

Control de Procesos Químicos

Tema 3. Control por Realimentación

Grado en Ingeniería Química
Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología

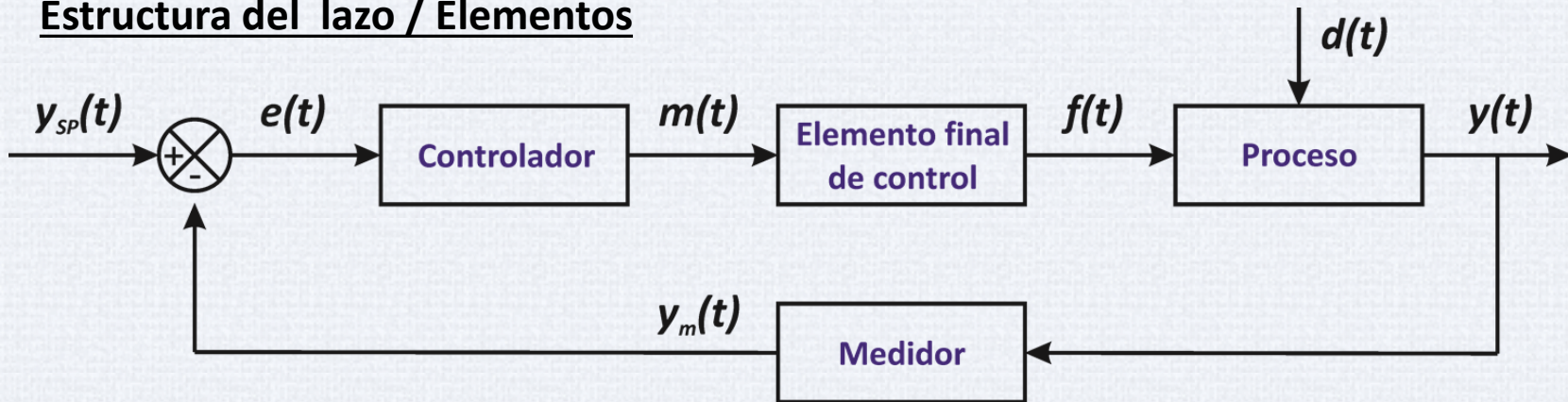
DESCRIPCIÓN DEL BUCLE DE CONTROL DE REALIMENTACIÓN

Descripción del bucle de control de realimentación

Lazo de control por realimentación (retroalimentación o *feedback*)

Objetivo Minimizar el error (diferencia entre la consigna y la variable controlada) para que su valor sea lo más próximo a cero.

Estructura del lazo / Elementos



Operación:

Bucle de realimentación de la información de la salida hacia la entrada –denominación

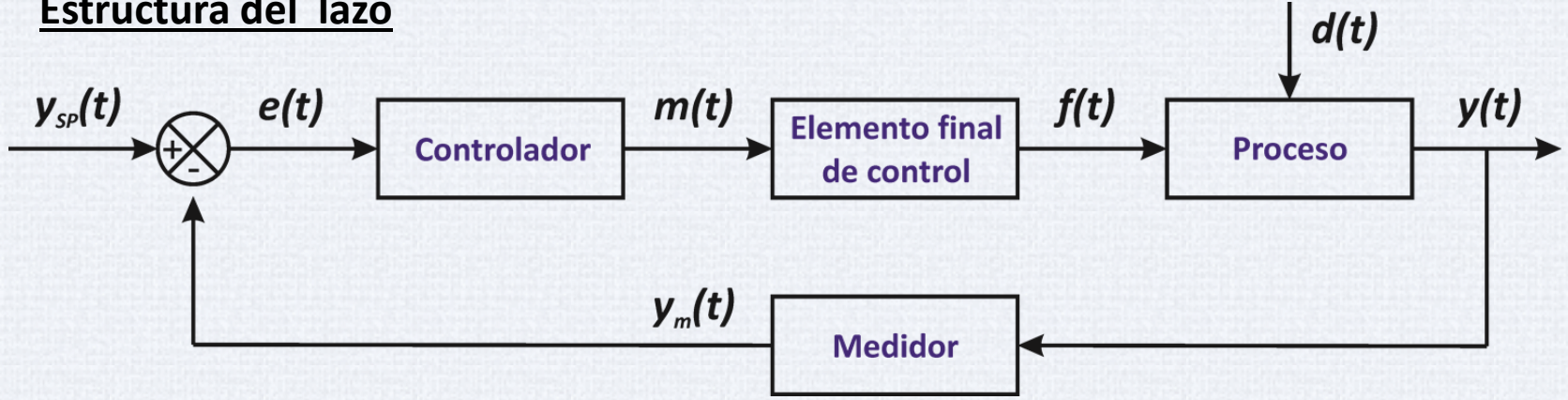
- 1- El proceso, afectado por la variable manipulada (f) y la perturbación (d), responde proporcionando un determinado valor para la variable controlada (y).
- 2 – El elemento de medida, interaccionando con el proceso extrae el valor de la variable controlada y la transmite hacia el controlador.
- 3 – Se compara el valor deseado (punto de consigna, y_{SP}) con el medido (valor actual, y_m) para la variable controlada para calcular el error (e , SP-PV), a partir del que se calcula la salida de control (m).
- 4 – La salida de control se alimenta al actuador que modifica la variable manipulada.

Descripción del bucle de control de realimentación

Lazo de control por realimentación (retroalimentación o *feedback*)

Objetivo Minimizar el error (diferencia entre la consigna y la variable controlada) para que su valor sea lo más próximo a cero.

Estructura del lazo



Variables que intervienen

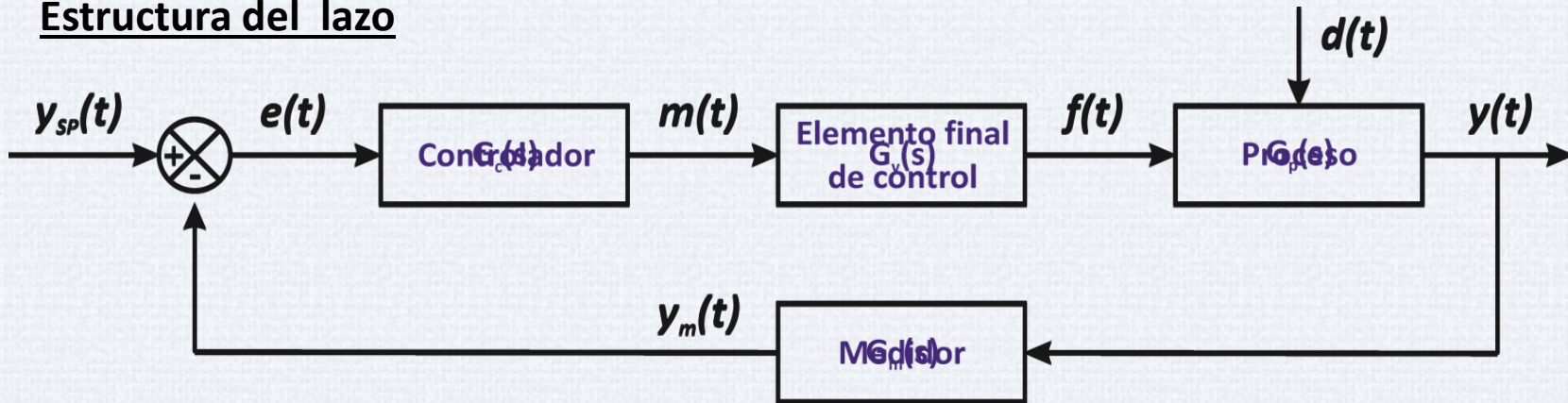
- $y_{sp}(t)$** Punto de consigna (set point – Valor deseado para la variable controlada)
- $y(t)$** Valor de la variable controlada. No es preciso conocer la perturbación del proceso.
- $y_m(t)$** Valor de la variable controlada (medida)
- $e(t)$** Valor calculado de la diferencia entre la consigna y la variable controlada
- $m(t)$** Señal de control (presión, velocidad, posición desviación (error) para iniciar la actuación.
- $f(t)$** Valor de la variable manipulada
- $d(t)$** Variable de perturbación

Descripción del bucle de control de realimentación

Lazo de control por realimentación (retroalimentación o *feedback*)

Objetivo Minimizar el error (diferencia entre la consigna y la variable controlada) para que su valor sea lo más próximo a cero.

Estructura del lazo



Características:

Estructura de Entrada-Salida: Los bloques que representan cada elemento del lazo se definen aprovechando la estructura entrada salida, lo que permite implementar las funciones de transferencia de los mismos.

$G_c(s)$ Función de transferencia del controlador

$G_v(s)$ Función de transferencia del elemento final de control

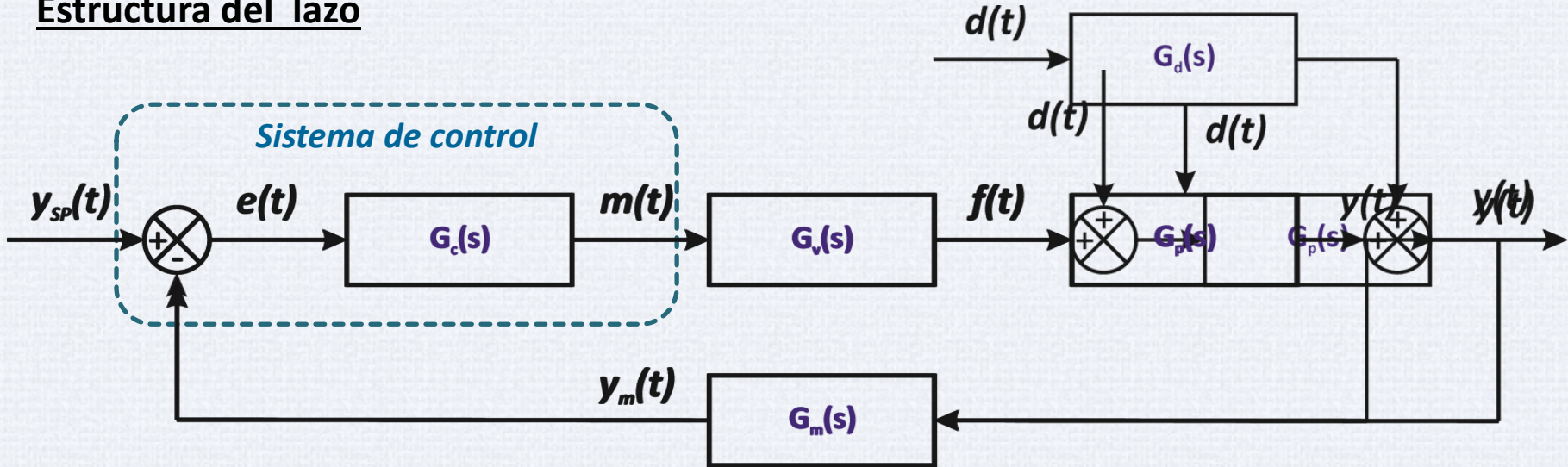
$G_p(t)$ Función de transferencia del proceso (habitualmente lineal: 1º o 2º orden)

$G_m(t)$ Función de transferencia del sensor o elemento de medida

Descripción del bucle de control de realimentación

Lazo de control por realimentación (retroalimentación o *feedback*)

Estructura del lazo



Arquitectura:

Estructura de Entrada-Salida: Los bloques que representan cada elemento del lazo se definen aprovechando la estructura entrada salida, lo que permite implementar las funciones de transferencia de los mismos.

$G_c(s)$ Función de transferencia del controlador

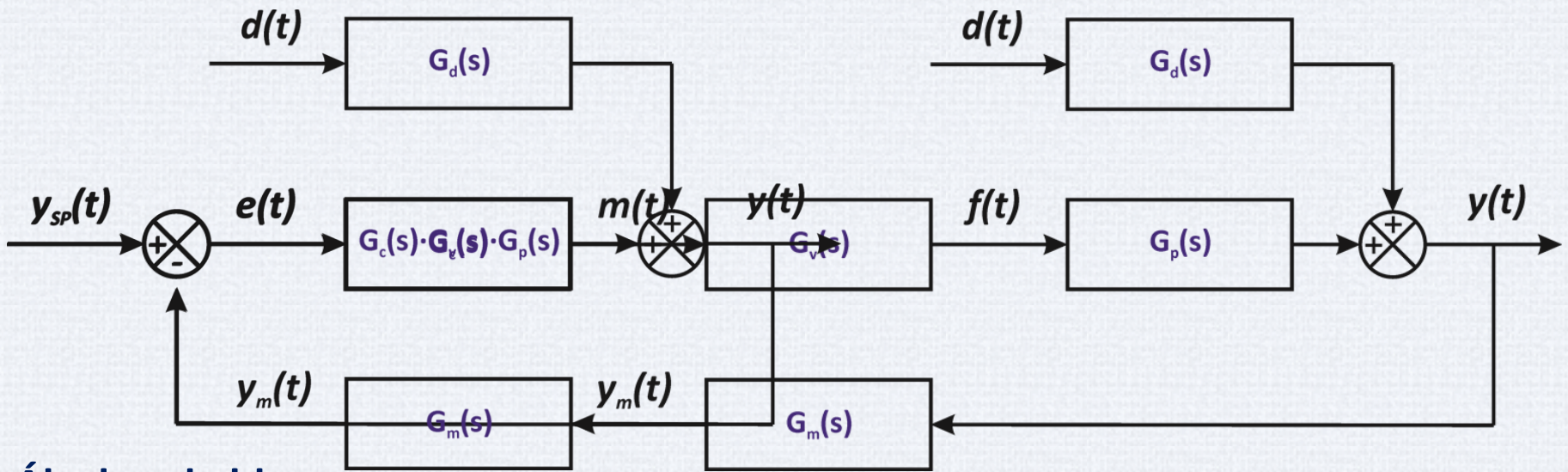
$G_v(s)$ Función de transferencia del elemento final de control

$G_p(s)$ Función de transferencia del proceso (habitualmente lineal: 1º o 2º orden)

$G_m(s)$ Función de transferencia del sensor o elemento de medida

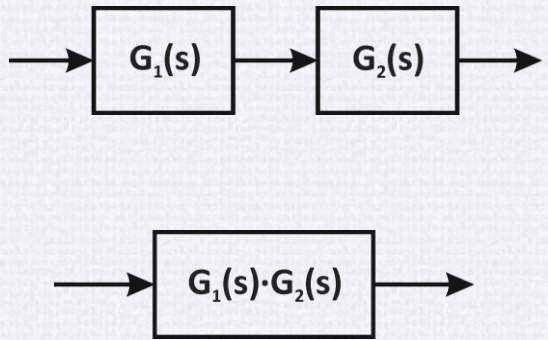
Descripción del bucle de control de realimentación

Lazo de control por realimentación (retroalimentación o *feedback*)

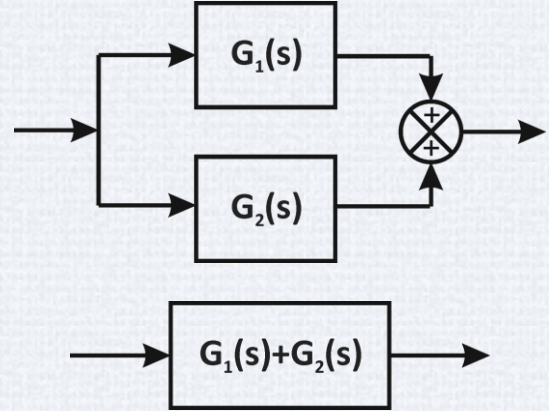


Álgebra de bloques

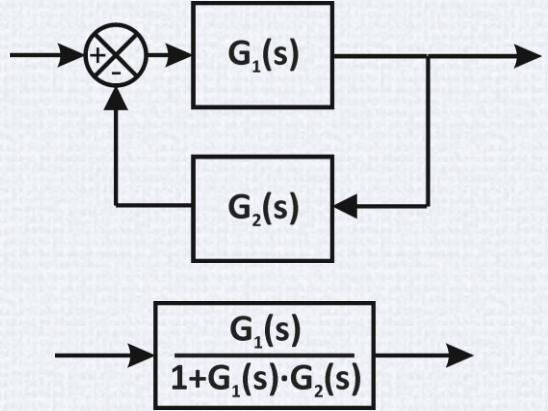
Serie



Paralelo

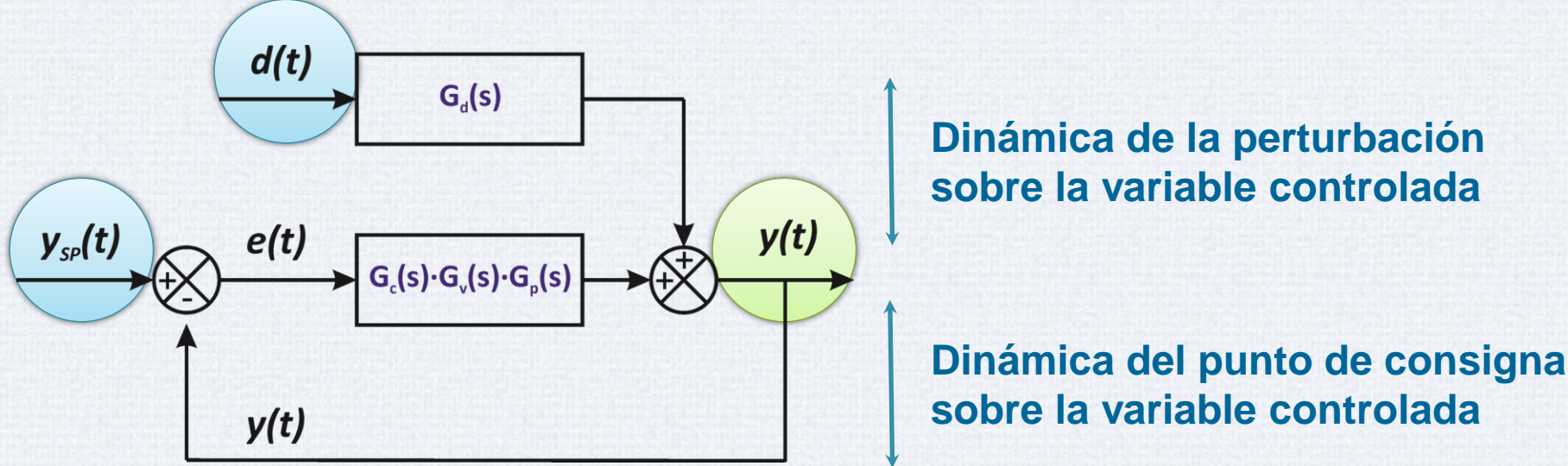


Realimentación



Descripción del bucle de control de realimentación

Lazo de control por realimentación (retroalimentación o *feedback*)



$$y(s) = G_C \cdot G_V \cdot G_P \cdot (y_{sp}(s) - y(s)) + G_D \cdot d(s)$$

$$y(s) = \frac{G_C \cdot G_V \cdot G_P}{1 + G_C \cdot G_V \cdot G_P} \cdot y_{sp}(s) + \frac{G_D}{1 + G_C \cdot G_V \cdot G_P} \cdot d(s)$$

Función de transferencia consigna sobre salida

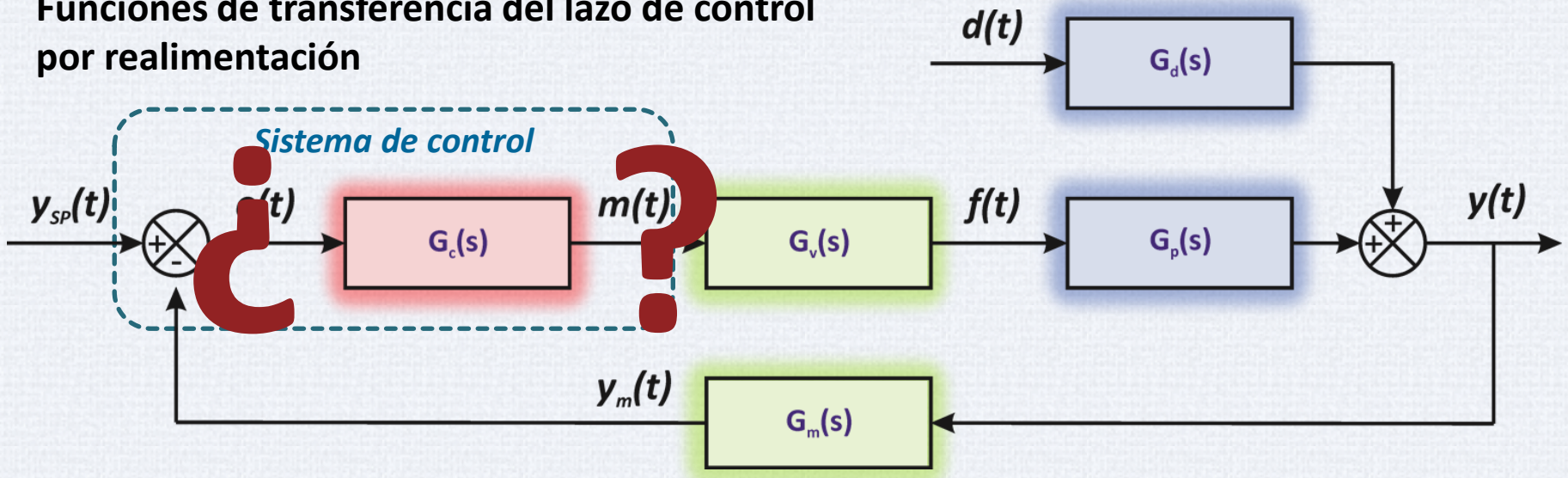
Función de transferencia perturbación sobre salida

Cálculo de la Variable Controlada en función del punto de consigna y de la variable de perturbación.

Descripción del bucle de control de realimentación

Lazo de control por realimentación (retroalimentación o *feedback*)

Funciones de transferencia del lazo de control por realimentación



Instantáneo

$$y(t) = K_p \cdot x(t)$$

$$G(s) = K_p$$

Tiempo muerto

$$y(t) = K_p \cdot x(t - \theta)$$

$$G(s) = K_p \cdot \exp(-\theta \cdot s)$$

Primer Orden

$$\tau \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_p \cdot x(t)$$

$$G(s) = \frac{K_p}{1 + \tau \cdot s}$$

Segundo Orden

$$\tau^2 \cdot \frac{d^2y(t)}{dt^2} + 2 \cdot \delta \cdot \tau \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_p \cdot x(t)$$

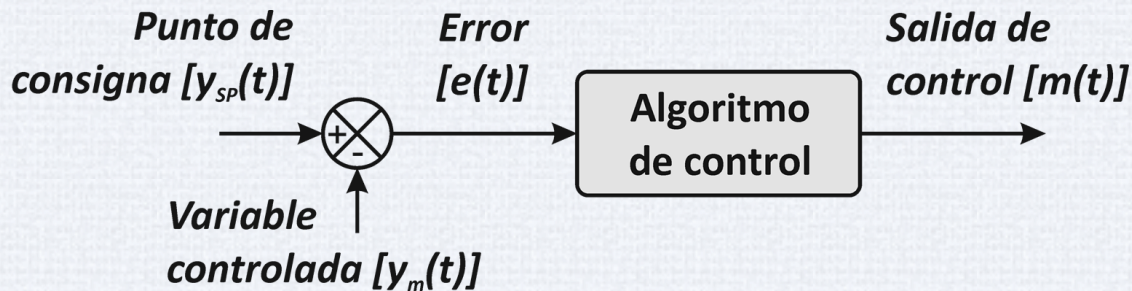
$$G(s) = \frac{K_p}{1 + 2 \cdot \delta \cdot \tau \cdot s + \tau^2 \cdot s^2}$$

La Función de Transferencia del Bloque de Control depende de la

ECUACIÓN o ALGORITMO DE CONTROL

EL ALGORITMO DE CONTROL

Ecuación o Algoritmo de Control



Cálculo de la salida de control (acción a ejecutar sobre el elemento final de control) **a partir del cálculo del error** (diferencia entre punto de consigna y valor de la variable a controlar).

$$m(t) = f(e(t))$$

Algoritmos de control más extendidos:

- Control Todo/Nada
- Control Proporcional
- Control Proporcional-Integral
- Control Proporcional-Integral-Derivativo

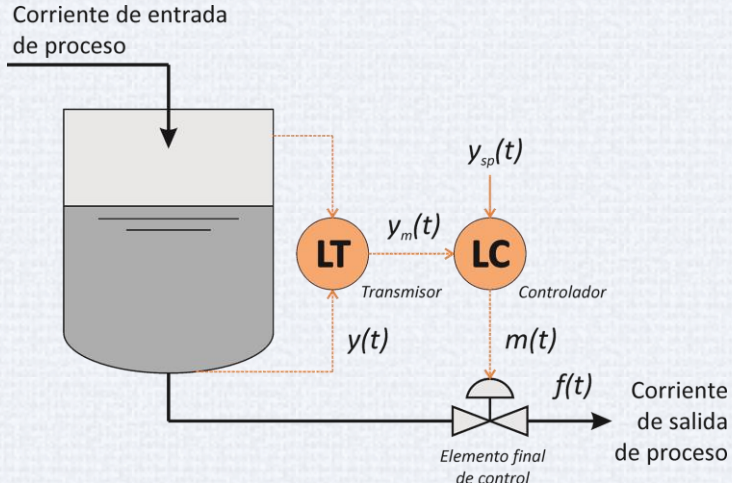
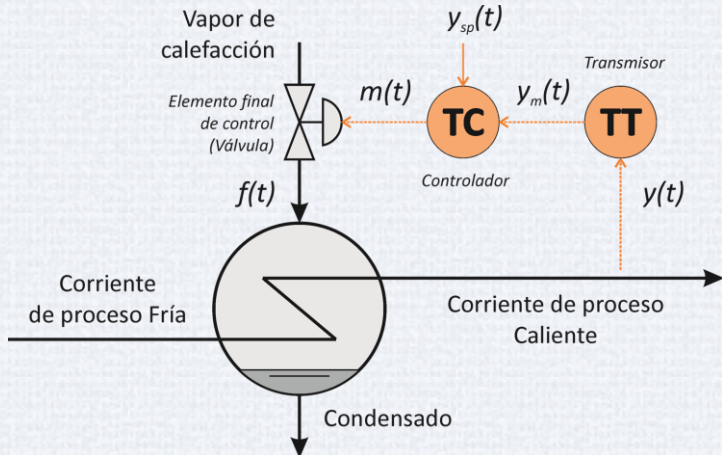
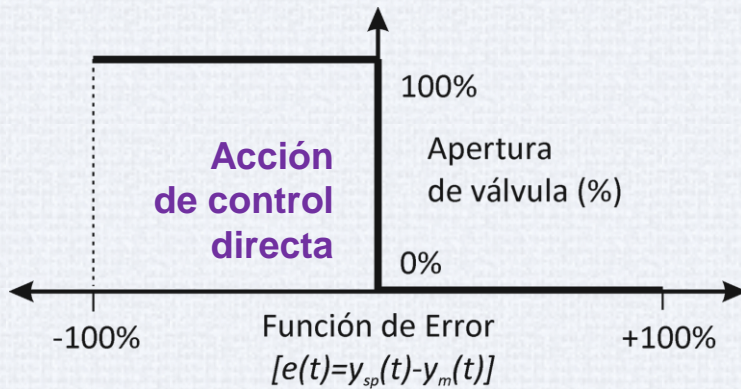
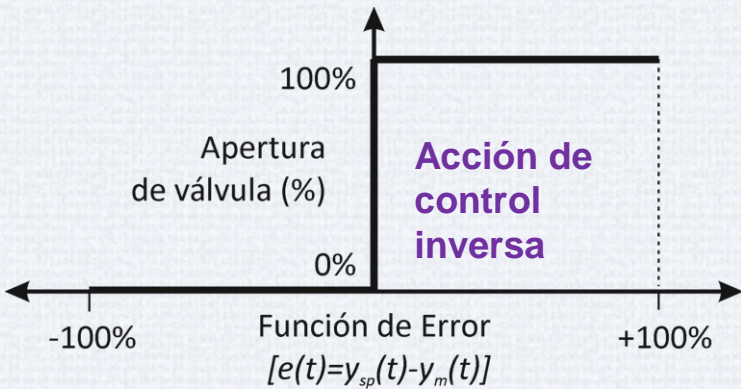
El algoritmo de control

CONTROL Todo/Nada (On/Off – Abierto/Cerrado)

Definición: Control de dos posiciones

Algoritmo de Control

$$m(t) = \begin{cases} \text{si } PV > SP & 0\% & \text{ó} & 100\% \\ \text{si } PV < SP & 100\% & & 0\% \end{cases}$$



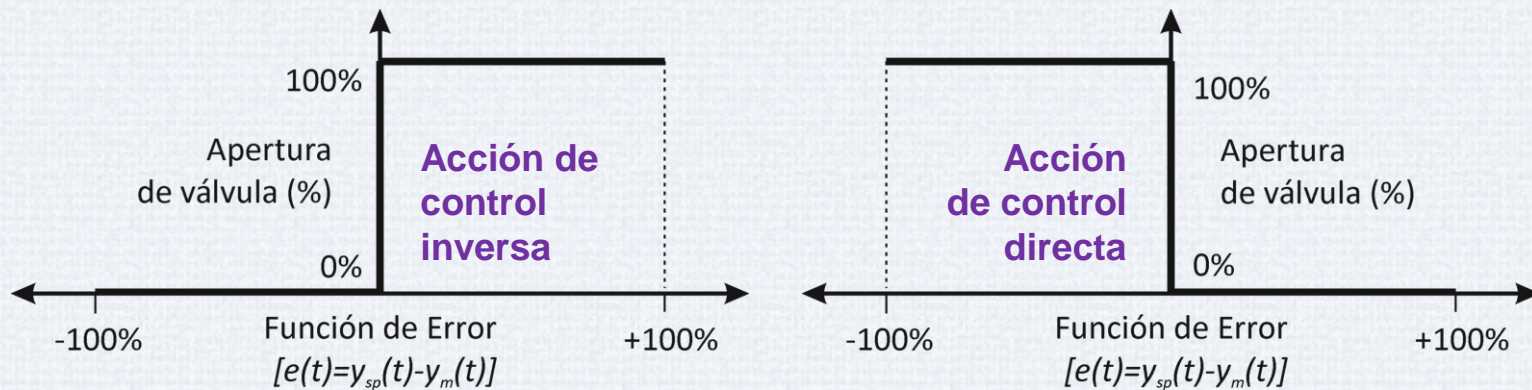
El algoritmo de control

CONTROL Todo/Nada (On/Off – Abierto/Cerrado)

Definición: Control de dos posiciones

Algoritmo de Control

$$m(t) = \begin{cases} \text{si } PV > SP & 0\% & \text{ó} & 100\% \\ \text{si } PV < SP & 100\% & & 0\% \end{cases}$$

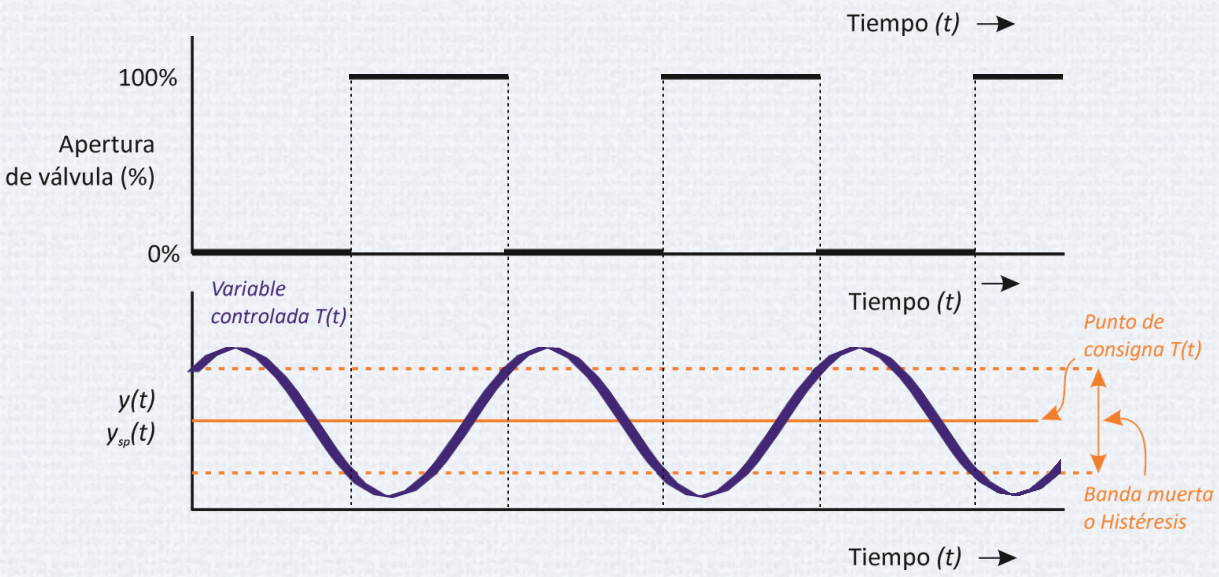
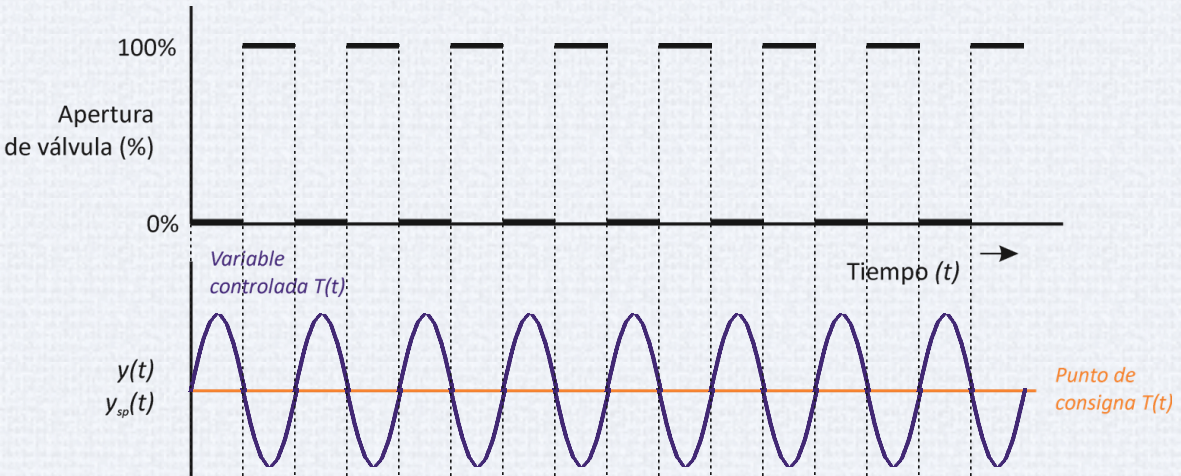


Características básicas:

- 1- Sistema de control muy barato.** El elemento final de control solamente ocupa dos posiciones. Interruptores o conmutadores. Ejemplo: Termostatos
- 2- Aplicables a sistemas de control con grandes capacitancias o resistencias donde el control fino no sea un requisito imprescindible.** Ejemplo: Control de temperatura ambiente
- 3- Elevado desgaste del elemento final de control.** Continua actuación entorno al punto de consigna

El algoritmo de control

CONTROL Todo/Nada (On/Off – Abierto/Cerrado)



El elemento final de control conmuta con muy elevada frecuencia – elevado desgaste en piezas mecánicas.



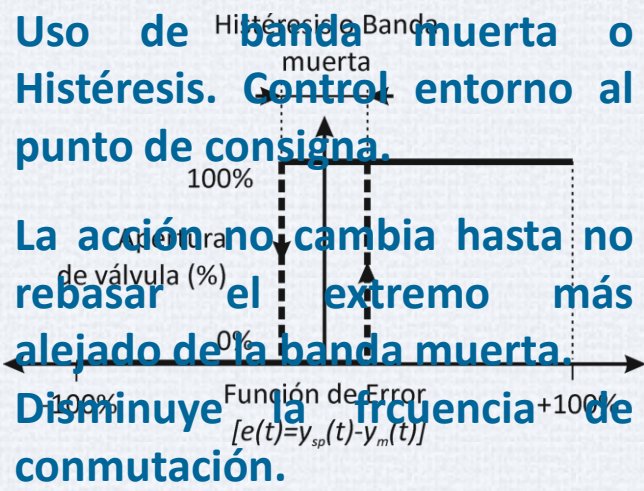
Necesidad de limitar la frecuencia de conmutación.



Uso de banda muerta o Histéresis. Control entorno al punto de consigna.

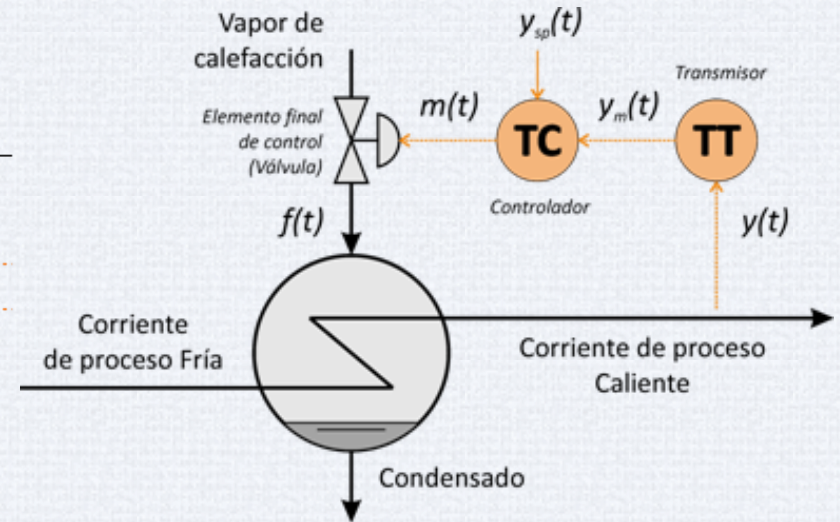
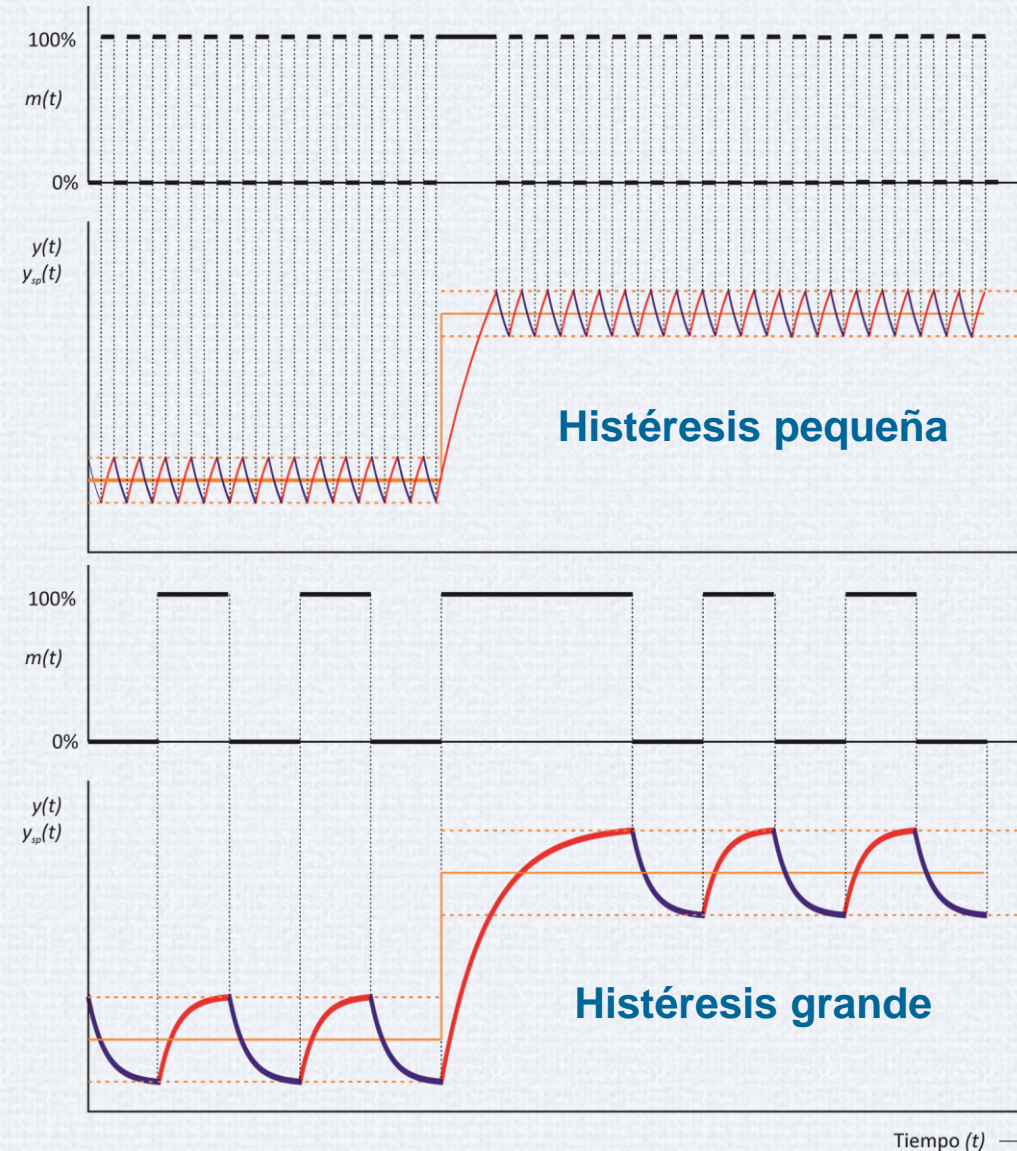
La acción no cambia hasta no rebasar el extremo más alejado de la banda muerta.

Disminuye la frecuencia de conmutación.



El algoritmo de control

CONTROL Todo/Nada (On/Off – Abierto/Cerrado)



La extensión de la histéresis afecta a la frecuencia de la conmutación y a la fineza del ajuste.

Mayor histéresis implica menor frecuencia de conmutación, pero también menor fineza en el control.

El algoritmo de control

CONTROL PROPORCIONAL

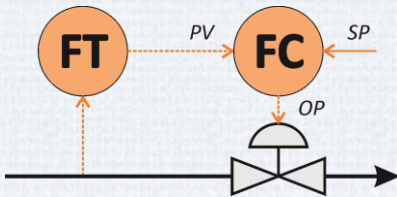
Definición: La salida de control es proporcional al error en todo momento.

Algoritmo de Control

$$m = \bar{m} \pm K_C \cdot (y_{sp}(t) - y_m(t)) = \bar{m} \pm K_C \cdot e(t)$$

Parámetros:

m Señal de Bias o de *reset*. Salida de control cuando el error es nulo. Normalmente suele corresponder a la señal que debe proporcionarse al elemento final de control para que este proporcione un valor de la variable manipulada igual al establecido por el diseño en régimen estacionario de la operación.



Lazo de control de caudal volumétrico:

Si el error es cero ($SP=PV$), la salida de control (OP) no puede ser nula, puesto que el caudal sería nulo.

El algoritmo de control

CONTROL PROPORCIONAL

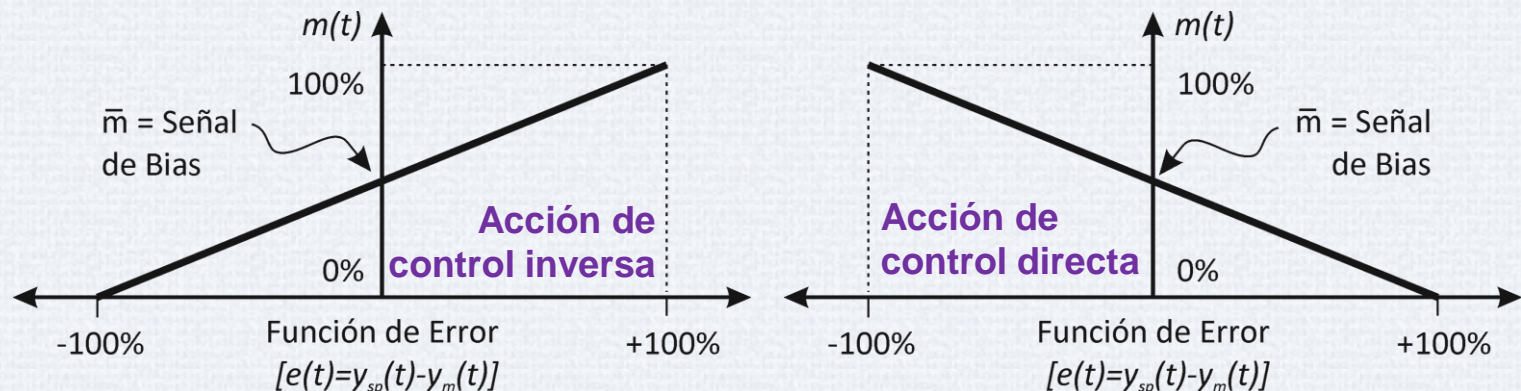
Definición: La salida de control es proporcional al error en todo momento.

Algoritmo de Control

$$m = \bar{m} \pm K_C \cdot (y_{sp}(t) - y_m(t)) = \bar{m} \pm K_C \cdot e(t)$$

Parámetros:

Kc Ganancia del controlador. Constante de proporcionalidad entre el error y la salida de control. Su signo condiciona el tipo de acción (directa/inversa)



El algoritmo de control

CONTROL PROPORCIONAL

Definición: La salida de control es proporcional al error en todo momento.

Algoritmo de Control

$$m = \bar{m} \pm K_C \cdot (y_{sp}(t) - y_m(t)) = \bar{m} \pm K_C \cdot e(t)$$

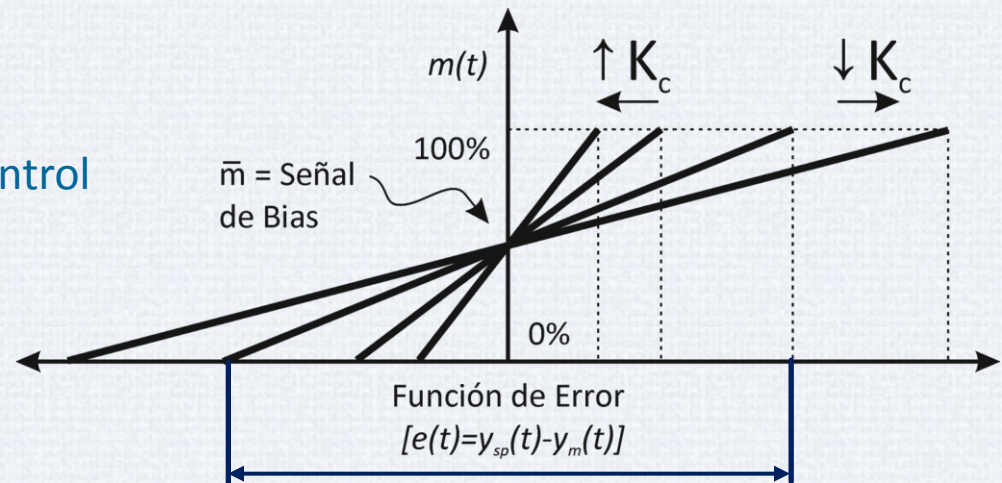
Parámetros:

K_C Ganancia del controlador. La Intensidad de la acción depende del valor de K_C .

Cuanto mayor K_C :

- Mayor velocidad del controlador
- Para un mismo error, la salida de control es más intensa.

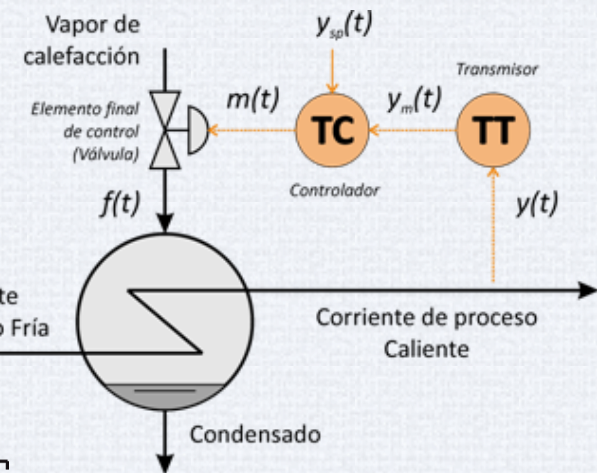
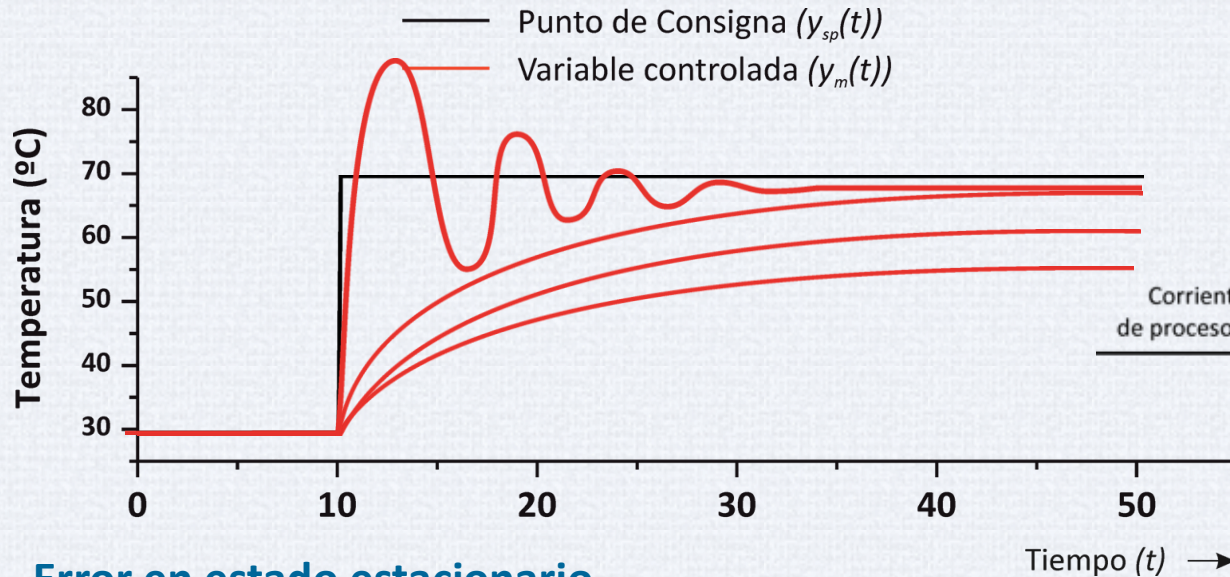
$$BP = \frac{100}{K_C}$$



BP Banda Proporcional. Es otra forma de expresar la ganancia del controlador. Corresponde al error necesario para producir una salida de control del 100%.

El algoritmo de control

CONTROL PROPORCIONAL



Error en estado estacionario

La acción proporcional carece de términos dinámicos (modelo instantáneo)

$$m = \bar{m} \pm K_C \cdot e(t) \quad G_C(s) = K_C$$

Mayor ganancia del controlador, menor error en estado estacionario, pero también mayor inestabilidad.

Solución: Considerar el error acumulado en el tiempo: **Acción Integral**

El algoritmo de control

CONTROL INTEGRAL

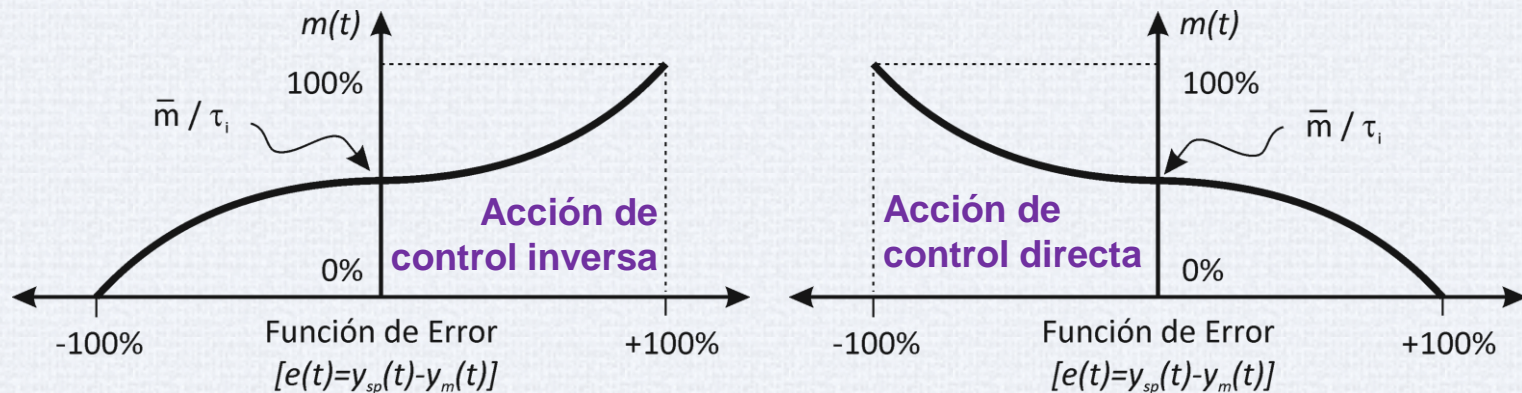
Definición: La salida de control es proporcional a la integral del error.

Algoritmo de Control

$$m = \bar{m} \pm \frac{K_C}{\tau_i} \cdot \int_0^t y_{sp}(t) - y_m(t) dt = \bar{m} \pm \frac{K_C}{\tau_i} \cdot \int_0^t e(t) dt$$

Parámetros:

τ_i **Tiempo integral.** Tiempo que se precisa para que la salida de control sufra un cambio igual al la magnitud del error producido



Normalmente no se usa por sí misma (aunque funcionaría), sino en conjunción con la acción proporcional

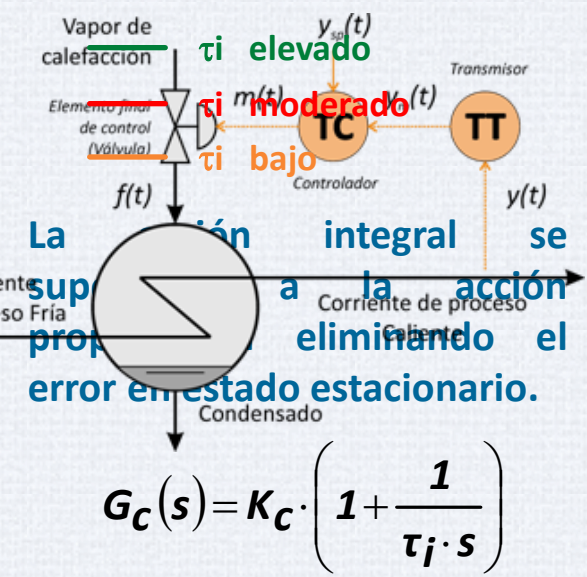
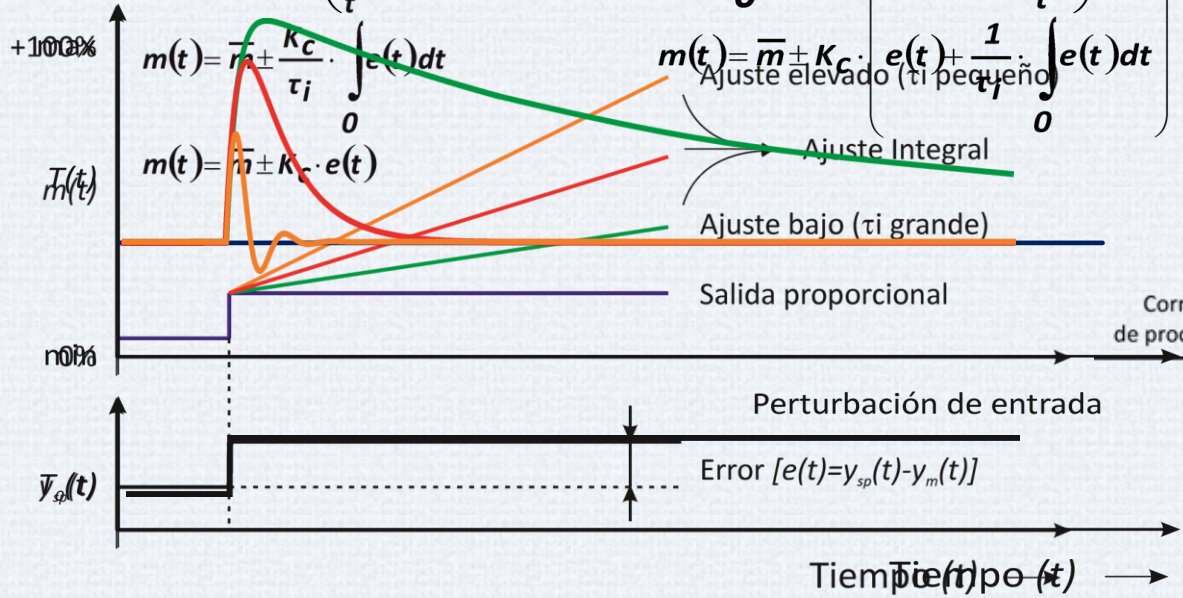
El algoritmo de control

CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL

Definición: La salida de control es proporcional al error más la suma del error

Algoritmo de Control

$$m = \bar{m} \pm K_C \cdot \left(y_{sp}(t) - y_m(t) \right) + \frac{1}{\tau_i} \cdot \int_0^t y_{sp}(t) - y_m(t) dt = \bar{m} \pm K_C \cdot \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \cdot \int_0^t e(t) dt \right)$$



La acción integral se suma a la acción proporcional eliminando el error en estado estacionario.

La acción Integral introduce cierta inestabilidad (oscilaciones)

Solución: Considerar la trayectoria del error en el tiempo: **Acción derivativa**

CONTROL DERIVATIVO

Definición: La salida de control es proporcional a la variación del error en cada instante.

Algoritmo de Control

$$m(t) = \bar{m} \pm K_c \cdot \tau_d \cdot \frac{d(y_{sp}(t) - y_m(t))}{dt} \qquad m(t) = \bar{m} \pm K_c \cdot \tau_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Tiene **carácter anticipativo** (no predictivo) pues lo que evalúa es la trayectoria del error (su velocidad de crecimiento o disminución) y por tanto la salida del control es proporcional a esa velocidad de crecimiento

La acción de control derivativa **no puede usarse por sí sola**, siempre en combinación con la acción de control proporcional (PD) o proporcional + integral (PID).

La acción derivativa se utiliza en conjunción con la proporcional (Controladores PD) en **procesos con grandes retardos** (inercia) como el control de temperatura.

No es adecuada para el control de variables de respuesta rápida (caudal, presión) y señales con ruido (oscilaciones de elevada frecuencia – la derivada es tanto más intensa) pues provoca la desestabilización del lazo.

CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO

Definición: La salida de control es proporcional al error, su acumulación en el tiempo y a la variación que éste experimenta en cada instante.

Algoritmo de Control

$$m(t) = \bar{m} \pm K_c \cdot \left((y_{sp}(t) - y_m(t)) + \frac{1}{\tau_i} \cdot \int_0^t (y_{sp}(t) - y_m(t)) dt + \tau_d \cdot \frac{d(y_{sp}(t) - y_m(t))}{dt} \right)$$
$$m(t) = \bar{m} \pm K_c \cdot \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \cdot \int_0^t e(t) dt + \tau_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right)$$

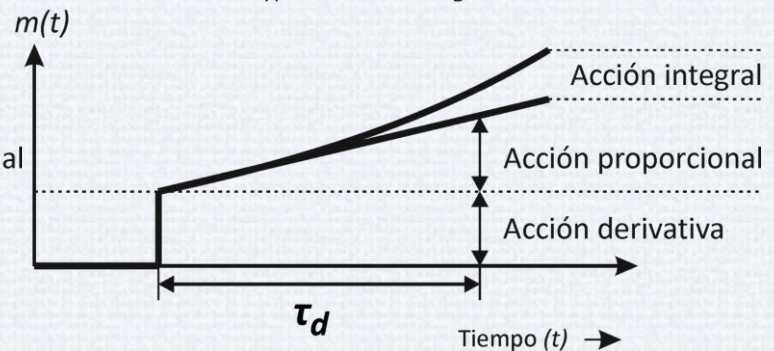
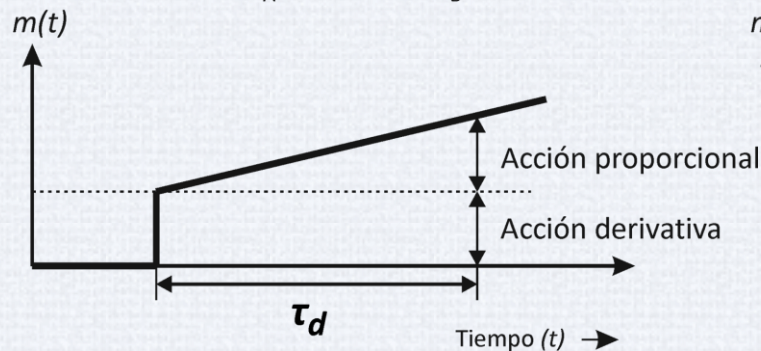
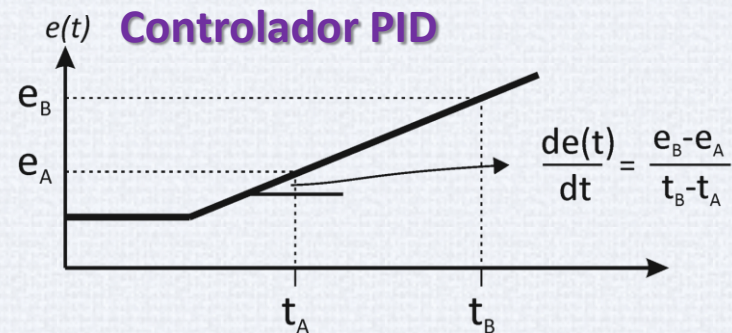
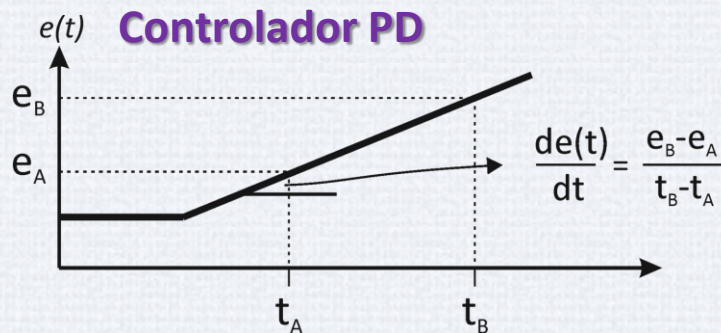
Los controladores PID son capaces de hacer frente a perturbaciones de carga y de punto de consigna. Son indicados para procesos donde no sea tolerable el error en el estado estacionario y se precise estabilidad en la regulación.

El algoritmo de control PID es el más empleado, si bien existen variantes con bandas muertas (variables rápidas o con mucho ruido) o no lineales (la ganancia varía con el error).

CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO

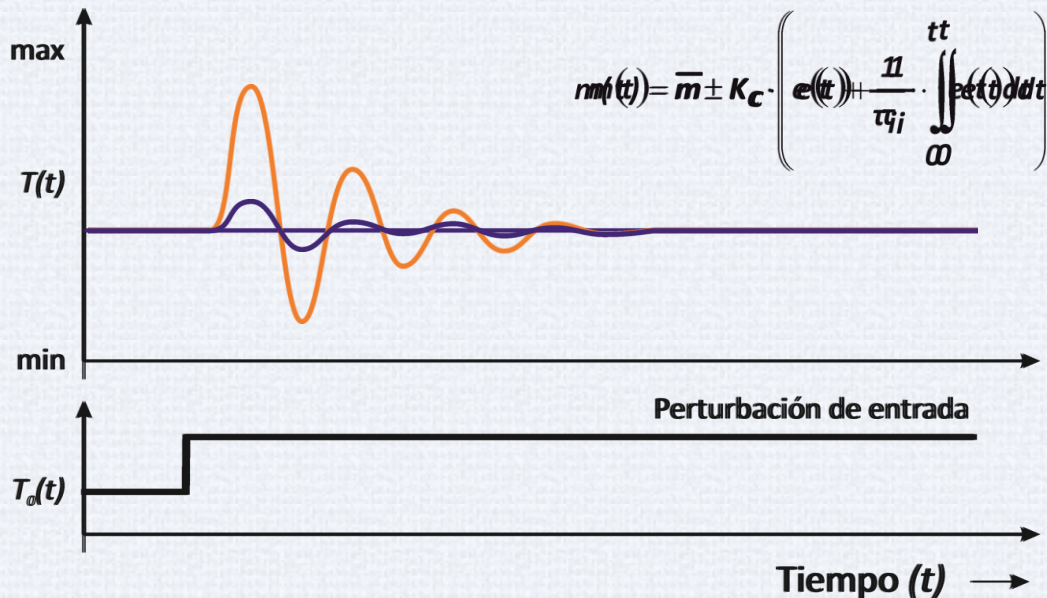
Parámetros:

τ_d **Tiempo derivativo.** Tiempo necesario para que el efecto de acción de control proporcional avance hasta igualar a la diferencial (si la velocidad de crecimiento del error es constante).

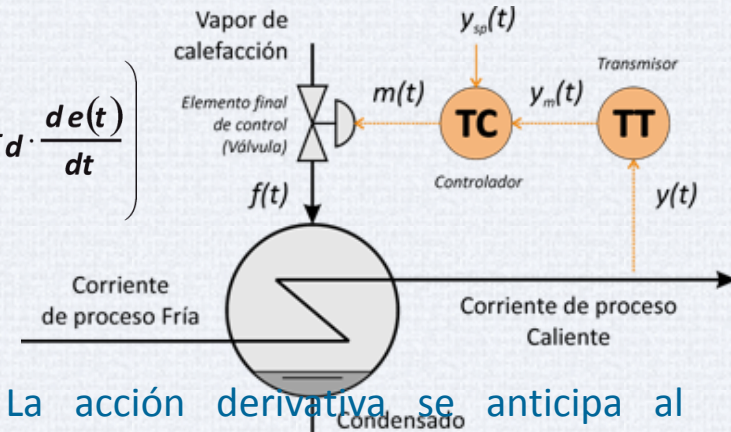


El algoritmo de control

CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVATIVO



$$m(t) = \bar{m} \pm K_c \cdot \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \cdot \int_0^t e(t) dt + \tau_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right)$$



La acción derivativa se anticipa al crecimiento (en términos absolutos) del error, lo que dota de estabilidad al sistema reduciendo la oscilación (acción diferencial).

$$m(t) = \bar{m} \pm K_c \cdot \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \cdot \int_0^t e(t) dt + \tau_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right)$$

$$G_c(s) = K_c \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_i \cdot s} + \tau_d \cdot s \right)$$

El algoritmo de control

RESUMEN

Modelo Dinámico

Función de Transferencia

Proporcional

$$m(t) = \bar{m} \pm K_C \cdot e(t)$$

$$G_C(s) = K_C$$

Proporcional
Integral

$$m(t) = \bar{m} \pm K_C \cdot \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \cdot \int_0^t e(t) dt \right)$$

$$G_C(s) = K_C \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_i \cdot s} \right)$$

Proporcional
Integral
Derivativo

$$m(t) = \bar{m} \pm K_C \cdot \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \cdot \int_0^t e(t) dt + \tau_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \right)$$

$$G_C(s) = K_C \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_i \cdot s} + \tau_d \cdot s \right)$$

Parámetro	Velocidad	Estabilidad
Ganancia (Kc)	Aumenta	Disminuye
Tiempo Integral (τ_i)	Disminuye	Aumenta
Tiempo Derivativo (τ_d)	Aumenta	---

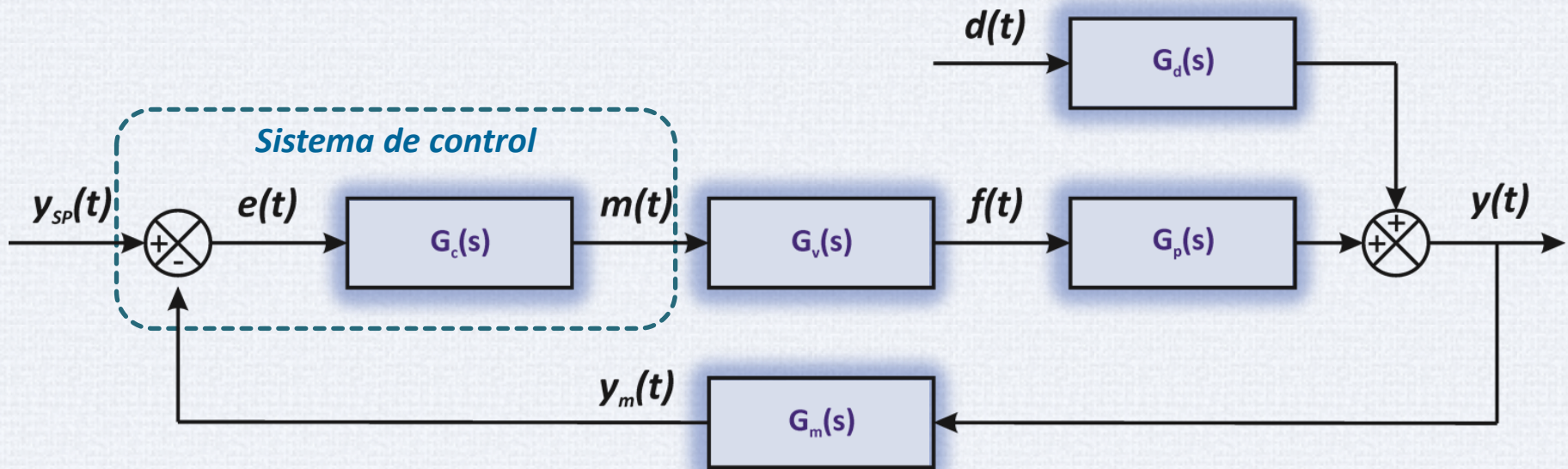
SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES PID

SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES DE REALIMENTACIÓN PID

Sintonización

La **Sintonización de controladores PID** consiste en la determinación de los valores de los parámetros característicos del algoritmo de control PID.

Los valores óptimos dependen del proceso al que el controlador esté acoplado.



$$y_m(s) = \frac{G_c \cdot G_v \cdot G_p}{1 + G_c \cdot G_v \cdot G_p} \cdot y_{sp}(s) + \frac{G_d}{1 + G_c \cdot G_v \cdot G_p} \cdot d(s)$$

**Función de transferencia
consigna sobre salida**

**Función de transferencia
perturbación sobre salida**

MÉTODO DE TANTEOS

La acción proporcional es aquella principal en el control PID, por lo que, en tanteos, se inicia la búsqueda a partir de controladores proporcionales, con acciones integrales y derivativas en el mínimo.

La ganancia proporcional se va elevando progresivamente de acuerdo a una progresión aritmética de 2. El valor óptimo es el que proporciona un ratio de decaimiento (ratio de sobrepasaje entre primera y segunda oscilación) de 0,25.

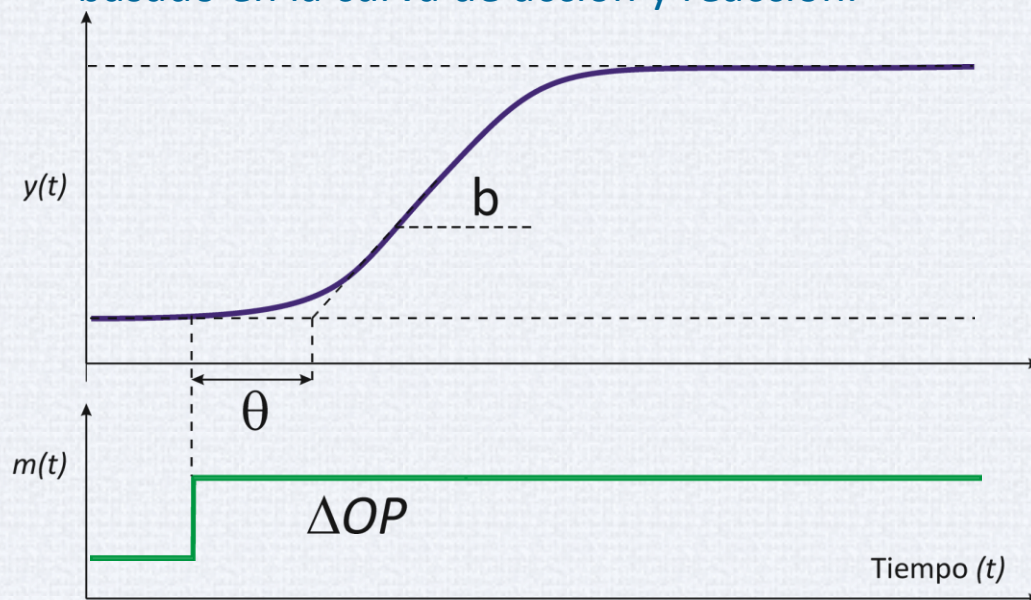
MÉTODO DE TANTEOS (II)

No se trata de un método de ajuste como tal, sino de partir de unos valores preestablecidos, dependiendo el tipo de proceso y variable a la que se aplica el lazo de control por realimentación. Desde ese punto, los parámetros se ajustan manualmente para lograr un mejor resultado.

VARIABLE CONTROLADA	CAUDAL	NIVEL	PRES. (vap)	PRES. (Liq)	TEMP.
Ganancia (K_c)	0,40-0,65	2-20	2-10	0,5-2,0	2-10
Tiempo Integral (τ_i)	0,1' (6'')	1'-5'	2'-10'	6''-15''	2'-10'
Tiempo Derivativo (τ_d)	---	---	---		0-5'

MÉTODO DE ZIEGLER-NICHOLS (Lazo abierto)

Método desarrollado por Ziegler y Nichols en 1942 (doc. de información adicional). Está basado en la curva de acción y reacción.



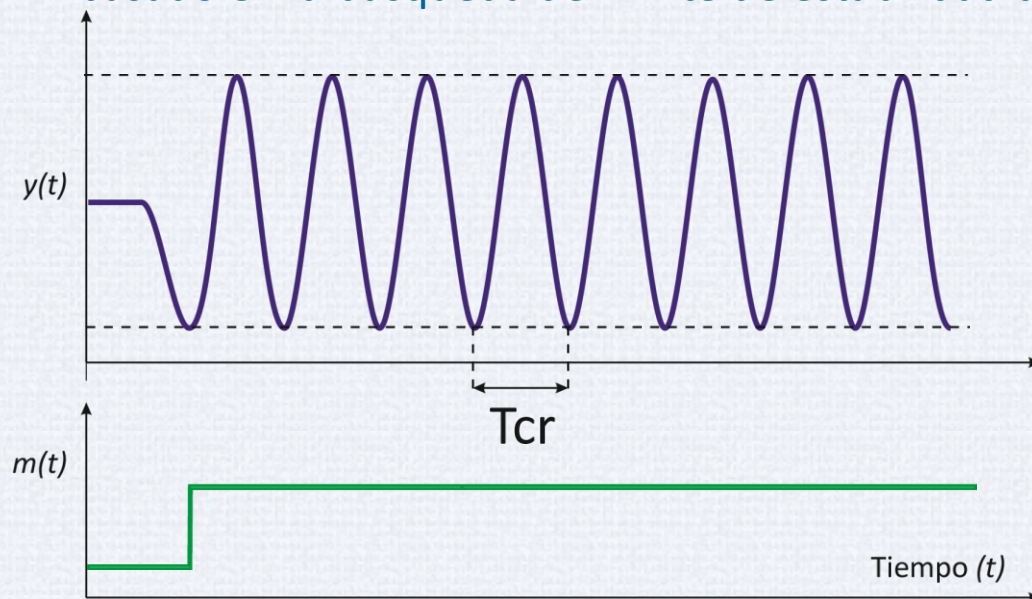
La curva se obtiene introduciendo una perturbación en la variable de entrada al proceso (salida de control) en forma de escalón y se monitoriza la salida o respuesta del sistema (variable controlada).

El método se basa en ajustar la dinámica del proceso a un modelo de primer orden de retardo con tiempo muerto.

Tipo de controlador	Ganancia	T. Integral	T. Derivativo
Proporcional	b/θ	∞	0
Proporcional-Integral	$0,9 \cdot b/\theta$	$\theta/0,3$	0
Proporcional-Integral-derivativo	$1,2 \cdot \Delta OP / (b \cdot \theta)$	$2 \cdot \theta$	$0,5 \cdot \theta$

MÉTODO DE ZIEGLER-NICHOLS (Lazo cerrado)

Método desarrollado por Ziegler y Nichols en 1942 (doc. de información adicional). Está basado en la búsqueda del límite de estabilidad del lazo.



El ensayo consiste en operar con el controlador en lazo cerrado con un algoritmo proporcional, ir elevando la ganancia progresivamente e introducir perturbaciones en escalón en el punto de consigna, hasta conseguir una respuesta oscilante sostenida de amplitud constante. En ese momento la ganancia se denomina crítica.

Tipo de controlador	Ganancia	T. Integral	T. Derivativo
Proporcional	$0,50 \cdot K_{cr}$	∞	0
Proporcional-Integral	$0,45 \cdot K_{cr}$	$1/(1,2 \cdot T_{cr})$	0
Proporcional-Integral-derivativo	$0,60 \cdot K_{cr}$	$0,5 \cdot T_{cr}$	$0,125 \cdot T_{cr}$

- La estructura del lazo de realimentación está basado en alimentar información de entrada a una secuencia de comparación – orden de control – actuación obteniendo dicha información de la salida (respuesta del proceso).
- El controlador por realimentación puede ser implementado sobre cualquier tipo de proceso, puesto que su funcionamiento es independiente de la perturbación y de la dinámica que siga la variable controlada respecto de ésta.
- El algoritmo de control es la ecuación que permite obtener la orden o salida de control en función del error que se produce en cada instante.
- Existen distintas formas básicas de algoritmo de control: Todo-nada y las resultantes de la combinación de la acción proporcional, integral y derivativa.
- El ajuste de los parámetros básicos del controlador (K_c , t_i , y t_d) dependen de la naturaleza del proceso y sus características principales. Su ajuste es imprescindible para que el lazo de control se acople correctamente al proceso.