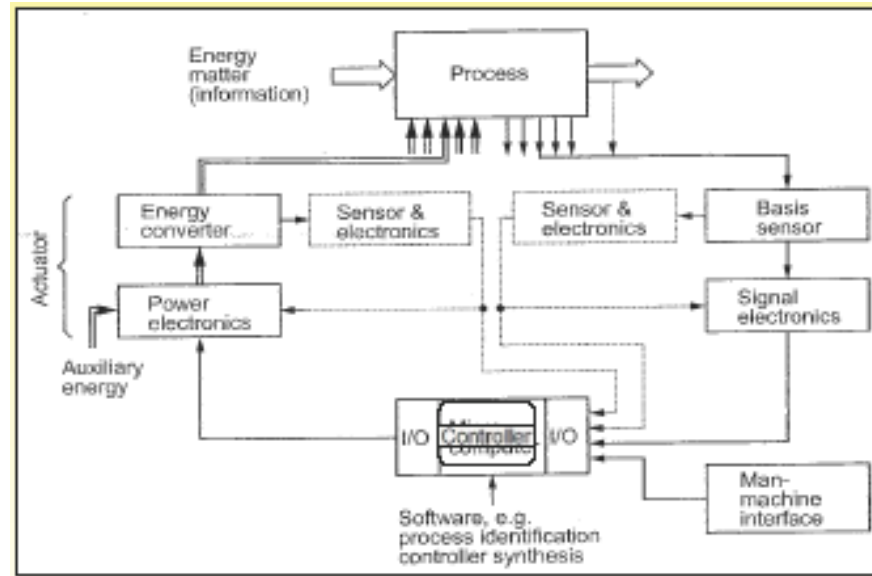


# CONTROLES INDUSTRIALES

# CONTROLADORES

## CONCEPTO:



Elemento de un proceso controlado que a partir de medidas externas (señales de entrada) y utilizando un algoritmo de procesamiento mediante una tecnología específica (analógica/ digital, neumática/hidráulica/eléctrica) produce una o varias respuestas (señales de salida).

Genera una señal hacia el elemento final de control basada en la desviación de la variable controlada respecto de una referencia establecida.

# CONTROLADORES

CONCEPTO:

## Rango de la Variable

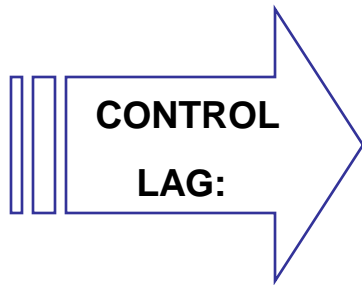
La variable dinámica dentro del control tiene un rango de valores dentro de los cuales el control será mantenido. Este rango puede ser expresado como valor mínimo y máximo de la variable dinámica.

## Rango del parámetro de control

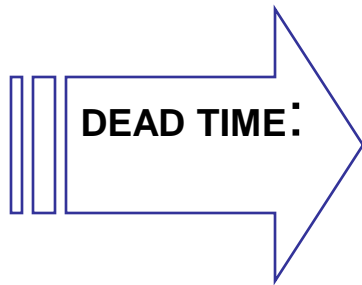
Este rango está asociado con la salida del controlador, este es la conversión de salida del rango de valores posibles del elemento final de control por lo general expresado.

# CONTROLADORES

## CONCEPTO:

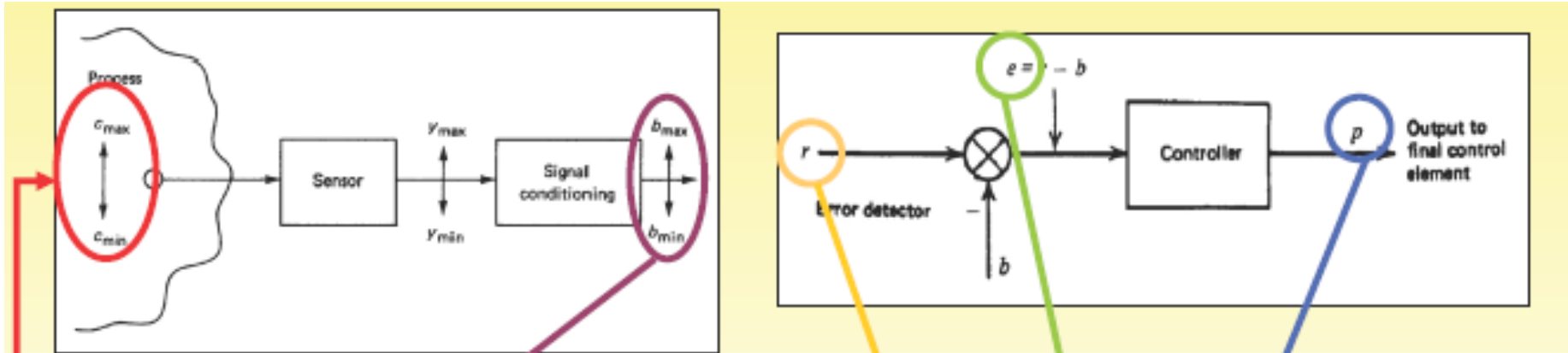


Quando una variable dinámica experimenta un cambio repentino, el lazo de control de proceso reacciona, por una orden de salida, al elemento final de control para adoptar un nuevo valor para compensar el cambio descubierto. El retraso de control se refiere al tiempo para el lazo de control de proceso para hacer ajustes necesarios al elemento final de control.



Es el tiempo transcurrido entre el instante que ocurre una desviación (error) y la primera acción correctiva. Cuando una desviación es descubierta, un sistema de control rápidamente cambia las válvulas que se ponen para ajustar el caudal. Pero si el tubo es bastante largo, hay un período de tiempo durante el cual ningún efecto es sentido en el navío de reacción. Esto es el tiempo requerido para el nuevo caudal para degradar la longitud del tubo.

# EXPRESIONES PORCENTUALES



Curtis Johnson: Process Control Instrumentation Technology, 8e. Copyright ©2006 by Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, New Jersey 07458. All rights reserved.

$$e = r - b$$

- e: error.
- b: medida realizada del parámetro de interés c.
- r: referencia de la medida (setpoint).

$$c_p(\%) = \frac{c - c_{min}}{c_{max} - c_{min}} \cdot 100$$

- c: valor del parámetro de interés.
- $c_{max}$ : valor máximo de c.
- $c_{min}$ : valor mínimo de c.

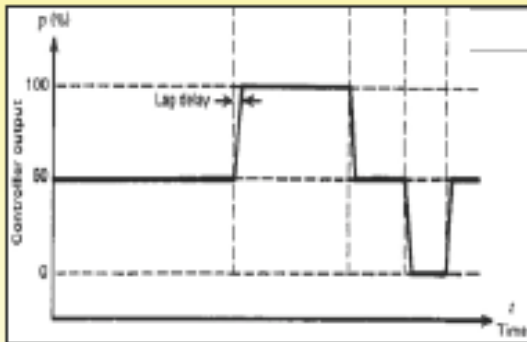
$$p(\%) = \frac{p - p_{min}}{p_{max} - p_{min}} \cdot 100$$

- p: respuesta del controlador.
- $p_{max}$ : valor máximo de p.
- $p_{min}$ : valor mínimo de p.

$$e_p(\%) = \frac{r - b}{b_{max} - b_{min}} \cdot 100$$

# MODOS DEL CONTROLADOR

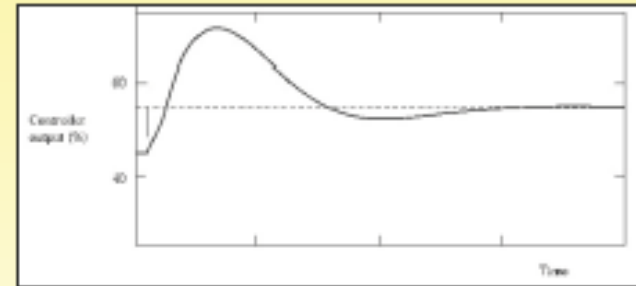
## Discontinuo



*Curtis Johnson: Process Control Instrumentation Technology, 8e. Copyright ©2006 by Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, New Jersey 07458. All rights reserved.*

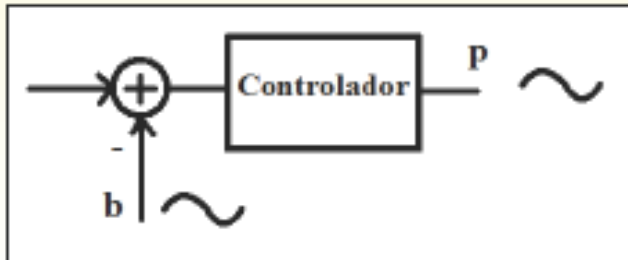
➤ La salida del controlador toma un valor dentro de un conjunto finito.

## Continuo



➤ La salida del controlador toma un valor dentro de un intervalo real.

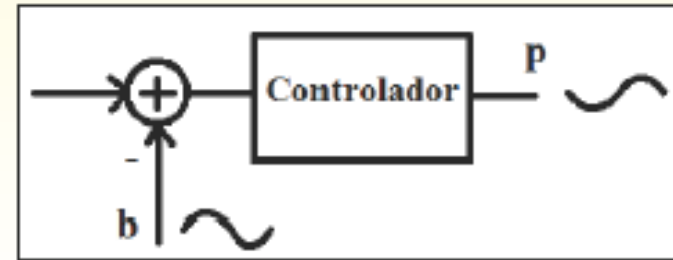
## Directa



➤ Aumento de la variable medida  $b \rightarrow$  Aumento de la respuesta del controlador (control del nivel en depósito).

## Acción del controlador

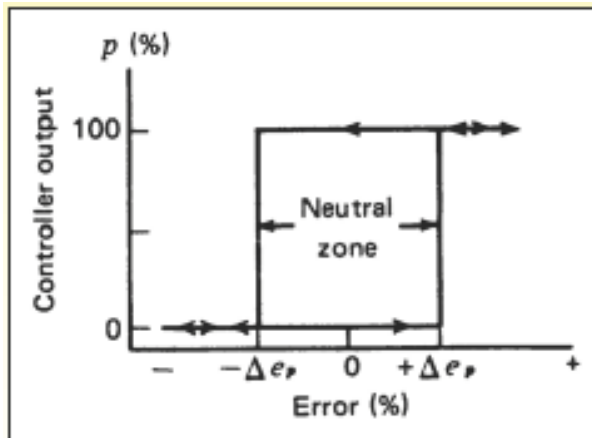
## Inversa



➤ Aumento de la variable medida  $b \rightarrow$  Disminución de la respuesta del controlador (control de  $t^{\circ}$  en calefactor).

## CONTROL DOS POSICIONES

- El más simple y de costo más bajo.
- Por debajo del setpoint la acción del controlador es total.
- Ejemplo: Aire Acondicionado (si  $t^a_{amb} > t^a_{set} \rightarrow$  ON si  $t^a_{amb} < t^a_{set} \rightarrow$  OFF).
- Histéresis (intencionada) evita innecesarios y continuos redisparos.



$$p = \begin{cases} 0\% & \text{si } e_p < 0. \\ 100\% & \text{si } e_p > 0. \end{cases}$$

# CONTROL DOS POSICIONES

## Zona Neutral

En cualquier implementación de un controlador On-Off ocurre un solapamiento por debajo y encima del cero, en este rango no ocurren cambios en la salida del controlador. El rango  $2\Delta E_p$  es denominado zona neutral

## Aplicaciones

El control 2 posiciones se adapta mejor a sistemas de gran escala con cambios moderados en los parámetros del proceso.

Climatización de grandes volúmenes, control de nivel en grandes depósitos (sistemas de gran capacidad con respuesta lenta).



## CONTROL DOS POSICIONES

### Ejemplo

Un sistema de control de nivel de líquido convierte linealmente un desplazamiento de 2-3 metros en una señal de control de 4-20 mA. Un Relé sirve como el controlador de 2 posiciones para abrir o cerrar la válvula de entrada. El Relé cierra en 12 mA y abre en 10 mA. Encontrar: a) La relación entre el nivel y la corriente y b) La zona Neutral

a) La relación entre el nivel y corriente es una ecuación lineal tal que  $H = K_i + H_o$

Encontramos K y  $H_o$  escribiendo 2 ecuaciones

$$2\text{m} = K(4\text{mA}) + H_o$$

$$3\text{m} = K(20\text{mA}) + H_o$$

Resolviendo  $K = 0,0625 \text{ m/mA}$  y  $H_o = 1,75 \text{ m}$

## CONTROL DOS POSICIONES

### Ejemplo

b) El Relé cierra en 12mA el cual es el nivel alto

$$HH = (0,0625\text{m/mA})(12\text{mA}) + 1,75 \text{ m}$$

$$HH = 2.5 \text{ m}$$

El nivel bajo ocurre en 10 mA

$$HI = (0,0625\text{m/mA})(10\text{mA}) + 1,75 \text{ m}$$

$$HI = 2,375 \text{ m}$$

**Entonces la zona neutral es  $2,5\text{m} - 2,375\text{m} = 0,125\text{m}$**

# CONTROL PROPORCIONAL

## MODOS DE CONTROL CONTINUO

Las salidas del controlador cambia en respuesta al error o rango de cambio del error



### MODO DE CONTROL PROPORCIONAL

- Existe una relación lineal entre la salida del controlador y el error.
- Cada valor del error tiene un único valor de la salida del controlador.
- El rango de error que cubre de 0% a 100% de la salida del controlador es llamado banda proporcional.
- Puede expresarse por:

$$P = K_p E_p + P_0$$

Donde:

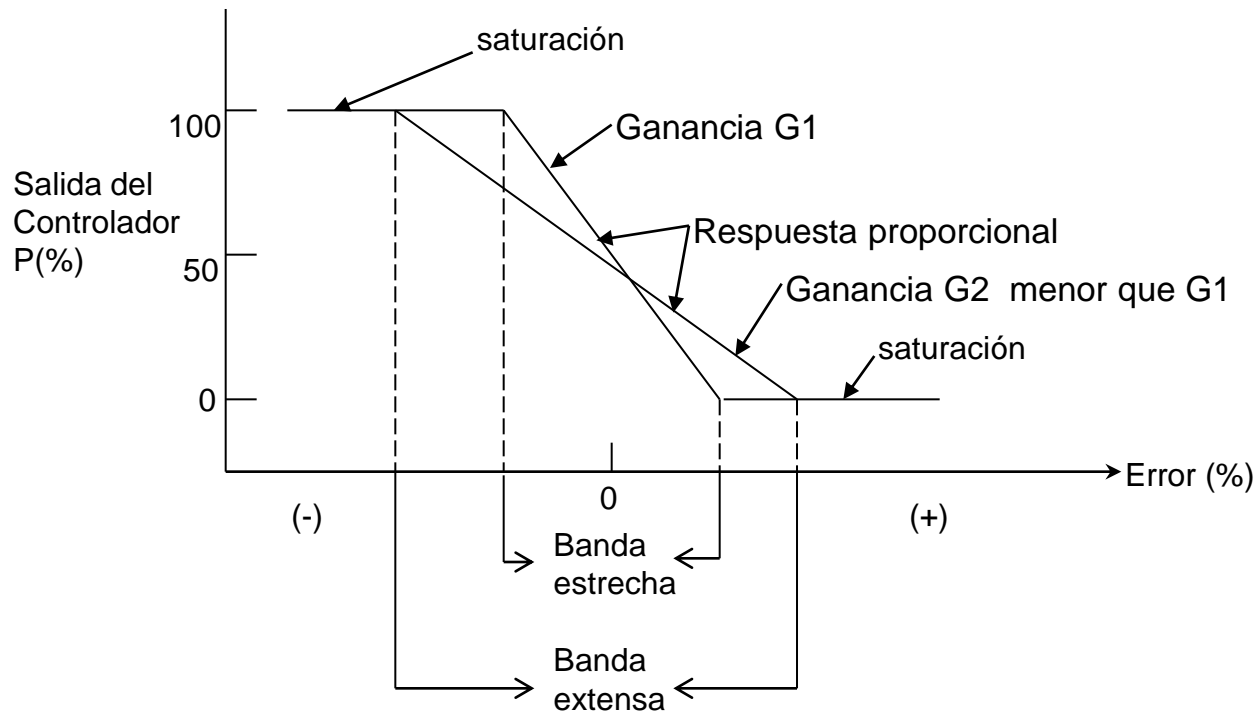
- |         |   |
|---------|---|
| $K_p =$ | ctte proporcional entre el error y la salida del controlador. (%/%) |
| $P_0 =$ | Salida del controlador sin error (%)                                |
| $E_p =$ | Error   |

**MODO DE CONTROL PROPORCIONAL**

La salida del controlador, para errores que exceden la banda proporcional, es saturada a 100% o 0% dependiendo del signo del error.

La constante de proporcionalidad determina la banda proporcional

El valor de  $P_0$  es a menudo asignado como 50% para dar un balance a la salida del controlador.



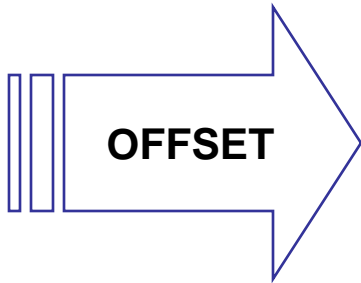


**MODO DE CONTROL  
PROPORCIONAL**

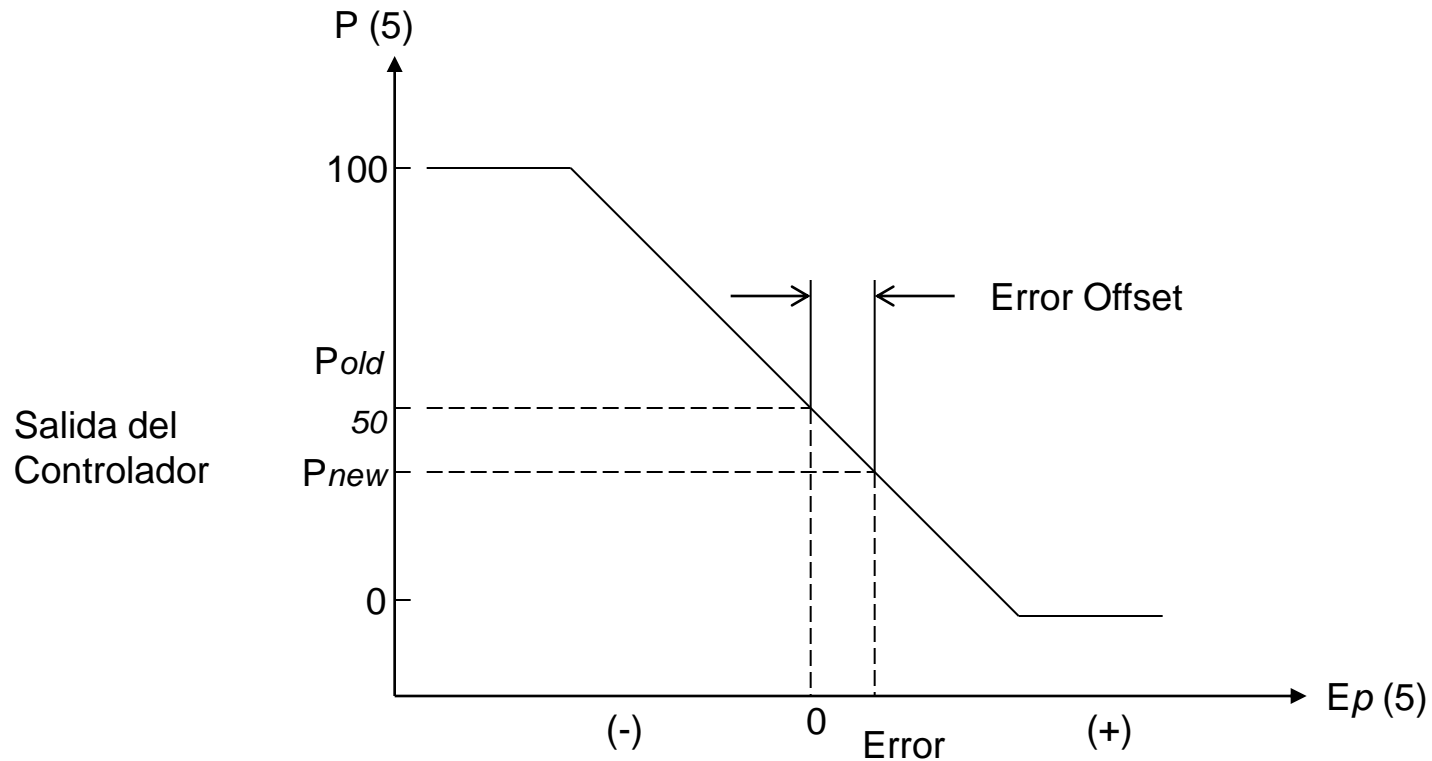
**BANDA PROPORCIONAL**

$$\mathbf{PB = 100 / K_p \quad (9-15)}$$

- Si el error es 0 la salida es una constante igual a  $P_0$
- Si hay un error, para cada 1% del error una corrección de  $K_p$  % es añadida o sustraída de  $P_0$ , dependiendo de la acción inversa o directa del controlador.
- Hay una banda de error sobre cero de magnitud PB dentro de la cual la salida no se satura a 0% ó 100%.

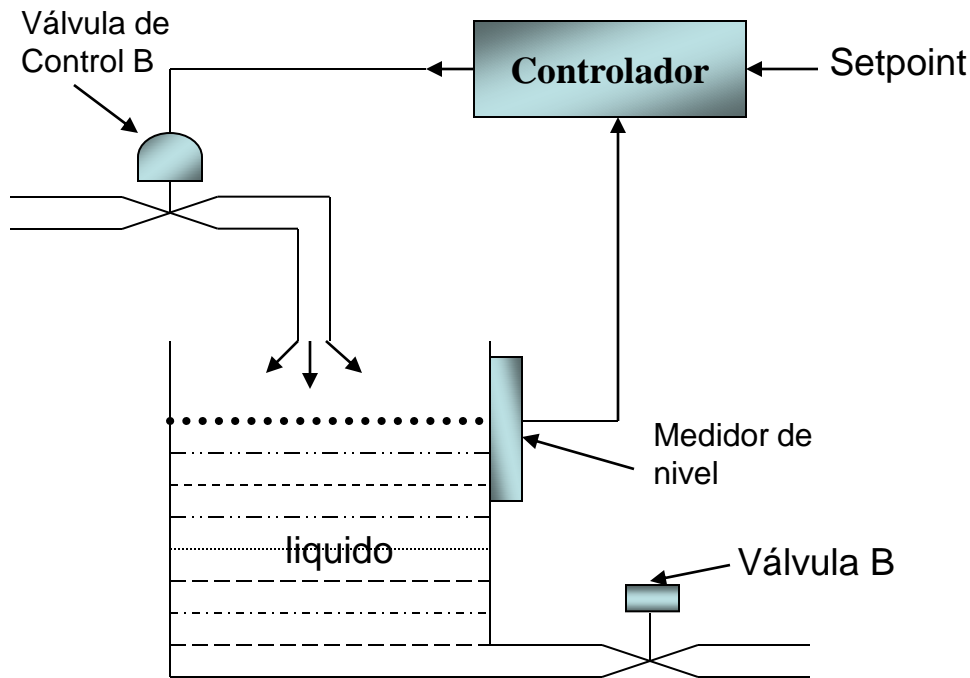


- Error residual permanente en el punto de operación de la variable controlada cuando ocurre un cambio de carga.
- Es reducido por la constante  $K_p$  → reducción en la banda proporcional



*Es muy posible que ocurra un error nominal si un controlador proporcional requiere una nueva salida cuando ocurre un cambio de carga.*

Ejemplo: Considere un sistema de control de nivel como el que se muestra en la figura. La válvula A es lineal, con un factor de escala de flujo de  $10\text{m}^3/\text{hr}$  por porcentaje de salida del controlador. La salida del controlador es nominalmente 50% con una constante  $K_p = 10\%/%$ . Un cambio de carga ocurre cuando el flujo a través de la válvula B cambia de  $500\text{m}^3/\text{hr}$  a  $600\text{m}^3/\text{hr}$ . Calcular la nueva salida del controlador y el error offset.



La nueva salida del controlador viene dada por:

$$Q_a = (10\text{m}^3/\text{hr}) (60\%) = 600\text{m}^3/\text{hr}\%$$

Como se trata de un controlador proporcional se tiene que:

$$P = K_p E_p + P_0$$

Con  $P_0 = 50\%$

Despejando  $E_p$ , resulta:

$$E_p = (P - P_0)/K_p$$

Al evaluar se obtiene:

$$E_p = (60 - 50)/10 = 1\%$$



⊕ Procesos donde es poco probable la ocurrencia de grandes cambios de carga o con pequeños tiempos de retraso.

# CAMPO DE APLICACIÓN

⊕ Sistemas donde es posible la reinicialización manual del punto de operación para eliminar el offset.

# CONTROL INTEGRAL

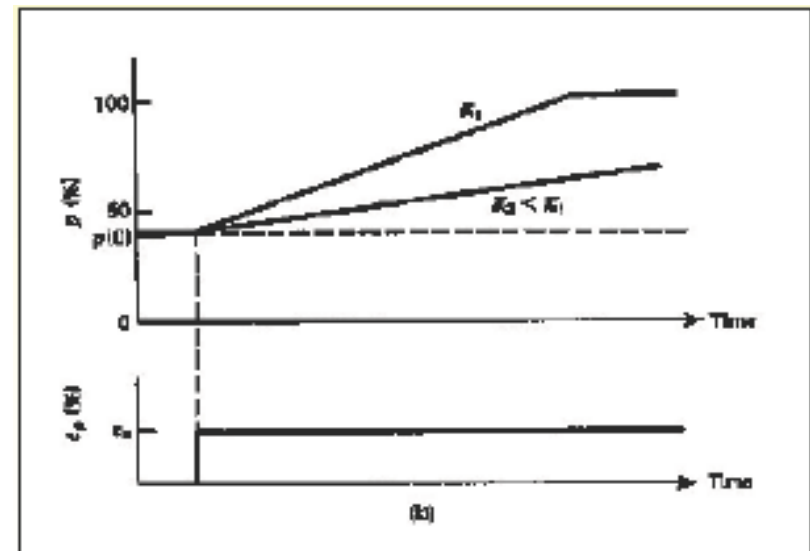
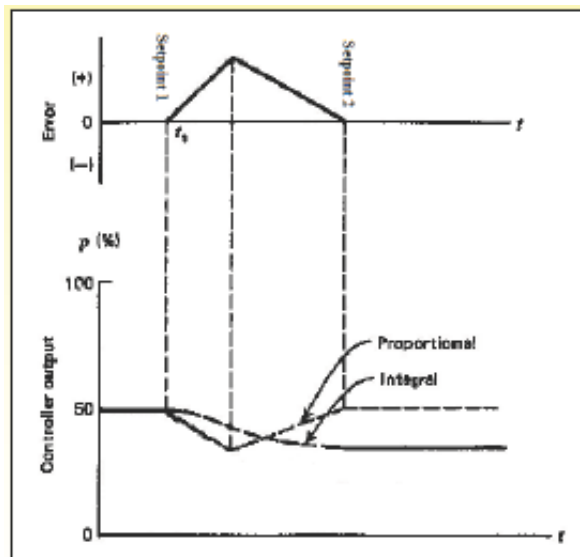
# CONTROL INTEGRAL

Resuelve el efecto de la no actualización frente a cambios del setpoint.

Frente a error cero el controlador puede tomar diferentes valores a su salida.

$$P(0) = K_i \int_0^t E_p dt + P_i(0)$$

P(0): Salida del controlador en el inicio del nuevo setpoint.



# CONTROL INTEGRAL

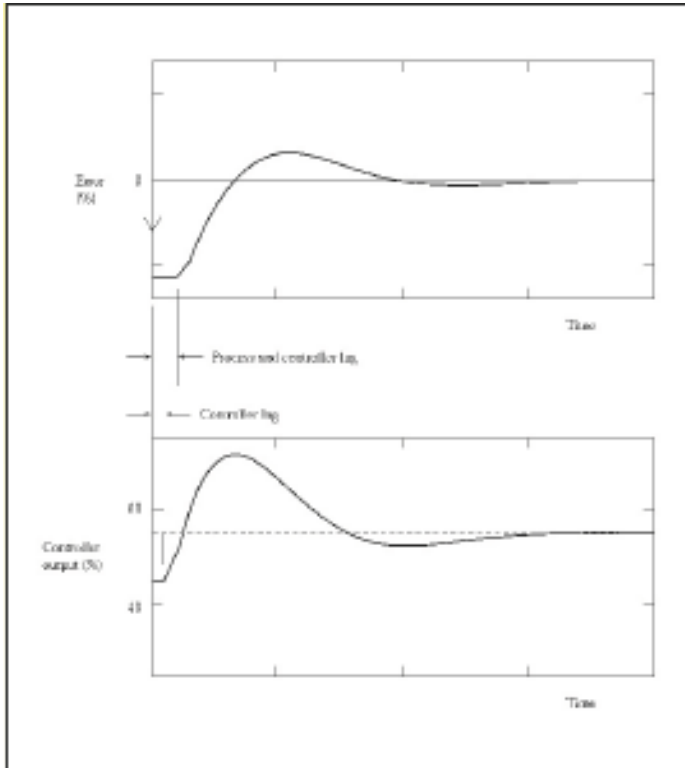
Aplicaciones:

Accionamientos continuos sobre elementos finales de control con actualización del setpoint (válvulas, motores, lámparas, climatizadores, etc.).

$T_i$ : tiempo integral.  $T_i = 1/K_i$

La salida del controlador satisface la expresión.

$$\frac{dp}{dt} = K_I \cdot e_p$$



# CONTROL DERIVATIVO

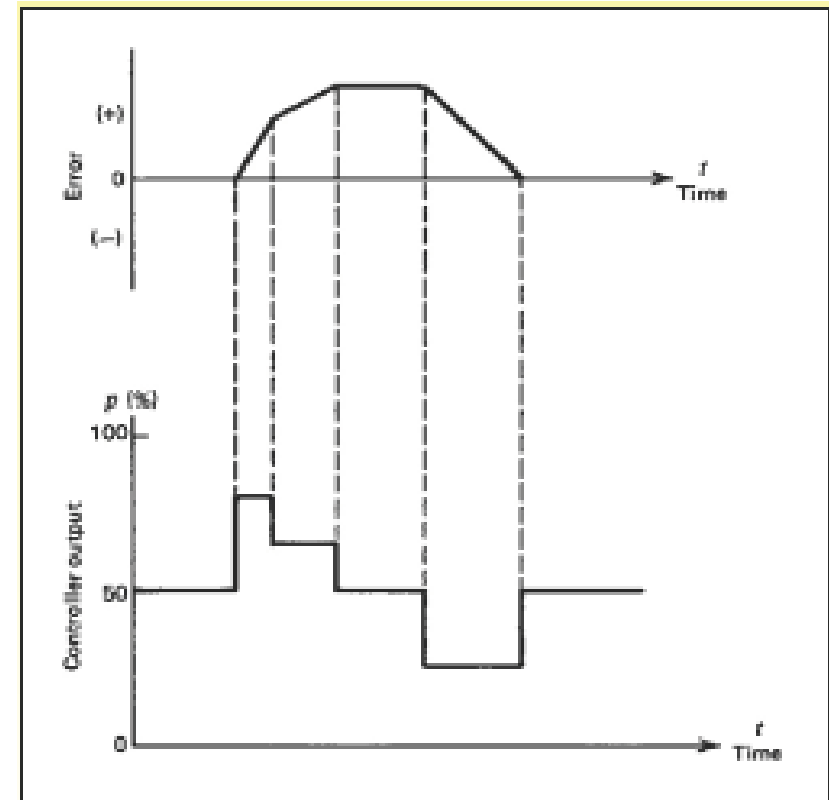
## CONTROL DERIVATIVO

El controlador responde a la variación temporal del error.

$$p(t) = K_D \cdot \frac{de_p}{dt}$$

Ha de actuar en combinación con otro modo pues a error constante la respuesta es nula.

Ha de emplearse con precaución y con ganancia moderada → posibles oscilaciones en la respuesta del controlador (saturación).



**El último modo puro de operación de controlador estipula que la salida de controlador depende de la rata de cambio de error. Se conoce este modo también como la rata o el control de anticipación.**

**El modo no puede ser usado solo porque cuando el error es cero o constante, el controlador no tiene ninguna salida.**

## CONTROL DERIVATIVO

### LAS CARACTERÍSTICAS DEL MODO DERIVATIVO Y LA ECUACIÓN (9-18)

- Si el error es el cero, el modo no proporciona ninguna salida.
- Si el error es constante en tiempo, el modo no proporciona ninguna salida.
- Si el error se cambia a tiempo, el modo contribuye una salida de  $K_p$  por ciento para cada 1% por segundo de tasa de cambio de error.
- Para la acción directa, una tasa positiva de cambio de error produce una salida positiva de modo derivativa.

# CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL



## Control Proporcional-Integral (PI)

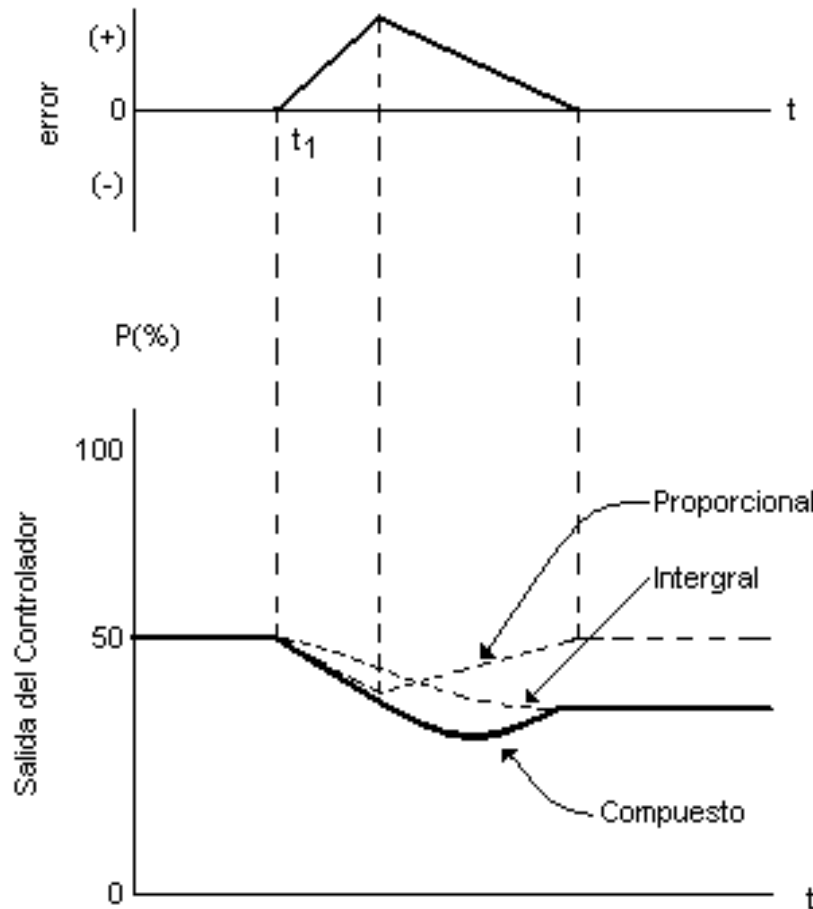
Este modo de control resulta de una combinación del modo proporcional y el modo integral. La expresión analítica es:

$$P = K_p E_p + K_p K_i \int_0^t E_p dt + P_i(0)$$

Donde:

$P_i(0)$  = valor del término integral  
 $t = 0$  (valor inicial)

## Acción Reset de la Contribución Integral (acción reversa)



1. Cuando el error es cero, la salida del controlador se fija en el valor que el término integral tenía cuando el error era cero. Esta salida es dada por  $P_i(0)$ .
2. Si el error no es cero, en la salida del controlador, el término proporcional contribuye a una corrección y el integral inicia un incremento o decremento del valor acumulado (inicialmente  $P_i(0)$ ) dependiendo del signo del error y la acción inversa o directa.

## Ventajas

- La ventaja principal de este modo de control es que esta disponible la correspondencia uno-uno del modo proporcional y el modo integral.
- Elimina el offset inherente.
- El modo integral proporciona un reset del error de salida a cero después que ocurre un cambio de carga.

## Aplicaciones

**El modo proporcional-integral elimina el problema del off set del control proporcional.**

## Ejemplo:

Determinar el error de la figura a, que contiene la grafica de un controlador de salida proporcional-integral como una función de tiempo.  $K_p = 5$ ,  $K_i = 1.0s^{-1}$  y  $P_i(0) = 20\%$ .

## Solución:

Encontraremos la solución por medio de la aplicación de:

$$P = K_p E_p + K_p K_i \int_0^t E_p dt + P_i(0)$$

Para encontrar la salida del controlador, resolvemos la ecuación 1 en tiempo en el tiempo. El error puede ser expresado en tres regiones de tiempo.

- $0 \leq t \leq 1$  (t entre 0 y 1 segundo) el error varia de 0% a 1% en 1 segundo. Entonces, este viene dado por  $E_p = t$ .
- $1 \leq t \leq 3$  para este rango de tiempo el error es constante e igual a 1%, por lo tanto este viene dado por  $E_p = 1$ .
- $t \geq 3$  para este tiempo el error es cero,  $E_p = 0$ .

Ahora escribiremos y resolveremos la ecuación número 1 para cada uno de estos rangos de tiempo.

$$0 \leq t \leq 1 \quad E_p = t.$$

$$P_1 = 5t + 5 \int_0^t dt + 20$$

$$P_1 = 5t + 5 \left[ \frac{t^2}{2} \right]_0^t + 20$$

$$P_1 = 5t + 2.5 t^2 + 20$$

Esto esta graficado en la figura a desde 0 a 1 segundo. Al final de 1 segundo, el término de la integral habrá acumulado un valor de  $P_1(1) = 22.5\%$

$$1 \leq t \leq 3 \quad E_p = 1$$

$$P_1 = 5 \cdot 1 + 5 \int_1^t 1 \, dt + 22.5$$

$$P_1 = 5 + 5 [t] \Big|_1^t + 22.5$$

$$P_1 = 5 t + 22.5$$

Al final de 3 segundos, el término de la integral habrá acumulado un valor de  $P_2(1) = 32.5\%$

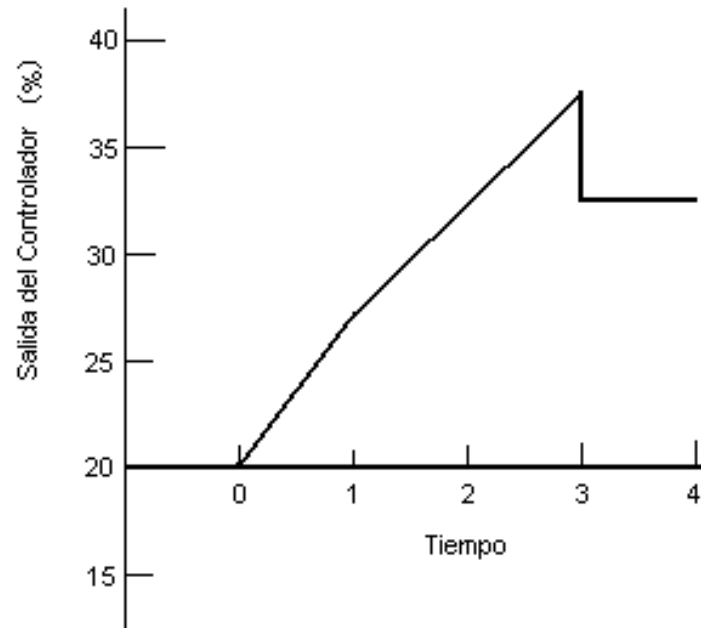
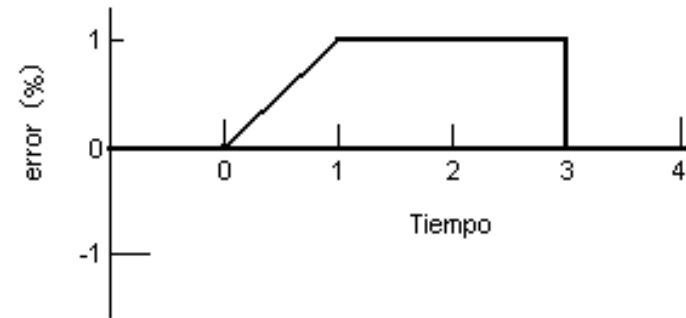
$$t \geq 3 \quad E_p = 0.$$

$$P_3 = 5[0] + 5 \int_3^t 0 dt + 32.5$$

$$P_3 = 32.5$$

La figura a muestra que la salida se mantendrá constante en 32.5% a partir de los 3 segundos.

# Solución del ejemplo





# *CONTROL PROPORCIONAL DERIVATIVO*

# CONTROL PROPORCIONAL DERIVATIVO

## CONTROL PROPORCIONAL DERIVATIVO.

La expresión analítica de ésta combinación es la siguiente:

$$P = K_p E_p + K_d K_p \frac{dE_p}{dt} + P_o.$$

Donde:

$K_p$  = Constante Proporcional.

$E_p$  = Error como porcentaje del rango del Setpoint.

$K_d$  = Constante Derivativa.

$\frac{dE_p}{dt}$  = Rata de Cambio del Error.

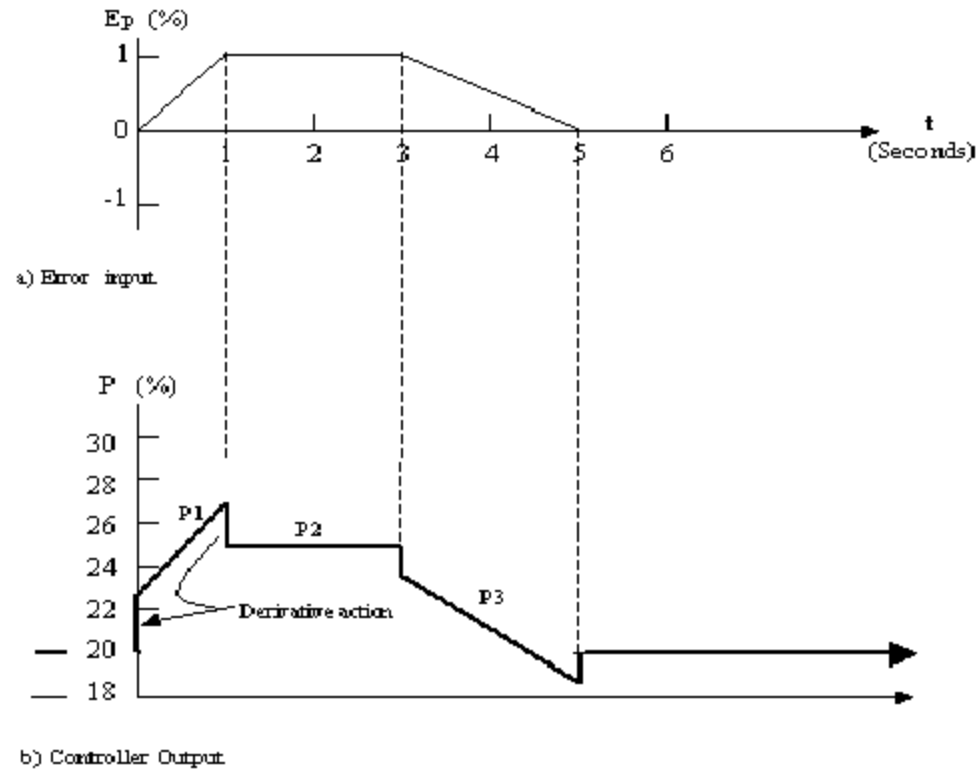
$P_o$  = Salida del Controlador.

Este sistema no puede eliminar el offset del controlador proporcional. Puede manejar cambios rápidos de carga en los procesos dependiendo de lo aceptable que sea el error de offset.

# ***CONTROL DERIVATIVO***

**Ejemplo: Suponga que el error de la figura es aplicado a un controlador proporcional derivativo con  $K_p=5$ ,  $K_d=0.55$ ,  $P_o=20\%$ . Graficar el resultado de la salida del controlador.**

# CONTROL DERIVATIVO



Evaluando:

$$P = K_p E_p + K_d K_p \frac{dE_p}{dt} + P_o.$$

# CONTROL DERIVATIVO

Sobre los rangos de error. En el tiempo de 0 – 1s donde  $E_p = at$ , se tiene:

$$P_1 = K_p at + K_d K_p a + P_o.$$

$$a = 1\%/s.$$

$$P_1 = 5t + 2.5 + 20.$$

Nota: el cambio instantáneo producido por el error 2.5%.

En el rango 1-3 s tenemos:

$$P_2 = 5 + 20 = 25.$$

En el rango 3-5s tenemos un error de  $E_p = -0.5t + 2.5$ .

$$P_3 = -2.5t + 12.5 - 1.25 + 20. \text{ ó } P_3 = -2.5t + 31.25.$$

# CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID)

# CONTROL PID

Uno de los operaciones de modo de controlador más fuertes pero complicados combina al proporcional, integral, y modo de derivados. Este sistema puede ser usado para prácticamente cualquier condición de proceso. La expresión analítica lo es:

$$P = k_p E_p + K_p K_t \int_0^t E_p dt + K_p K_d \frac{dE_p}{dt} + P_i(0)$$

Donde todos términos han sido definidos antes.

Este modo elimina el offset del modo de proporcional y el fotograma provee la respuesta rápida. En la figura, se muestra la respuesta de los tres modos de sistema para un error.

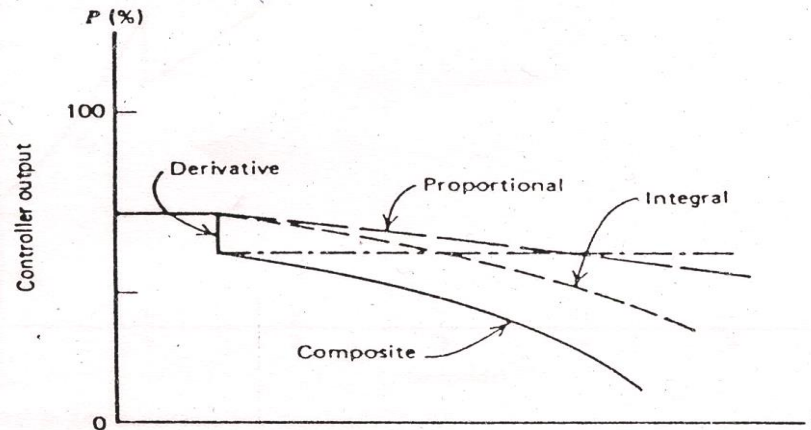
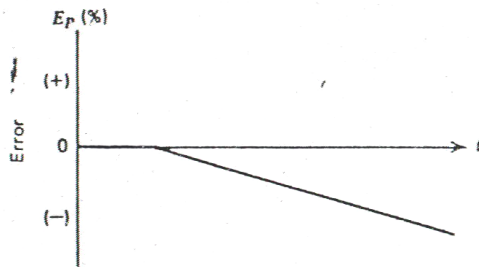


FIGURE 9.23 The three-mode controller action exhibits proportional, integral, and derivative action.

# CONTROL PID

**Ejemplo:**

Supongamos que el error de la figura es aplicado a un controlador PID con  $K_p=5$ ,  $K_t=0.75s$ ,  $K_d=0.5$  y

$P(0)=20\%$

El error expresado por la grafica es:

0-1  $E_p = t$

1-3  $E_p = 1$

3-5  $E_p = -(1/2)t + 2.5\%$

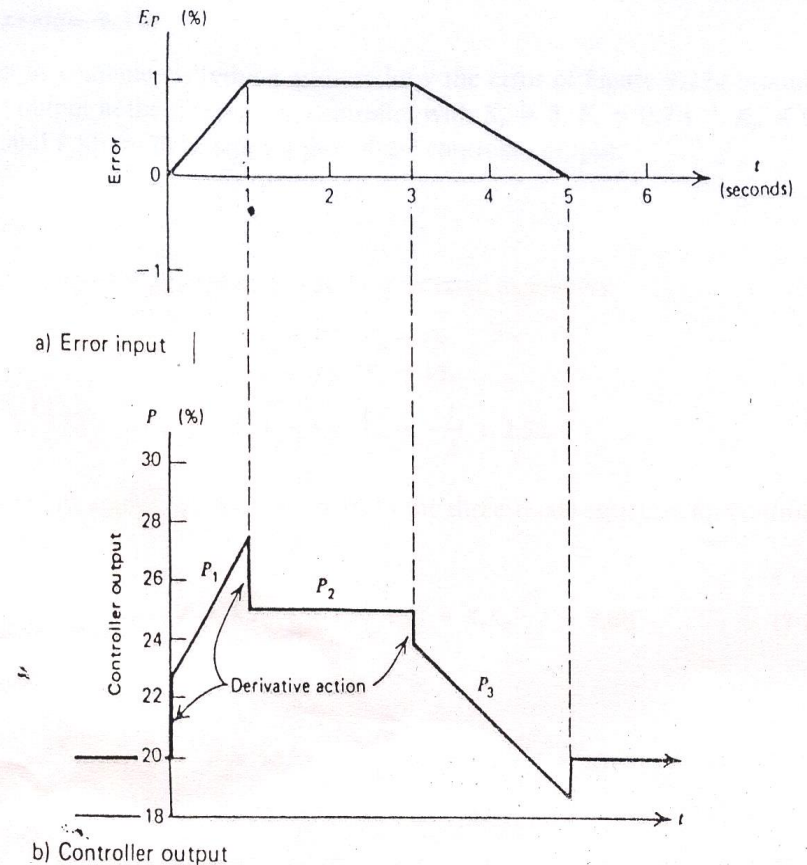
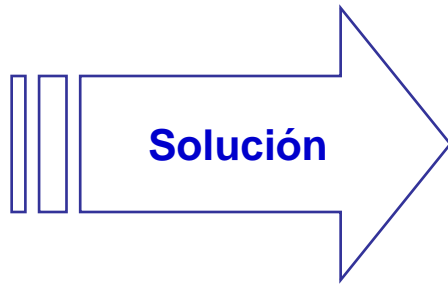


FIGURE 9.22 Solution for Example 9.9.





$$P = k_p E_p + K_p K_t \int_0^t E_p dt + K_p K_d \frac{dE_p}{dt} + P_t(0)$$

$$P = 5E_p + 3.5 \int_0^t E_p dt + 2.5 \frac{dE_p}{dt} + 20$$

De 0-1, tenemos:

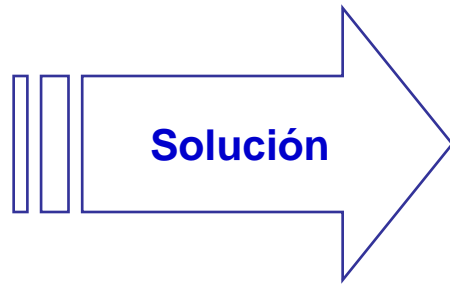
$$P_1 = 5t + 3.5 \int_0^t t dt + 2.5 + 20$$

En la figura anterior en el tramo 0-1, en el final de 1, la integral daría:

$$P_1(1) = 21.75\%$$

or

$$P_1 = 1.75t^2 + 5t + 22.5$$



$$P = k_p E_p + K_p K_t \int_0^t E_p dt + K_p K_d \frac{dE_p}{dt} + P_i(0)$$

Ahora de 1-3, tenemos:

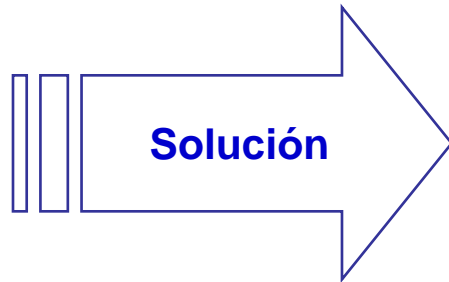
$$P_2 = 5 + 3.5 \int_0^t (1) dt + 21.75$$

*or*

$$P_2 = 3.5(t - 1) + 26.75$$

Con esta formula en el tramo 1-3, en el final de 3, la integral daría:

$$P_2(3) = 28.75\%$$



$$P = k_p E_p + K_p K_t \int_0^t E_p dt + K_p K_d \frac{dE_p}{dt} + P_t(0)$$

Ahora de 3-5, tenemos:

$$P_3 = 5\left(-\frac{1}{2}t + 2.5\right) + 3.5 \int_0^t \left(-\frac{1}{2}t + 2.5\right) dt - \frac{2.5}{2} + 28.75$$

*or*

$$P_3 = -0.875t^2 + 6.25t + 21.625$$

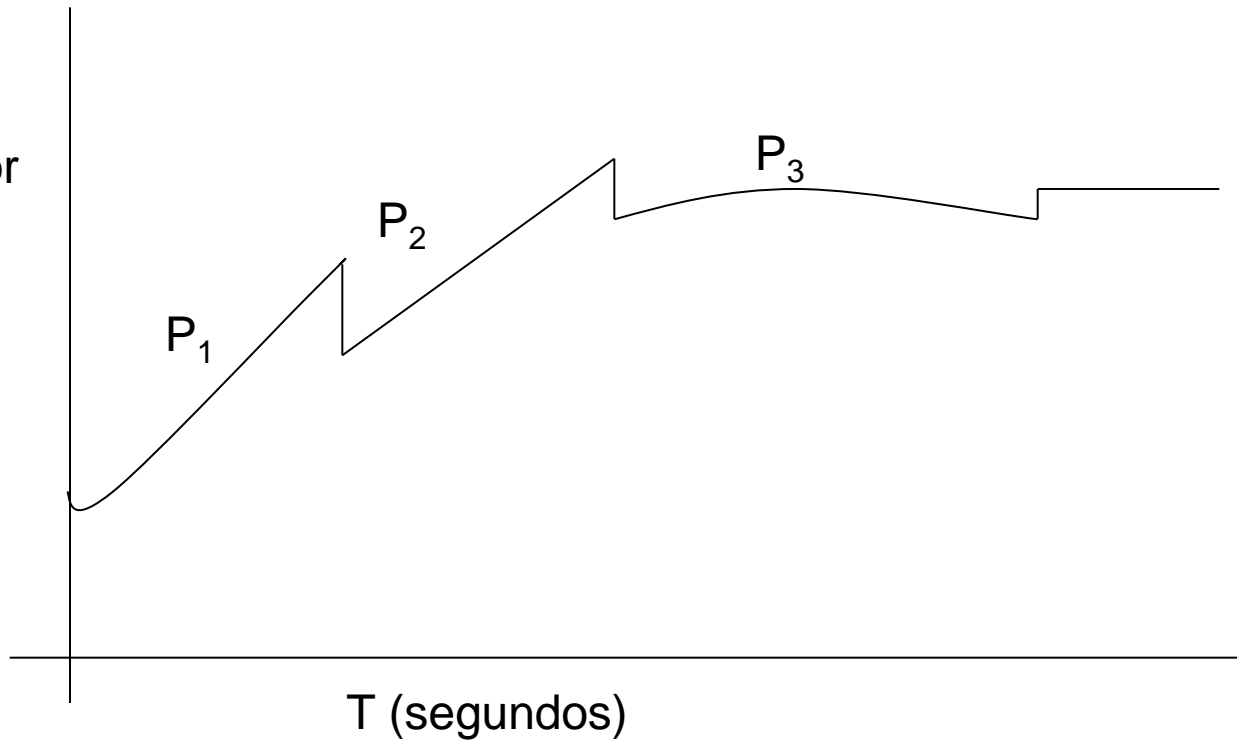
Con esta fórmula en el tramo 3-5, en el final de 5, la integral daría:

$$P_3(5) = 32.25\%$$



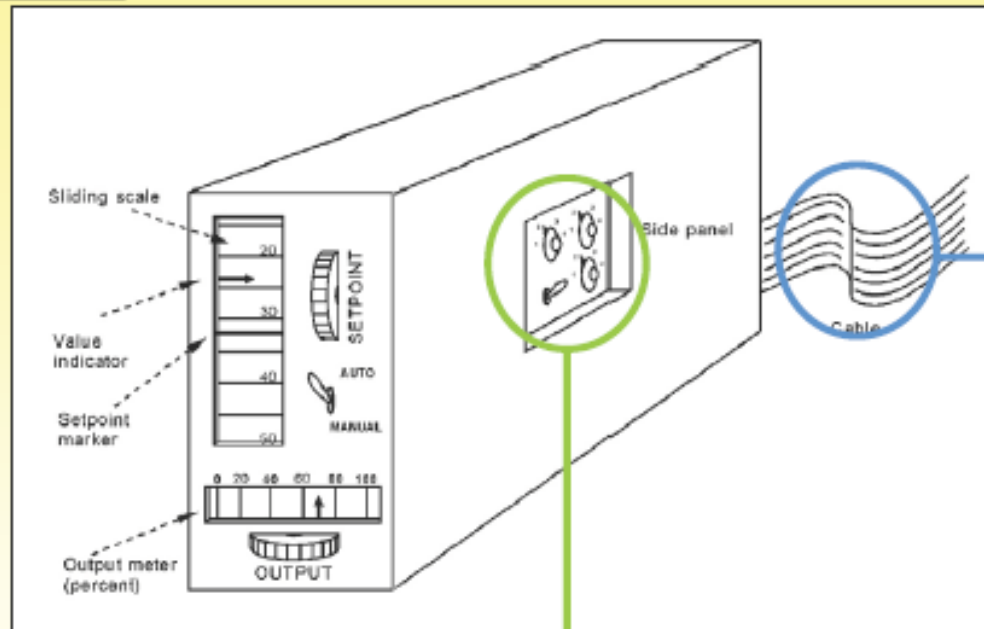
$$P = k_p E_p + K_p K_t \int_0^t E_p dt + K_p K_d \frac{dE_p}{dt} + P_i(0)$$

Salida del controlador



**Controladores prácticos**

**Controladores.**



*Curtis Johnson: Process Control Instrumentation Technology, 8e. Copyright ©2006 by Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, New Jersey 07458. All rights reserved.*

- Salidas eléctricas, bucle de corriente o neumáticas.
- Selección del modo de control y ajuste de sus ganancias.
- Eventual filtrado y acción directa/inversa.

## Controladores prácticos

## Controladores.

DR19 Siemens



- Hasta 5 setpoints.
- Salidas binarias, de relé y 4-20 mA.
- 3 entradas directas de sensores.
- Interfaces RS232, RS485, Profibus.

DR21 Siemens



- Hasta 2 setpoints.
- Salidas binarias, de relé y 4-20 mA.
- 3 entradas directas de sensores.
- Interfaces RS232, RS485, Profibus.