

## **INTRODUCCIÓN A LA AUTOMATIZACIÓN**

### **EL ELEMENTO TIEMPO EN LA MEDICION**

En un sistema de regulación automática, se encuentra generalmente, el circuito indicado en la figura 64. El elemento sensitivo y de medición, relacionado con el regulador, tiene una característica muy importante, que es la velocidad de respuesta. El control automático es una función dinámica, donde la velocidad de detección y el tiempo de respuesta de los dispositivos de medida y regulación constituyen una parte esencial de un análisis, lo mismo que el error estático, la precisión y la zona muerta. Si la medición es deficiente, el regulador perezoso y no se detectan pequeños cambios, el control automático no es correcto.

El elemento tiempo, en general, se llama retraso. Por ejemplo, el bulbo de un termómetro no acusa instantáneamente un cambio de temperatura; el calor debe transmitirse a través de la pared del bulbo, al medio que lo llena y el cambio de presión al receptor.

El retraso de los sistemas de medición consta de tres partes: el que corresponde al elemento sensitivo o primario, al transmisor de la información y al receptor del regulador.

Si se sumerge bruscamente el bulbo desnudo de un termómetro en un baño a temperatura constante, los valores crecientes de temperatura se registran según las curvas logarítmicas de la figura 65, donde se observa que no se alcanza la temperatura final. En la figura 66, si la temperatura del baño tiene el valor 1.0, el valor "y" que indica el termómetro en función del tiempo es:

$$y = 1 - e^{-t/L}$$

t : tiempo en minutos; e = 2.71828..

L : coeficiente de retraso o tiempo en minutos en el cual, el termómetro alcanza el 63.2% de la temperatura del baño ( 0.632 en el gráfico ); varía entre 0.01 y 14 minutos

Para un par cromel / alumel desnudo es L = 0.58 min.

### **ERROR DINAMICO**

Si la temperatura del baño varía con el tiempo, se observa en la figura 67 que después de un corto tiempo, la temperatura indicada (y) va retrasada de una cantidad casi constante, respecto a la del baño (x) y se define como:

Error dinámico de la medición:  $x - y = K * L$

(válido aproximadamente para valores de L pequeños), siendo K la velocidad con que varía la temperatura del baño en grados / min.

La figura 68 muestra el caso de una variación senoidal de la temperatura del baño. La temperatura va desfasada y su amplitud es menor.

En los casos de medición de presión, caudal y nivel, la respuesta es más rápida (figura 69).

### **ERROR ESTATICO Y ZONA MUERTA DE LA MEDICION**

El error estático de una medición es el que proviene del instrumento al determinar un valor concreto de la variable medida. Depende de la calidad del instrumento y de la manera como se realiza la medición. No afecta al control automático en el aspecto de la regulación.

La zona muerta de los elementos de medición de un regulador, o insensibilidad, es el intervalo en que puede cambiar el valor de la variable regulada sin que el regulador actúe. Generalmente es pequeña y menor que 0,2 % de la escala.

### **LA REALIMENTACION**

Cuando se estudia el comportamiento de un proceso, es útil el concepto de realimentación. Para comprenderlo mejor se considera el ejemplo de la figura C-1:

Supongamos que en un determinado momento, el nivel del líquido en el tanque está fijo en un cierto valor, o sea en estado estacionario. El caudal de salida Fs debe ser igual a la suma de los caudales de entrada Fa y Fb (con densidades iguales):

$$Fa = 40 \text{ m}^3/\text{h};$$

$$Fb = 60 \text{ m}^3/\text{h};$$

$$Fs = 100 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$\text{Nivel } H = 1 \text{ m}$$

El caudal  $F_s$  depende de la altura  $H$  y de la sección de apertura de la válvula de salida. Si el caudal  $F_a$  aumenta a  $60 \text{ m}^3/\text{h}$  y se mantiene constante la apertura de la válvula, el nivel aumenta hasta que  $F_s$  sea igual a  $60 + 60 = 120 \text{ m}^3/\text{h}$  y ahí se mantiene constante nuevamente. O sea que si  $F_a$  o  $F_b$  varían, también varía en el mismo sentido el nivel  $H$ , que hace variar el caudal  $F_s$  hasta que se estabiliza en un nuevo valor. Esto es lo que se denomina "realimentación negativa" del proceso.

### **EL CONTROL MANUAL**

Si se deseara mantener el nivel constante en un cierto valor, para cualquier caudal  $F_a$  o  $F_b$ , sería necesario regular la apertura de la válvula, para cambiar el caudal  $F_s$  en un valor mayor que el correspondiente a un cambio transitorio del nivel  $H$ . En este caso la realimentación negativa proviene de una acción externa (del hombre).

### **EL CONTROL AUTOMÁTICO**

Si se reemplaza esta tarea correctiva del hombre, por un mecanismo que sea capaz de accionar la válvula, para mantener constante el nivel, se implementa un control automático, que es una realimentación negativa adicional a las que ya pueda tener el propio proceso. Un sistema de control automático de nivel, se puede instrumentar como se indica en la figura C-2, controlando la válvula de salida o en la figura C-3, donde se controla la válvula de entrada. En ambos casos, la acción reguladora del hombre es reemplazada por un controlador automático, que recibe una señal (neumática o eléctrica) proporcional al nivel en el tanque, emitida por un transmisor. Esta es la variable medida ( $m$ ) que se compara con el valor deseado ( $VD$ ) o "set point" (punto de ajuste) introducido por el operario, determinando el error ( $e = VD - m$ ). Sobre la base de la magnitud del error y de su signo (positivo o negativo) el controlador emite una señal de salida ( $S$ ) para posicionar la válvula que regula el caudal del fluido, llamado variable manipulada. Este sistema se denomina control en lazo cerrado y se puede representar como en la figura C-4.

### **EL ERROR ESTACIONARIO**

Si la acción del controlador sobre la válvula varía en forma lineal y proporcional al error, para un determinado valor de la variable controlada que sea igual al valor deseado ( $m = VD$ ), o sea error nulo ( $e = 0$ ), el controlador emite una señal inicial ( $S_0$ ) que posiciona la válvula de manera que la variable manipulada (por ej. el caudal) sea tal que la variable medida (el nivel) sea igual al  $VD$ . Para cualquier otro estado del proceso (con otro valor del caudal), la salida del controlador debe ser diferente a  $S_0$ , para cambiar la posición de la válvula; o sea que el proceso se estabiliza con un error diferente de cero. Esta diferencia  $VD - m$  (positiva o negativa), se denomina error estacionario y es inherente al modo de control proporcional. Para eliminarlo hace falta implementar otras acciones de control más inteligentes.

### **RETARDOS**

Desde el instante en que cambia el valor de la variable manipulada (por ej. el caudal) y hasta que se estabiliza el nivel, transcurre un tiempo, o sea que la respuesta del proceso no es instantánea. Lo mismo ocurre cuando se cambia la apertura de la válvula. La respuesta de la variable controlada (nivel) es como se muestra en la figura C-5. El tiempo para el cual el cambio del nivel alcanza el 63,2 % de su valor definitivo, se denomina constante de tiempo. Para sistemas lineales es característico del proceso y no depende de la magnitud de los cambios. Es un retardo de tipo capacitivo.

Otro tipo de retardo es el denominado retardo de distancia-velocidad que es una consecuencia del tiempo que demanda el transporte de masa a través de tuberías, conductos, cintas o rastras, etc. Desde el punto de vista de la estabilidad y de la eficiencia del control, es más perjudicial.

Estos retardos tienen una importancia fundamental en la estabilidad de los lazos cerrados de control automático.

### **GANANCIA ESTÁTICA**

Se define como ganancia estática del controlador ( $K_c$ ), al cociente entre la variación de la señal de salida y la variación de la señal de entrada (medición) que origina a la primera. Esta definición es válida para cualquier elemento del lazo de control. Por ejemplo, en el caso del tanque de figura C-1, si una variación de caudal de  $10 \text{ m}^3/\text{h}$  (entrada), origina un cambio en el nivel de  $0.2 \text{ m}$  (salida), la ganancia estática del proceso sería:

$$K_p = 0.2 / 10 = 0.02 \text{ m} / \text{m}^3/\text{h}$$

Es la sensibilidad de la variable controlada respecto de las variaciones de una de las variables de entrada al proceso.

### **GANANCIA DINAMICA**

Supongamos que en el ejemplo de la figura C-1, el caudal  $F_a$  oscila según una función senoidal entre un valor mínimo y otro máximo (fig.C-6); si la frecuencia de esa oscilación es muy alta, el nivel permanecería constante en el valor que corresponde al valor medio del caudal. En cambio si la frecuencia es muy baja, el nivel sigue las oscilaciones del caudal con la misma frecuencia y con la amplitud que corresponde a la ganancia estática del proceso. Entre ambos casos extremos, la amplitud de las oscilaciones del nivel toma valores intermedios. Se llama "ganancia dinámica" al cociente entre la amplitud de la señal de salida (nivel) y la amplitud de la señal de excitación (caudal), a una cierta frecuencia. Es un concepto muy importante para analizar la estabilidad de un sistema de control de lazo cerrado.

En el caso de un proceso con un retardo único de constante de tiempo  $T$  (min.), frecuencia  $f$  (c/s) y ganancia estática  $K_p$ , la ganancia dinámica está dada por la siguiente expresión:

$$G_d = K_p / \left[ 1 + (2\pi T f)^2 \right]$$

### **DEFASAJE**

Si el sistema posee un retardo común o retardo de distancia - velocidad, entre los picos máximos de la senoide de salida y la de entrada existe una diferencia de tiempo o un retraso, que expresado en grados, se denomina "desfasaje". Por ejemplo, si el retraso es de 0.5 minutos y la frecuencia es 2 c/min, entonces el desfasaje es de:

$$2 * 360 * 0.5 = 360^\circ$$

El desfasaje depende de la frecuencia y de la velocidad de respuesta o sea la constante de tiempo.

### **CONTROLADORES**

Un controlador automático es un instrumento que elabora una acción correctiva (señal de salida "s") en función de la magnitud y del signo (positivo o negativo) de la diferencia (error "e") entre el valor deseado "VD" (o Set Point SP) y la señal de entrada o variable medida del proceso ("m").

Ambas señales se expresan en un lenguaje interno (psi, bar, mA, voltios, %, etc.). La primera expresa el valor deseado o punto de ajuste de la variable controlada y la medición expresa el estado de la misma. La diferencia  $e = VD - m$ , es el error y se genera en el comparador (fig. IV.7).

Se llama algoritmo del controlador a la ley matemática fija que vincula la acción correctiva del controlador con el error. Este puede ser una simple acción SI-NO (ON-OFF o ABIERTO-CERRADO).

### **ACCION PROPORCIONAL**

El algoritmo de un controlador proporcional es el siguiente:

$$S = S_o + K_c * e$$

Donde:

$S$  = Señal de salida.

$S_o$  = Señal de salida inicial, fijada manualmente antes de poner el sistema bajo control automático, de tal manera que el error "e" sea nulo.

$e$  = error =  $VD - m$

$K_c$  = Ganancia estática del controlador; cociente entre la variación de la señal de salida "S" y la variación de la medición y se expresa en psi / psi, mA / mA, etc. También se habla de banda proporcional BP (%) =  $100 / K_c$

**Acción directa:** cuando aumenta la señal de entrada (medición), aumenta la señal de salida; corresponde a ganancia negativa (- $K_c$ )

**Acción inversa:** cuando aumenta la señal de entrada, disminuye la señal de salida; corresponde a ganancia positiva (+ $K_c$ ).

### **ACCION INTEGRAL**

Anteriormente se vio que en el caso de un control proporcional, existe un error estacionario (offset) que debe ser corregido manualmente por el operario, reponiendo el valor  $S_o$  de salida del controlador, hasta que el error sea nulo. Este ajuste se complica cuando el proceso está sometido a frecuentes cambios de carga. Para que esta reposición ("reset") sea generada por el controlador, se debe incorporar una acción integral al algoritmo matemático (P+I):

$$S = S_0 + K_c * e + K_c/T_i \int_0^t edt$$

$\int edt$  = Integral del error en el tiempo, desde 0 a t

T<sub>i</sub> = Tiempo integral o de reposición (reset) en minutos; es el tiempo en el cual la magnitud de la Acción integral iguala a la magnitud de la acción proporcional. También se usa la inversa: 1/T<sub>i</sub> (reposiciones por minuto).

Debido a la acción integral, la salida del controlador, "S", crece o decrece en el tiempo, ("t" minutos) hasta que el error sea nulo.

### **ACCION DERIVATIVA**

En un controlador con acción proporcional más derivativa (P+D), al establecerse una diferencia entre el valor deseado y la medición, a la acción proporcional  $K_c * e$ , se agrega una acción que depende de la velocidad con que cambia la variable medida, que en términos matemáticos, se expresa como la derivada del error con respecto al tiempo (de/dt):

$$S = S_0 + K_c * e + K_c * T_d * de/dt$$

T<sub>d</sub>: es el tiempo en minutos con que la acción derivativa se anticipa al efecto de la acción proporcional.

### **ESTABILIDAD**

Si en un lazo de control cerrado hay varios retardos en serie o un retardo de distancia-velocidad, es posible que un mal ajuste de la ganancia estática (K<sub>c</sub>) del controlador, lleve al sistema a la inestabilidad. Si analizamos el lazo de control de la fig. C-8 y el diagrama de bloques correspondiente, el controlador (proporcional) tiene una ganancia K<sub>c</sub> (psi / psi); la ganancia del proceso es K<sub>p</sub> (m / m<sup>3</sup>/h); la ganancia de la válvula es K<sub>v</sub> (m<sup>3</sup>/h / psi) y la del transmisor es K<sub>t</sub> (psi / m). El producto de todas las ganancias es adimensional:

$$K = K_c * K_v * K_p * K_t$$

Si K<sub>c</sub> es tal que resulta K = 1, ante una perturbación del proceso, la variable controlada comienza a oscilar indefinidamente. Si se aumenta K<sub>c</sub>, de modo que sea K > 1, la amplitud de la oscilación crece y el sistema se hace inestable. Si se ajusta K<sub>c</sub> de manera que sea K < 1, las ondas se amortiguan hasta llegar al estado estacionario y el lazo de control es estable.

La ganancia del controlador se ajusta para un determinado estado operativo, de modo que el lazo sea estable; pero si varía el proceso ( otro valor de K<sub>p</sub> ), puede ocurrir que se haga inestable, lo que indica la existencia de una no-linealidad que no fue tenida en cuenta al ajustar el controlador. Esta situación es habitual en el control automático de procesos y en ocasiones es necesario pasar el control al modo manual y hacer un nuevo ajuste del controlador.

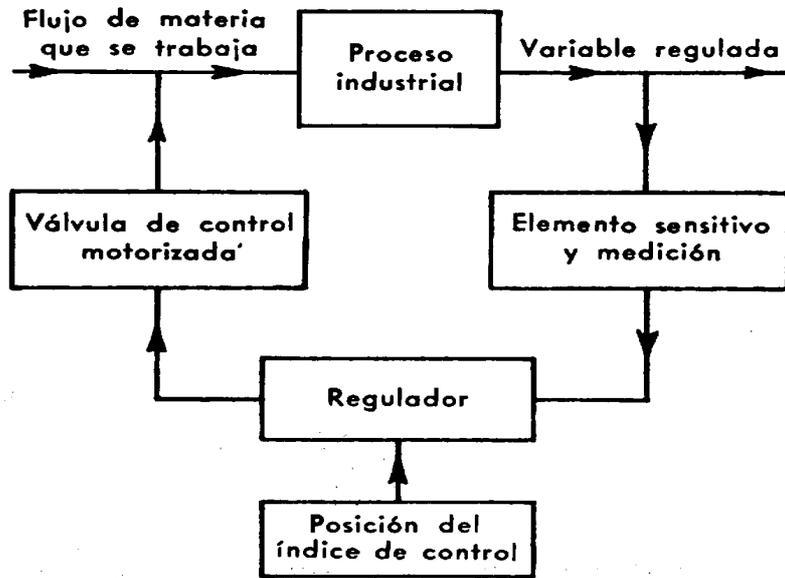


FIG. 64

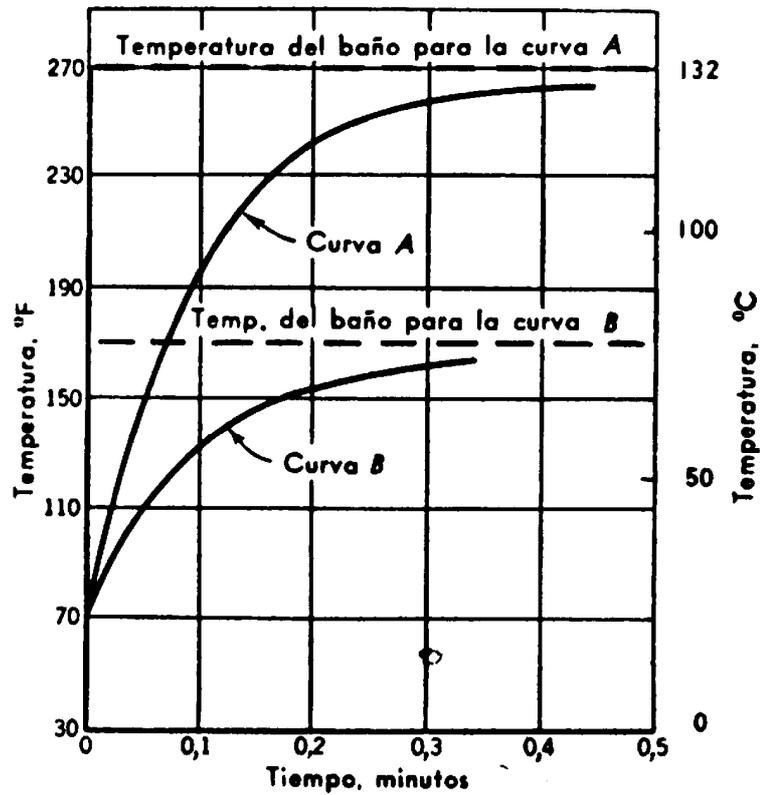


FIG. 65

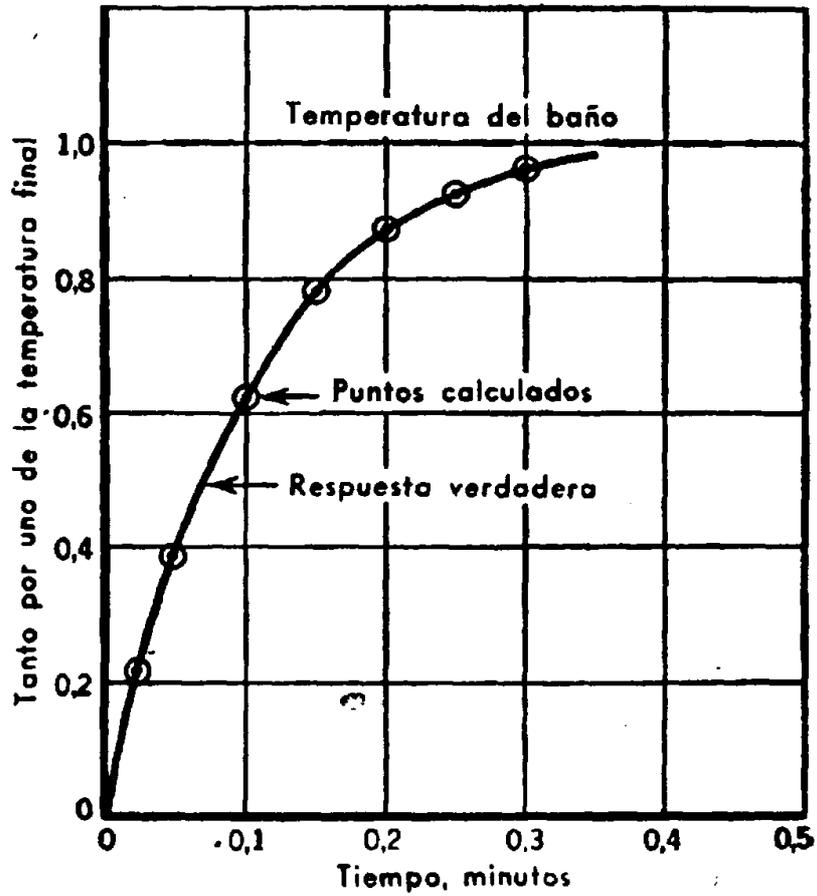


FIG. 66

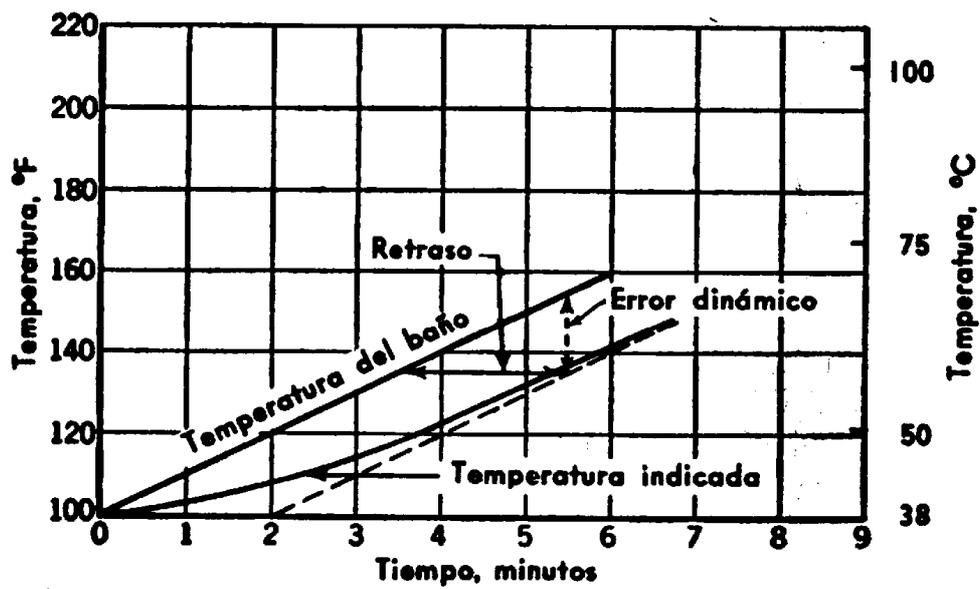
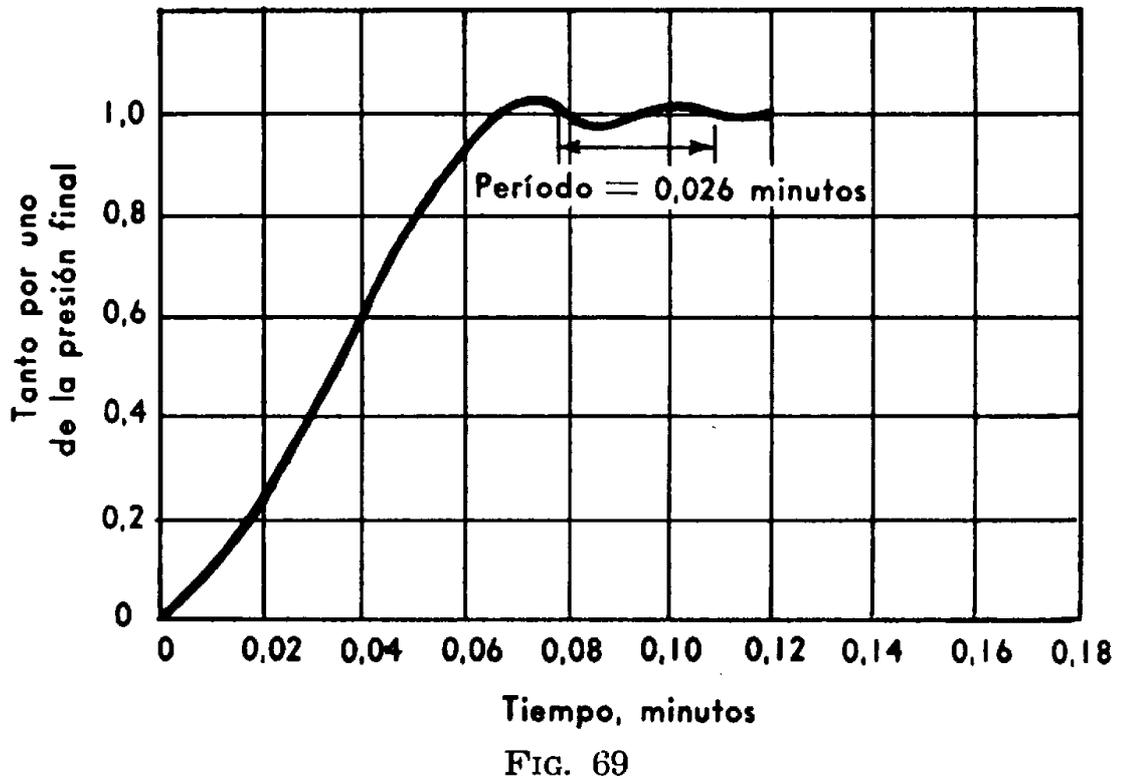
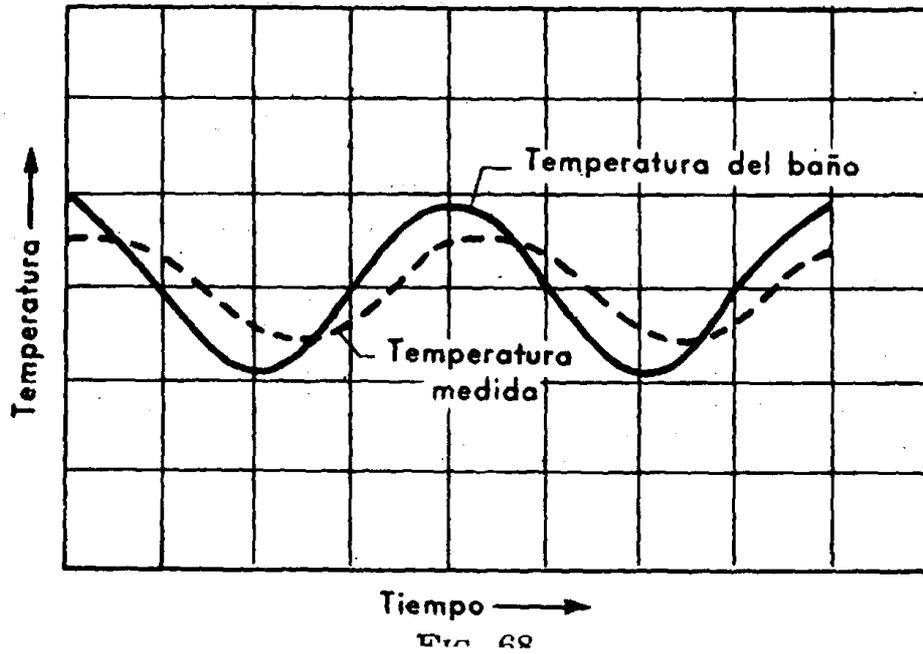


FIG. 67



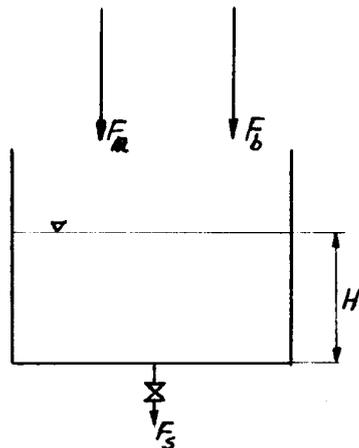


fig. C-1

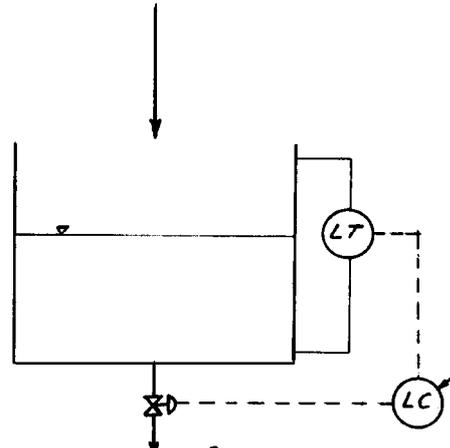


fig. C-2

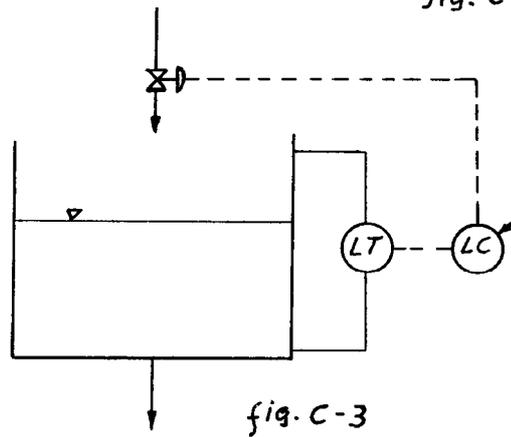


fig. C-3

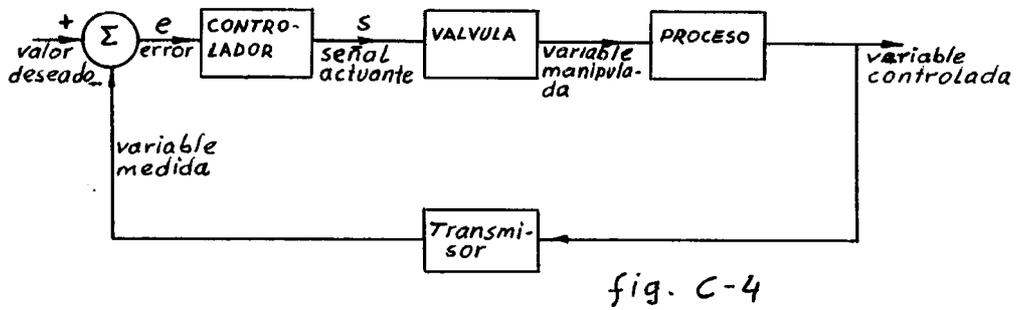


fig. C-4

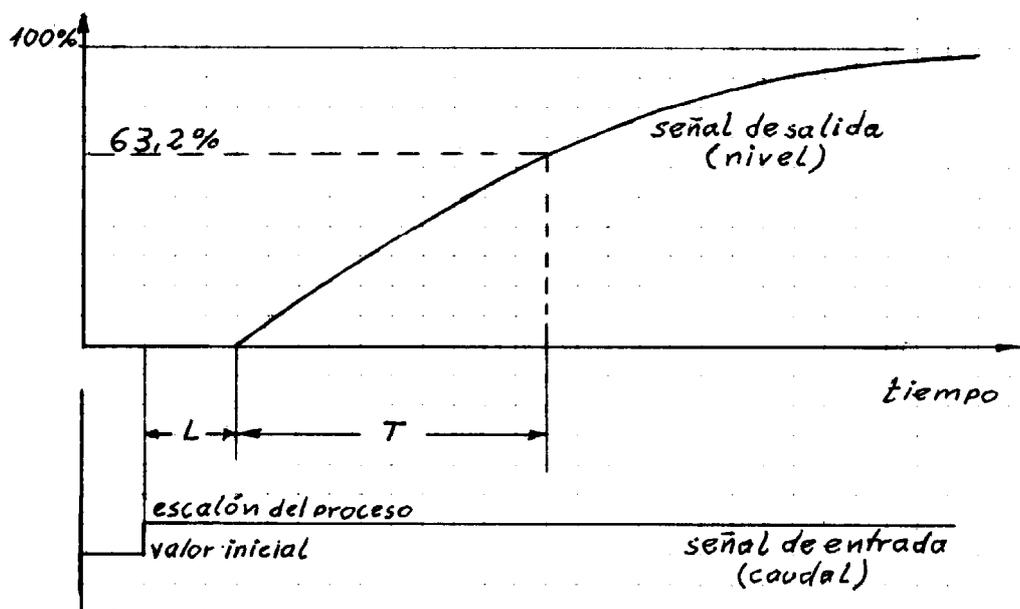


fig. C-5

### Selección del sistema de control

Las tres acciones combinadas PID actúan sobre el elemento final de control en la forma señalada en la figura 9.37.

Sus características esenciales ya estudiadas pueden resumirse así:

1. La acción proporcional cambia la posición de la válvula proporcionalmente a la desviación de la variable con respecto al punto de consigna.
2. La acción integral mueve la válvula a una velocidad proporcional a la desviación con respecto al punto de consigna.
3. La acción derivada corrige la posición de la válvula proporcionalmente a la velocidad de cambio de la variable controlada.

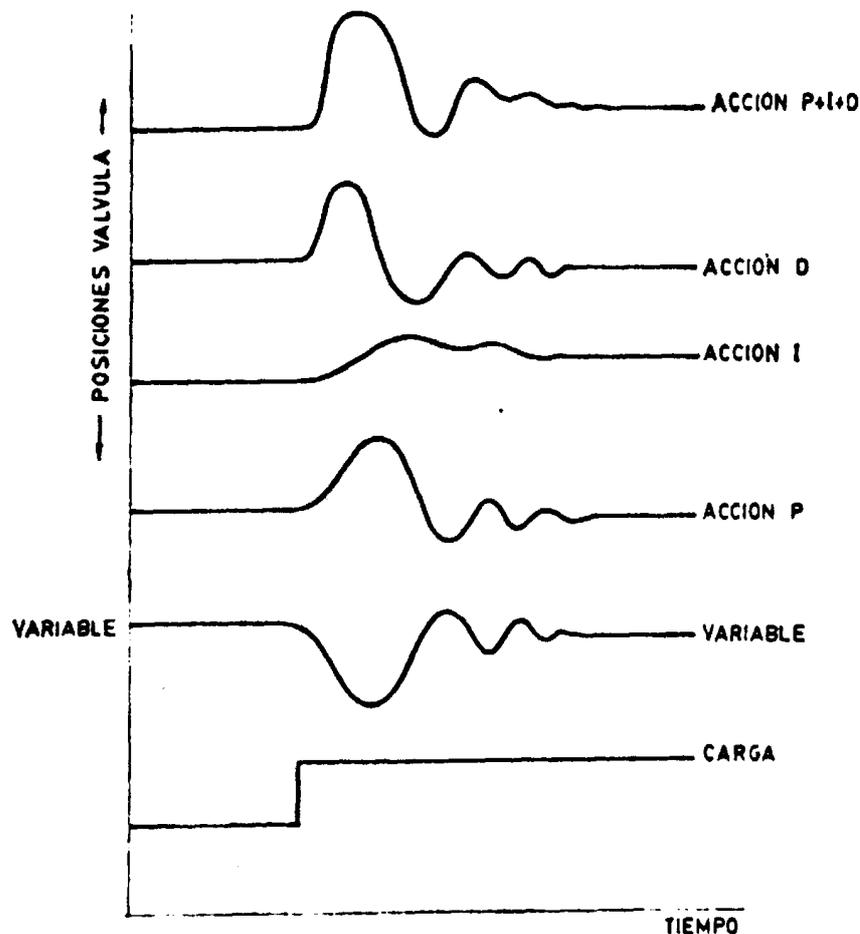


Fig. 9.37 Acciones PID.

Considerando estos puntos, la selección del sistema de control es usualmente un compromiso entre la calidad del control que se desea y el costo del sistema de control. Es decir, debe ser suficiente para satisfacer la tolerancia requerida en el proceso, pero no debe incluir excesivos refinamientos que lo encarezcan. Sin embargo, económicamente hay muy poca diferencia entre un controlador PI y uno PID, de modo que en el caso de estudiar procesos y sus perturbaciones que no sean bien conocidos puede ser más barato adquirir el controlador PID para tener así un potencial de mayor flexibilidad en el control del proceso. No obstante, los instrumentos actuales de tipo modular admiten fácilmente la adición de una o más acciones.

En la siguiente tabla, se indica una guía general para seleccionar un sistema de control, válida únicamente como orientación:

CONTROL	CAPACITANCIA	RESISTENCIA	CAMBIOS DE CARGA	APLICACIONES
Todo-nada	Grande	Cualquiera	Cualquiera	Control de nivel y temperatura en procesos de gran capacidad.
Proporcional	Pequeña a media	Pequeña	Moderados	Presión, nivel y temperatura cuando el offset no sea inconveniente.
Proporcional + integral	Cualquiera	Pequeña	Cualquiera	La mayor parte de las aplicaciones, inclusive el caudal.
Proporcional + derivativa	Media	Pequeña	Cualquiera	Cuando es necesaria una gran estabilidad con offset mínimo y sin necesidad de acción integral.
Proporcional + integral + derivativa	Cualquiera	Grande	Rápidos	Procesos con cambios rápidos y retardos apreciables (control de temperatura en intercambiadores de calor).

### Criterios de estabilidad en el control

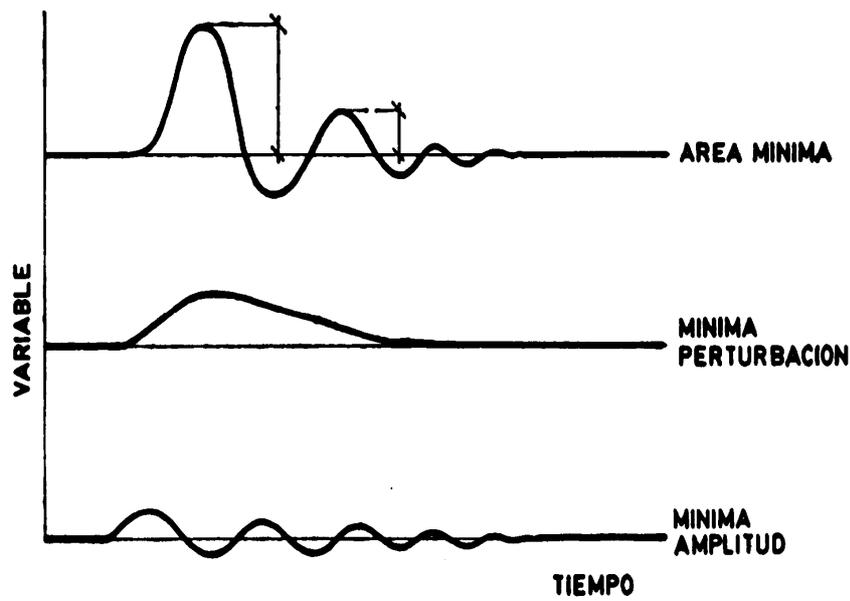
La estabilidad del control es la característica del sistema que hace que la variable vuelva al punto de consigna después de una perturbación.

Los criterios deseables para la estabilidad se representan en la figura 9.38 y son los siguientes:

**Criterio de área mínima o de razón de amortiguamiento:** Este criterio indica que el área de la curva de recuperación debe ser mínima, para lograr que la desviación sea mínima en el tiempo más corto. Es decir, la expresión, en la que  $|e|$  es el valor absoluto de la desviación, debe tener el valor mínimo. Se ha encontrado que esta área es mínima cuando la relación de amplitudes entre las crestas de los ciclos sucesivos es 0,25, es decir, que cada onda equivale a una cuarta parte de la anterior. Este criterio es el más importante y se aplica especialmente en los procesos donde la duración de la desviación es tan importante como el valor de la misma.

**Criterio de mínima perturbación:** Éste requiere una curva de recuperaciones *no* cíclicas, y se aplica cuando por ejemplo, las correcciones rápidas o cíclicas de una válvula de control de vapor, pueden perturbar seriamente las presiones de vapor de alimentación e influir en otros procesos alimentados por la misma fuente. Otro caso puede ser el control en cascada en que la señal de salida de un controlador varíe cíclicamente y se aplique como punto de consigna en un segundo controlador creándole serias variaciones de carga.

**Criterio de amplitud mínima:** De acuerdo con este criterio, la amplitud de la desviación debe ser mínima, lo cual se aplica especialmente a procesos en que el producto o el equipo puede ser dañado por desviaciones momentáneas excesivas, y en este caso la magnitud de la desviación es más importante que su duración. Por ejemplo, en el caso de fusión de algunas aleaciones metálicas, el sobrepasar temporalmente una determinada temperatura puede destruir el metal. Se aplica también este criterio en el caso de procesos exotérmicos con el punto de consigna próximo a la temperatura de disparo de la reacción incontrolable.



**Fig. 9.38 Criterios de estabilidad.**

### **Métodos de ajuste de controladores**

Existen varios sistemas para ajustar los controladores al proceso, es decir, para que la banda proporcional (ganancia), el tiempo de acción integral (minutos/repetición) y el tiempo de acción derivada (minutos de anticipo) del controlador, caso de que posea las tres acciones, se acoplen adecuadamente con el resto de los elementos del bucle de control (proceso + transmisor + válvula de control). Este acoplamiento debe ser tal que, ante una perturbación, se obtenga una curva de recuperación que satisfaga cualquiera de los criterios mencionados para que el control sea estable, en particular, el de área mínima con una relación de amortiguación de 0,25 entre crestas sucesivas de la onda.

Para que este acoplamiento entre el controlador y el proceso sea posible es necesario un conocimiento inicial de las características estáticas y dinámicas del sistema controlado. Existen dos métodos fundamentales para determinar estas características, el método analítico y el experimental.

El método analítico se basa en determinar la ecuación relativa a la dinámica del sistema, es decir, su evolución en función del tiempo. Este método es generalmente difícil de aplicar por la complejidad de los procesos industriales y la dificultad de obtener datos fidedignos suficientemente aproximados. Es un método muy laborioso que requiere normalmente el empleo de una computadora, en particular en el caso de procesos muy complejos.

En el método experimental, las características estáticas y dinámicas del proceso se obtienen a partir de una medida o de una serie de medidas realizadas en el proceso real. Estas respuestas del proceso pueden efectuarse de tres formas principales.

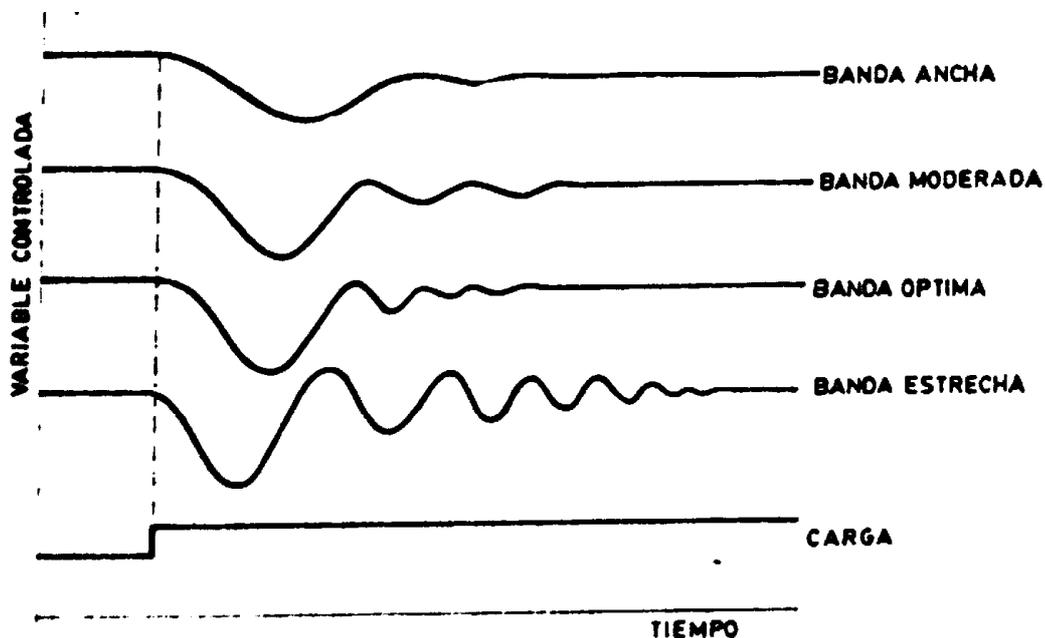
1. Método de tanteo.
2. Método de sensibilidad límite.
3. Método de curva de reacción.

**Método de tanteo.** Este método requiere que el controlador y el proceso estén instalados completamente y trabajando en su forma normal. El procedimiento general se basa en poner en marcha el proceso con bandas anchas en todas las acciones, y estrecharlas después poco a poco individualmente, hasta obtener la estabilidad deseada.

Para provocar cambios de carga en el proceso, y observar sus reacciones, se mueve el punto de consigna arriba y abajo en ambas direcciones, lo suficiente para lograr una perturbación considerable, pero no demasiado grande que pueda dañar el producto, perjudicar la marcha de la planta o bien crear perturbaciones intolerables en los procesos asociados.

Es necesario que pase un tiempo suficiente después de cada desplazamiento del punto de consigna, para observar el efecto total del último ajuste obteniendo algunos ciclos de la respuesta ante la perturbación creada. En procesos muy lentos ello puede requerir hasta 2 ó 3 horas.

Para ajustar los controladores proporcionales, se empieza con una banda proporcional ancha y se estrecha gradualmente observando el comportamiento del sistema hasta obtener la estabilidad deseada. Se debe hacer notar que al estrechar la banda proporcional, aumenta la inestabilidad y que al ampliarla se incrementa el error de offset, tal como se ve en la figura 9.39.



**Fig. 9.39 Ajuste de banda proporcional.**

Para ajustar los controladores con banda P+I, se procede del siguiente modo:

Con la banda integral 0, o en su valor más bajo, se sigue el procedimiento descrito anteriormente para obtener el ajuste de la banda proporcional hasta una relación de amortiguamiento aproximado de 0,25. Como la acción integral empeora el control y al poseerla el instrumento, su banda proporcional debe ser un poco más alta (menor ganancia del controlador), se aumenta ligeramente la banda proporcional y a continuación se incrementa por pasos la banda integral, creando al mismo tiempo perturbaciones en forma de desplazamientos del punto de consigna, hasta que empiecen a aumentar los ciclos. La última banda ensayada se reduce ligeramente. En la figura 9.40 pueden verse unas curvas características de recuperación.

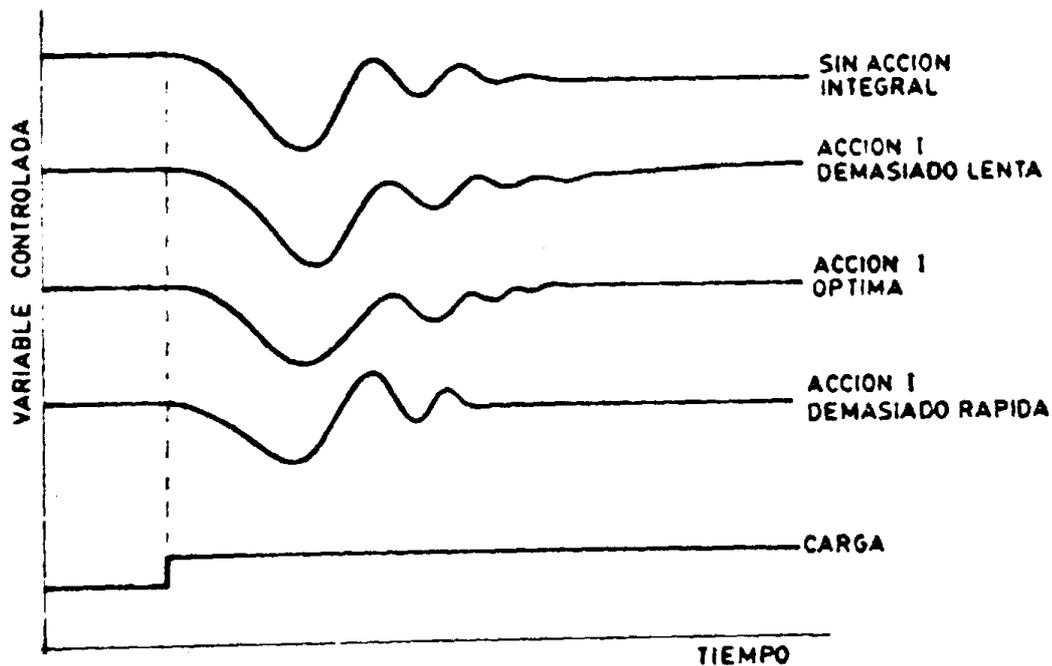


Fig. 9.40 Ajuste de banda integral

Un controlador P+I bien ajustado lleva la variable al punto de consigna rápidamente y con pocos ciclos sin que éstos rebasen o bajen del punto de consigna según haya sido el signo de la perturbación.

Al ajustar los controladores P + I + D, se procede del siguiente modo:

Con la banda derivada e integral a 0, o al mínimo, se estrecha la banda proporcional hasta obtener una relación de amortiguamiento de 0,25. Se aumenta lentamente la banda integral en la forma indicada anteriormente hasta acercarse al punto de inestabilidad. Se aumenta la banda derivativa en pequeños incrementos, creando al mismo tiempo desplazamientos del punto de consigna hasta obtener en el proceso un comportamiento cíclico, reduciendo ligeramente la última banda derivada. Después de estos ajustes, puede estrecharse normalmente la banda proporcional con mejores resultados en el control.

Hay que señalar que una acción derivada óptima después de una perturbación lleva la variable a la estabilización en muy pocos ciclos.

En otra forma de ajuste, para obtener una óptima banda derivada se trabaja primero con una banda proporcional que da lugar a una ligera oscilación (varios ciclos) ante una perturbación, con la acción integral reducida al mínimo. Se aumenta a continuación la acción derivada hasta eliminar el ciclo de la proporcional. Se estrecha de nuevo la acción proporcional hasta que los ciclos se inician, y se aumenta todavía más la banda derivada hasta eliminarlos, continuando con estos pasos hasta que el aumento de la acción derivada no mejore la eliminación de los ciclos producidos. Finalmente se ajusta la acción integral en la forma descrita anteriormente para eliminar el offset. En la figura 9.41, se representan unas curvas características de recuperación.

Si los ajustes efectuados son excesivos, pueden obtenerse las oscilaciones:

- Oscilación proporcional.
- Oscilación integral.
- Oscilación derivada.

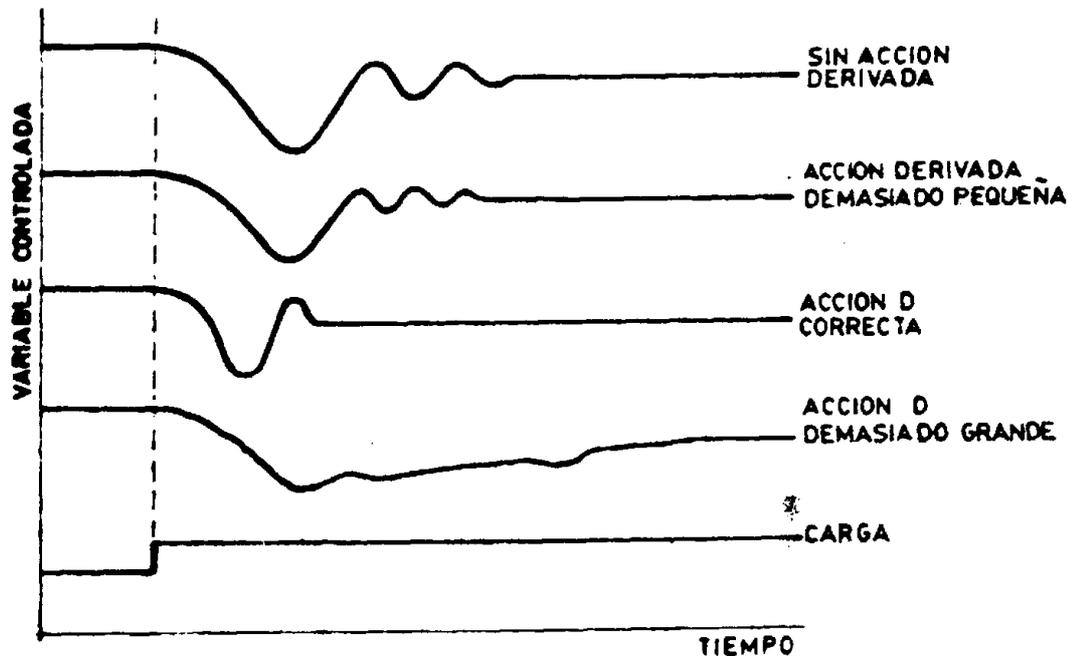


Fig. 9.41 Ajuste de banda derivada.

Para distinguirlas, se observan las siguientes reglas:

- La oscilación integral tiene un período relativamente largo (fig. 9.40);
- La oscilación proporcional tiene un período relativamente moderado (fig. 9.39);
- La oscilación derivada tiene un período muy largo y la variable tarda bastante tiempo en estabilizarse (fig. 9.41).

### Método de ganancia límite

Este método fue desarrollado por ZIEGLER & NICHOLS, en 1941 y permite calcular los tres términos de ajuste del controlador a partir de los datos obtenidos en una prueba rápida de características del bucle cerrado de control. El método se basa en estrechar gradualmente la banda proporcional con los ajustes de integral y derivada en su valor más bajo, mientras se crean pequeños cambios en el punto de consigna, hasta que el proceso empieza a oscilar de modo continuo (fig. 9.42).

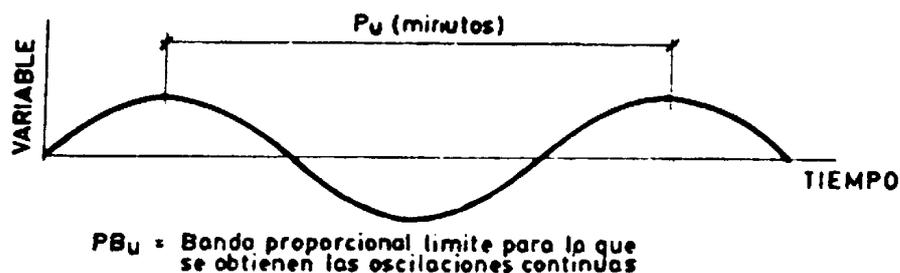


Fig. 9.42 Oscilación mantenida (sensibilidad límite).

Esta banda proporcional se denomina <banda proporcional límite> (PBU). Se anota el período del ciclo de las oscilaciones  $P_u$  en minutos, y la última banda proporcional  $P_{Bu}$ . Los ajustes de control que producirán aproximadamente una respuesta con una relación de amplitudes 0,25, se calculan como sigue:

**- Controladores de banda proporcional P:**

Banda proporcional (%) =  $2 P_{Bu}$

**- Controladores con banda P + I:**

Banda proporcional (%) =  $2,2 P_{Bu}$

Banda integral (min/rep) =  $P_u / 1,2$

**- Controladores con banda P + I + D:**

Banda proporcional (%) =  $1,7 P_{Bu}$

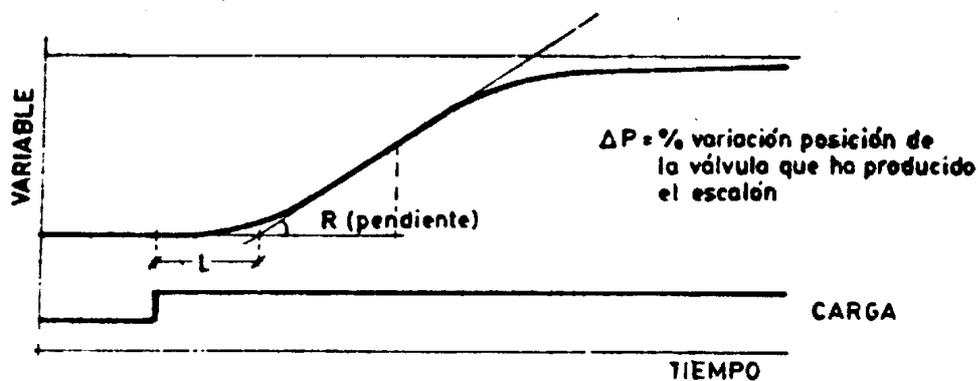
Banda integral (min/rep) =  $P_u / 2$

Banda derivada (min) =  $P_u / 8$

**Método de curva de reacción**

El procedimiento general consiste en abrir el bucle cerrado de regulación antes de la válvula, es decir, operar directamente la válvula con el controlador en manual y crear un pequeño y rápido cambio en escalón en el proceso de entrada. La respuesta obtenida se introduce en un registrador de gráfico de banda de precisión con el mayor tamaño posible del gráfico para obtener la mayor exactitud.

En el punto de inflexión de la curva obtenida se traza una tangente lo más aproximada posible y se miden los valores  $R$  y  $L$  (fig. 9.43).



**Fig. 9.43 Curva de reacción.**

$R$  es la pendiente de la tangente en el punto de inflexión de la curva. El retardo  $L$  es el tiempo en minutos que transcurre entre el instante del cambio en escalón y el punto en que la tangente anterior cruza el valor inicial de la variable controlada.  $\Delta P$  es el % de variación de posición de la válvula de control que introduce el escalón en el proceso.

Las fórmulas a aplicar son las siguientes:

**1. Control proporcional**

$$\% BP = 100 RL / \Delta P$$

**2. Control P + I**

$$\% BP = 110 RL / \Delta P$$

$$\text{Minutos por repetición} = L / 0,3$$

**3. Control P + I + D**

$$\% BP = 83 RL / \Delta P$$

$$\text{Minutos por repetición} = L / 0,5$$

$$\text{Minutos de anticipo} = 0,5 L$$

Hay que señalar que los procedimientos de ganancia límite y de curva de reacción fueron deducidos empíricamente después de analizar muchos tipos de procesos industriales y ambos se basan en la respuesta del proceso ante una perturbación. Es evidente que las características del proceso no permanecen constantes en todo momento, por lo cual puede ocurrir que los valores de las acciones determinados en unas condiciones de carga dadas se aparten de las bandas convenientes para otras condiciones de carga distintas. De aquí, que es preferible realizar los ensayos en las peores condiciones de carga del proceso para que, de este modo, los ajustes del controlador sean válidos en todas las condiciones de servicio.

Observaciones análogas pueden aplicarse a las bandas determinadas con el método de tanteo debiendo señalar que para afinar los ajustes determinados con los otros dos métodos es conveniente realizar un procedimiento de tanteo adicional.

## VALVULAS DE CONTROL AUTOMATICO

La válvula de regulación de caudal de un fluido, provista de un servomotor con accionamiento neumático, eléctrico o hidráulico, es un tipo de elemento final de control que recibe la señal del controlador. También se usan registros, compuertas, bombas, motores, etc.

En la figura I-1 (Creus pag.333) se ve el esquema básico de una válvula de control, motorizada con un cabezal neumático para accionar el obturador en el cuerpo.

Existen diversos tipos de válvulas con cuerpos y accionamientos especificados según el fluido regulado, el tamaño, clase de servicio, tipo de cierre, costos, etc. En el siguiente cuadro se detallan las características principales de los tipos de válvulas más utilizadas en el control automático de procesos:

**GLOBO DE SIMPLE ASIENTO:** Apta para la mayoría de los servicios; buen cierre con un actuador más potente para vencer la presión del fluido; con todas las características de regulación; con obturador reversible; elevado costo referido al Cv; amplitud de regulación limitada; no apta para líquidos con barros.

**GLOBO DE DOBLE ASIENTO:** Para servicios similares a la anterior, con cierre pobre, actuador menor por estar balaceadas las fuerzas del fluido.

**GLOBO TIPO JAULA:** Reemplaza a la válvula globo, con mayor amplitud de regulación; fácil reemplazo del obturador, no reversible; se consigue buen cierre con asientos con aros de teflón; menor costo por Cv; se construyen con obturadores anti-ruido; apta para elevadas presiones y con muy buen balance de fuerzas.

**MARIPOSA:** Disponible en todos los tamaños; bajo costo por Cv; con característica de regulación de igual porcentaje; para control de grandes caudales de fluidos a baja presión; el cierre hermético se logra con recubrimientos especiales del asiento; el actuador debe ejercer un elevado torque sobre el eje de la clapeta que limita su giro a 60 grados en el caso de regulación continua.

**ESFERICA:** Característica de igual porcentaje; cierre hermético; mayor capacidad; apta para líquidos con materiales fibrosos o de alta viscosidad o con sólidos en suspensión; requiere motor de gran tamaño y posicionador; se debe retirar de la línea para mantenimiento.

**SAUNDERS:** Usada en los casos de fluidos agresivos y con sólidos en suspensión; de cierre hermético y construcción simple; las partes móviles no tienen contacto con el fluido; presión máxima de trabajo 10 bar; temperatura limitada por los materiales de los recubrimientos; servomotor potente y característica de regulación aceptable hasta el 50% de apertura.

### CARACTERISTICA DE CAUDAL INHERENTE:

Se denomina característica inherente de la válvula, a la relación entre el caudal que pasa a través de la válvula y la carrera del vástago, manteniendo constante la diferencia de presiones entre la entrada y la salida.

La característica de una válvula se define con la forma del cuerpo, obturador y asiento.

Las curvas características más significativas son (fig.II-2):

- a) de apertura rápida
- b) lineal
- c) de igual porcentaje

La figura II-3, muestra las formas de los obturadores para las diferentes características:

El obturador con característica de apertura rápida, tiene la forma de un disco plano. El caudal de fluido llega rápidamente al valor máximo con pequeñas carreras.

Con el obturador de característica lineal, el caudal  $F$  es directamente proporcional a la carrera  $x$  de la válvula:

$$F = k * x; \text{ donde } k = F_{\max}; x = 0 \text{ a } 1.0$$

El rango de regulación  $R = F_{\max}/F_{\min}$  ("rangeability") en una válvula de característica lineal y con diferencia de presiones constante, es de 15 a 1 o de 30 a 1.

En la válvula de característica isoporcentual, cada incremento de la carrera del obturador produce un cambio en el caudal proporcional al valor anterior:

$$F = a * e^{KX}$$

Donde e = 2.7281.. es la base de los logaritmos Neperianos.

Con la constante a = Fmin ( x = 0 ); y con R = 50, resulta para x = 1:  $e^K = 50$

Y en consecuencia:  $F = 0.02 * Fmax * 50^x$

X	0.0	0.10	0.20	0.30	0.40	0.60	0.80	1.00
F/Fmax	0.02	0.0296	0.0437	0.0647	0.0956	0.2091	0.4573	100.0

### **CARACTERISTICA INSTALADA O EN LINEA:**

Con la válvula instalada y en servicio, para distintas posiciones del obturador, varia el caudal del fluido y también las presiones en la entrada y salida de la válvula. O sea que para mayores caudales la diferencia de presiones es menor y como consecuencia se modifica su característica inherente, dando lugar a la que se conoce como característica instalada o en línea, con valores de caudal menores para determinadas posiciones del obturador en el caso de una válvula con característica lineal (Ver fig. II-4). En el caso de una válvula con característica isoporcentual también ocurre una deformación de la curva. En la fig. II-5, se indica la variación de la presión diferencial en la válvula instalada entre dos tanques con una altura hidrostática constante. Se ve que para el caudal Fmin, la DP es máxima y con Fmax es DP mínimo.

En la fig. II-6, se muestra el caso de una válvula instalada en serie con una bomba centrífuga.

- DPL = perdidas de presión de la línea
- DPV = perdidas de presión de la válvula
- DPB = impulsión de la bomba
- gH = presión hidrostática

Se define la "Rangeability" RI de la válvula en línea:

$$RI = (Cvmax/Cvmin) * \sqrt{DPVmin/DPVmax}$$

**Definición de Cv:** Capacidad de la válvula totalmente abierta, en galones US de agua (densidad = 1) por minuto, con una DPV igual a 1 psi. En el sistema técnico de unidades se usa el valor:

$$Kv : m^3/h \text{ con un DPV de } 1 \text{ kg/cm}^2.$$

Cuando menor es la relación  $a = DPVmin/DPVmax$ , mayor es la deformación de la curva característica en línea, con respecto a la característica inherente  $Rh$ ; por ej. con  $a = 0.1$  resulta  $RI = Rh/3$ . La consecuencia más importante es la variación de la ganancia estática de la válvula en uno u otro sentido, a veces deseado y en otras no.

### **DIMENSIONADO DE VALVULAS:**

Para determinar la dimensión de una válvula, se debe calcular la cifra característica Cv ( o Kv) necesaria para el caudal máximo del fluido a las condiciones de servicio. Con el  $Cv_{max.}$ , calculado se puede seleccionar el tamaño de la válvula y el tipo según sea el servicio. Los fabricantes suministran para cada tipo y tamaño nominal de válvula, el valor del  $Cv_{max.}$ , correspondiente a la apertura total. También puede suministrar los valores de Cv para distintas posiciones de apertura.

En el cálculo es fundamental el valor de la diferencia de presiones en la válvula DPV, siendo éste el dato que más dificultad presenta por lo expuesto en los párrafos anteriores.

Según un método práctico, se puede adoptar un valor de DPV<sub>mínimo</sub>, correspondiente al caudal máximo, en función de la caída de presión en la línea:

$$DPV_{\min} = 0.5 * DPL$$

O sea el 33% de la diferencia de presión total. Para mayor precisión se puede adoptar:

$$DPV = 0.2 * DPL \text{ para una válvula con característica } =\%$$

$$DPV = 0.5 * DPL \text{ para una válvula con característica lineal}$$

Otro criterio:  $DPV_{\min} = (0.1 \text{ a } 0.05) * DPV_{\max}$  para válvulas con característica =%

$$DPV_{\min} = (0.5 \text{ a } 0.25) * DPV_{\max} \text{ para válvulas con característica lineal}$$

Con el valor de Cv calculado ( o necesario ), se selecciona de la tabla del fabricante, el tipo y tamaño de la válvula, de manera que dicho valor del Cv corresponda a una apertura de válvula de aproximadamente 75%. Esto equivale a tomar para el cálculo un caudal máximo de 20 a 30 % mayor que el nominal. Así se asegura que la válvula tenga un margen de regulación en los casos transitorios.

#### **FORMULAS PARA CALCULAR EL Cv:** ( Según FOXBORO )

I.- **Para flujo de líquidos:** 
$$Cv = 0.70 * V * \sqrt{\frac{\rho}{DPV}}$$

V: Flujo de líquido, en litros/min

$\rho$  : Densidad del líquido, en  $kg/dm^3$

DPV: Caída de presión en la válvula, en  $kp/cm^2$ .

II.- **Para flujo de gases:** 
$$Cv = 0,00259 * Q * \sqrt{\frac{T_f * \delta}{DPV * P_2}}$$

Q: Flujo de gas, en  $Nm^3/h$ .

$T_f$  : Temperatura absoluta del gas, en ° K.

$\delta$  : Densidad relativa al aire seco.

$P_2$  : presión absoluta del gas aguas abajo, en  $kp/cm^2$ .

Si  $P_2$  es menor que la presión crítica  $P_c \cong 0.5 P_1$ , se debe tomar para DPV y  $P_2$  el valor de  $P_c$ .

III.- **Para flujos de vapor:** 
$$Cv = \frac{0.037 * W}{\sqrt{DPV / v}}$$

W: Flujo másico de vapor, en kg/h

$v(m^3 / kg)$  : Volumen específico a las condiciones de  $P_2$  o  $P_c$  según el caso explicado en el punto II.

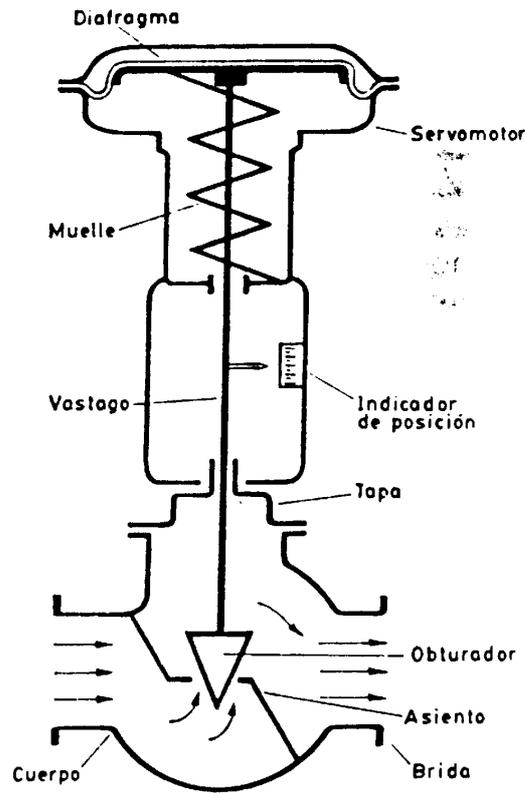


FIG. V – 1: Esquema de una válvula de control con servomotor neumático.

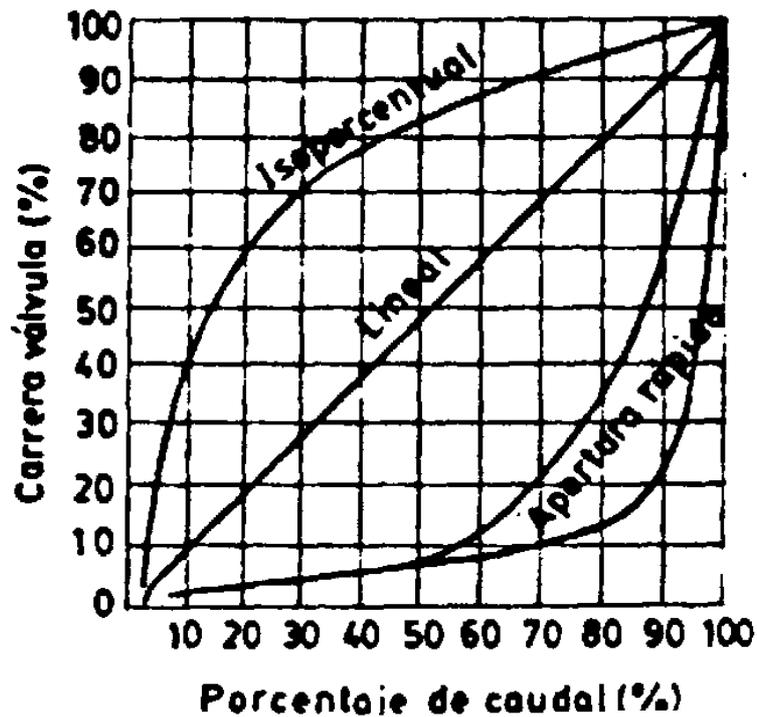


FIG. V – 3: Características inherentes de una válvula de control.