TEMA 7. LAZOS DE CONTROL

ACCIONES DE CONTROL.
Tipos de acción.
Elemento Final de control

INTRODUCCIÓN

¿QUE ES EL CONTROL?

Procurar, mediante un determinado algoritmo, que una determinada variable del proceso, se mantenga igual a un determinado valor, modificando para ello el valor de otra variable que le afecta. En definitiva, se trata de hacer posible que una planta industrial se puedan mantener de una forma constante unos valores de trabajo (temperatura, nivel, presión, composición, caudal, pH, etc…).

¿POR QUÉ CONTROLAR?

Cualquier planta de producción, y en concreto, cualquier planta química, debe ser capaz de operar permanentemente en unas determinadas condiciones. Existen tres razones principales para esto:

- SEGURIDAD
- OPERATIVIDAD
- ECONOMÍA

INTRODUCCIÓN

SEGURIDAD: la seguridad de las personas y equipos, así como las limitaciones medioambientales, deben de estar garantizadas.

OPERATIVIDAD: Para que determinadas reacciones u operaciones sean llevadas a cabo, es preciso que se cumplan ciertas condiciones (caudales, temperaturas, presiones, etc…).

Debe de ser posible para la planta química en que se lleven a cabo, asegurar el cumplimiento.

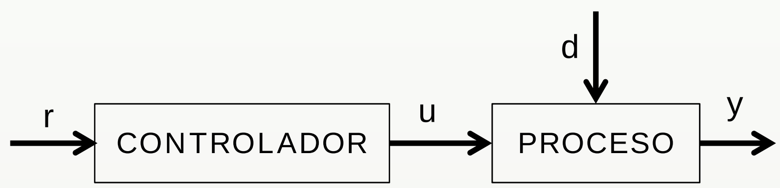
ECONOMÍA: Las plantas de proceso químico son caras, y tiene como finalidad ganar dinero. Para que los productos finales puedan entrar en el mercado, es preciso que se cumplan los requisitos de pureza necesaria, ya que sino el producto no será vendible.

Por otro lado, la obtención de una pureza excesiva supondrá unos costes de producción innecesarios.

INTRODUCCIÓN

LAZO ABIERTO – LAZO CERRADO

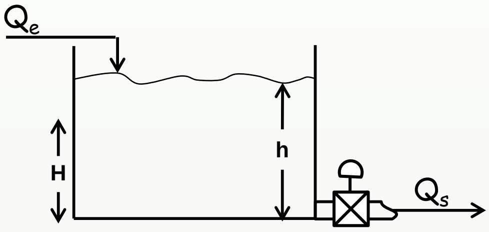
Lazo abierto No se realimenta la información del proceso al controlador, en consecuencia la acción correctora no conduce a un cambio en la variable manipulada



u: variable de control o variable manipulada
r: variable referencia o consigna
d: señal de alteración
y: variable controlada (salida del proceso)

INTRODUCCIÓN

Ejemplo: tanque de almacenamiento



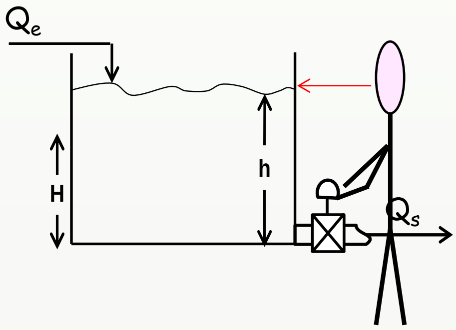
- Tanque al que entra un caudal Q_e y sale un caudal Q_s. En estado estacionario $Q_e = Q_s$ y el nivel en el tanque es h
- Conocidas los parámetros del sistema (densidad del fluido, superficie tanque, características de válvula...) el nivel será h

SISTEMA EN LAZO ABIERTO

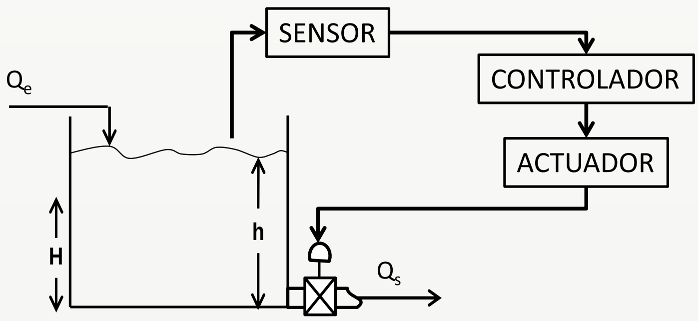
- Objetivo de control: el nivel del tanque en estado estacionario sea H
- Calcular Q_e para que h = H
- Problema: ¿qué ocurre si hay perturbaciones en Q_e?

Ejemplos: Tanque de almacenamiento, calentador continuo de agua

<u>Lazo cerrado</u> Control por retroalimentación. La salida del controlador es la calculada en función de la información recibida del proceso y la ley de control implementada



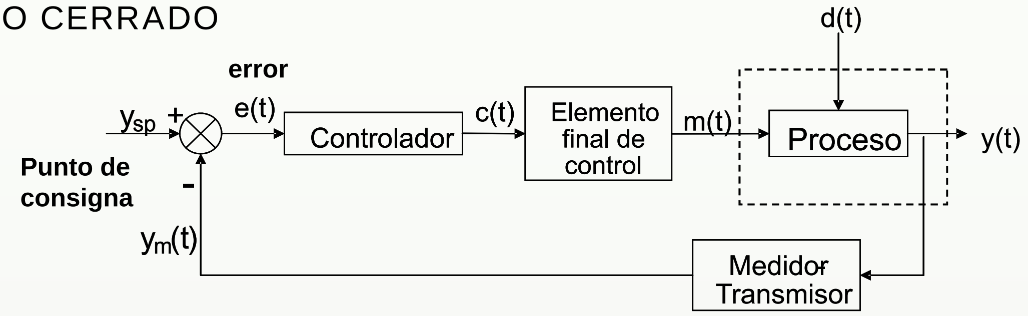
OPERADOR (control manual):
h>H abre válvula
h < H cierra válvula
h = H no hace nada



CONTROL AUTOMÁTICO
- elemento sensor – transmisor
- elemento controlador
- elemento actuador

PROCESO CONTROLADO EN REALIMENTACIÓN

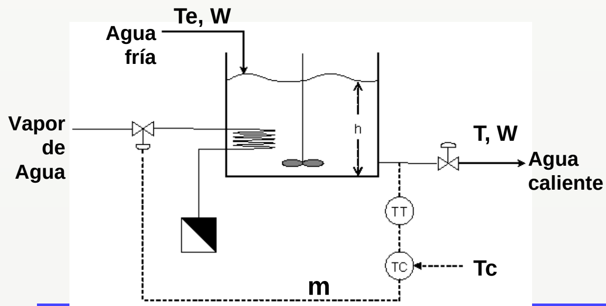
LAZO CERRADO



y_{sp}: valor deseado (pto. consigna)
e(t): señal de error
c(t): salida del controlador
m(t): variable manipulada
d(t): señal de alteración
y(t): variable controlada

$$e(t) = y_{sp} - y(t)$$

$$e = Tc - T$$



VARIABLES DE UN LAZO DE CONTROL:

Asociadas con un sistema de control hay una serie de variables de diferentes tipos.

- **Variable controlada**. Esta es la variable principal del sistema y la que se desea regular.
- **Setpoint o punto de consigna**. valor deseado para la variable controlada. El objeto del control es mantener la variable controlada en el setpoint.
- **Variables manipuladas**. Variable que alterar o ajustar para compensar o corregir el efecto de la perturbación.
- **Variable perturbación**. Variables externas del sistema de control que afectan a las variables controladas.

INTRODUCCIÓN

-Perturbaciones:

En el diseño de un control hay que tener en cuenta del tipo de perturbación y su intensidad (y su naturaleza).

Puede existir perturbaciones de caudal y hay que analizar con que frecuencia.

Si la frecuencia es cada 3 minutos habrá que controlarla.

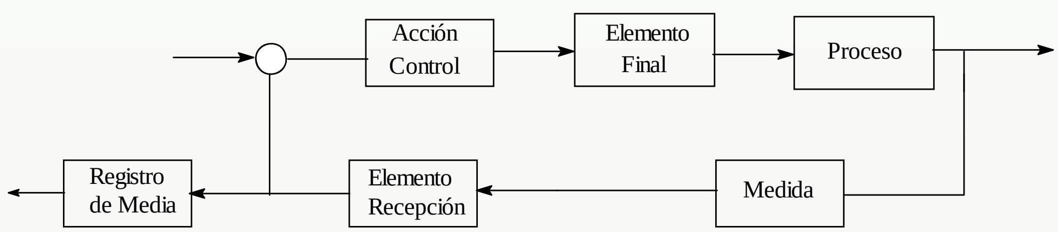
-Interacciones:

Interacciones entre lazos, también son importantes. Si manipula una variable quizá estoy influyendo sobre otras más lejanas.

- Estabilidad

INTRODUCCIÓN

ANALISIS DE LOS SISTEMAS DE LAZO CERRADO

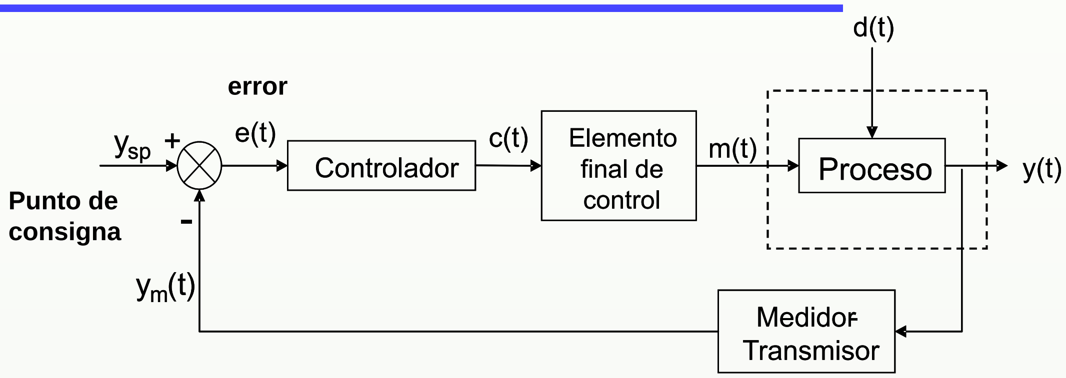


-Clasificación de Controladores:

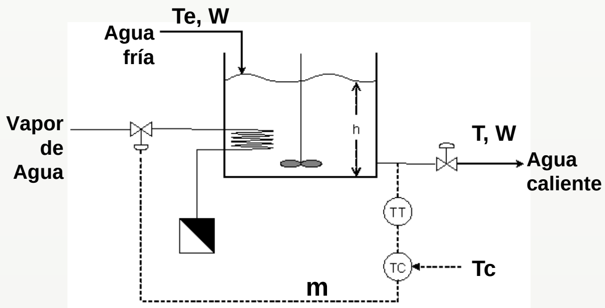
-Según la fuente de energía que genera la acción de control

- Según la acción de control que generan los controladores

Control Lazo cerrado



y_{sp}: valor deseado (pto. consigna)
e(t): señal de error
c(t): salida del controlador
m(t): variable manipulada
d(t): señal de alteración
y(t): variable controlada



$$e(t) = y_{sp} - y(t)$$

$$e = Tc - T$$

Control Lazo cerrado

ELEMENTOS DEL LAZO DE CONTROL:

- Sensor. Elemento primario de mediada. Detecta el valor de la variable proceso a controlar produciendo un efecto cuya magnitud está relacionada con la variable del proceso.
- Transmisor. Convierte la señal física procedente del elemento de medida primario en una señal estándar que puede ser transmitida a larga distancia
- Controlador. La señal estándar recibida se compara con el punto de consigna determinando el error. De acuerdo con el algoritmo de control produce otra señal que envía al elemento.
- Elemento final de control. Elemento que manipula la variable de proceso de acuerdo con la acción calculada por el controlador

Otros elementos son:

- Convertidor de señal
- Líneas de transmisión.

INTRODUCCIÓN

Clasificación de los controladores

- Según la fuente de energía que genera la acción de control:
  - Neumáticos
  - Eléctricos
  - Electrónico o digital (microprocesador)
  - Hidráulicos
  - Mecánico
- Según la acción de control que generan los controladores
  - Acción de control discontinua
    - ✓ Bifuncionales
    - ✓ Multifuncionales
  - Acción de control continua
    - ✓ Proporcionales, P
    - ✓ De acción integral, I
    - ✓ De acción derivada, D
    - ✓ Combinación de los tres, PI, PD, PID.

El controlador:

Compara el valor real de la salida de una planta con la entrada de referencia (el valor deseado)

$\Rightarrow$ Calcula el error: **e = Tc-T**

determina la desviación y produce una señal de control que reducirá la desviación a cero ó a un valor pequeño

$\Rightarrow$ Genera una salida que es función del error m = f(e)

La manera en la cual el controlador automático produce la señal de control se denomina ***acción de control***.

➢Tipo de acción:

- Acción todo-nada
- Acción proporcional (P)
- Acción Integral (I)
- Acción derivativo (D)

Actuación de los controladores

❑ Acción directa o reversa: crítica para el funcionamiento del controlador

- ❑ Acción directa:
  - Si al aumentar la variable medida la señal del controlador aumenta
  - Ganancia controlador Kc<0
- ❑ Acción reversa:
  - Si al aumentar la variable medida la señal del controlador disminuye
  - Ganancia controlador kc>0

✓ Selección de la acción del controlador: depende del tipo de válvula: AO; AC

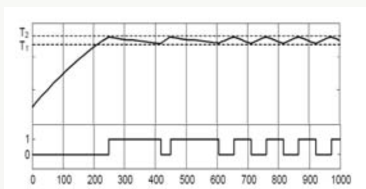
Acción de control TODO-NADA, ON/OFF

- El dispositivo final tiene sólo dos posiciones. La señal de salida del controlador depende únicamente del signo de la señal de error, no de su magnitud.

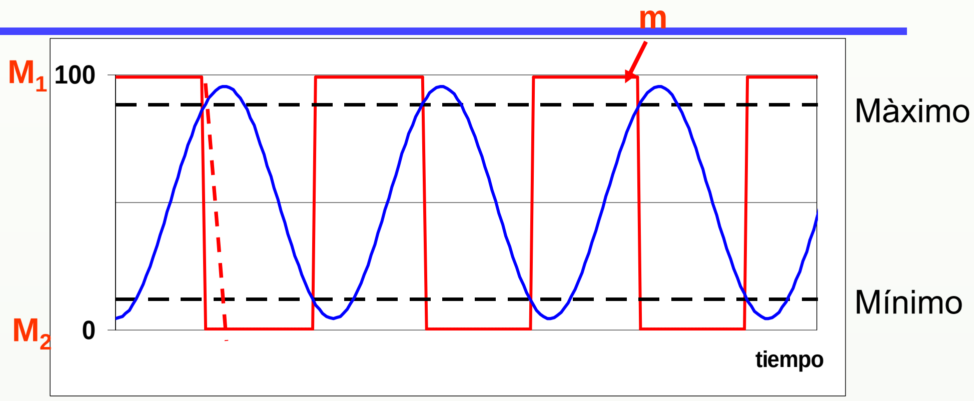
$$e(t) \longrightarrow \boxed{G_C} \longrightarrow m(t)$$

- EL dispositivo corrector tiene 2 posiciones. Si la señal de error es negativa, el controlador envía el dispositivo corrector final a la otra posición
  - •Si el rango es 0 – 100

$$m \begin{cases} 0\ \% & e(t) < 0 \ \rightarrow m(t) = M_2 \\ 100\% & e(t) > 0 \ \rightarrow m(t) = M_1 \end{cases}$$

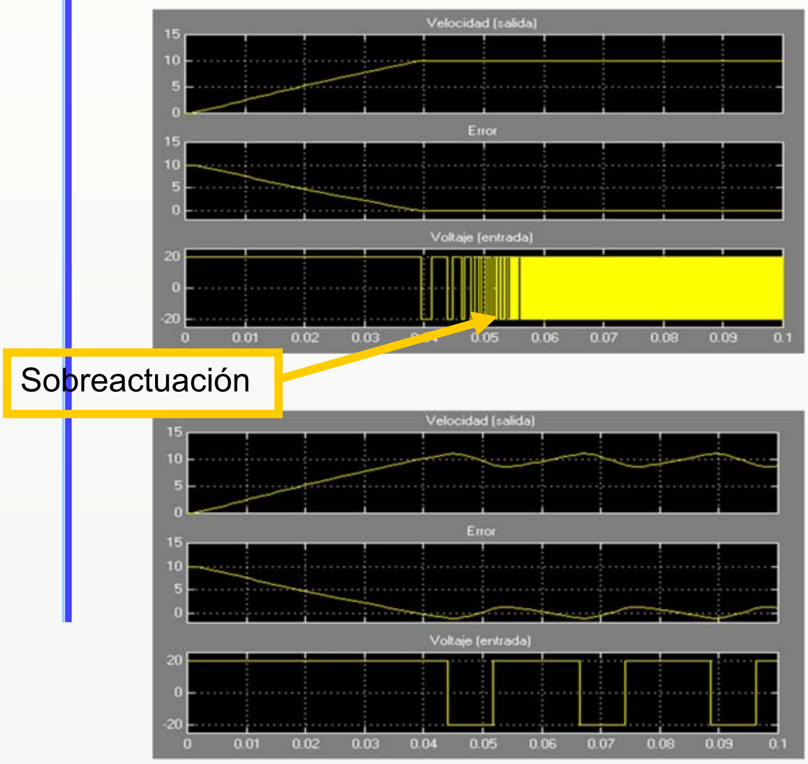


- Ejemplo típico de este control es el de una estufa con termostato.
- El mecanismo de generación es un simple relé.



CARACTERÍSTICAS:

- Existe una zona inactiva en la que no actúa el sistema de control (entre los valores máx. y min.
- La válvula sólo tiene dos posiciones: cerrado o abierto.
- Se sobrepasan los valores máx. y min. debido a la inercia del sistema.
- La variable controlada oscila permanentemente.
- Cuanto más estrecha sea la zona intermedia mayor es el número de oscilaciones.
- El cierre no es instantáneo, las bajadas de la válvula no son perpendiculares a la abcisa



brecha diferencial, δ, (aumenta el intervalo de oscilación). Se define como: el más pequeño rango de valores medidos que debe atravesar para hacer que el actuador vaya de una posición a la otra.

La señal de error tendrá que superar ese δ para comenzar a actuar

$e(t) > \delta$
$e(t) < -\delta$

En general:

- Es un control **adecuado** cuando se tarda un tiempo relativamente grande en notar una **variación relativamente pequeña de la variable controlada**, es decir en sistemas lentos. Ej. Nivel y temperatura.
- **No** es adecuados en **sistemas rápidos** como el control de caudal y la presión.
- Es muy **barato**
- Se **desgastan** muy rápido

Usos:

•Sistema de calefacción

•Baños de temperatura

•Controladores de nivel

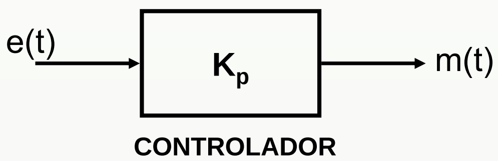
CONTROL MULTIPOSICINAL

- Es una variante, tiene tres posiciones en la zona inactiva (100-50-0). Disminuye las oscilaciones. Poco usados

Acción Proporcional

La señal de salida del controlador es proporcional al error

$$m(t) = K_p \; e(t)$$ En variables de perturbación $$\Delta m(t) = K_p \; \Delta e(t)$$



Kp: ganancia proporcional del controlador

$e(t) = y_{sp} - y(t)$

- La salida del controlador es proporcional al error: a mayor error mayor es la actuación del controlador
- La proporcionalidad se establece por la ganancia del controlador Kp
- Ganancia del controlador Kp: determina cuanto cambia la salida del controlador para un cambio dado en el error: sensibilidad del controlador
- Kp: positiva o negativa en función del modo de acción reversa o inversa (se selecciona manualmente en el controlador)

- Unidades de la ganancia:
  - Variable de entrada: señal estándar procedente del sensor-transmisor: 4-20 mA, 3-15 psi. Frecuentemente: % salida del transmisor
  - Variable de salida: señal estándar producida por el controlador: 4-20 mA, 3-15 psi. Frecuentemente: % salida del controlador (%CO)

❑ F. T. controlador Proporcional: en términos de variables de desviación:

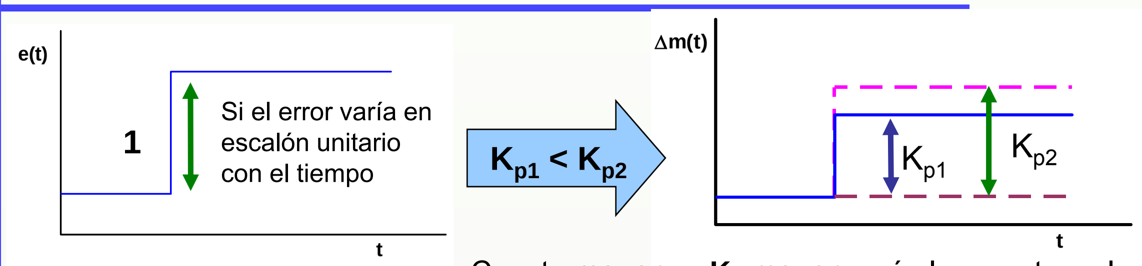
$$\Delta m(t) = K_p \ \Delta e(t)$$

En Lapace $$\Delta m(s) = K_p \ \Delta e(s)$$

$$\boxed{G(s) = \frac{\Delta m(s)}{\Delta e(s)} = K_p}$$

F.T. de un controlador proporcional

GANANCIA PROPORCIONAL



Cuanto **mayor** es K_p **mayor** será el aumento en la señal de **salida del controlador**.

La perturbación en la variable de salida se corrige más fácilmente cuanto menor es K_p

El control proporcional tiene una ventaja importante sobre el control todo o nada.

Elimina la constante oscilación alrededor del valor de referencia. Con esto proporciona un control de la planta más preciso, y reduce el desgaste y rotura de actuadores mecánicos.

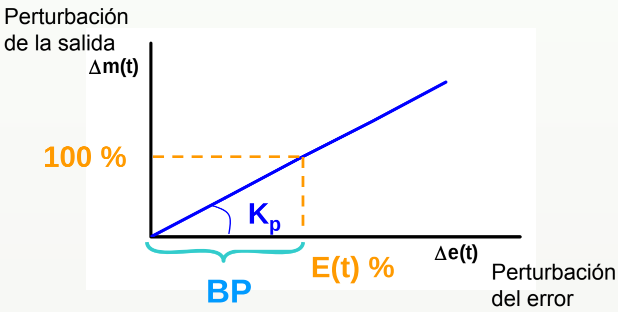
Desventaja : siempre habrá un OFFSET, (diferencia entre la referencia y la respuesta del sistema).

Una <u>K_p muy grande</u> implica la aparición de **oscilaciones**, de manera que el sistema no llega a estabilizarse.

Una <u>K_p muy pequeña</u>, pude no producir oscilaciones pero determina un **OFFSET** muy elevado.

Comercialmente la ganancia proporcional se expresa en terminos de la llamada Banda Proporcional, **BP**.

BP: es el % del error máximo que da lugar a una variación del 100% en la salida del controlador



$$pte = K_p = \frac{\Delta m(t)}{\Delta e(t)} = \frac{100}{BP}$$

$$\boxed{BP = \frac{100}{K_p}}$$

En el límite ($K_p \to \infty$); BP $\to$ 0, es decir, se aproxima todo-nada

Acción Integral

La señal de salida del controlador es proporcional a la integral del error

$$m(t) = \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t)dt$$

τ_i = tiempo integral (unidades de tiempo)

Tomando las T.L. se obtiene la función de transferencia:

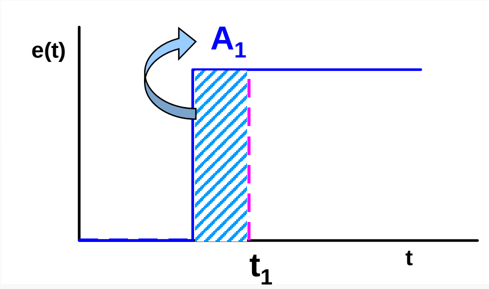
$$B(s) = \frac{\Delta m(s)}{\Delta e(s)} = \frac{1}{\tau_i s}$$

Supongamos que el punto de consigna aumenta una cierta cantidad A respecto del estado estacionario (señal de entrada en escalón)

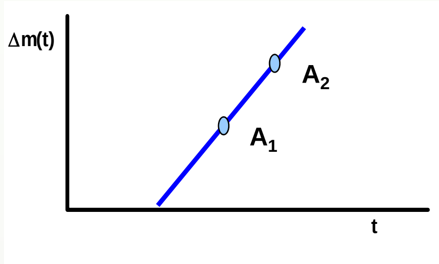
$$e = A; \qquad D.L. \quad e = \frac{A}{s}; \quad \Delta e(s) = \frac{A}{s}$$

$$\Delta m(s) = \frac{A}{\tau_I} \cdot \frac{1}{s^2} \quad \therefore \quad \Delta m(t) = \frac{A}{\tau_I} \cdot t$$

Metiendo una señal en escalón, la respuesta es una función creciente con el tiempo



$$\Delta m(t) = \frac{A}{\tau_I} \cdot t$$



$\uparrow t_1 \qquad A_1 \uparrow$

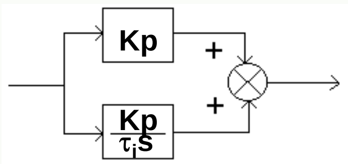
Metiendo una perturbación en escalón, la respuesta es una función creciente con el tiempo

Ventaja: Bien sintonizado es capaz de eliminar el error en la señal de salida OFFSET

Desventajas: Si el error de la primera gráfica se mantiene infinito el área aumenta y también la señal de salida

Acción Proporcional - integral

La acción de control PI, es la suma de una acción proporcional y una integral



$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{\tau_i} \int e(t)dt + m_0$$

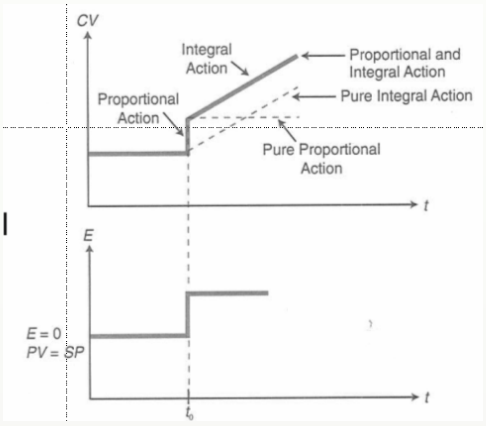
la acción proporcional nos acerca al valor deseado rápidamente, y la acción integral nos lleva exactamente al valor deseado, eliminando el error residual.

La función de transferencia es:

$$B(s) = \frac{\Delta m(s)}{\Delta e(s)} = K_p\left(1 + \frac{1}{\tau_i s}\right) = K_p\left(\frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s}\right)$$

En este tipo de controladores tenemos dos parámetros:

- Ganancia, K_p
- Tiempo integral τ_i



En la acción PI la variable manipulada aumenta, pero no parte de cero, parte de K_p, no siendo para tiempos cortos el error pequeño, ni la salida del controlador.

La acción proporcional actúa inmediatamente, y su acción se mantiene mientras dura el error, y el integral cuando el error está dado sirve para eliminar el offset.

Acción Derivativa

La señal de salida del controlador es proporcional a la derivada del error respecto al tiempo en el sistema

$$m(t) = \tau_D \frac{de(t)}{dt}$$

τ_D = tiempo derivativo

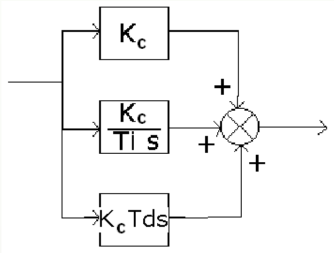
- La acción de control derivativa se le llama a veces como control de velocidad.
- τ_D es el intervalo de tiempo durante el cual la acción de velocidad hace avanzar el efecto de la acción proporcional.
- No sirve para perturbaciones constantes
- La acción derivativa tiene la ventaja de ser de previsión, pero amplifica las señales de ruido
- Este tipo de acción nunca se usa sola, esto es bebido a que los cambios que provoca son muy grandes en la salida del controlador, ya sea con error positivo o negativo.

Función de transferencia:

$$B(s) = \frac{\Delta m(s)}{\Delta e(s)} = \frac{1+\tau_D s}{1+\alpha\tau_D s}$$

Acción Proporcional Integral Derivativa

La acción de control PID, es la suma de una acción proporcional, una integral y una diferencial



$$\Delta m(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{\tau_i}\int_0^t e(t)\,dt + K_p \tau_D \frac{de(t)}{dt} =$$

$$= K_p\left[e(t) + \frac{1}{\tau_i}\int_0^t e(t)\,dt + \tau_D \frac{de(t)}{dt}\right]$$

Función de transferencia PID

$$\boxed{B(s) = \frac{\Delta m(s)}{\Delta e(s)} = K_p\left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_D\, s\right)}$$

El controlador proporcional-integral-derivativo (PID), combina las acciones de los tres controladores.

Este controlador puede usarse en casi todos los procesos que involucren retardos y tiempos muertos.

El PID elimina el offset del controlador proporcional, a través de su acción derivativa y suprime oscilaciones con su acción derivativa.

Cuando se ajusta correctamente el PID regulará suavemente la respuesta de cualquier proceso.

Combina las tres acciones, posee las ventajas e inconvenientes de los tres

Si $\tau_D \downarrow$ $\Rightarrow$ Actúa como PI
Si $\tau_D \downarrow$ y $\tau_i \uparrow$ $\Rightarrow$ Actúa como P

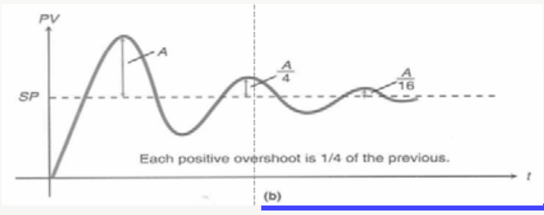
CONTROL DE PROCESOS
Curso 2014-2015

Específicamente, hay dos características de procesos, para los cuales no es suficiente un PI:

- Cambios muy rápidos en la carga
- Retardos de tiempo grandes entre la aplicación de la acción correctora y el aparecimiento de los resultados de dicha acción en la variable medida.

Existe algunos procedimientos para ajustar el PID, que dependen del proceso que se quiere regular.

La finalidad es ajustarlo de tal forma que al provocar una perturbación el controlador lleve al proceso a la estabilidad (variable proceso = punto de consigna) en le menor tiempo posible o el permitido por el proceso.

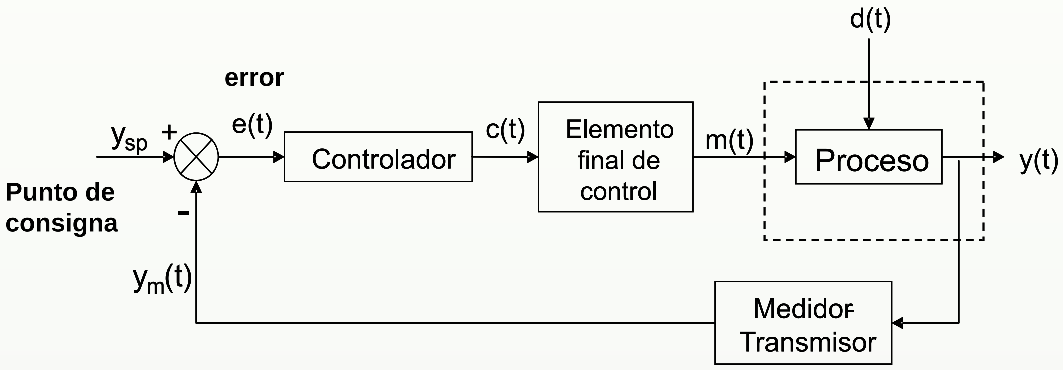


DINAMICA DEL LAZO DE CONTROL

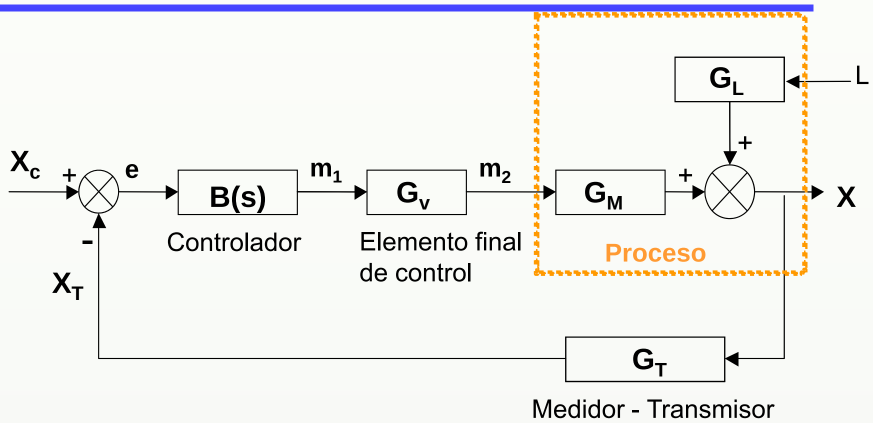
Control de retroalimentación

- Se analizará la respuesta dinámica de control, (variación con el tiempo de la variable controlada para perturbaciones de entrada)
    - ➢ Conocer las ecuaciones diferenciales de cada elemento que componen el circuito
    - ➢ Combinarlas adecuadamente
    - ➢ Empleo de la transformada de Laplace y de las funciones de transferencia simplifican el tratamiento matemático

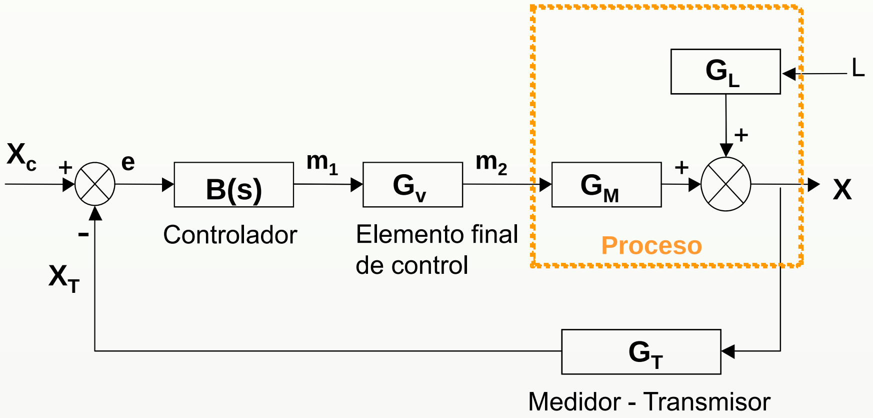
Control Lazo cerrado



y_{sp}:	valor deseado (pto. consigna):	**X_c**
e(t):	señal de error:	**e**
c(t):	salida del controlador:	**m_1**
m(t):	variable manipulada	**m_2**
d(t):	señal de alteración:	**L**
y(t):	variable controlada	**X**



- Cada elemento del sistema se caracteriza por su propia función de transferencia, que relaciona la entrada con la salida.
  - F.T. proceso $X = G_M m_2 + G_L L$
  - F.T. dispositivo de medida $X_T = G_T X$
  - F.T. controlador:
    - comparador $e = X_C - X_T$
    - acción de control $m_1 = B(s)\, e$
  - F.T. elemento final de control $m_2 = G_v m_1$
  - Dinámica de las líneas de transmisión: despreciables

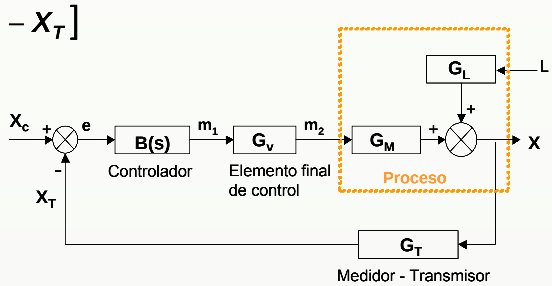


- Serie de bloques entre el comparador y la salida controlada: B, G_v, G_M: trayecto de ida
- Serie de bloques entre la salida controlada y el comparador: G_T: trayecto de vuelta

Partiendo de F.T. elemento final de control $m_2 = G_v\, m_1$

$$m_2 = G_v\, m_1 = G_v\, B(s)\, e = G_v\, B(s)\left[X_c - X_T\right]$$

$$m_2 = G_v\, B(s)\left[X_c - G_T X\right]$$



- Sustituyendo m_2 en la F.T. del proceso:

$$X = G_M\, m_2 + G_L\, L =$$

$$= G_M\left[G_v\, B(s)\left(X_c - G_T\, X\right)\right] + G_L\, L$$

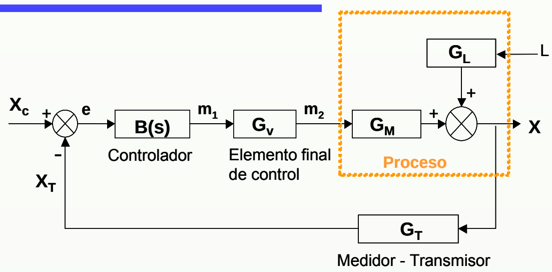
$$\left[1 + G_M\, G_v\, B(s) G_T\right] X = G_M\, G_v\, B(s)\, X_c + G_L\, L$$

$$\boxed{X = \frac{G_M\, G_v\, B(s)}{1 + G_M\, G_v\, B(s)\, G_T} X_c + \frac{G_L}{1 + G_M\, G_v\, B(s)\, G_T} L}$$

F.T del proceso (lazo cerrado)

- Formado por dos términos:
  - •1º: efecto de un cambio en el punto de consigna sobre la salida
  - •2º: efecto de una perturbación ("carga") sobre la salida

- Pueden considerarse 2 F.T en el lazo cerrado



$$\frac{G_M\,G_v\,B(s)}{1+G_M\,G_v\,B(s)\,G_T}=G_{X,C}(s)$$

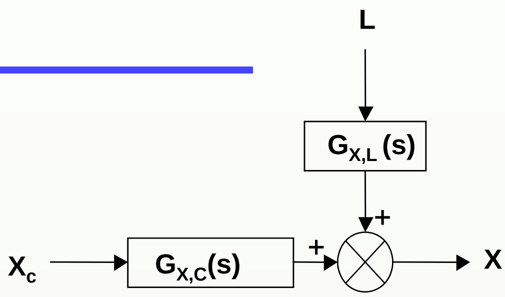
$$\frac{G_L}{1+G_M\,G_v\,B(s)\,G_T}=G_{X,L}(s)$$

- F.T del proceso en lazo cerrado

$$X=\frac{G_M\,G_v\,B(s)}{1+G_M\,G_v\,B(s)\,G_T}X_c+\frac{G_L}{1+G_M\,G_v\,B(s)\,G_T}L \qquad X=G_{X,C}(s)X_c+G_{X,L}(s)L$$

- Denominador (ambos términos): 1+ producto de las funciones de transferencia <u>en el lazo</u>
- Numerador: producto de las funciones de transferencia entre el punto de consigna y la salida controlada ó entre la carga y la salida controlada
  - (a) F.T. en el camino de ida entre el punto de consigna X_c y la salida "X": $G_M\,G_v\,B$
  - (b) F.T. en el camino de ida entre la carga "L" y la salida: G_L

$$X=G_{X,C}(s)X_c+G_{X,L}(s)L$$



- Las funciones de transferencia en lazo cerrado, $G_{X,C}$ y $G_{X,L}$ dependen
  - de la dinámica del proceso
  - de la dinámica del sensor de medida, del controlador y del elemento final de control

- Para control en realimentación podemos distinguir dos tipos de problemas de control:
  - Problema del **servomecanismo**: se desea un buen comportamiento del lazo de control frente a cambios en el punto de consigna. El controlador debe actuar de forma que X siga los cambios de X_c, ya que L=0

    $X= G_{X,C}(s)\ X_C$

  - Problema del **regulador**, (más frecuente en control de procesos): el punto de consigna no cambia (X_C=0); el controlador intenta eliminar el impacto de los cambios de la carga y mantener X en el punto de consigna deseado

    $X= G_{X,L}(s)\ L$

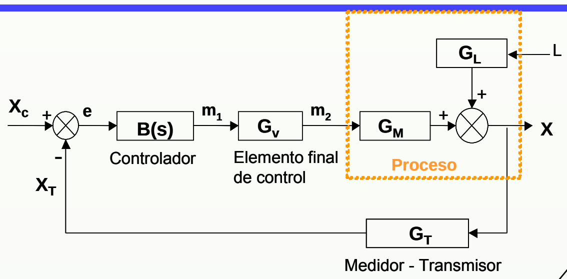
- Por simplicidad, suponemos F.T. elemento de medida y elemento final de control:

$$G_T = 1 \qquad G_v = 1$$

- F.T. controlador proporcional: $G_c(s) = K_p$

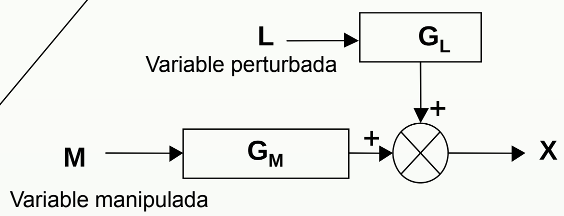
- Por tanto la F.T. de un lazo cerrado quedaría:

$$\boxed{X = \frac{G_M \; K_p}{1 + G_M \; K_p} X_c + \frac{G_L}{1 + G_M \; K_p} L}$$



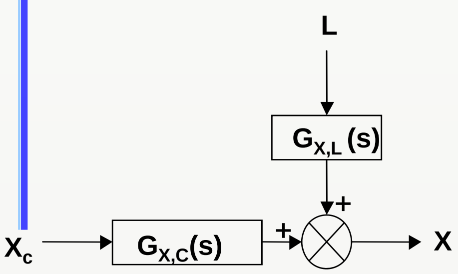
Simplificando el diagrama de bloques:

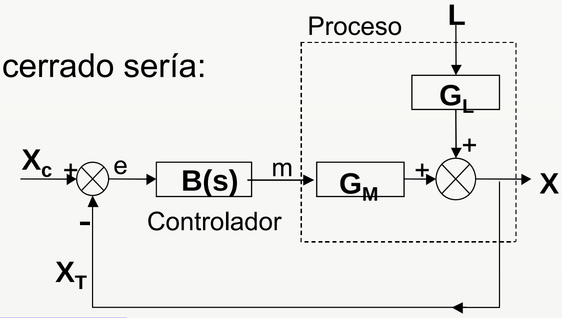
En lazo abierto sería:



$$\boxed{\text{F.T. lazo abierto} \qquad X = G_M M + G_L L}$$

En lazo cerrado sería:





$$\boxed{\text{F. T. Lazo cerrado} \qquad X = \frac{G_M \; B}{1 + G_M \; B} X_c + \frac{G_L}{1 + G_M \; B} L}$$

Efecto de la acción de control proporcional en la respuesta de un proceso controlado

- **Efecto de un controlador proporcional en un sistema de 1º orden**
  - La dinámica de un sistema no controlado cambia al cerrar el lazo de control
  - F.T. sistema en lazo cerrado: (suponiendo $G_M = 1$; $G_v = 1$ y $B = K_p$

$$X = \frac{G_M \; K_p}{1+G_M \; K_p} X_c + \frac{G_L}{1+G_M \; K_p} L$$

- Para un sistema de 1º orden en lazo abierto (en términos de variables de perturbación):

$$\tau \frac{dX}{dt} + X = K_M \, m + K_L \, L \qquad X(0) = m(0) = L(0) = 0$$

$$\tau \, s \, X(s) + X(s) = K_M m(s) + K_L L$$

$$X(s) = \frac{K_M}{\tau \, s + 1} m(s) + \frac{K_L}{\tau \, s + 1} L(s) = G_M m(s) + G_L L(s)$$

τ: constante de tiempo sistema en lazo abierto

K_M: ganancia de la variable de salida respecto a la manipulada

K_L: ganancia de la variable de salida respecto a la carga

- Luego

$$G_M = \frac{K_M}{\tau \, s + 1} \qquad G_L = \frac{K_L}{\tau \, s + 1}$$

Sustituyendo en la ec. de lazo cerrado

$$\Delta X(s) = \frac{G_M(s) K_p}{1+G_M(s) K_p} \Delta X_c(s) + \frac{G_L(s)}{1+G_M K_p} \Delta L(s)$$

$$\Delta X(s) = \frac{\frac{K_M}{\tau \, s + 1} K_p}{1+\frac{K_M}{\tau \, s + 1} K_p} \Delta X_c(s) + \frac{\frac{K_L}{\tau \, s + 1}}{1+\frac{K_M}{\tau \, s + 1} K_p} \Delta L(s)$$

$$\Delta X(s) = \frac{\frac{K_M}{\tau \, s + 1} K_p}{\frac{\tau \, s + 1 + K_M K_p}{\tau \, s + 1}} \Delta X_c(s) + \frac{\frac{K_L}{\tau \, s + 1}}{\frac{\tau \, s + 1 + K_M K_p}{\tau \, s + 1}} \Delta L(s) =$$

$$= \frac{K_M K_p}{\tau \, s + 1 + K_M K_p} \Delta X_c(s) + \frac{K_L}{\tau \, s + 1 + K_M K_p} \Delta L(s)$$

Reordenando

$$\Delta X(s)=\frac{K'_p}{\tau' s+1}\Delta X_C(s)+\frac{K'_L}{\tau' s+1}\Delta L(s)$$

F.T. proceso en lazo cerrado

$$\tau'=\frac{\tau}{1+K_M K_p} \qquad K'_p=\frac{K_M K_p}{1+K_M K_p} \qquad K'_L=\frac{K_L}{1+K_M K_p}$$

τ': constante de tiempo del proceso controlado

K'_p: ganancia estática en lazo cerrado de la variable de salida respecto a cambios en el punto de consigna

K'_L: ganancia estática en lazo cerrado de la variable de salida respecto a cambios en la variable de perturbación

$$\Delta X(s)=\frac{K'_p}{\tau' s+1}\Delta X_c(s)+\frac{K'_L}{\tau' s+1}\Delta L(s)$$

F.T. proceso en lazo cerrado

- Por tanto, podemos concluir que, para un **proceso de 1º orden**, el control del proceso mediante control proporcional conduce a los siguientes resultados:
  - El **sistema** en lazo cerrado sigue siendo de **1º orden**
    - con respecto a cambios en la **variable de perturbación** y
    - con respecto a cambios en el **punto de consigna**
  - La constante de tiempo se ha reducido ($\tau'<\tau$). Por tanto:
    - la **respuesta** del sistema en lazo cerrado es **más rápida** que en lazo abierto con respecto a cambios en la variable de perturbación y cambios en la carga
  - Las ganancias estáticas disminuyen con respecto al sistema no controlado

- Dinámica del lazo cerrado en el dominio del tiempo: **cambio en escalón unitario en el punto de consigna**

  - ¡recordar que trabajamos en variables de perturbación!

Nuevo punto de consigna: $\Delta X_c = 1$ $\qquad L(s) = 0$

$$\Delta X_c(s) = \frac{1}{s}$$

Por lo tanto:

$$X(s) = \frac{K'_p}{\tau' s + 1}\left(\frac{1}{s}\right)$$

- En el dominio del tiempo:

$$X(t) = K'_p\left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau'}\right)\right)$$

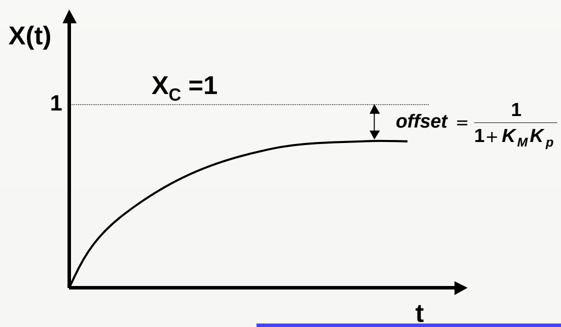
$$X(t \to \infty) = K'_p = \frac{K_M K_p}{1 + K_M K_p} \neq 1$$

- Por tanto, la variable de salida **NO** alcanza el nuevo estado estacionario
- Esta discrepancia: offset: EFECTO CARACTERÍSTICO DEL CONTROL PROPORCIONAL
- Valor del offset:

offset = (nuevo punto de consigna - valor final de la variable de salida)

$$offset = 1 - \frac{K_M K_p}{1 + K_M K_p} = \frac{1}{1 + K_M K_p}$$

$$K_p \to \infty \qquad \text{offset} \to 0$$



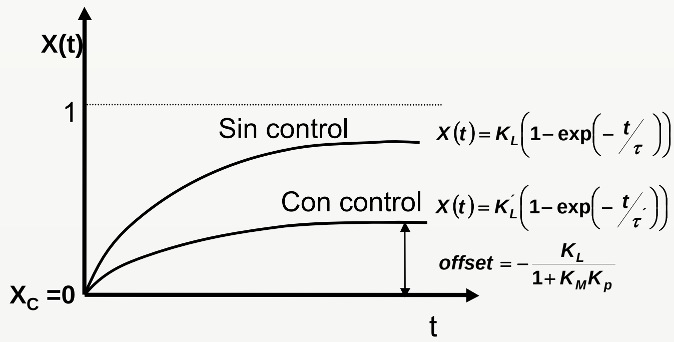
❑ Dinámica del lazo cerrado en el dominio del tiempo: **cambio en escalón unitario en la variable de perturbación**

¡recordar que trabajamos en variables de perturbación!

- Valor del offset:

$$offset = -\frac{K_L}{1 + K_M K_p}$$

$$K_p \rightarrow \infty \qquad \text{offset} \rightarrow 0$$



Efecto de la acción de Control Integral en la respuesta de un proceso controlado

❑ **Sistemas de 1º orden: F.T. en lazo cerrado**

$$X(s) = \frac{K_M}{\tau s + 1} m(s) + \frac{K_L}{\tau s + 1} d(s) = G_M m(s) + G_L L(s)$$

- F.T. de una acción integral simple:

$$m(t) = \frac{K_p}{\tau_i} \int e(t)\,dt$$

$$m(s) = \frac{K_p}{\tau_i} \frac{1}{s} e(s) \qquad B = \frac{c(s)}{e(s)} = \frac{K_p}{\tau_i} \frac{1}{s}$$

- Suponemos F.T. elemento de medida y elemento final de control:

$G_T(s)=1 \qquad G_V(s)=1$

- Para una perturbación en escalón unitario en el punto de consigna, permaneciendo constante la variable de perturbación, e introduciendo estas ecuaciones en la F.T. del proceso en lazo cerrado.

$$X(s)=\frac{G_M(s)G_v(s)B(s)}{1+G_M(s)G_v(s)B(s)G_T(s)}X_c(s)+\frac{G_L(s)}{1+G_MG_v(s)B(s)G_T(s)}L(s)$$

$$X(s)=\frac{\frac{K_M}{\tau s+1}\frac{K_p}{\tau_i}\frac{1}{s}}{1+\frac{K_M}{\tau s+1}\frac{K_p}{\tau_i}\frac{1}{s}}X_c(s)=\frac{\frac{K_M}{\tau s+1}\frac{K_p}{\tau_i}\frac{1}{s}}{\frac{(\tau s+1)(\tau_i s)+K_MK_p}{(\tau s+1)(\tau_i s)}}X_c(s)$$

- Reorganizando

$$X(s)=\frac{\frac{K_M}{\tau s+1}\frac{K_p}{\tau_i}\frac{1}{s}}{\frac{(\tau s+1)(\tau_i s)+K_MK_p}{(\tau s+1)(\tau_i s)}}X_c(s)=\frac{K_MK_p}{(\tau s+1)(\tau_i s)+K_MK_p}X_c(s)$$

$$X(s)=\frac{K_MK_p}{\tau\tau_i s^2+\tau_i s+K_MK_p}X_c(s)=\frac{\frac{K_MK_p}{K_MK_p}}{\frac{\tau\tau_i s^2}{K_MK_c}+\frac{\tau_i s}{K_MK_p}+\frac{K_MK_p}{K_MK_p}}X_c(s)$$

$$\boxed{X(s)=\frac{1}{(\tau'_n)^2s^2+2\xi'\tau'_n s+1}X_c(s)}$$ F.T. proceso en lazo cerrado

$$\tau'_n=\sqrt{\frac{\tau\tau_i}{k_MK_c}}\qquad 2\xi'\tau'_n=2\xi'\sqrt{\frac{\tau\tau_i}{K_MK_p}}=\frac{\tau_i}{K_MK_p}\quad\Rightarrow\xi'=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\tau_i}{\tau K_MK_p}}$$

- Por tanto, podemos concluir que, para un **sistema de 1º orden**, el control del proceso mediante acción de **control integral pura** conduce a los siguientes resultados:
  - **se incrementa el orden del proceso** al cerrar el lazo de control
  - puede **cambiar drásticamente** el comportamiento dinámico del sistema (1º orden pasa a 2º orden)
  - el **incremento del orden** del sistema trae consigo una **mayor lentitud** en la respuesta de la variable de salida ante los cambios

CONTROL DE PROCESOS
Curso 2014-2015

$$\tau'_n = \sqrt{\frac{\tau\,\tau_i}{K_M K_p}} \qquad \xi' = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{\tau_i}{\tau\, K_M K_p}}$$

- La forma de la **respuesta en lazo cerrado** (sobreamortiguado, críticamente amortiguado, subamortiguado):
  - **depende** de los parámetros de los controladores $\mathbf{K_p}$ y τ_i
  - los parámetros $\mathbf{K_p}$ y τ_i deberán **ajustarse** para conseguir el comportamiento deseado
- El coeficiente de amortiguamiento ξ' **disminuye** al **aumentar** $\mathbf{k_p}$ y al **disminuir** τ_i
- Al **disminuir** el coeficiente de amortiguamiento ξ':
  - la **respuesta** se hace **más rápida**, pero **oscilatoria**, con **mayores desviaciones del punto de consigna** y **mayores oscilaciones**, al pasar de comportamiento sobreamortiguado a subamortiguado

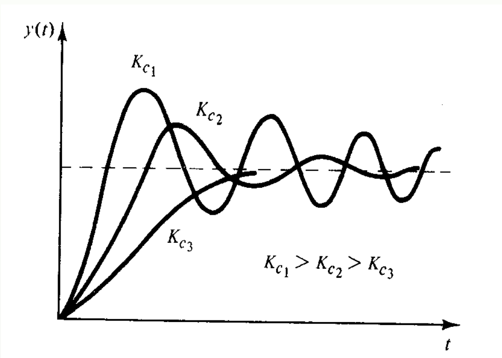


Figura 5.20. Efecto de la ganancia del controlador, kc, (K_p) en la respuesta en lazo cerrado de un sistema de 1º orden con acción de control integral pura

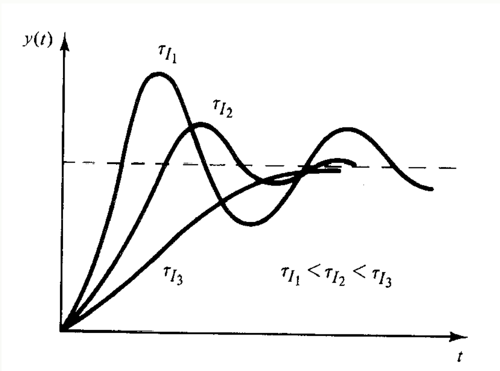


Figura 5.21. Efecto de la constante de tiempo integral, τ_I, en la respuesta en lazo cerrado de un sistema de 1º orden con acción de control integral pura

- Sistemas de 1º orden: dinámica del lazo cerrado en el dominio del tiempo: **cambio en escalón unitario en el punto de consigna**

(¡recordar que trabajamos en variables de desviación')

- Valor final de la variable a controlar (aplicando el teorema del valor final):

$$X(s) = \frac{1}{(\tau'_n)^2 s^2 + 2\xi'\tau'_n s + 1} X_c(s) = \frac{1}{(\tau'_n)^2 s^2 + 2\xi'\tau'_n s + 1}\left(\frac{1}{s}\right)$$

$$X'(t \to \infty) = \lim_{s \to 0} [s\, X'(s)] = \lim_{s \to 0}\left[\frac{1}{(\tau'_n)^2 s^2 + 2\xi'\tau'_n s + 1}\right] = 1$$

- Por tanto
  - offset = (nuevo punto de consigna-valor final variable a controlar) = 1-1 = 0
  - La **acción integral elimina el offset**

Efecto de la acción de Control diferencial en la respuesta de un proceso controlado

- **Sistemas de 1º orden: F.T. en lazo cerrado**

$$X(s) = \frac{K_M}{\tau s + 1} m(s) + \frac{K_L}{\tau s + 1} L(s) = G_M m(s) + G_L L(s)$$

- F.T. de una acción diferencial simple:

$$B(s) = K_p \tau_D\, s$$

Suponiendo $G_v(s) = G_T(s) = 1$

- Para un **cambio en escalón unitario en la variable de perturbación**, permaneciendo constante el punto de consigna, e introduciendo estas ecuaciones en la F.T. del proceso en lazo cerrado

$$X(s)=\frac{G_M(s)G_V(s)B(s)}{1+G_M(s)G_V(s)B(s)G_T(s)}X_c(s)+\frac{G_L(s)}{1+G_MG_V(s)B(s)G_T(s)}L(s)$$

$$X(s)=\frac{\frac{K_L}{\tau s+1}}{1+\frac{K_M}{\tau s+1}K_p\tau_D s}L(s)=\frac{\frac{K_L}{\tau_p s+1}}{\frac{(\tau s+1)+K_MK_p\tau_D s}{(\tau s+1)}}L(s) \quad \therefore \quad X(s)=\frac{K_L}{(\tau+K_MK_p\tau_D)s+1}L(s)$$

$$\boxed{X(s)=\frac{K_L}{(\tau+K_MK_p\tau_D)s+1}L(s)}$$ **F.T. proceso en lazo cerrado**

- Por tanto, podemos concluir que, para un **sistema de 1º orden**, el control del proceso mediante acción de **control diferencial pura** conduce a los siguientes resultados:
  - La acción de control diferencial **no cambia el orden del sistema**
  - La **constante de tiempo** en lazo cerrado es **mayor** que en **lazo abierto**: la **respuesta** del proceso controlado es **más lenta** que la del proceso original de 1º orden
  - Para **mayor K_p**, la **constante de tiempo** en lazo cerrado **aumenta**

Efecto de las acciones de control compuestas: P, PI, PID

- Controladores usuales: **Efecto del control PI**

La combinación de los modos de control Proporcional e integral produce los siguientes efectos en la respuesta de un sistema en lazo cerrado:

- El orden del sistema se incrementa (efecto del modo integral)
- El offset se elimina (efecto del modo integral)
- Para mayor K_p, la respuesta del sistema se hace más rápida (efectos de los modos proporcional e integral) y más oscilatoria (el sobrepasaje y la relación de amortiguamiento se incrementan, como efecto del modo integral)
- Elevados valores de K_p crean una respuesta muy sensible y pueden conducir a sistemas inestables (apartado siguiente)
- Para K_p constante, para mayor τ_i la respuesta se hace más rápida pero más oscilatoria (efecto del modo integral)

❑ Efecto del control PID

- Combinación de los modos de control Proporcional, integral y derivativo
- Cualitativamente, tiene las mismas características dinámicas que un sistema PI
- Principales ventajas introducidas por la acción de control diferencial:
  - La presencia de control integral hace más lenta la respuesta en lazo cerrado de un sistema.
  - Para compensarlo, puede incrementarse la ganancia del controlador K_p.
  - El aumento de K_p puede causar una respuesta oscilatoria y llevar a la inestabilidad del sistema

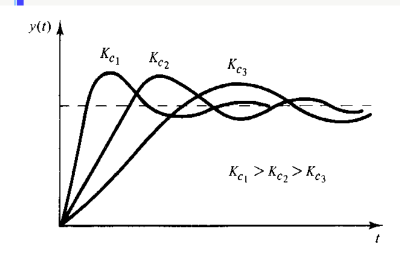


Figura 5.22. Efecto de la ganancia del controlador en la respuesta en lazo cerrado de un sistema de 1º orden con control PID

❑ Efecto del control PID (continuación)

- Principales ventajas introducidas por la acción de control diferencial (continuación):
  - La introducción del modo derivativo estabiliza el sistema
  - Pueden seleccionarse un valor apropiado de K_p de forma que
    - proporcione una velocidad de respuesta aceptable
    - se mantengan valores de sobrepasaje y relación de amortiguamiento moderados
- Efecto de un controlador PID en la respuesta de un proceso controlado ante cambios en el punto de consigna.

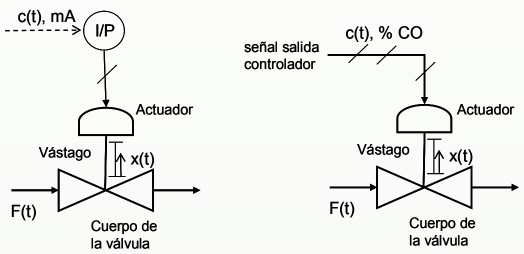
  Para mayor K_p:

  - El sistema responde más rápidamente
  - El sobrepasaje prácticamente no varía

Elemento final de control

- Recibe la señal procedente del controlador
- Actúa sobre la variable manipulada de acuerdo a esta señal recibida
- Procesos químicos: generalmente una válvula neumática de regulación de caudal.
- Entrada a la válvula: señal de salida del controlador (generalmente eléctrica 4-20 mA).
- Usualmente: transductor IP a la salida del controlador: transforma señal eléctrica a neumática.
- Señal salida de la válvula: caudal .

Esquema de instrumentación de una válvula de control



(a) Detallada (b) Esquemática

- **Dinámica válvulas control**: suficiente modelar la válvula como un elemento de 1º orden

$$G_f(s) = \frac{k_f}{\tau_f \cdot s + 1}$$

kf: ganancia de la válvula (caudal/señal salida del controlador)

τ_f: constante de tiempo del actuador (s)

- Dinámica de la válvula: mucho más rápida que la del proceso:

  τ_f: del orden de pocos segundos

  τ_f :puede despreciarse cuando las constantes de tiempo del proceso son del orden de minutos ($\tau_f <<< \tau_p$)

- **F.T. de la válvula**: se reduce al valor de la ganancia k_f

$$k_f = \frac{\%\,apertura\ válvula}{señal\ salida\ controlador} \cdot \frac{caudal\ de\ salida}{\%\,apertura\ válvula} = \frac{caudal\ de\ salida}{señal\ salida\ controlador}$$

- Ganancia de una válvula: depende de:
  - modo de acción (AO, AC)
  - característica inherente de la válvula (depende de la forma geométrica del obturador): relaciona el caudal con el % apertura de la válvula: lineal, isoporcentual, apertura rápida
  - caída de presión en la válvula

✓ Ganancia de una válvula lineal, AO, con caída de presión constante:

$$k_v = \frac{caudal\ de\ salida}{\%\,apertura\ válvula} = \frac{F_{max}}{100}\left(\frac{caudal}{\%\,apertura}\right)$$

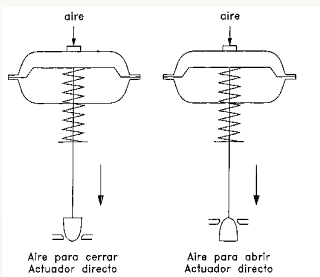
$$k_f = \frac{100-0}{20-4}\left(\frac{\%\,apertura}{mA}\right) \cdot \frac{F_{máx}}{100}\left(\frac{caudal}{\%\,apertura}\right) = \frac{F_{max}}{16}\left(\frac{caudal}{mA}\right)$$

✓ Ganancia de una válvula isoporcentual, AO, con caída de presión constante:

$$k_v = \frac{caudal\ de\ salida}{\%\,apertura\ válvula} = F_{max} \cdot R^{x-1} \cdot LnR\left(\frac{caudal}{\%\,apertura}\right) \neq constante$$

$$R = F_{max}/F\,min \qquad x = \%\,apertura\ de\ la\ válvula$$

- Modo de acción de una válvula: aire para abrir (AO), aire para cerrar (AC)
  - Afecta directamente a la acción del controlador en feedback
  - Determina el signo de la ganancia de la válvula



- Válvula aire para abrir (necesito aire para abrir, $\mathbf{K_f > 0}$):
  - Un incremento en la señal que recibe del controlador aumenta el grado de apertura de la válvula y por tanto aumenta el caudal
  - A mayor presión neumática, mayor caudal: ganancia positiva: $k_v>0$
  - si falla el suministro de aire, válvula completamente cerrada
- Válvula aire para cerrar (necesito aire para cerrar, $\mathbf{K_f<0}$):
  - Un incremento en la señal que recibe del controlador disminuye el grado de apertura de la válvula y por tanto disminuye el caudal
  - A mayor presión neumática, menor caudal: ganancia negativa: $k_v<0$
  - si falla el suministro de aire, válvula completamente abierta

- Selección modo de acción de la válvula: en función de la seguridad
  - Ejemplo válvula **aire para abrir**:
    - válvula que administra el caudal de vapor en un tanque calefactor de agua (emergencia: la válvula se cierra totalmente si falla el suministro de aire, el caudal de vapor se detiene)
  - Ejemplo válvula **aire para cerrar**:
    - válvula que maneja el caudal de refrigeración de un reactor exotérmico (emergencia: la válvula queda totalmente abierta, el caudal de refrigeración se hace máximo)