

## 1.- INTRODUCCIÓN.

El control en lazo abierto es sistema de control no recibe ningún tipo de información del comportamiento de la planta. En los sistemas de control en lazo cerrado, el **controlador** se usa para comparar la salida de un sistema con la condición requerida y convertir el error que de esa comparación resulte en una acción de control diseñada para reducir dicho error. Éste puede deberse a algún cambio en las condiciones que se estén controlando, o la modificación del valor de consigna (se introduce una señal de entrada de tipo escalón, para cambiar el valor inicial por uno nuevo).

En este tema se estudiarán las diversas maneras en que los controladores pueden reaccionar a las señales de error, es decir, **los modos de control** que se presentan en los procesos continuos. A un controlador se le va a exigir que cumpla con los siguientes puntos:

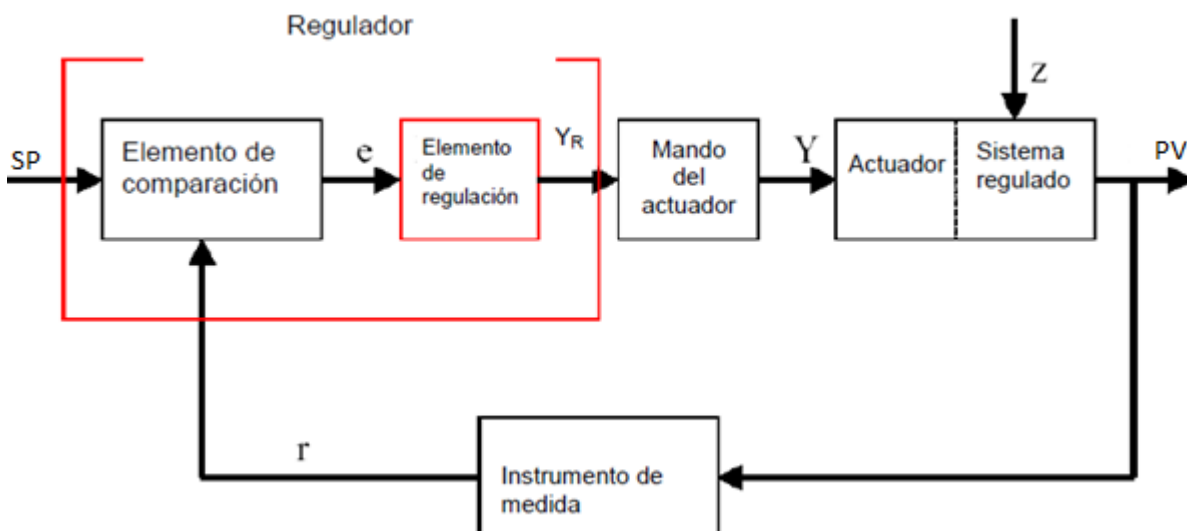
- **Estabilizarse** en un valor concreto prefijado en el punto de consigna (SP).
- **Evolucionar** en un tiempo mínimo hasta dicho punto, sin oscilaciones.
- **Rechazar** las perturbaciones que se ocasionen.

Por ejemplo, se desea que la temperatura de un horno llegue a 250°C (**estabilización**), lo haga en un tiempo prefijado (**evolución**) y se mantenga en dicha temperatura incluso aunque se introduzca en la caldera un tinte a temperatura inferior (**rechazo de perturbaciones**).

**Regulación automática:** Técnica industrial que persigue el control de las variables continuas situándolas en valores determinados prefijados, evolucionando en el tiempo de la forma más rápida posible sin oscilaciones y anulando las posibles perturbaciones.

La regulación automática se basa en la utilización del **bucle cerrado** (o lazo cerrado) de control, en el cual se inserta un **regulador** (o controlador) que realizará las operaciones oportunas para que el sistema en bucle cerrado se comporte de la forma prefijada (según los puntos anteriores).

El funcionamiento básico **regulador** es comparar el valor leído por el elemento de medida de la salida del proceso (**PV**), con la entrada de punto de consigna o set point (**SP**) o valor deseado, determinar la desviación y producir una señal de control que reducirá la desviación a cero o un valor muy pequeño. El esquema, ya conocido, es el de un control en bucle cerrado.



**MAGNITUD REGULADA:** Es el auténtico "objetivo" de la regulación, es decir, la magnitud física que se quiere controlar o mantener constante para todo el sistema. También se denomina *ProcessValue*, **PV**.

**CONSIGNA:** Variable de entrada en el Regulador y que fija el valor deseado de la magnitud regulada. También se denomina *Set Point*, **SP**

**INSTRUMENTO DE MEDIDA:** Proporciona la señal de realimentación enviada al Regulador. Mide la magnitud regulada y la transforma en una señal que puedan entender los demás componentes del sistema controlador, **valor real, r**. Puede ser en forma de tensión, corriente o presión neumática y con unos valores normalizados. Tensión: 0 a 10V. Corriente: 4 a 20mA.

**ELEMENTO DE COMPARACION:** Compara la magnitud regulada con la señal de consigna, formando así la **señal de error, e**.

**ELEMENTO DE REGULACIÓN:** Es la parte más importante de una regulación. A partir de la señal de error, proporciona una variable correctora que actúa sobre el elemento final de control. El ajuste óptimo del controlador es muy importante para obtener la magnitud regulada que queremos. El controlador estará bien ajustado cuando se alcance la variable regulada: con la máxima rapidez, máxima exactitud y con un mínimo de oscilaciones. Obtenemos la **magnitud de salida del regulador YR**, que en último término influye en la magnitud regulada. El regulador más utilizado es el PID.

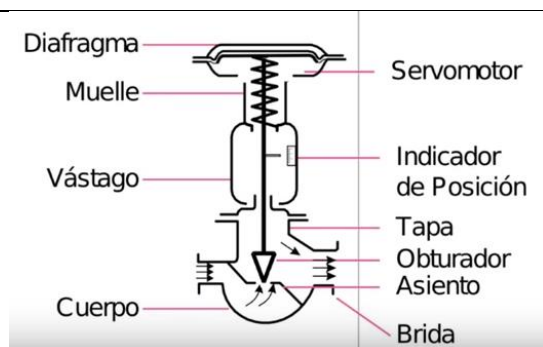
**MANDO DEL ACTUADOR,** Es por así decirlo, el "órgano ejecutor" de la regulación. El elemento de regulación (a través de la magnitud de salida del regulador) comunica al actuador cómo debe modificarse la magnitud regulada, y el actuador transforma esa información en una modificación de la **magnitud manipulada, Y**. La magnitud manipulada es la cantidad de fluido de control que incide sobre el proceso. El mando del actuador deja pasar más o menos fluido de control. Puede ser un contactor, un SSR proporcional, el servomotor (actuador) de una válvula de control, un variador de frecuencia ... El fluido de control puede ser vapor, agua caliente, corriente eléctrica ...

**ACTUADOR o ELEMENTO FINAL DE CONTROL:** Se trata del elemento del circuito de regulación que modifica (de forma más o menos directa) la magnitud regulada en función de la **magnitud manipulada Y**. Pueden ser una resistencia calefactora, válvula de control, un motor ...

**SISTEMA REGULADO:** sistema donde se encuentra la magnitud que se quiere regular; en un ejemplo de regulación de temperatura, puede ser un horno.

**PERTURBACIONES, z.** Es la magnitud que influye de manera no deseada en la magnitud regulada y la aleja de la consigna actual. La existencia de la perturbación exige la regulación para mantener un valor fijo. En el ejemplo de regulación de temperatura de un horno puede ser la apertura de una puerta o una fuga o grieta en el horno.

En los sistemas de control industrial en lazo cerrado, la válvula de control es el elemento final de control por excelencia. Esta formada por el cuerpo y el servomotor o actuador.



## ● VALVULAS DE PROCESO

En el control automático de los procesos industriales la válvula de control juega un papel muy importante en el bucle de regulación. Realiza la función de variar el caudal del fluido de control, que modifica a su vez el valor de la variable medida comportándose como un orificio de área continuamente variable. Dentro del bucle de control tiene tanta importancia como el elemento primario, el transmisor y el controlador.



El **cuerpo** de la válvula contiene en su interior el obturador y los asientos y está provisto de rosca o de bridas para conectar la válvula a la tubería. El obturador es quien realiza la función de control de paso del fluido y puede actuar en la dirección de su propio eje o bien tener un movimiento rotativo. Está unido a un vástago que pasa a través de la tapa del cuerpo y que es accionado por el **servomotor** que puede ser eléctrico mediante una señal todo/nada o proporcional mediante una señal analógica, otra opción es la activación mediante un sistema neumático por una válvula todo/nada o un posicionador.



Las válvulas pueden ser de varios tipos según sea el diseño del cuerpo y el movimiento del obturador.

- Válvula de globo.

Pueden ser de simple asiento, de doble asiento y de obturador equilibrado respectivamente. Las válvulas de simple asiento precisan de un actuador de mayor tamaño para que el obturador cierre en contra de la presión diferencial del proceso. Por lo tanto, se emplean cuando la presión del fluido es baja y se precisa que las fugas en posición de cierre sean mínimas. En la válvula de doble asiento o de obturador equilibrado la fuerza de desequilibrio desarrollada por la presión diferencial a través del obturador es menor que en la válvula de simple asiento. Por este motivo se emplea en válvulas de gran tamaño o bien cuando deba trabajarse con una alta presión diferencial. En posición de cierre las fugas son mayores que en una válvula de simple asiento.



- Válvula de asiento inclinado.

Esta válvula representada permite obtener un flujo de caudal regular sin excesivas turbulencias y es adecuada para disminuir la erosión cuando ésta es considerable por las características del fluido o por la excesiva presión diferencial. El diseño de la válvula es idóneo para el control de fluidos que vaporizan (flashing), para trabajar con grandes presiones diferenciales y para los fluidos que contienen sólidos en suspensión.

- Válvula de tres vías.

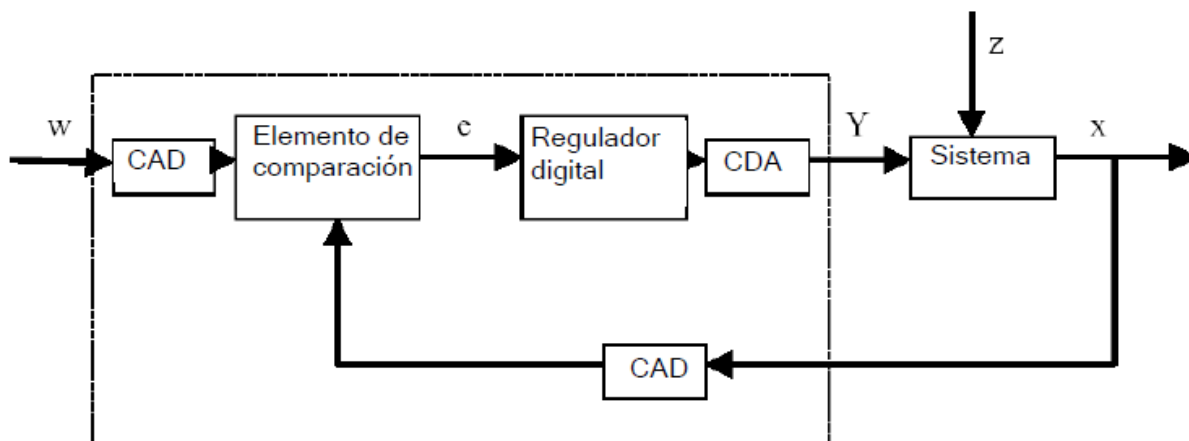
Este tipo de válvula se emplea generalmente para mezclar fluidos (válvulas mezcladoras) o bien para derivar de un flujo de entrada dos de salida (válvulas diversoras). Las válvulas de tres vías intervienen típicamente en el control de temperatura de intercambiadores de calor.



Funcionamiento de una válvula de control: <https://www.youtube.com/watch?v=9P46cC-xmiQ>

Todo lo dicho hasta ahora corresponde a reguladores con tecnología analógica. Lo habitual es utilizar reguladores con tecnología digital los cuales nos ofrecen mayor capacidad de cálculo y además pueden programarse.

Para poder procesar digitalmente las magnitudes, tanto la magnitud de consigna como la magnitud de realimentación se convierten en magnitudes digitales por medio de un convertidor analógico-digital (CAD). A continuación, un elemento de comparación digital las resta para obtener la magnitud de error y la diferencia se transfiere al elemento de regulación digital. Luego la magnitud de salida del regulador se convierte de nuevo en una magnitud analógica por medio de un convertidor digital-analógico (CDA). Así pues, la unidad compuesta de convertidores, elemento de comparación y elemento de regulación tiene el aspecto de un regulador analógico.



La forma en que se realiza la acción correctora de un controlador como respuesta a diferentes desviaciones se clasifica de la siguiente forma:

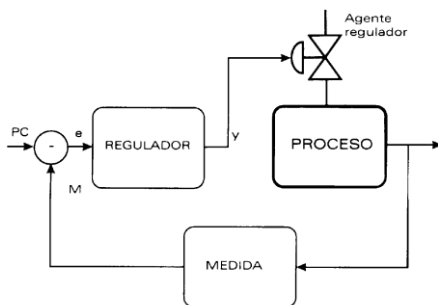
- Controlador todo / nada.
- Controlador proporcional (P).
- Controlador integral (I).
- Controlador derivativo (D).
- Combinación de controladores: PI, PD, PID.

## 2.- CONTROLADOR TODO / NADA.

Un ejemplo de controlador todo / nada, o de dos posiciones, es un termostato bimetálico. Éste es un interruptor que se enciende o apaga (cierra o abre su contacto), según si la temperatura está por debajo o por encima de la requerida.

Es la forma más simple de realizar un control continuo en bucle cerrado, se dispone de un valor umbral determinado por el punto de consigna o set point (PC o SP), sobre el que compararemos la medida activando o desactivando si la medida supera el umbral.

La figura muestra de forma simplificada la situación del regulador dentro del bucle de control. La salida del regulador " $y$ " sólo tiene dos posibles valores, nivel alto y bajo (**abrir válvula o cerrar válvula**). Por ello, la válvula estará o totalmente abierta o totalmente cerrada.



Con este tipo de reguladores es difícil que la medida se mantenga en el punto de consigna, ya que ésta sigue creciendo después de haber cortado el suministro de energía al proceso cerrando la válvula.

Estos reguladores solo son "aceptables" en procesos con tiempos de estabilización muy grandes (procesos lentos, por ejemplo procesos de temperatura), en los procesos rápidos (p.ej. control velocidad en motores) llevan a comportamientos dinámicos indeseados.

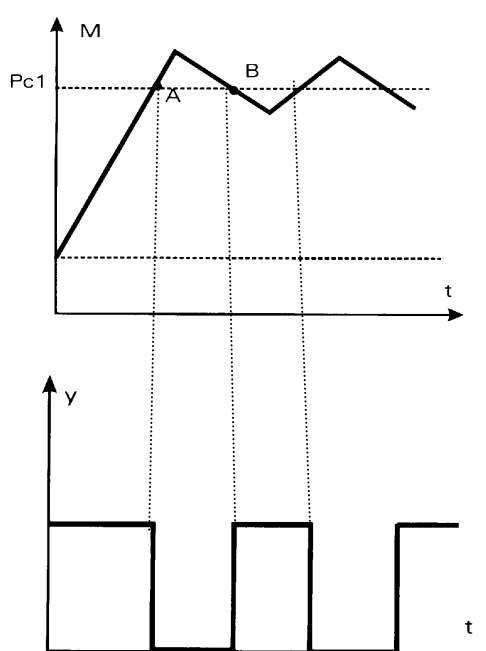


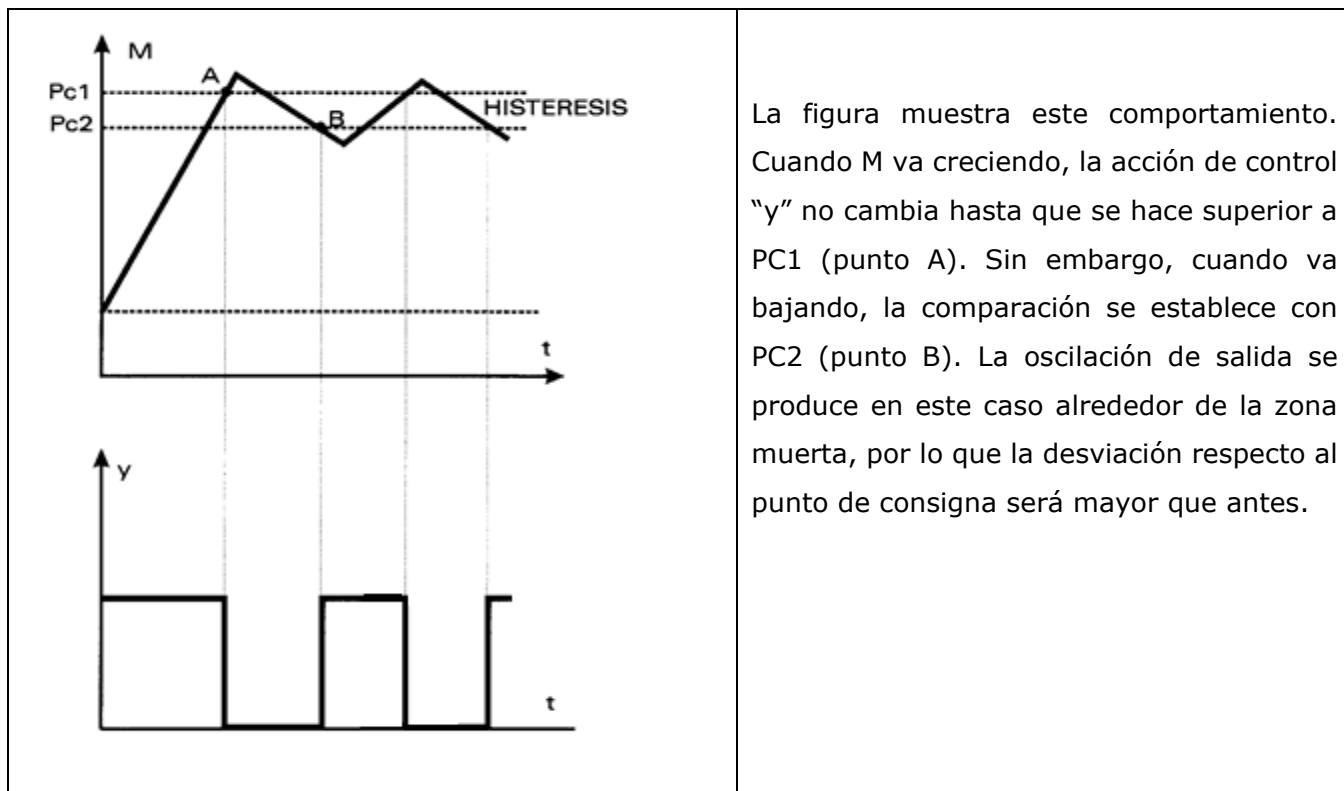
Figura 4.2. Respuesta con regulador todo/nada.

La figura anterior muestra cómo evolucionaría la salida  $M$  en el tiempo si introdujéramos un punto de consigna " $Pc1$ " en un instante dado. En el punto A la acción de control " $y$ " pasa a nivel bajo, pero la salida  $M$  sigue subiendo debido a la inercia del proceso, para luego bajar. Al llegar a B la " $y$ " vuelve a nivel alto y la válvula se abre, pero hasta que no pasa un cierto tiempo  $M$  no vuelve a crecer (debido a la inercia).

La salida del proceso estará continuamente oscilando alrededor del punto de consigna, por lo que si el elemento de actuación es electromecánico llegaremos a un ciclo de apertura-cierre rápido que reduciría la vida útil del mismo.

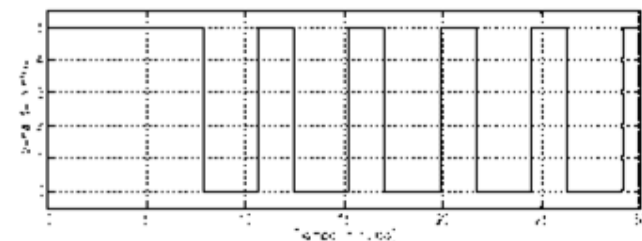
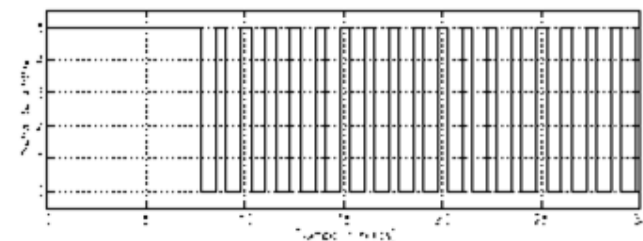
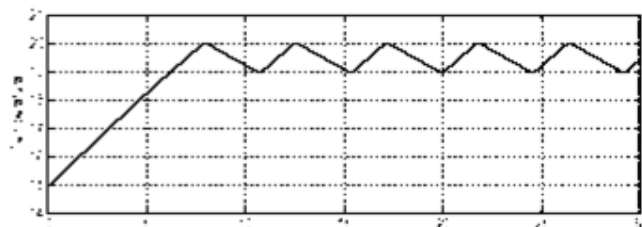
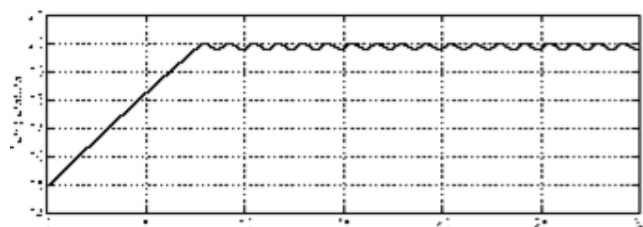
## Controlador todo / nada con histéresis (banda muerta).

Una variante del anterior es el regulador todo/nada con zona muerta o histéresis. Alrededor del punto de consigna se da una banda (histéresis) en la que el regulador se comporta de forma diferente según que vaya subiendo o bajando M.



Se establecerá una histéresis en el controlador siempre que se prevea que la salida del proceso va a estar subiendo y bajando por encima y debajo del punto de consigna de forma reiterada. De esta forma evitamos una frecuencia elevada de apertura y cierre de la válvula o puesta en marcha de motores en el caso de electrobombas, electrocompresores, etc., que **dañaría mecánicamente** dichos elementos.

En las figuras siguientes podemos ver el comportamiento de la salida (gráfico superior), frente a una histéresis pequeña (figuras de la izquierda) y a una histéresis grande (figuras de la derecha), en las figuras inferiores vemos el comportamiento de la salida de control.



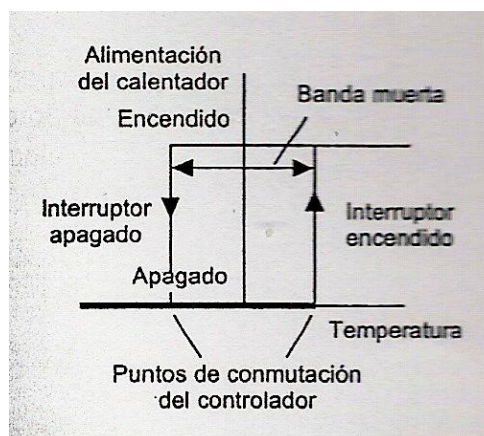
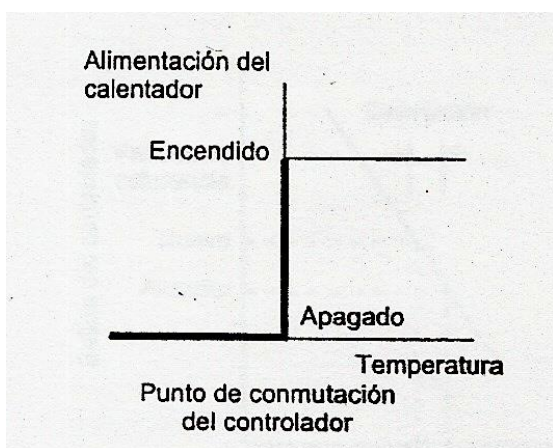
Cuanto menor es la histéresis más veces tenemos que conmutar la salida por minuto, lo que ocasiona una reducción de vida del elemento final de control pero una mejor estabilización. El **inconveniente** de este tipo de control es, como es fácil observar, que la estabilidad de la variable se pierde debido a que está oscilando en el entorno de la histéresis prefijada.

En resumen en control todo / nada con histéresis frente al todo / nada:

- Reduce las oscilaciones y por tanto el desgaste del elemento final de control.
- Se obtiene menos precisión en torno al punto de consigna.
- A mayor anchura de la zona muerta se reduce la frecuencia de oscilación.

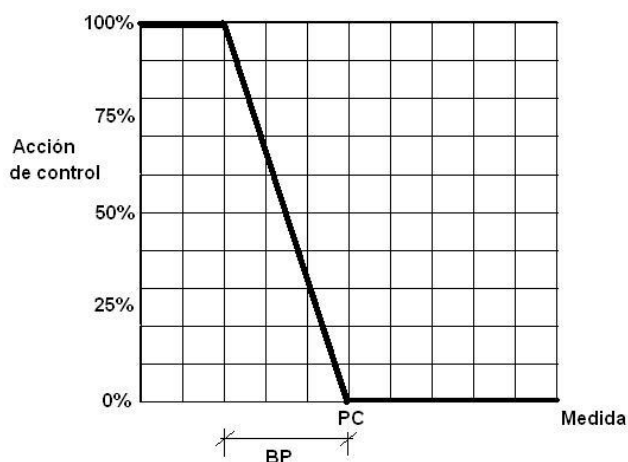
En general, aunque el control de dos posiciones no es muy preciso, es muy utilizado en aplicaciones que no necesiten gran precisión y estabilidad, debido a su sencillez y bajo precio. También en procesos lentos, por ejemplo la temperatura, donde el PV varia de manera lenta. En procesos rápidos, por ejemplo control de velocidad, no podríamos aplicar este tipo de control.

**Ejercicio 1.** Interpreta las siguientes gráficas correspondientes a un control todo / nada y un control todo / nada con histéresis.



### 3. CONTROL PROPORCIONAL (P).

En el control todo / nada, la salida es una señal de encendido o apagado sin importar la magnitud del error. En el control proporcional, la magnitud de la señal de salida del controlador es proporcional a la magnitud de error. Esto significa que el elemento de corrección del sistema de control, por ejemplo, una valvula, recibirá una señal que dependerá del valor de la corrección requerida. La figura muestra como varia la salida del controlador en función del error.



Lo que se hace es establecer una banda proporcional, BP, con respecto al PC o SP y dentro de dicha banda, la salida se hace proporcional al error. Dentro de dicha banda proporcional, la salida varía linealmente entre el 0% y el 100%. Los valores de salida  $y(\%)$  están representados por la siguiente ecuación:

$$y(\%) = \frac{100}{BP} \cdot \text{error} = \frac{100}{BP} \cdot (SP - PV) = K \cdot (SP - PV)$$



Por tanto el parametro característico de un control proporcional es su BP, que se expresa en %, respecto al campo de medida total. En ocasiones la salida se expresa como:  $y(\%) = K \cdot error$ , siendo **K** la ganancia del regulador. La relación entre **BP** y **K** es:  $K = \frac{100}{BP}$

En la figura podemos observar que hay tres zonas:

- Mientras la medida (PV) está fuera de la BP y por encima de ella, la salida y, estará al 100% (totalmente abierta). En este caso el error será grande.
- Cuando la medida está situada dentro de la BP, el regulador tiene un comportamiento proporcional, haciendo que la válvula se abra más o menos, según que la medida esté más o menos alejada del SP. Es decir, dependiendo del error, la válvula abre más o menos.
- Finalmente cuando la medida alcanza el SP, la salida estará al 0% y si la medida supera el SP, la salida también estará al 0%, es decir completamente cerrada.

**Ejercicio 2.** Tenemos un regulador proporcional para el control de temperatura. El SP=70°C, el intervalo de medida está entre 0°C y 100°C. La BP=30%. La señal de salida del regulador varía entre 0V y 10V.

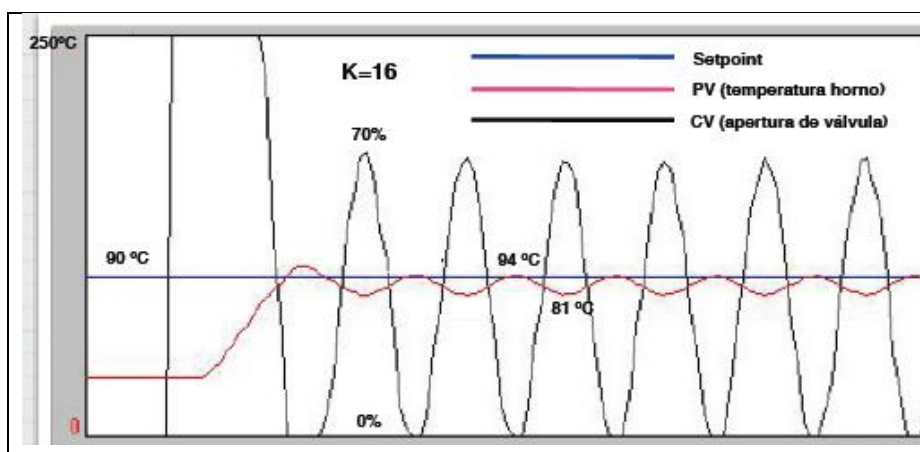
- Dibuja la gráfica de la salida (y) en función de la PV.
- ¿Qué vale la salida para los siguientes valores de PV : 35°C, 45°C, 65°C y 70°C?.
- ¿A qué temperatura la salida será del 50%, es decir valdrá 5V?.

**Ejercicio 3.** Repite el ejercicio anterior si la BP=5%.

Una BP pequeña (K grande) hace que cambios muy pequeños de la medida (PV), provocan que la salida varíe del 0% al 100%. Es decir un recorrido completo de la válvula. Esto supone convertir al regulador proporcional en uno del tipo todo / nada. En concreto un control P con una BP=0% es un control todo / nada.

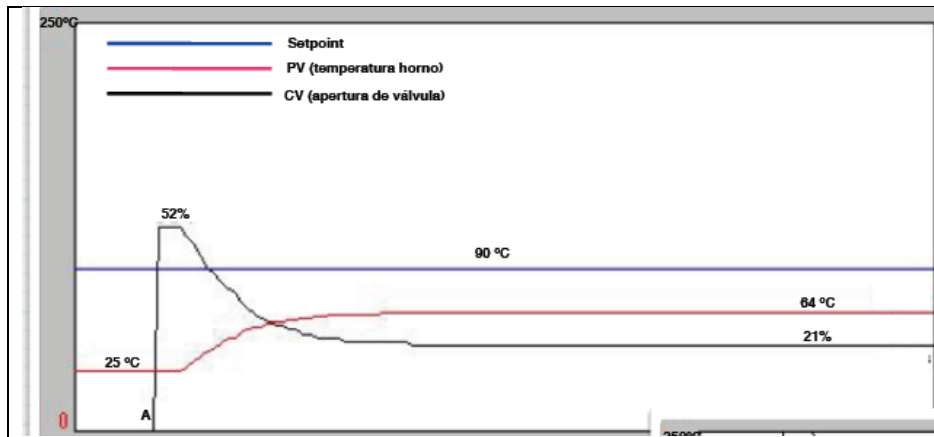
Una BP grande (K pequeña) hace que la salida varíe desde el 0% al 100%, para unos cambios en la medida (PV) mayores.

Por tanto, con todo esto, ¿Qué regulador proporcional será más rápido en alcanzar el SP? ¿Un regulador con K grande o pequeña?.

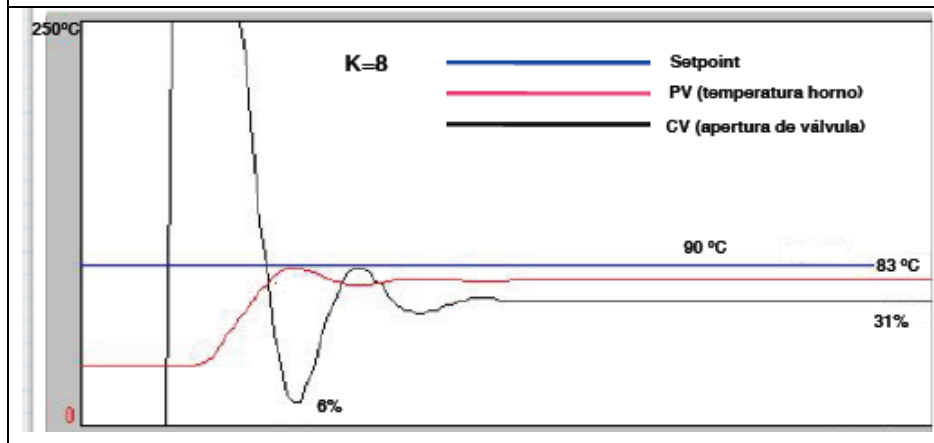


Si la K es demasiado grande, habrá oscilaciones de PV ante un nuevo valor de SP.





Si la  $K$  es muy pequeña, la respuesta del proceso será muy estable bajo condiciones de estado estacionario, pero "lenta" ante cambios de SP porque el controlador no tiene la suficiente acción agresiva para realizar cambios rápidos en el proceso (PV).



Con control proporcional, la única manera de obtener una respuesta de acción rápida ante cambios de SP o "perturbaciones" en el proceso es fijar una  $K$  adecuada hasta la aparición del algún "overshoot" o sobre impulso

Cuanto mayor la  $K$  más rápido alcanzará el sistema el SP (recordemos que cuanto mayor sea la  $K$ , más nos acercamos a un control todo / nada). Aunque al aumentar mucho la  $K$ , corremos el riesgo de sobrepasar el SP y provocar oscilaciones en el proceso, convirtiendo el sistema en inestable.

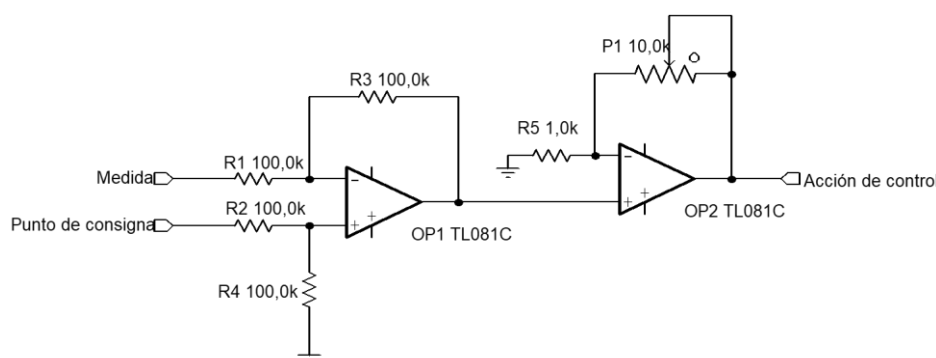
Cuanto menor la  $K$ , más lento alcanzará el sistema el SP (el sistema tiene una velocidad de reacción lenta), aunque nos aseguramos que no sobrepasaremos el SP y no provocaremos oscilaciones.

**Ejercicio 4.** Queremos regular un sistema con una constante de tiempo pequeña, con un regulador P. Explica como debe ser la BP y porque.

**Ejercicio 5.** Control P, SP=110°C, BP=20%, intervalo de medida entre 0°C y 150°C.

- Dibujar la gráfica y / PV.
- Valor de  $Y$  en % si PV=90°C
- Valor de PV si  $y=50\%$ .

### Implementación del regulador proporcional mediante amplificadores operacionales.

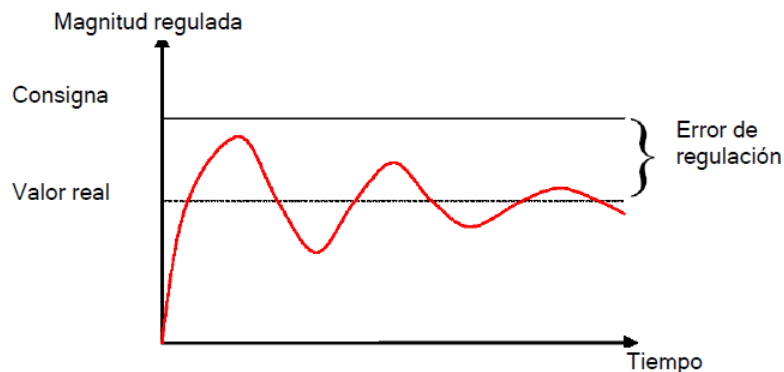


Con OP1 obtenemos la señal de error  $E=SP-PV$ . Esta señal se amplifica con OP2, siendo P1 la que permite ajustar la ganancia K.

$$Y = \left(1 + \frac{P1}{R5}\right) \cdot (SP - PV) = K \cdot error ; \text{ siendo el valor de } K = \left(1 + \frac{P1}{R5}\right)$$

### 3.1. El problema del error de regulación en el control proporcional.

El problema que presenta el control P es que la medida PV, jamás alcanzará el SP. En la práctica la medida se estacionará en un punto dentro de la BP y menor al SP. Esto es lo que se conoce como **error de regulación** o **error estacionario**.



La razón es fácil de entender mediante el siguiente ejemplo. Supongamos que en un horno el  $SP=200^{\circ}C$ , la temperatura se estaciona en  $200^{\circ}C$  en forma estable y permanente, entonces la salida sería 0%.

Pero siempre es necesario suministrarle al horno algo de potencia, por lo menos cómo para compensar las pérdidas de calor al medio ambiente o calor contenido en el material que sale del horno. Es evidentemente imposible que el horno se mantenga a  $200^{\circ}C$  con los calefactores permanentemente apagados ( $y=0\%$ ). La salida deberá aumentar, con lo que la temperatura será inferior a los  $200^{\circ}C$  y se producirá el error estacionario.

Además cuanto menor sea la BP (mayor sea K), menor será el error estacionario y cuanto mayor sea la BP (menor sea K) mayor será el error estacionario. La solución para el problema del error de regulación permanente es un regulador de acción integral.

## 4. CONTROL INTEGRAL (I).

El principal inconveniente de un regulador P es que deja siempre un error por corregir, tanto mayor, cuanto menor es la ganancia K. El regulador integral permite anular este error, haciendo que la salida crezca proporcionalmente al producto (error x tiempo). La ecuación de salida de un control integral es:

$$y = \frac{1}{T_i} \int_0^t (SP - PV) \cdot dt = \frac{1}{T_i} \int_0^t e \cdot dt$$

A  $T_i$  se le denomina tiempo integral (en segundos) y cuanto menor sea más efecto tiene la acción integral.

¿Cuál es el significado de la integral del error? → El concepto de integral nos indica la suma acumulada de los errores medidos por segundo. Por tanto nos indica la magnitud del error y el tiempo que este permanece.

En resumen podemos decir que un regulador integral nos indica que en tanto exista un error, la salida irá aumentando a fin de corregir dicho error. En el momento en que el error es nulo el regulador mantiene el valor de la salida constante.

Podemos decir que el regulador integral hace aumentar la salida, mientras el error se mantiene constante en el tiempo.

## 5. CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL (PI).

El control integral no se utiliza solo, sino que se utiliza conjuntamente con el control proporcional, formando el control PI:

$$y = K \cdot e + \frac{1}{T_i} \int_0^1 e \cdot dt$$

En ocasiones el algoritmo del control PI corresponde con la siguiente ecuación:

$$y = K \cdot \left( e + \frac{1}{T_i} \int_0^1 e \cdot dt \right)$$

La acción integral se basa en sumar su efecto sobre la acción proporcional, corrigiéndola, tomando en cuenta la magnitud del error y el tiempo que este ha permanecido.

La salida se corrige en una cantidad equivalente a la integral del error multiplicada por  $T_i$ , la integral del error es simplemente la suma acumulada de los errores medidos por el control cada segundo. La idea es que la salida del control será la misma que en un control proporcional más la magnitud del sumatorio multiplicada por la constante ( $1/T_i$ ). Internamente el control PI realiza el cálculo con la siguiente fórmula:

$$y = K \cdot \left( error + \frac{1}{T_i} \Sigma error \right)$$

Veamos un ejemplo, en el cual tenemos un control PI para controlar la temperatura de un horno. La acción integral  $T_i=25\text{seg}$ , el  $SP=200^\circ\text{C}$ ,  $BP=20\%$ . Con la temperatura estacionada en  $195^\circ\text{C}$  a partir del tiempo 1, se activa la acción integral, desde ese momento cada segundo la integral del error aumenta en  $5^\circ\text{C}$ .

La potencia de salida irá aumentando cada segundo, mientras el error sea  $5^\circ\text{C}$ , en la cantidad:

$$y = K \cdot \left( error + \frac{1}{T_i} \Sigma error \right) = \frac{100}{20} \cdot \left( 5 + \frac{1}{25} \cdot 5 \right) = 26\%$$

En el instante siguiente, el error aún es 5, por lo que sumado al anterior tenemos un error acumulado de 10, por tanto la acción PI, resuelve:

$$y = K \cdot \left( error + \frac{1}{T_i} \Sigma error \right) = \frac{100}{20} \cdot \left( 5 + \frac{1}{25} \cdot 10 \right) = 27\%$$

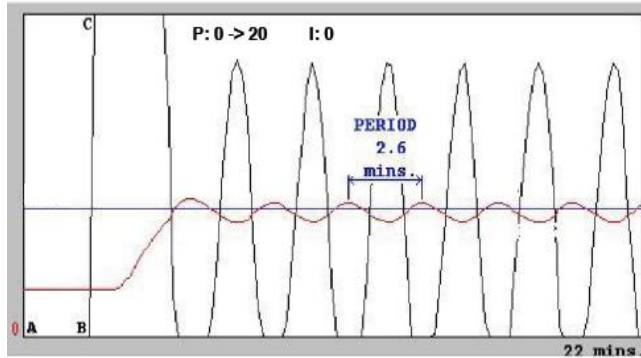
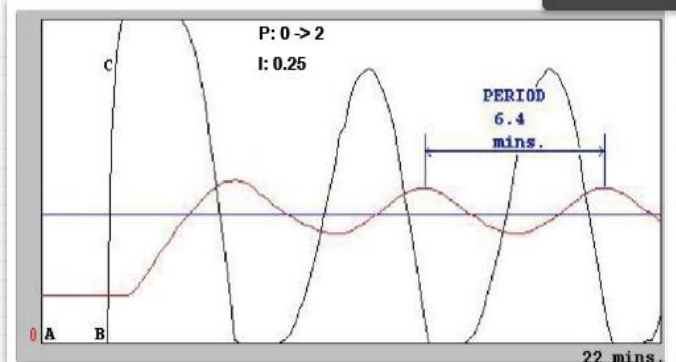
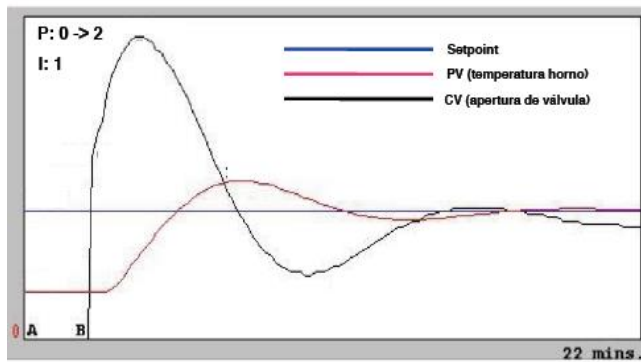
Y así sucesivamente.

Seg	PV °C.	Error °C	$\Sigma$ Error °C	Acción PI
0	195	5	0	25 %
1	195	5	5	26 %
2	195	5	10	27 %
3	195	5	15	28 %
4	195	5	20	29 %
5	195	5	25	30 %
6	196	4	29	25.8 %
7	196	4	33	26.6 %
8	196	4	37	27.4%
9	196	4	41	28.2%
10	196	4	45	29 %
11	197	3	48	24.6 %
12	197	3	51	25.2 %
...	...	...	...	...
7	196	4	33	26.6 %
8	196	4	37	27.4%
9	196	4	41	28.2%
10	196	4	45	29 %
11	197	3	48	24.6 %
12	197	3	51	25.2 %
13	197	3	54	25.8 %
14	197	3	57	26.4 %
15	198	2	59	21.8 %
16	198	2	61	22.2 %
17	198	2	63	22.6 %
xx	200	0	125	25%

El proceso continua de la misma forma, aumentando el sumatorio del error hasta que en algún momento el error sea definitivamente eliminado, pues solo en ese momento se detendrá el incremento de la potencia de salida.

¿Cómo influye la variación de la K y del  $T_i$  en el regulador PI?

- Si disminuye  $T_i$  (lo que significa reforzar la acción integral), la salida crece más rápidamente y el sistema alcanzará más rápidamente el SP con lo cual provocaremos un sobrepaso. Entonces la acción integral (con error negativo) será en sentido contrario, el sumatorio irá disminuyendo rápidamente con la magnitud del error. Como consecuencia habrá una excesiva disminución de la potencia de salida y la temperatura probablemente baje del SP, entrando así el sistema en un ciclo oscilatorio.
- Si aumenta  $T_i$  (lo que significa reducir la acción integral), la salida crece más lentamente y el sistema tardará más tiempo en alcanzar el SP. Es decir se tardará más tiempo en reducir el offset. En este caso el sobrepaso del SP será menor (o no habrá sobrepaso) y no habrá oscilaciones de la medida.
- La variación de la K tiene las mismas consecuencias que en el regulador P.

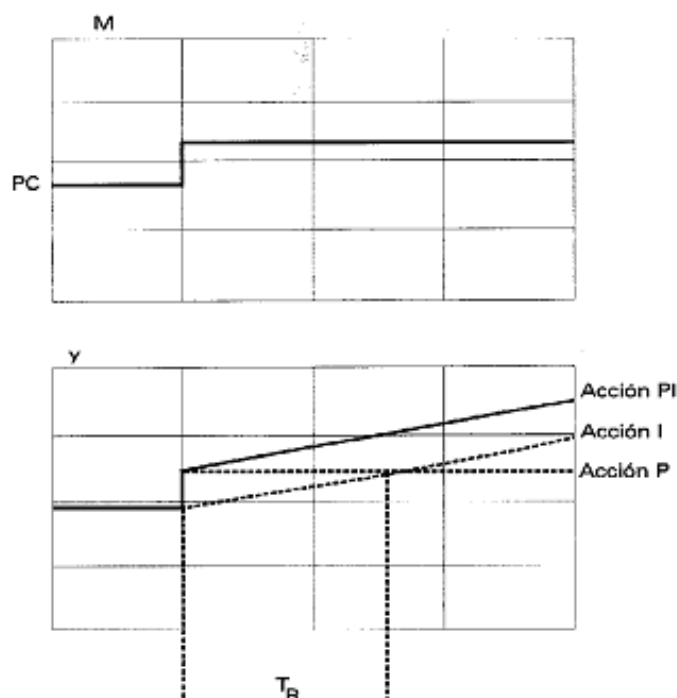


En la última figura se muestra, no obstante, el sistema en el que se ha cambiado la ganancia proporcional a 20, eliminando la parte integral. Resulta, como vimos ya anteriormente, en un sistema oscilatorio, pero lo interesante es que la frecuencia de oscilación de CV es mayor en este caso que en el anterior:

*“Cuando en un sistema tenemos oscilaciones persistentes con una frecuencia alta, lo más probable es que se deban a la parte proporcional, mientras que cuando las oscilaciones tengan una frecuencia mantenida baja, será muy posiblemente la parte integral quien las esté causando.”*

En la práctica normalmente **Ti deberá ser grande solo en sistemas que reaccionan rápidamente**, (por ejemplo controles de velocidad de motores ) y pequeña para sistemas lentos con mucha inercia. (por ejemplo control de temperatura).

El tiempo **Ti** es el tiempo que debe transcurrir para que la salida del regulador por efecto de la acción integral se iguale a la salida por efecto de la acción proporcional. La figura siguiente muestra un ejemplo en el que se explica este concepto. Como se ve en la figura, la respuesta proporcional se verá inmediatamente en la salida, seguida de la acción integral.



## 6. CONTROL DERIVATIVO (D).

Las acciones proporcional e integral no permiten resolver de forma satisfactoria todos los problemas en la regulación de un proceso. De la primera hemos dicho que dejaba siempre un error permanente y de la segunda que podía causar inestabilidad o un tiempo de respuesta elevado.

La acción derivada complementa a las dos anteriores, ayudando a obtener una respuesta dinámica más rápida, es decir, un tiempo de respuesta menor.

En un regulador derivativo la salida del mismo es proporcional a la derivada con respecto al tiempo de la señal de error. La ecuación de salida de un control derivativo es:

$y = T_D \frac{de}{dt}$   $T_D$  es el tiempo derivativo y cuanto mayor es más efecto tiene la acción derivativa.

¿Cuál es el significado de la derivada de la señal error? → Nos indica el valor de la pendiente de la señal de error. (Ver ejemplos).

La salida por efecto derivativo no depende del valor del error, (como sucedía con la acción integral), sino de la velocidad de cambio del mismo. La acción derivada tiene un efecto anticipativo, es decir tiende a corregir el error en el momento en que se detecta que este tiende a cambiar. Ni el regulador P ni el I responden bien a los errores que varían rápidamente, solo el regulador D responde ante estos errores.

La acción D se utilizará para hacer más rápido un sistema ante cambios de SP y sobre todo para corregir rápidamente las perturbaciones externas. Si el error es constante, solo actúan el control proporcional e integral, pero no el derivativo.

## 7. CONTROL PROPORCIONAL DERIVATIVO (PD).

La acción D nunca se utiliza sola, sino que se utiliza combinada con la acción P, formando un PD o con un PI, formando un PID. La ecuación de un control PD es:

$$y = K \cdot e + T_D \frac{de}{dt}$$

En ocasiones el algoritmo del control PD corresponde con la siguiente ecuación:

$$y = K \cdot \left( e + T_D \frac{de}{dt} \right)$$

La combinación de la acción P con la acción D hace que el regulador PD sea más rápido que el regulador P.

- Cuanto más aumenta  $T_D$  más rápido será el sistema en corregir las perturbaciones, aunque puede provocar oscilaciones en el sistema.
- Si disminuye  $T_D$  el sistema será más lento.

La acción de control derivativa tiene las siguientes **particularidades**:

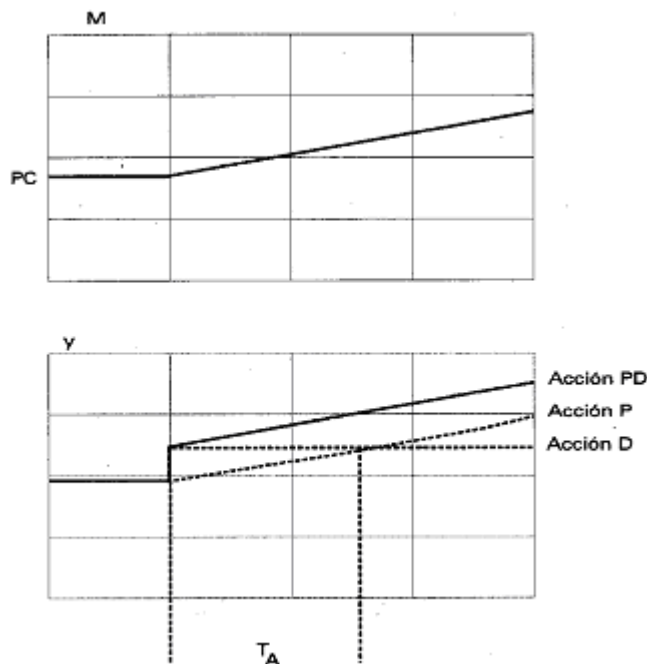
- a) Si el error es constante la salida es nula.
- b) Si el error cambia de forma brusca, la salida tiende al infinito, es decir el actuador dará su máxima acción (saturación positiva o negativa).

- c) Si el error empieza a crecer o decrecer de forma lineal, la salida es una constante proporcional a la velocidad de crecimiento o decrecimiento.

Por lo tanto se llega a las siguientes **conclusiones**:

- Debido a que cuando el error es constante la salida es nula, no se puede utilizar este controlador de forma aislada, **lo usaremos siempre en configuración PD o PID**.
- Ya que la salida tiende al infinito cuando el error cambia de forma brusca, **no se podrá usar este controlador con sistemas que tengan mucho ruido**, ya que este puede saturar la salida sin que el "error verdadero" haya aparecido.

El tiempo de avance,  $T_d$ , es el tiempo que debe transcurrir para que la salida por efecto proporcional se iguale a la salida por efecto derivativo.



## 8. CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID).

La ecuación de un control PID tiene las tres acciones vistas:

$$y = K \cdot \left( e + \frac{1}{Ti} \int_0^t e \cdot dt + Td \frac{de}{dt} \right)$$

Un regulador PD reacciona muy rápido. Sin embargo, este regulador no puede eliminar el error permanente u offset que se genera. Por otra parte, el regulador PI elimina totalmente el error permanente, pero en ocasiones no es suficientemente rápido. La combinación de las tres acciones da como resultado el PID, el cual es un regulador mucho más rápido y elimina totalmente el error.

1. El control proporcional produce una acción de control que es proporcional al error. La señal correctora aumentará en la medida que lo haga el error. Si el error disminuye, también disminuye la magnitud de la corrección y el proceso de corrección también se desacelera.



2. El control integral para una señal de error constante, producirá una señal de corrección que aumentará de forma constante. La corrección seguirá aumentando en tanto que el error persista.
3. El control derivativo produce una acción de control que es proporcional a la rapidez con la cual el error está cambiando. Cuando hay un cambio súbito en la señal de error, el controlador produce una señal correctora de gran magnitud; cuando el error es gradual, solo se produce una pequeña señal correctora. Se puede considerar que el control derivativo es una forma de control de anticipación, toda vez que al medir la rapidez con la que cambia el error se anticipa la llegada de un error mayor y se aplica la corrección antes de que este llegue.

## 9. SELECCIÓN Y AJUSTE DEL CONTROLADOR

En general puede establecerse que:

- Cuando no es importante la rapidez para alcanzar la estabilidad, pero sí lo es no causar sobre oscilaciones (inestabilidad), usar una acción P con K pequeña.
- Cuando se desee una rápida estabilización y no importen los sobre oscilaciones, aumentar la ganancia. Si la ganancia es demasiado grande se producirán oscilaciones.
- Cuando se producen sobre oscilaciones puede ser que la acción I sea demasiado fuerte ( $T_i$  pequeño), deberemos incrementar el tiempo de integración y/o disminuir la ganancia del control P.
- Si la acción derivativa D es demasiado fuerte ( $T_d$  grande), y el sistema responde excesivamente rápido podemos tener oscilaciones.

### Reglas heurísticas de ajuste

#### Paso 1: Acción Proporcional

- Tiempo integral ( $T_i$ ), a su máximo valor.
- Tiempo derivativo ( $T_d$ ), a su mínimo valor.
- Empezando con ganancia baja se va aumentando hasta obtener las características de respuesta deseadas.

#### Paso 2: Acción integral

- Reducir el  $T_i$  hasta anular el error en estado estacionario, aunque la oscilación sea excesiva.
- Disminuir ligeramente la ganancia.
- Repetir hasta obtener las características de respuesta deseadas.

#### Paso 3: Acción Derivativa

- Mantener ganancia y tiempo integral obtenidos anteriormente.
- Aumentar el  $T_d$  hasta obtener características similares, pero con la respuesta más rápida.
- Aumentar ligeramente la ganancia si fuera necesario.

En la tabla se puede resumir los resultados según los valores de ajuste:

	Kp aumenta	Ti disminuye	Td aumenta
Estabilidad	Se reduce	Disminuye	Aumenta
Velocidad	Aumenta	Aumenta	Aumenta
Error estacionario	No eliminado	Eliminado	No eliminado
Área de error	Se reduce	Disminuye hasta cierto punto	Se reduce
Perturbación control	Aumenta bruscamente	Aumenta gradualmente	Aumenta muy bruscamente
Frecuencia lazo	No afecta hasta cierto punto	Disminuye	Aumenta

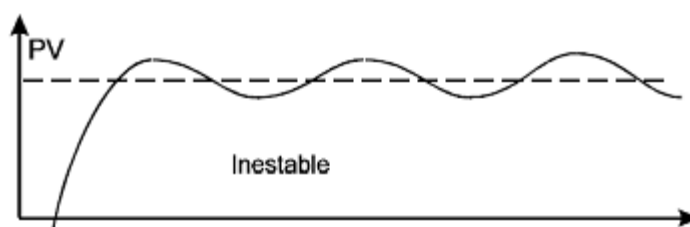
A esta altura nos estamos preguntando cómo elegir los valores de los parámetros K, I, D, que debemos introducir en el controlador PID. En este sentido la respuesta no es sencilla.

Existe un solo conjunto de valores K, I, D que darán el rendimiento óptimo y encontrarlos requiere: conocimientos teóricos, habilidad obtenida mediante la experiencia y suerte. Pero no hay que desalentarse, en realidad cualquier conjunto de valores cercano al óptimo brindará un rendimiento aceptable y probablemente casi igual al óptimo.

Además afortunadamente hoy en día, muchos reguladores PID disponen de una función de autorregulación conocida como **autotuning**, la cual calcula de forma automática los parámetros idóneos para el proceso que queremos regular.

También existen un par de métodos experimentales para encontrar una aproximación de estos parámetros. Pero antes de entrar en detalle de cómo encontrarlos, definiremos algunos conceptos útiles.

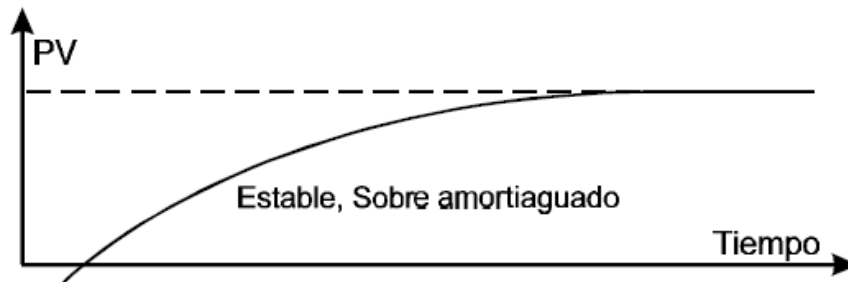
Se dice que un sistema y su controlador tienen un comportamiento **inestable** cuando después de un tiempo razonable de funcionamiento y sin ocurrir perturbaciones externas, la medida permanece fluctuando en forma oscilatoria ya sea con un período regular o errático.



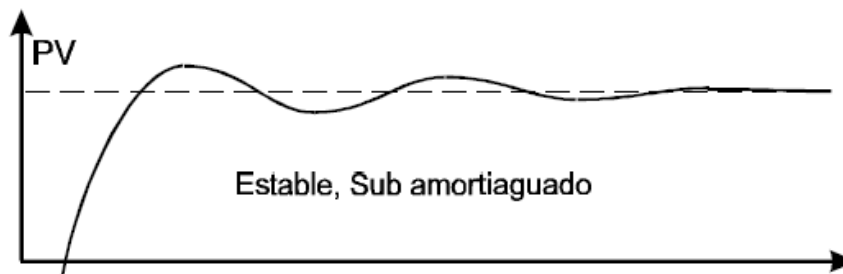
Este sería por ejemplo el caso de un control On/Off o uno proporcional con K muy grande. Por otra parte un comportamiento **estable** es tal que la medida se mantiene en un valor constante mientras no ocurran perturbaciones externas.

Siempre se busca que el sistema de control sea estable, pero además, dentro de las condiciones de estabilidad existen 3 tipos de comportamiento bien definidos: control *subamortiguado*, control con *amortiguamiento crítico* y control *sobreamortiguado*.

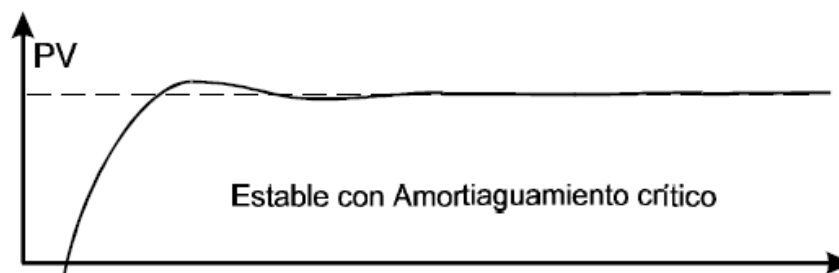
El sistema **sobreamortiguado** tiene una velocidad de respuesta lenta, después que ocurra una perturbación, el sistema puede tardar en volver al SP, pero la ventaja es que el sistema es muy estable y no adquiere comportamientos oscilatorios indeseables. Esta condición tiende a ocurrir cuando la ganancia  $K$  es más pequeña de lo necesario. También puede deberse a una constante derivativa  $D$  muy pequeñas, basta acordarse que la acción derivativa tiende a frenar la medida o también con constante integral  $I$  grande.



En el otro extremo, cuando un sistema se comporta de modo **subamortiguado** la velocidad de respuesta es muy buena pero pueden ocurrir varias oscilaciones de cierta amplitud antes que la temperatura llegue a un valor estable. Suele ocurrir esta condición cuando la ganancia  $K$  es grande (se parece a un On/Off), la constante derivativa  $D$  también grande o la constante de integración  $I$  pequeña.

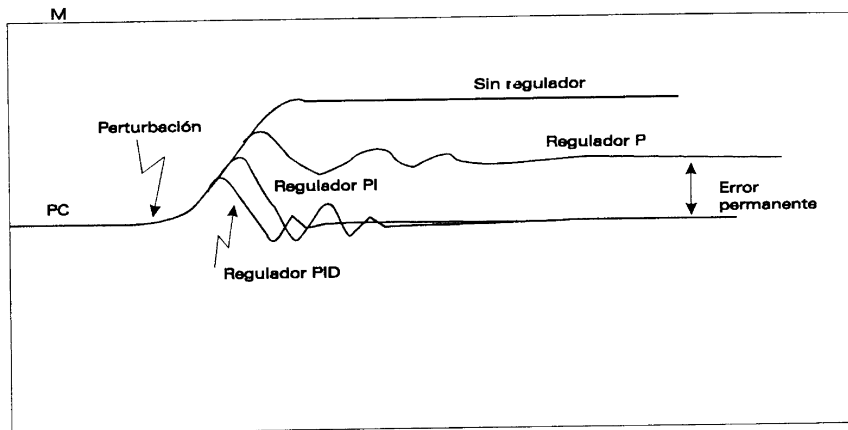


El justo medio entre las condiciones anteriores es el **amortiguamiento crítico**. A esta condición corresponde los valores óptimos de los parámetros  $K$ ,  $D$ ,  $I$ . En este caso el sistema es bastante estable y la velocidad de respuesta es la mejor que se puede lograr.



Si el regulador se sintoniza correctamente conseguiremos que el sistema reaccione de forma correcta ante cualquier perturbación o cambio en la consigna. La figura muestra el efecto de los

diferentes reguladores ante una perturbación externa, siempre que se encuentren ajustados correctamente.



### Podemos apreciar lo siguiente:

- Sin regulador, la salida permanece en el nuevo valor alcanzado, después de la perturbación, ya que la válvula de control no puede variar de posición por si misma.
- Con regulador P, el sistema reacciona de forma que los cambios en la medida hacen que la válvula de control se ajuste a un nuevo valor. La salida alcanzada en esta nueva situación no se sitúa en el SP, es decir, siempre habrá un cierto error permanente que será tanto menor cuanto menor sea la banda proporcional.
- Con regulador PI, el regulador actúa de forma similar pero haciendo que el sistema se comporte mejor, ya que no hay tanta sobreoscilación por encima del SP y, sobretodo, la medida alcanza de nuevo a la consigna, es decir, el error acaba valiendo cero.
- Si añadimos acción derivativa (regulador PID), se producen dos mejoras: menor sobrepasamiento sobre SP y recuperación más rápida.

## 10. TIPOS DE SALIDA DE UN CONTROL PID.

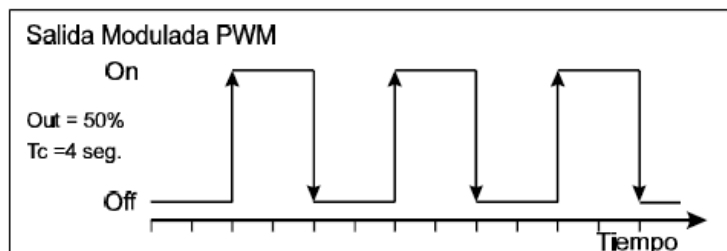
Un controlador PID puede implementarse con dos tipos de salida: salida analógica (proporcional) o salida digital. En el primer caso el actuador se controla con una salida analógica proporcional desde el 0% al 100% y que puede ser en tensión (por ejemplo 0 .. 10V) o en corriente (por ejemplo 4 .. 20mA).

En el segundo caso el actuador se controla a través de una salida digital (puede ser un contacto libre de potencial de un relé o una salida en tensión para SSR). Una modulación de ancho de impulsos (**PWM pulse width modulation**) permite formar tiempos de conexión y desconexión variables. Imaginemos que queremos controlar la potencia de un horno eléctrico. Con un PWM es posible modular de 0% a 100% la salida de un controlador con una salida digital la potencia que recibe un horno eléctrico mediante el mismo tipo de salida que se usaría para un control on/off.

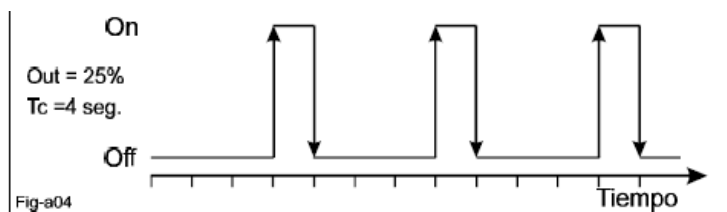
La idea es modular el tiempo de activación de la salida durante un lapso de tiempo fijo, llamado **tiempo de ciclo o periodo de control**, menor a la constante de tiempo del horno de modo que el horno reciba finalmente un promedio de la potencia.

**Ejemplo:** Supongamos que un horno funciona con un calefactor de 1000W, si se requiere una potencia de 500W, equivalente a 50% de la total, entonces se activa 2 segundos el relé y se desactiva otros 2, para luego empezar otro ciclo.

El efecto neto será que el horno recibe 50% de la potencia pero la temperatura no fluctúa al ritmo del tiempo de ciclo pues este es menor al tiempo de respuesta del horno.



Siguiendo con el ejemplo, si hace falta 250W, es decir 25% de la potencia basta con tener 1 segundo activado el relé y 3 segundos desactivado.



Si el periodo de control es muy pequeño, corremos el riesgo de desgastar rápidamente el contacto del relé de la salida digital. Para este caso hay que elegir periodos de control superiores a 5 segundos. Si la salida es una salida en tensión para rele de estado sólido (*SSR solid state relay*), el periodo de control puede ser más pequeño, ya que aquí no existe conmutación de un relé.



## 11. SINTONIZACION DEL PID.

Los valores de la ganancia  $K$ , constante de integración  $I$  y constante de derivación  $D$  determinan el correcto funcionamiento del controlador. Para cada sistema (máquina, horno, etc.) existe un conjunto de estos parámetros que optimiza el funcionamiento del sistema, redundando en mejora de la producción y economía de energía.

Por otra parte una selección no adecuada de parámetros podría provocar un control inestable, es decir una temperatura oscilante y susceptible a perturbaciones. Conviene ahora recordar aquella máxima de la teoría de sistemas dinámicos que dice así: "Si una máquina (o sistema dinámico en general) funciona, **i no lo toque !**".

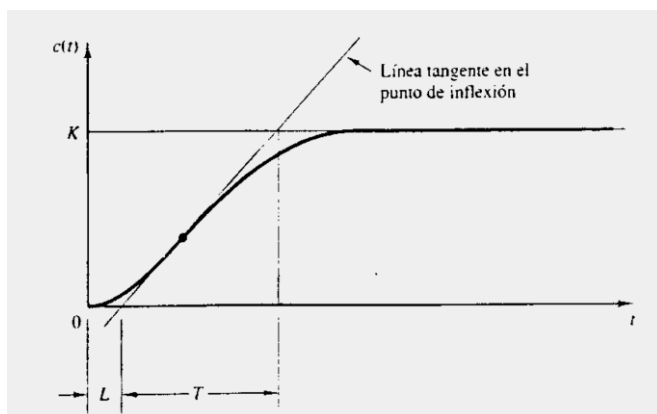
Los valores óptimos para estas constantes son aquellos en que el sistema exhiba un "amortiguamiento crítico". Existen cuatro métodos para sintonizar controladores PID:

1. Por el método de tanteo. Se trata de ir probando diversos valores y ver cómo va evolucionando el proceso.
2. Criterio analítico. Solo si se conoce el modelo matemático del proceso a controlar. Mediante técnicas temporales y/o en frecuencia (no estudiadas por nosotros) es posible calcular los parámetros de regulador.
3. Criterio empírico. Permite calcular los parámetros del regulador sin conocer el modelo matemático del sistema. Hay muchos métodos (tanto en lazo abierto como en lazo cerrado), pero los más conocidos son los de **Ziegler-Nichols**. Hay dos métodos: el de la **curva de reacción (en lazo abierto)**, y el de la **oscilación crítica (en lazo cerrado)**.
4. Autotuning o sintonización automática. Hoy en día casi todos los PID digitales disponen de esta función, la cual calcula de forma automática los valores óptimos para nuestro proceso.

Lo que se persigue es que, ante una perturbación, se obtenga una curva de variación de la medida que se recupere rápidamente y que no produzcan demasiadas oscilaciones. Los métodos de Ziegler-Nichols basan obtener un **25% de sobreoscilación** máxima en la respuesta escalón. Esta sobreoscilación puede no ser admisible en muchos casos, estas reglas son una primera aproximación a los valores correctos de K, I y D. Pudiendo posteriormente ser ajustados de forma manual a partir de la aproximación realizada.

#### 11.1. Método de la curva de reacción.

Consiste en abrir el lazo colocando el regulador en manual y aplicar un escalón directamente a la válvula. Se obtiene la respuesta temporal del proceso, siendo su aspecto como el indicado en la figura siguiente:



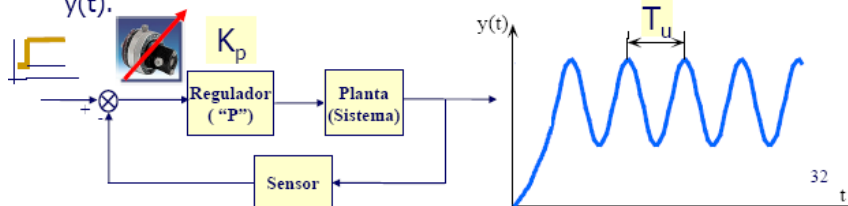
Las características que describen el comportamiento del proceso son  $L$  y  $T$ . A partir de estos datos podemos calcular el regulador como sigue:

Tipo de controlador	BP	I	D
<b>P</b>	$\frac{100 \cdot K \cdot L}{T}$	$\infty$	0
<b>PI</b>	$0.9 \cdot \frac{100 \cdot K \cdot L}{T}$	$L/0.3$	0

<b>PID</b>	$1.2 \cdot \frac{100 \cdot K \cdot L}{T}$	$2 \cdot L$	$0.5 \cdot L$
------------	---	-------------	---------------

## 11.2. Método de la oscilación crítica.

- Se conecta el Regulador en modo "P", es decir, con los parámetros  $T_i$  y  $T_d$  ajustados al valor que produzca menor contribución a la señal de control:  $T_i \rightarrow \infty$ ,  $T_d \rightarrow 0$ .
- Se va aumentando la ganancia  $K_p$  hasta obtener una *respuesta oscilatoria de amplitud constante*.
- Se *anota* el valor de la ganancia última  $K_u = K_p$  y del periodo  $T_u$  de  $y(t)$ .



Regulador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5 K_u$		
PI	$0.4 K_u$	$0.8 T_u$	
PID	$0.6 K_u$	$0.5 T_u$	$0.125 T_u$

## Starting PID Settings For Common Control Loops

LoopType	PB %	Integral min/rep	Integral rep/min	Derivative min	ValveType
Flow	50 to 500	0.005 to 0.05	20 to 200	none	Linear orModifiedPercentage
LiquidPressure	50 to 500	0.005 to 0.05	20 to 200	none	Linear orModifiedPercentage
Gas Pressure	1 to 50	0.1 to 50	0.02 to 10	0.02 to 0.1	Linear
LiquidLevel	1 to 50	1 to 100	0.1 to 1	0.01 to 0.05	Linear orModifiedPercentage
Temperature	2 to 100	0.2 to 50	0.02 to 5	0.1 to 20	EqualPercentage
Chromatograph	100 to 2000	10 to 120	0.008 to 0.1	0.1 to 20	Linear

These settings are rough, assume proper control loop design, ideal or series algorithm and do not apply to all controllers. Use ExperTune's [PIDLoop Optimizer](#) to find the proper PID settings for your process and controller. (From *Process Control S*)

## 12. INSTRUCCIÓN PID en S7-1200.