciclo límite*
  - ❑ *peligroso para ciertos casos*



Sintonía de PID

PID	PI	P
kp=0,6xKc	*kp=0,45xKc*	*kp=0,5xKc*
ti=Pc/2	*ti=Pc/1,2*	*ti=* ¥
td=Pc/8	*td=0*	*td=0*

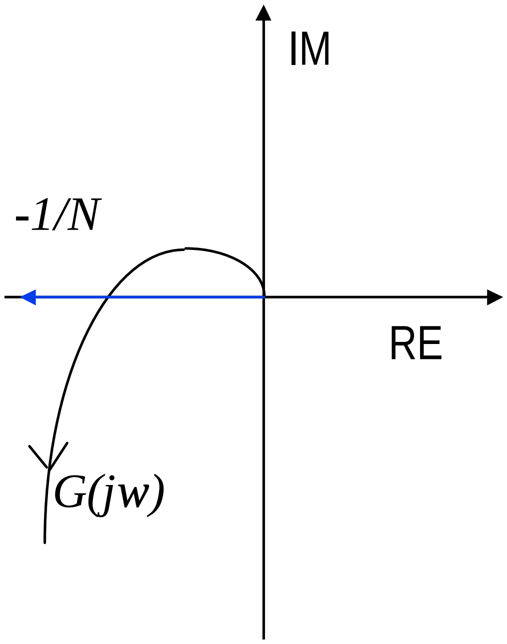
- Ambos
  - ✓ *pretenden sobrepaso máximo del 25%*
    - ❑ *característica “quarter decay”*
  - ✓ *útiles porque no es necesario conocer FT de planta*
  - ✓ *dan una 1a. estimación*
    - ❑ *ajuste final sobre el dominio temporal*
- Método de Aström y Hagglund
  - ✓ *para la determinación de Kc y Pc*
  - ✓ *Fundamento:*
    - ❑ *cualquier sistema con desfasaje > 180º puede oscilar con amplitud controlada cuando se lo compensa con una NL*



Sintonía de PID

- *si NL="bang-bang"*

$$N = \frac{4M}{pX} \quad [1]$$



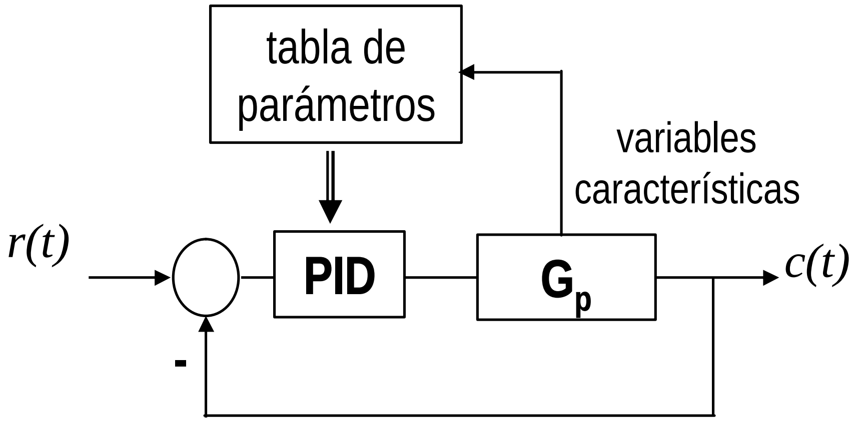
- *para que oscile*
  - criterio de Barkhausen

$$G(jw) = \frac{-1}{N} \quad [2]$$

- *con [1] y [2] se diseña la NL para una amplitud deseada*

➢ Controladores PID adaptables

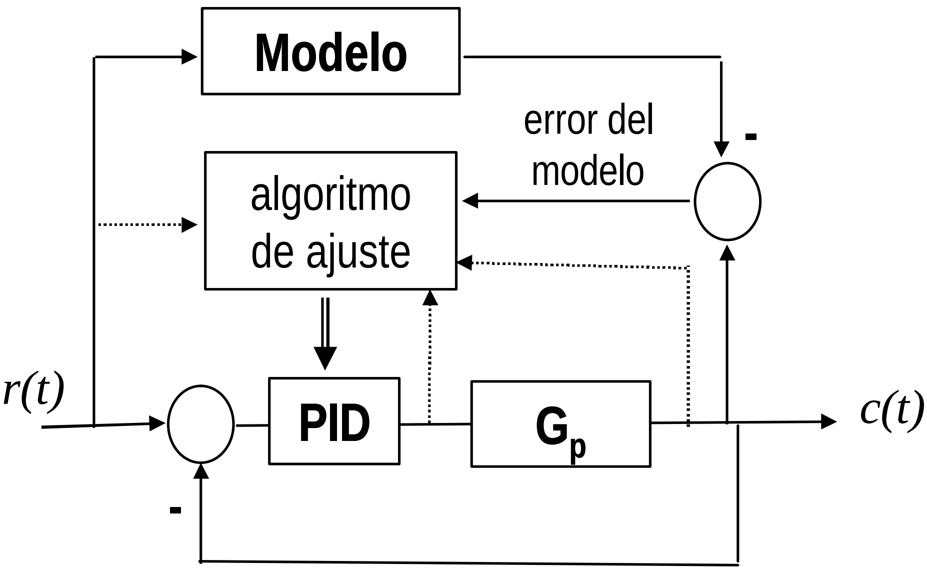
✓ *Ganancia tabulada*



- *Matriz de McVicar-Whealan (Fuzzy Control)*

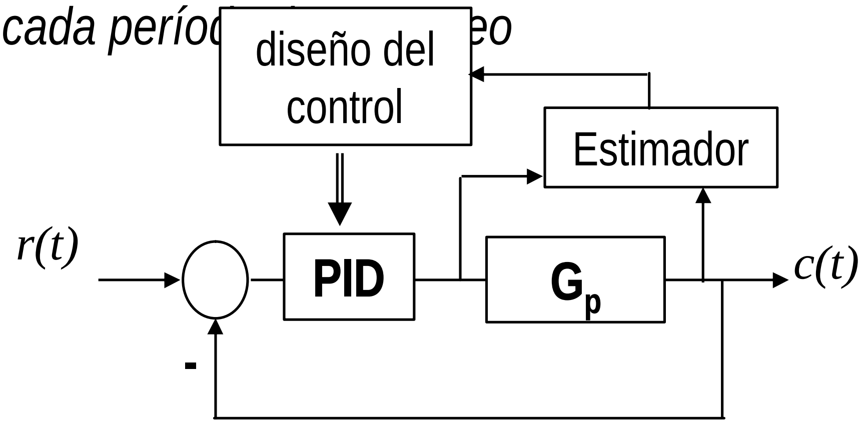
Controladores PID adaptables

- ✓ *Modelo de referencia (MRAC)*



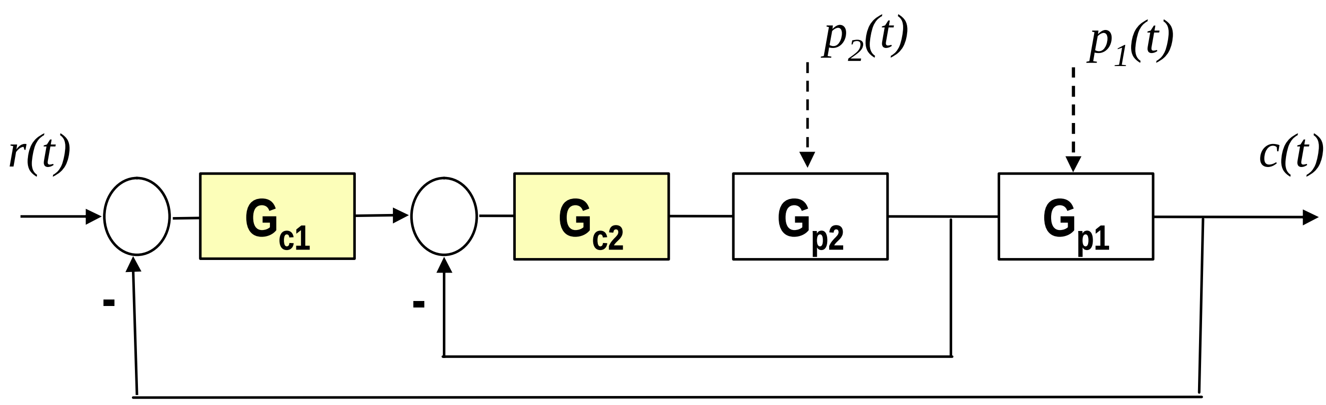
  - ❑ *la clave es diseñar el algoritmo de ajuste (corrección proporcional al error cuadrático del modelo, BP con ANN,...)*

- ✓ *Autosintonía*
  - ❑ *a requerimiento*
  - ❑ *cada períoc [illegible] eo*



Controladores en cascada

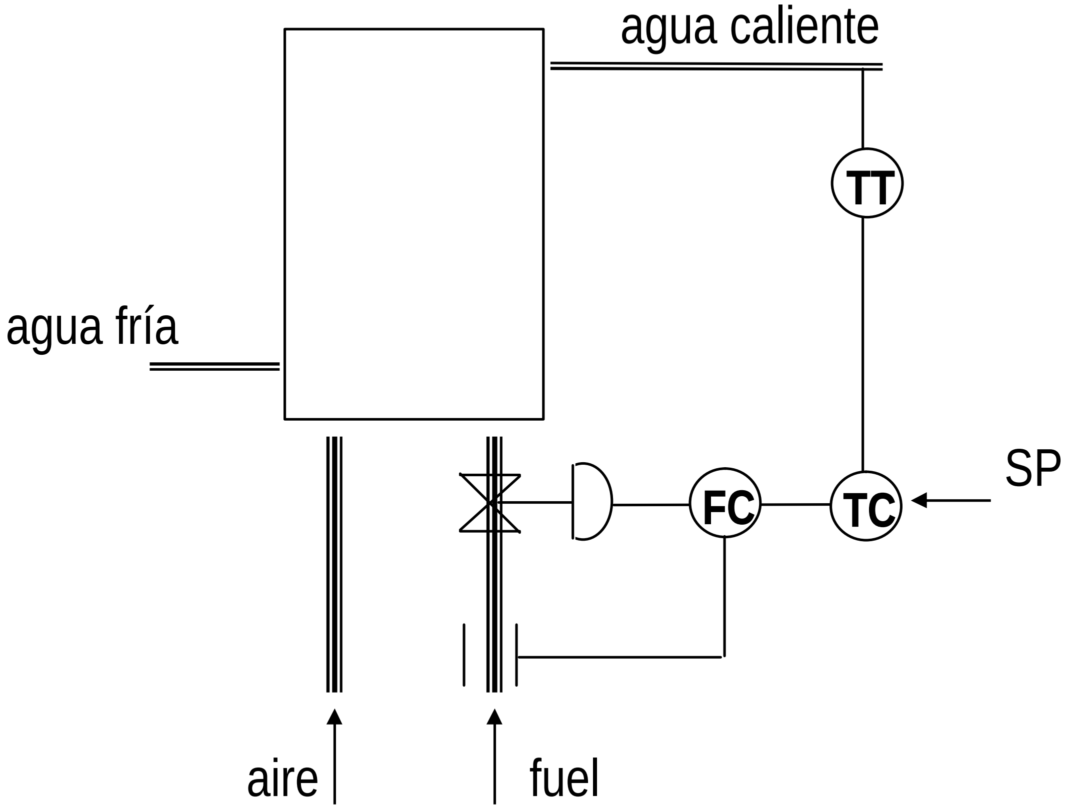
- la salida del controlador 1 se emplea como referencia del controlador 2
- se utilizan para mejorar el rechazo a perturbaciones del lazo

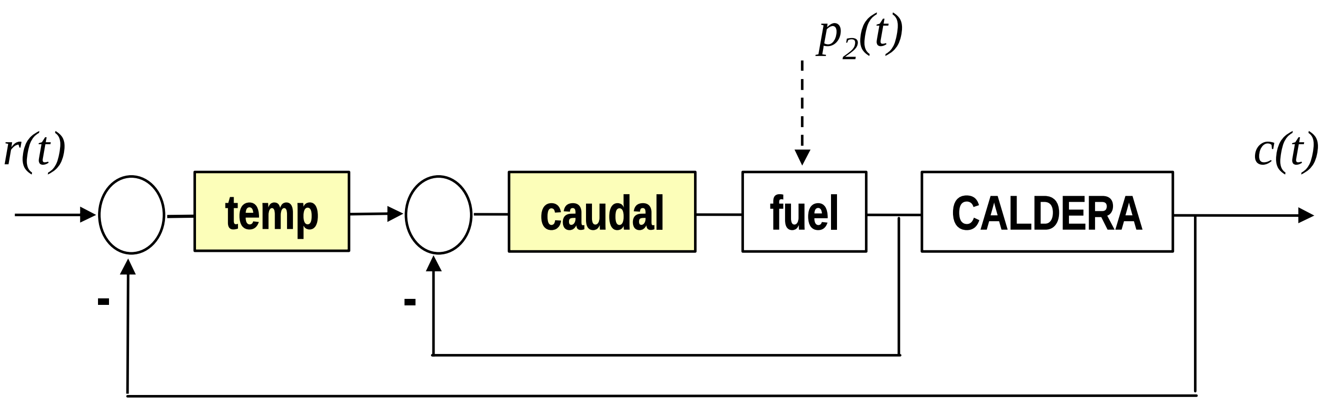


- ✓ *características:*
  - *$p_2(t)$ y Dganancia deben poder corregirse sin afectar al lazo primario*
  - *cada controlador tiene su propio punto de medida*
  - *sólo el controlador externo tiene su SP libre*
- ✓ *procedimiento de sintonía*
  - *desde los lazos interiores hacia afuera*
  - *si un lazo interior se pasa a manual, también los exteriores*

ÁREA DE ELECTRÓNICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
U.N.C.P.B.A.

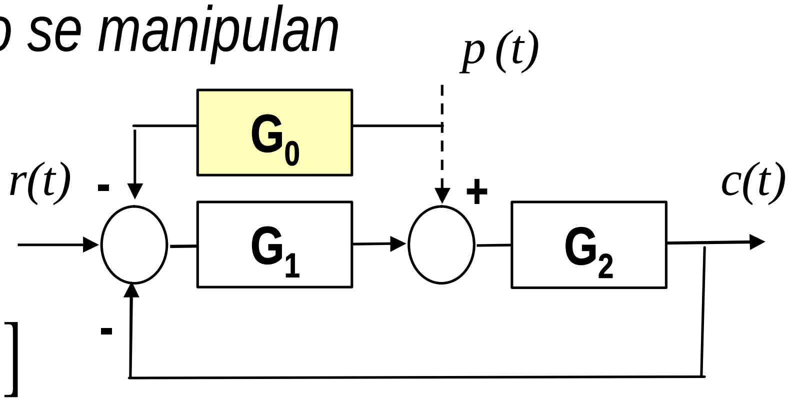
- Ejemplo:
  - ✓ *control de temperatura en caldera*





Lazos Feedforward

- ✓ *hay casos en los cuales las perturbaciones se miden pero no se manipulan*



$$C = G_2\left[P + G_1 E\right]$$

$$E = R - G_0 P - C$$

$$\therefore C = G_2\left\{P + G_1\left[R - G_0 P - C\right]\right\}$$

$$\ldots = G_2 P + G_2 G_1 R - G_2 G_1 G_0 P - G_2 G_1 C$$

$$\therefore C(1 + G_2 G_1) = RG_2 G_1 - PG_2(1 - G_0 G_1)$$

$$\therefore C = \frac{RG_2 G_1}{1 + G_2 G_1} - \frac{PG_2(1 - G_0 G_1)}{1 + G_2 G_1}$$

si se consigue $G_0 = \dfrac{1}{G_1}$ se elimina P

- ✓ *se emplea @ procesos*
  - ❑ *rangos reducidos de funcionamiento (f)*
- ✓ *no modifica la sintonía de los reguladores pre-existentes*

Lazos Feedforward

- Ejemplo: