

CONTROLADORES CONTINUOS

Agustín Rodríguez

Introducción al Control industrial

CONTROLADOR PROPORCIONAL

La salida del controlador cambia en forma proporcional a la señal de error.

Ejemplo: control de nivel de líquido en un tanque

A cada nivel le corresponde una posición de la válvula diferente.

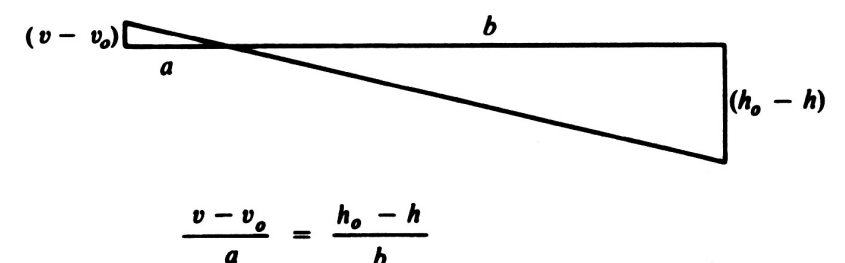
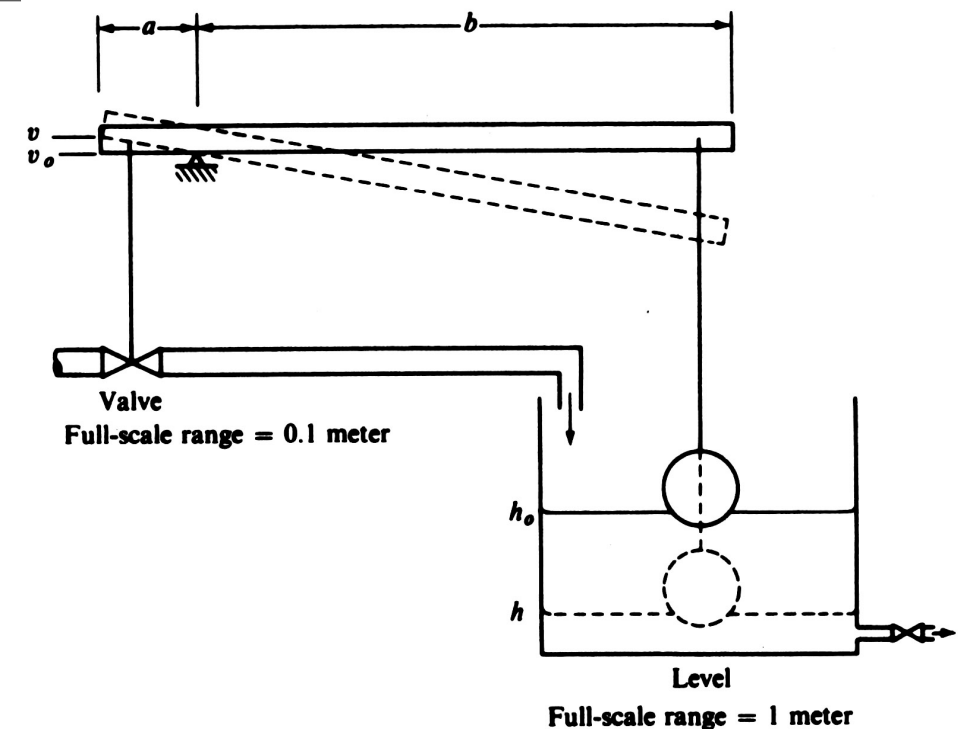
La ecuación que rige es:
$$\frac{v - v_0}{a} = \frac{h_0 - h}{b}$$

La señal de error es:
$$e = h_0 - h$$

Luego:
$$v = \left(\frac{a}{b}\right)e + v_0$$

donde h_0 es el nivel deseado

v_0 es la posición de la válvula con error nulo



CONTROLADOR PROPORCIONAL

Un incremento de la ganancia (P) reduce el error requerido para producir un cambio en el actuador necesario para balancear el proceso.

Por otro lado, esto también tiene la tendencia a inestabilizar el sistema (tiende a aumentar el tamaño de la oscilaciones).

➡ Solución de compromiso.

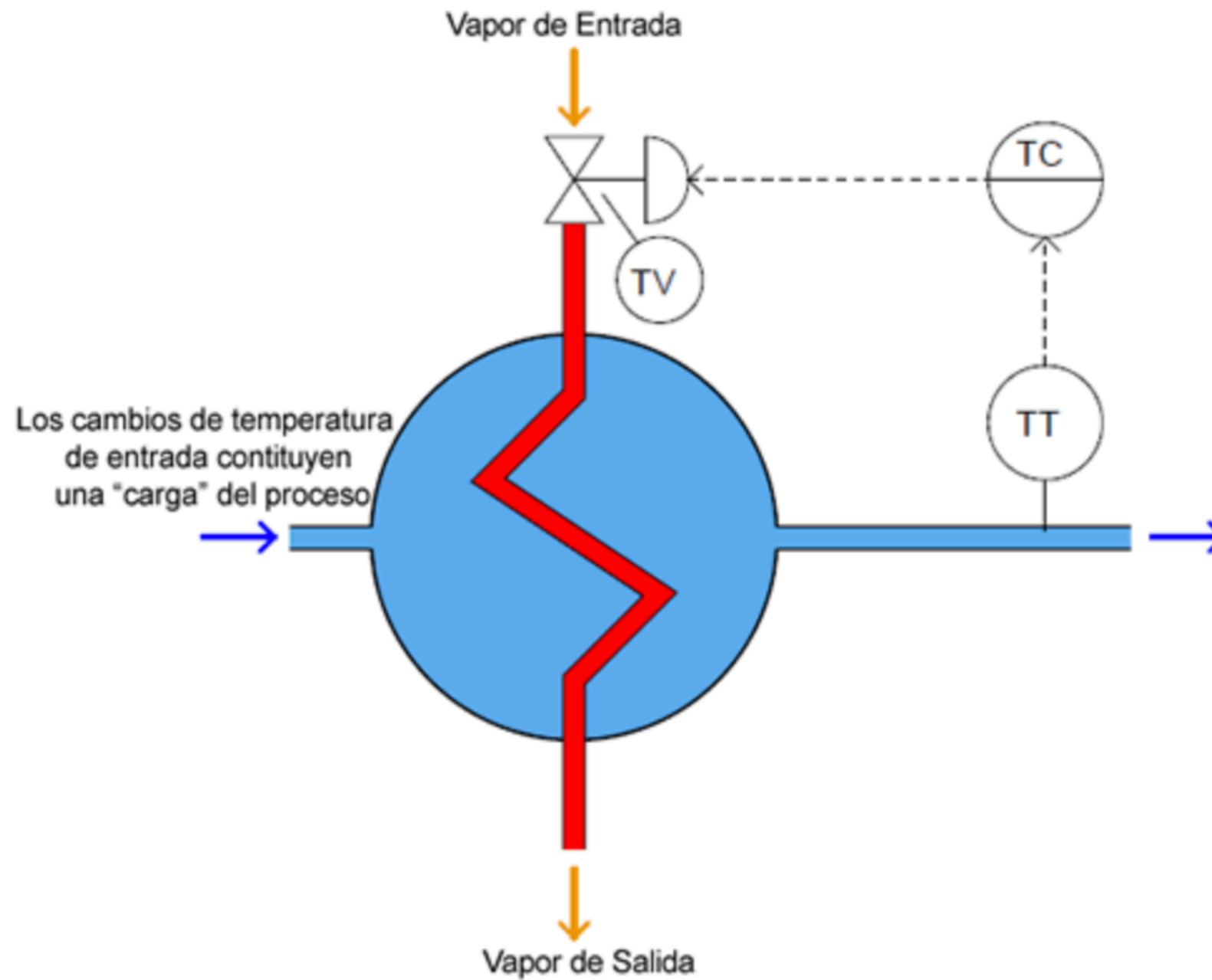
El problema del error de offset:

- Este modo de control no puede eliminar completamente el error causado por un cambio de carga (sistema de orden cero).
- El tamaño del offset es directamente proporcional al tamaño de los cambios de carga e inversamente proporcional a la ganancia P.

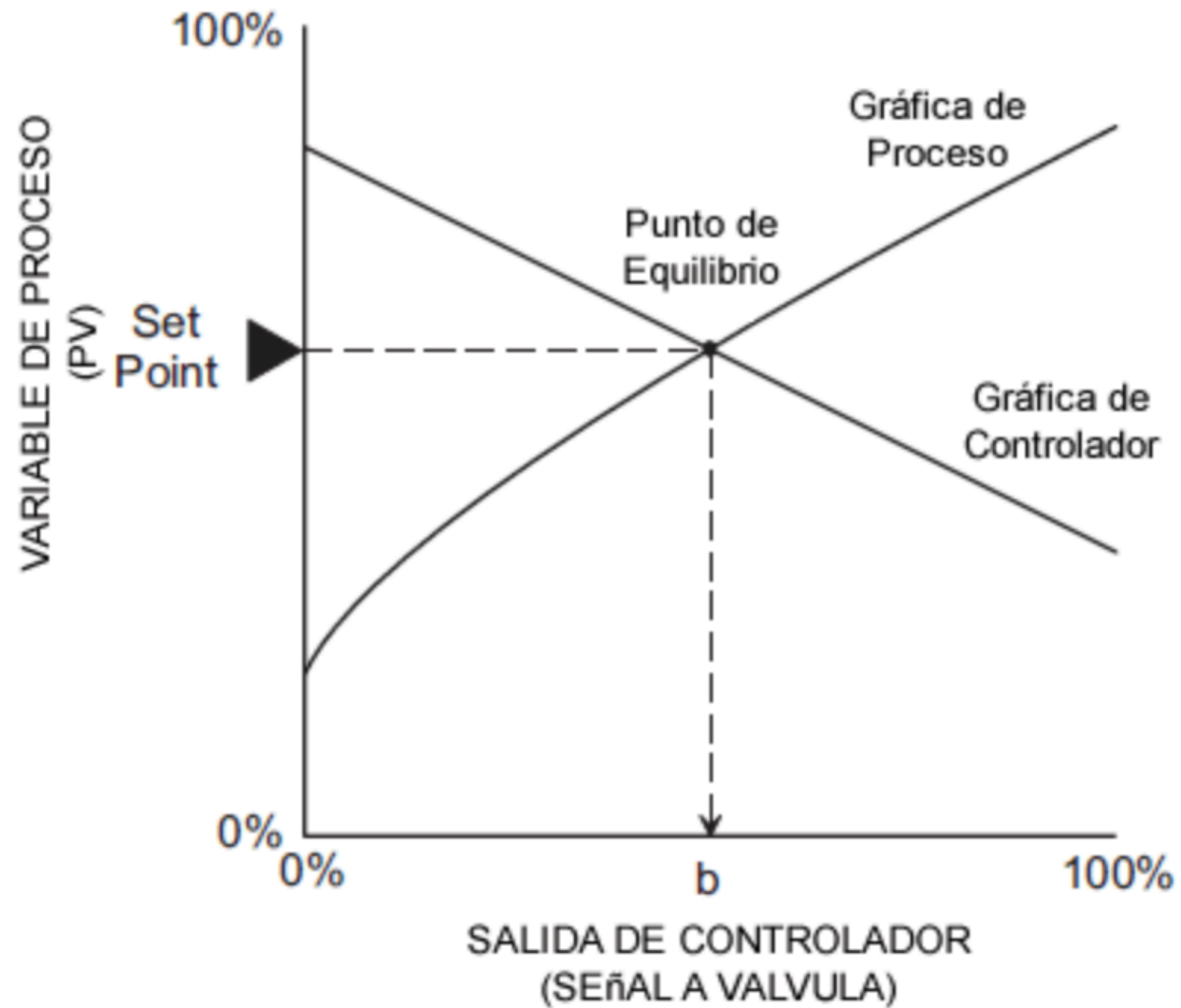


QUÉ ES UN CAMBIO DE CARGA Y CÓMO SE RELACIONA CON EL OFFSET?

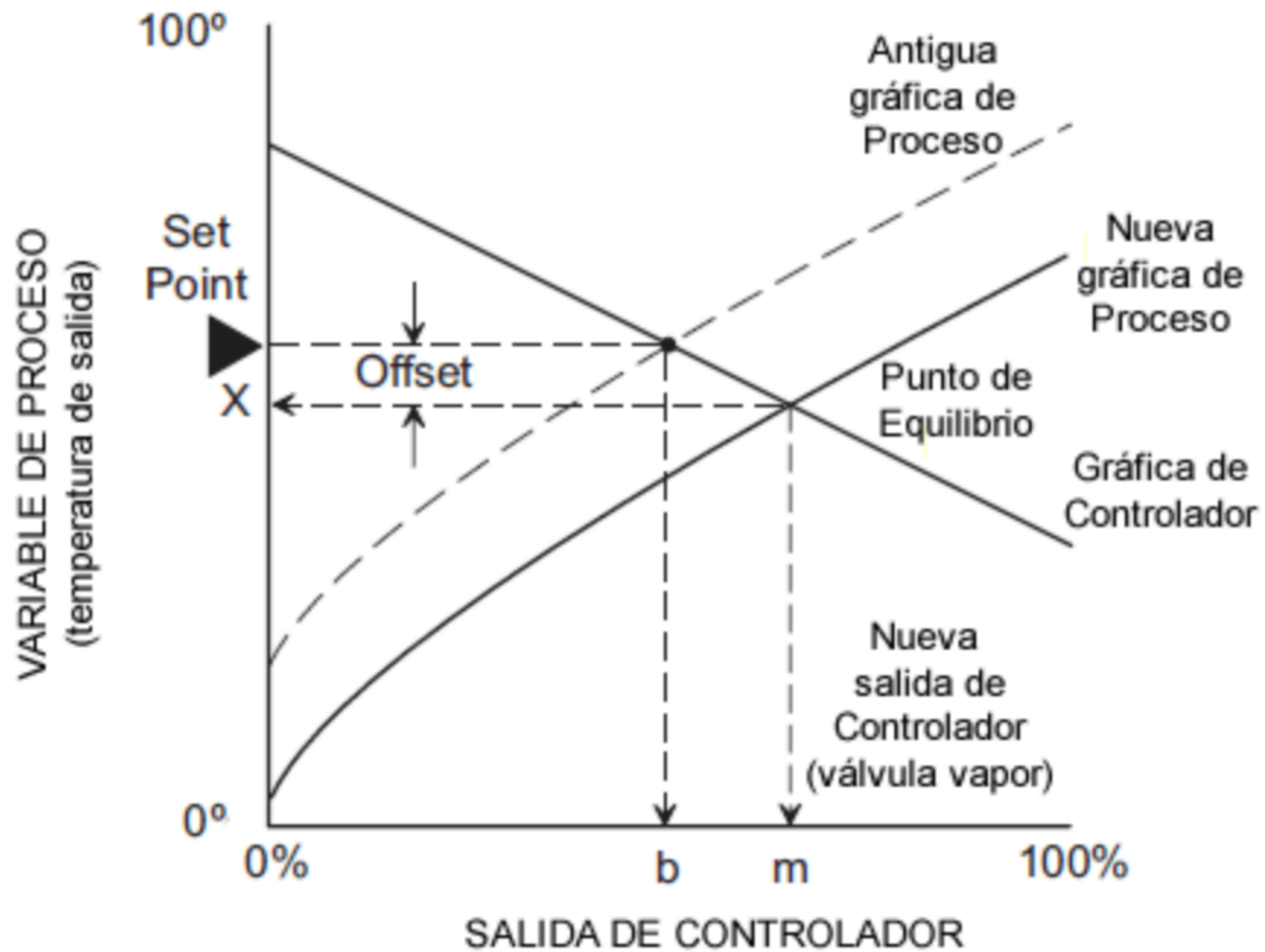
.....



QUÉ ES UN CAMBIO DE CARGA Y CÓMO SE RELACIONA CON EL OFFSET?



QUÉ ES UN CAMBIO DE CARGA Y CÓMO SE RELACIONA CON EL OFFSET?



QUÉ ES UN CAMBIO DE CARGA Y CÓMO SE RELACIONA CON EL OFFSET?

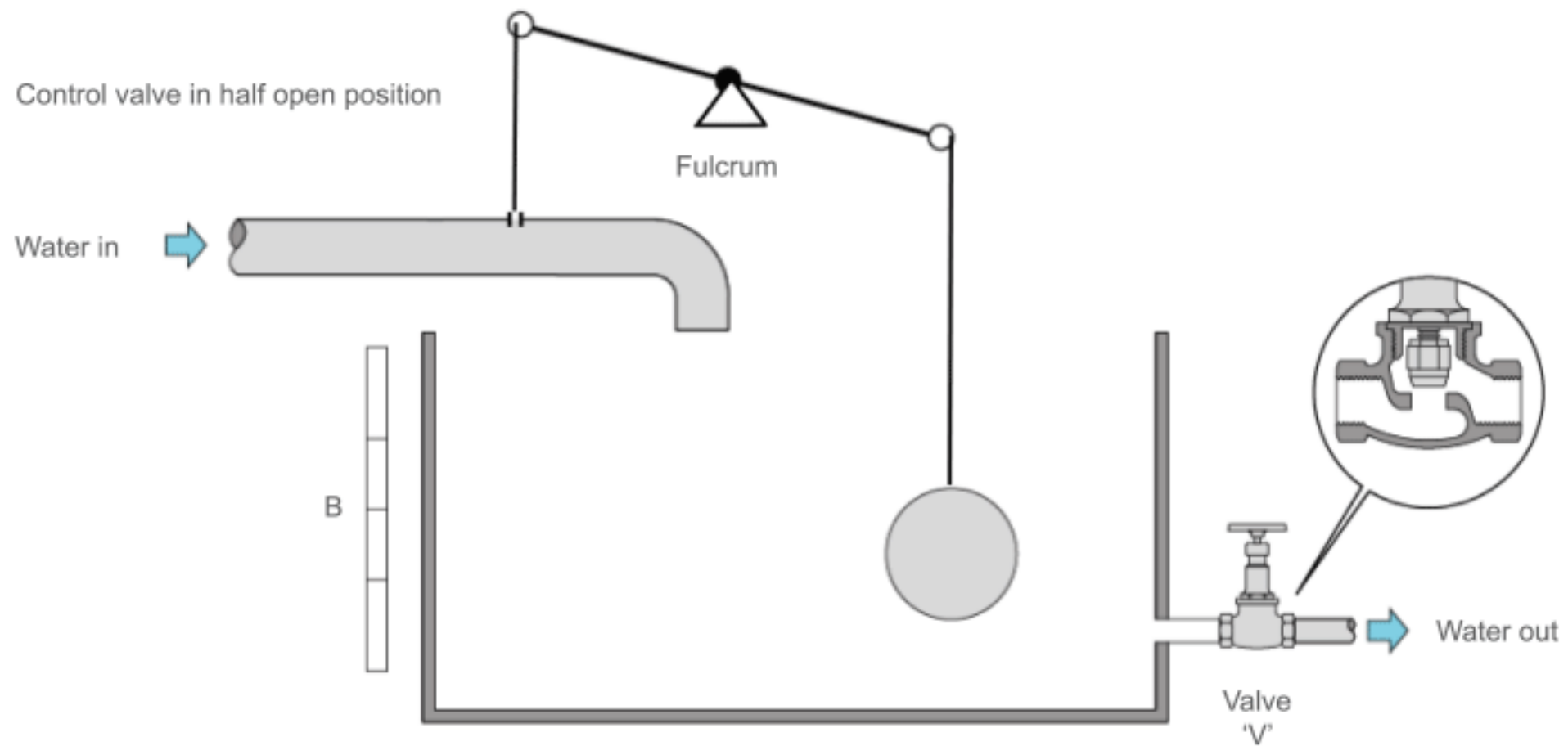


Fig. 5.2.4 Valve 50% open

QUÉ ES UN CAMBIO DE CARGA Y CÓMO SE RELACIONA CON EL OFFSET?

.....

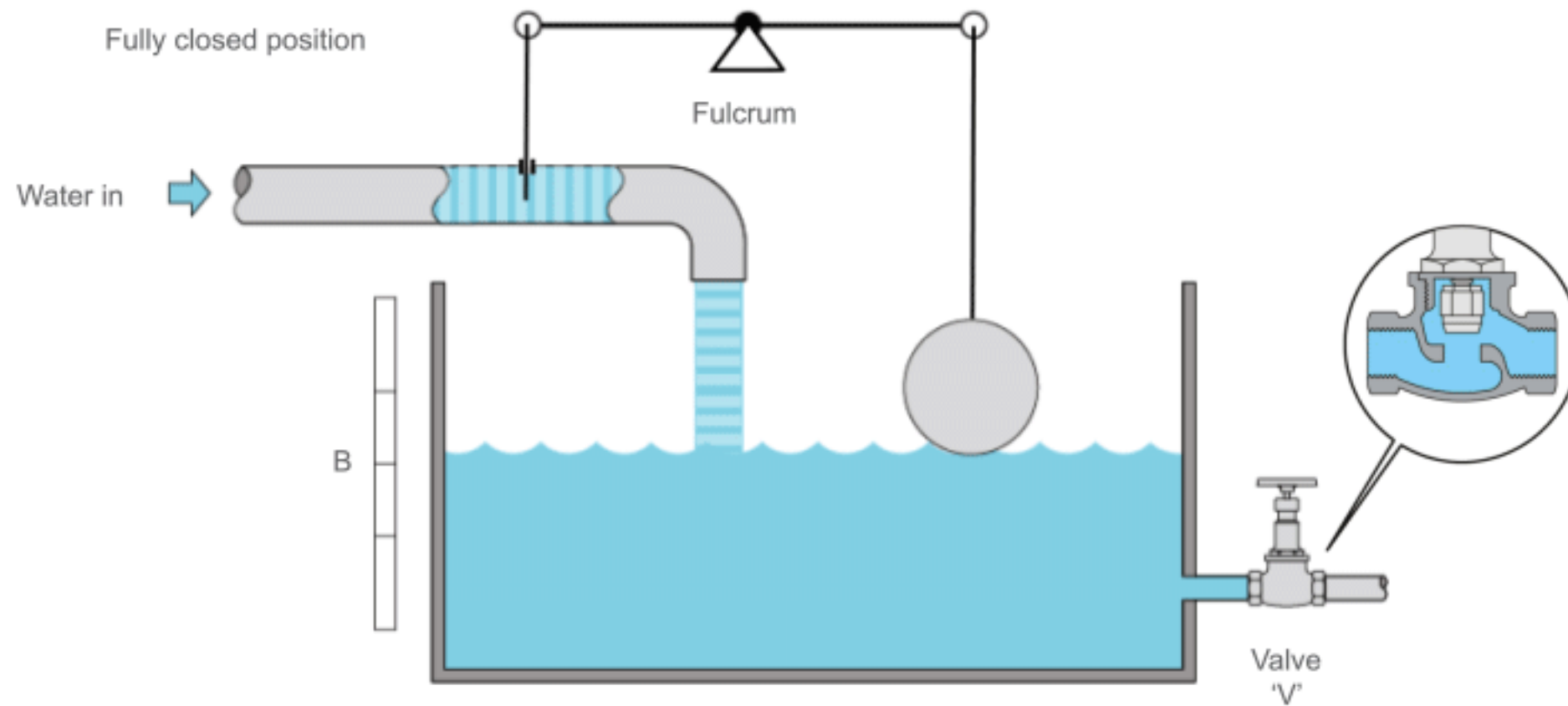


Fig. 5.2.5 Valve closed

QUÉ ES UN CAMBIO DE CARGA Y CÓMO SE RELACIONA CON EL OFFSET?

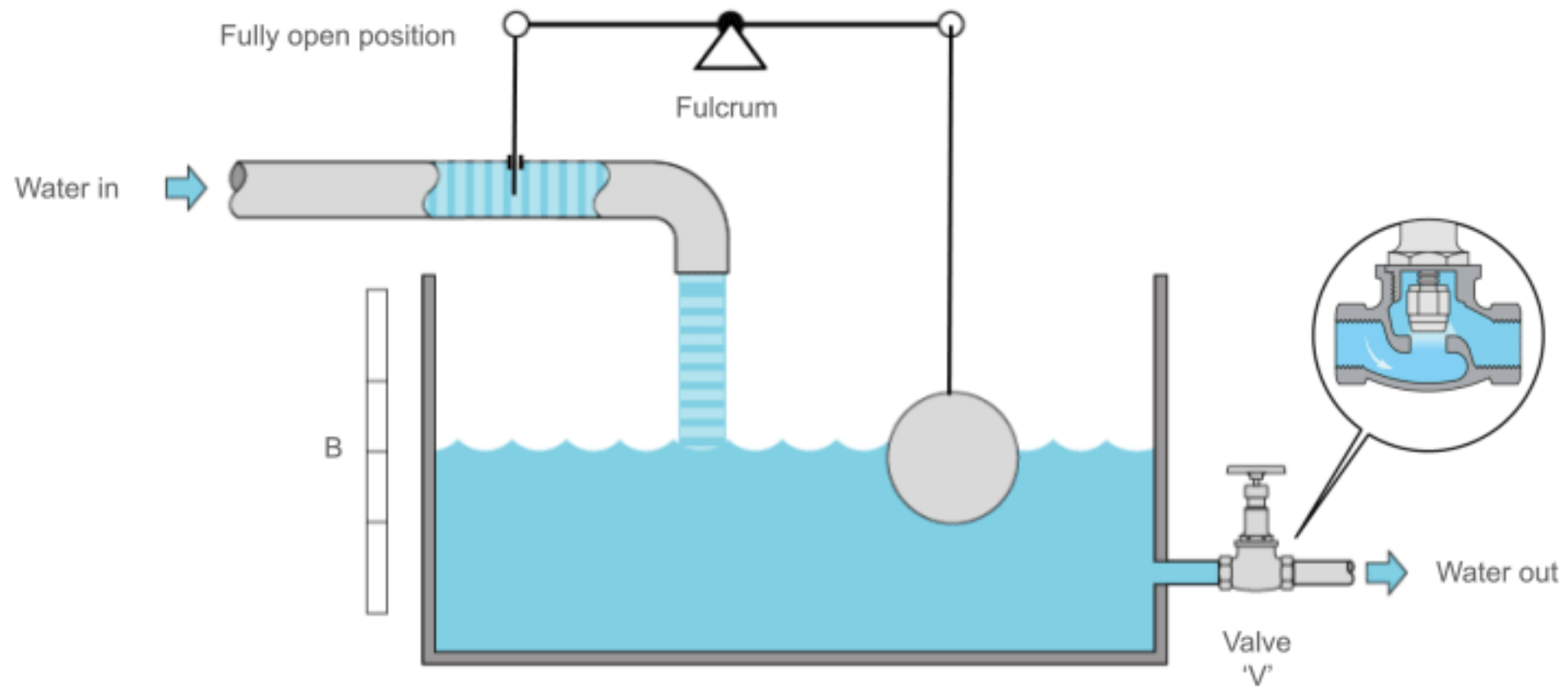
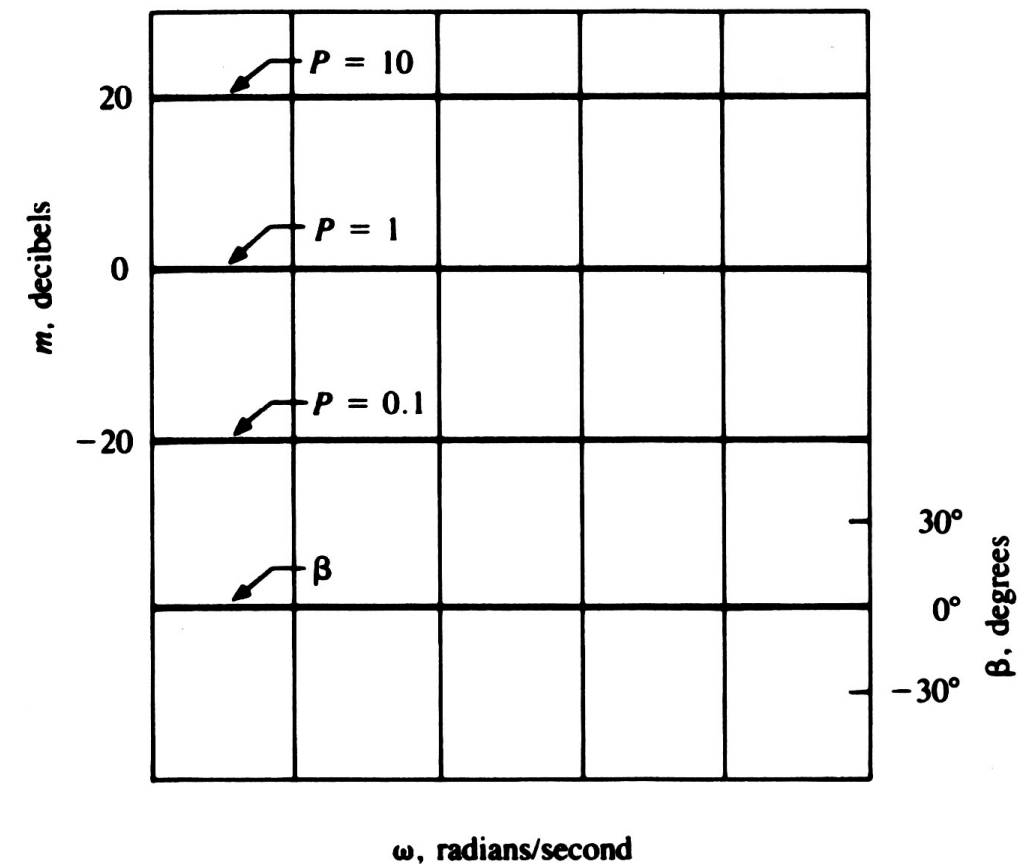


Fig. 5.2.6 Valve open

CONTROLADOR PROPORCIONAL

- La respuesta es instantánea; no hay retardo entre un cambio en el error y el correspondiente cambio en la acción de control.
- Visto en el dominio de la frecuencia, para todo valor de f :
 - el retardo de fase es 0°
 - La ganancia es constante
- Usado en procesos de capacitancia pequeña (inadecuados para control de dos posiciones) y cambios de carga rápidos, donde la ganancia puede hacerse lo suficientemente grande como para reducir el error de offset a un nivel aceptable.



CONTROLADOR PROPORCIONAL

CONTROLADOR PROPORCIONAL

Time-Domain Equation

$$v = Pe + v_0$$

Frequency-Domain Equation

$$V = PE$$

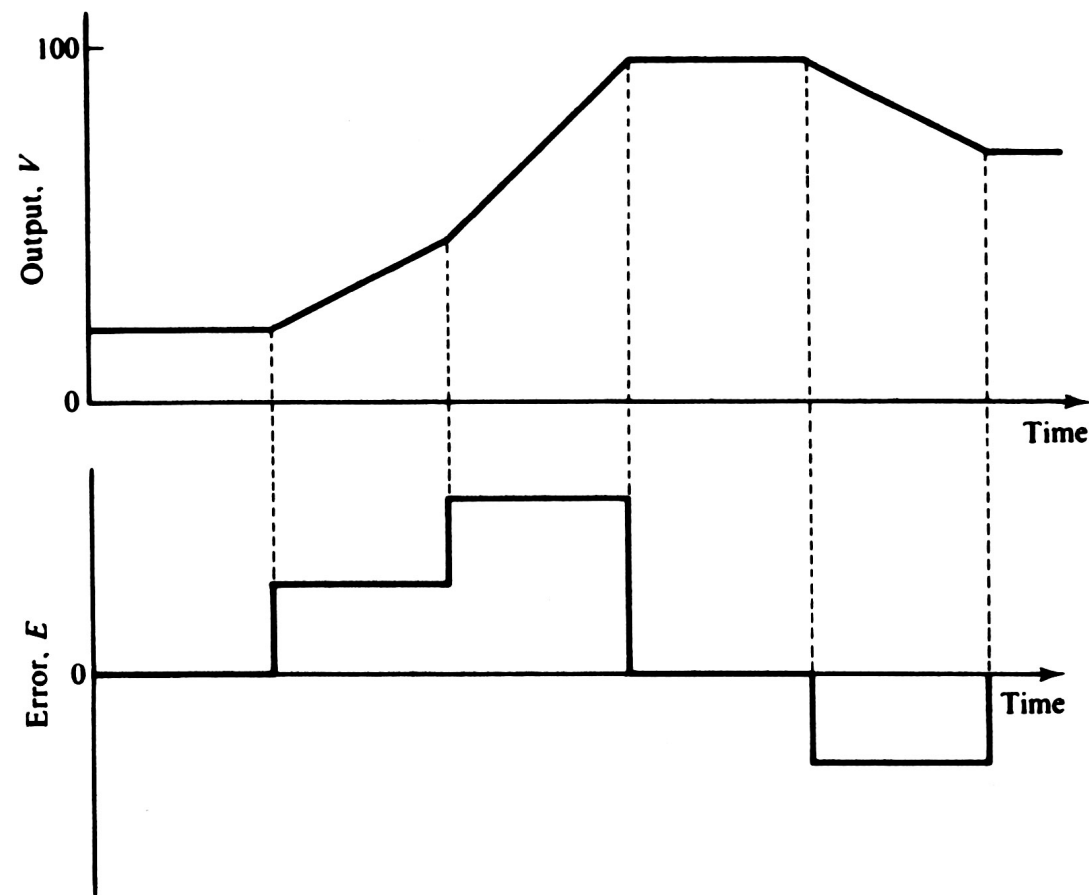
Transfer Function

$$\frac{V}{E} = P$$

Nota: En el dominio de la frecuencia, v_0 se asume 0 para satisfacer las condiciones nulas necesarias para calcular la función de transferencia.

CONTROL INTEGRAL

La salida del controlador cambia en forma proporcional a la integral de la señal de error (el error acumulado).



CONTROLADOR INTEGRAL

Time-Domain Equation

$$v = I \int_0^t e \, dt + v_0$$

Frequency-Domain Equation

$$V = \left(\frac{I}{s} \right) E$$

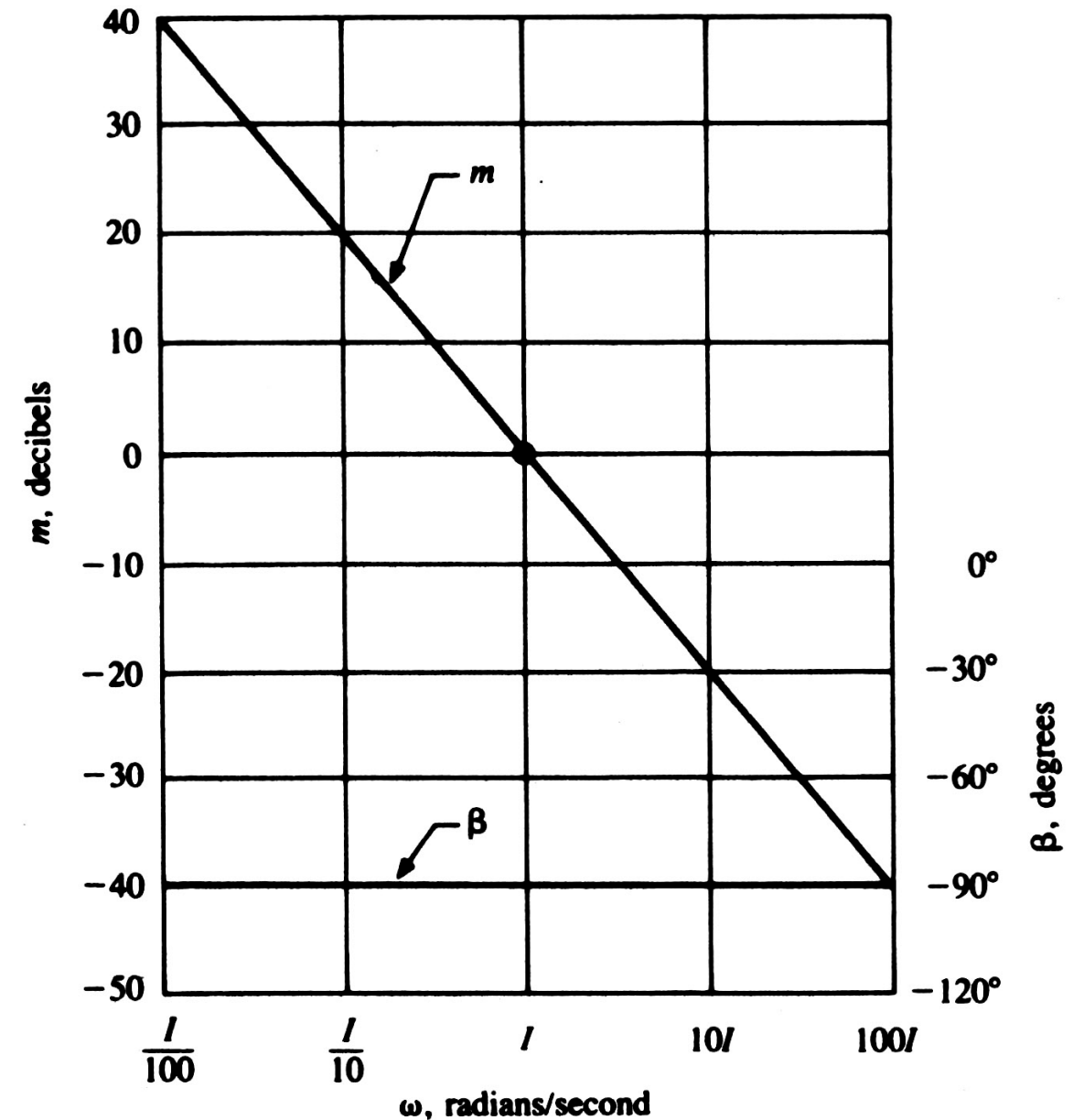
Transfer Function

$$\frac{V}{E} = \frac{I}{s}$$

CONTROL INTEGRAL

La ganancia decrece a 20 dB/dec, y se hace 0 dB (ganancia unitaria) a una frecuencia igual a 1 rad/s (cte. de integración).

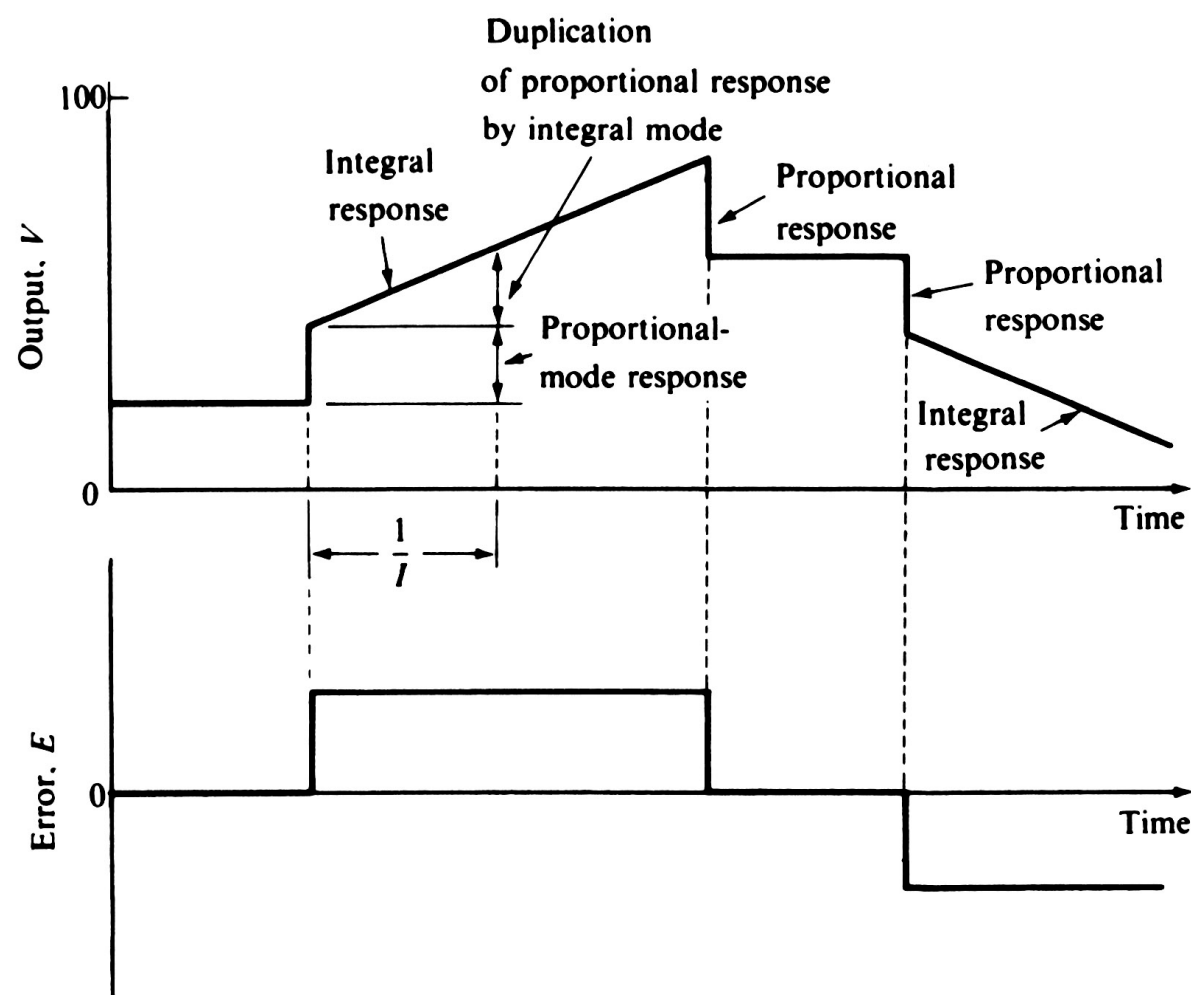
El desfase es constante e igual a -90° .



CONTROL PROPORCIONAL - INTEGRAL

El modo integral se usa frecuentemente con el modo proporcional para brindar una acción que elimina el error de offset.

El inverso de la acción integral (I) es el tiempo requerido para que el modo integral iguale el cambio en la salida producido por el modo proporcional.



CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL

Time-Domain Equation

$$v = Pe + PI \int_0^t e dt + v_0$$

Frequency-Domain Equation

$$V = PE + P \left(\frac{I}{s} \right) E$$

Transfer Function

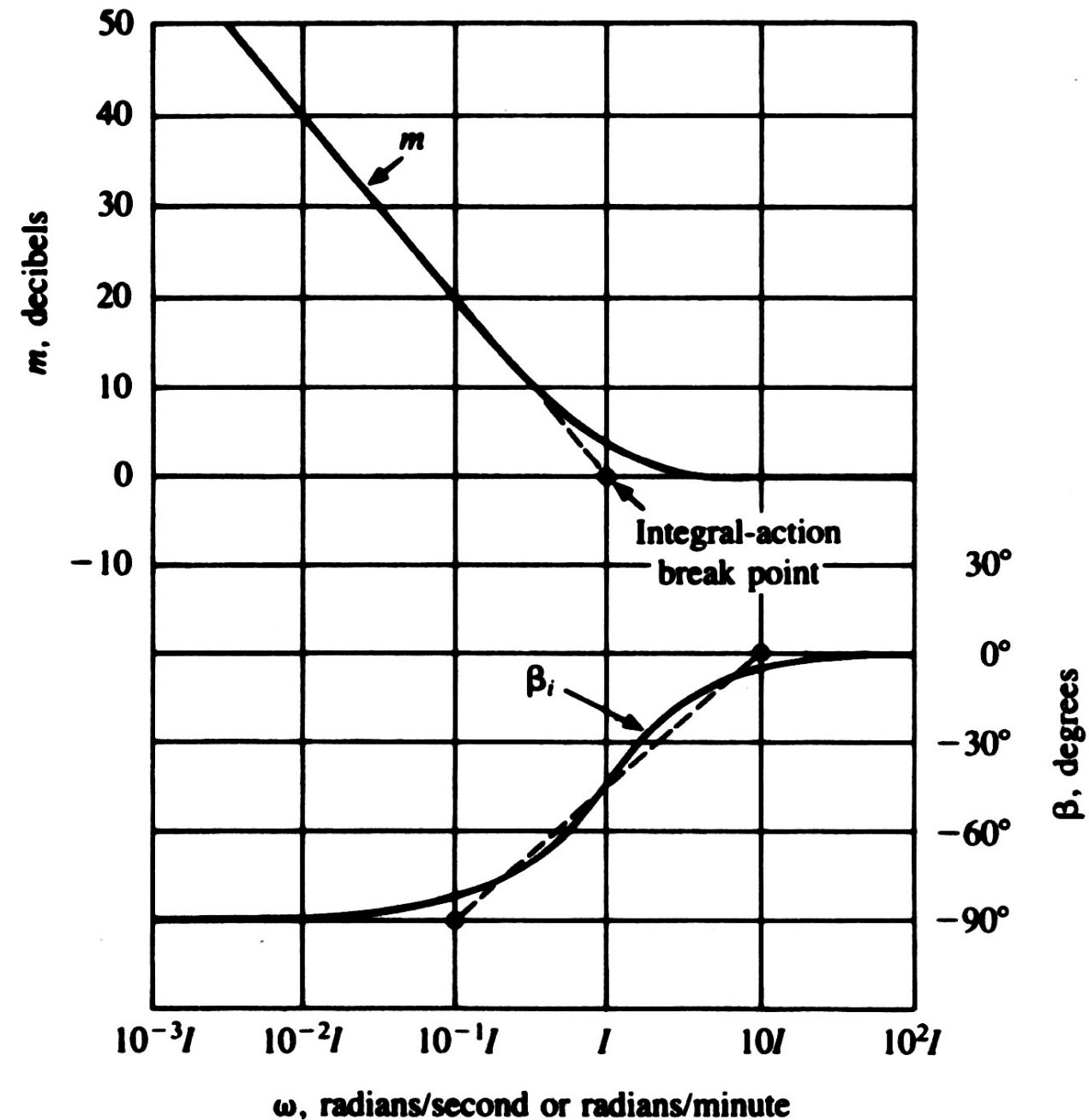
$$\frac{V}{E} = P \left(\frac{I + s}{s} \right)$$

CONTROL PROPORCIONAL - INTEGRAL

- Un problema con el modo integral es su tendencia a aumentar las oscilaciones de la var. controlada (inestabiliza).
- El valor de P debe reducirse al agregar el modo integral. Esto reduce la habilidad del controlador de responder a cambios de carga rápidos.
- Cuando hay tiempos muertos, como la señal de error no refleja inmediatamente los cambios, se producen sobrecorrecciones del modo integral.
- El controlador PI se usa en procesos con cambios de carga grandes, cuando el modo P sólo no es capaz de reducir el offset a un nivel aceptable y no es posible una ganancia proporcional grande.

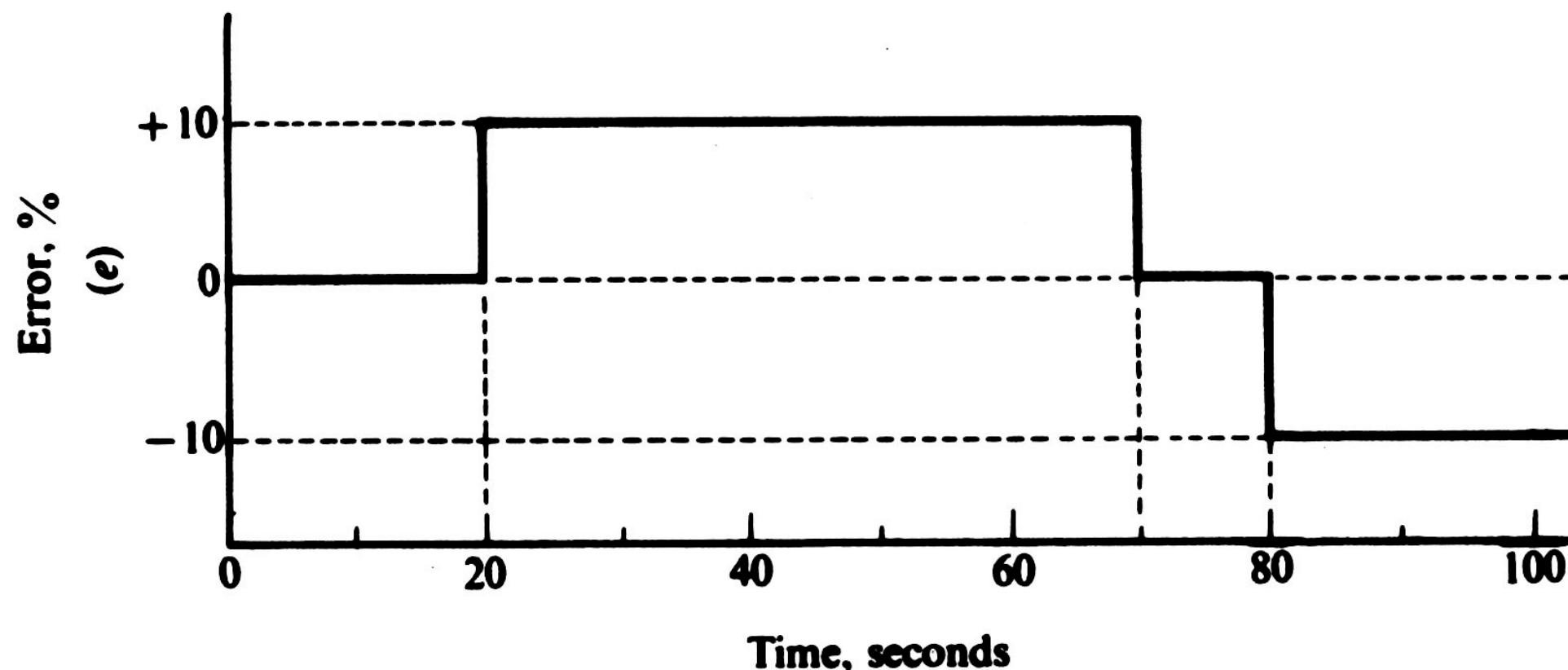
DIAGRAMAS DE BODE

- Se distinguen 3 zonas en relación al punto de quiebre a frecuencia I :
 - $w \ll I$ – zona de predominio del modo integral
 - $w \sim I$ – zona de transición
 - $w \gg I$ – zona de predominio del modo proporcional



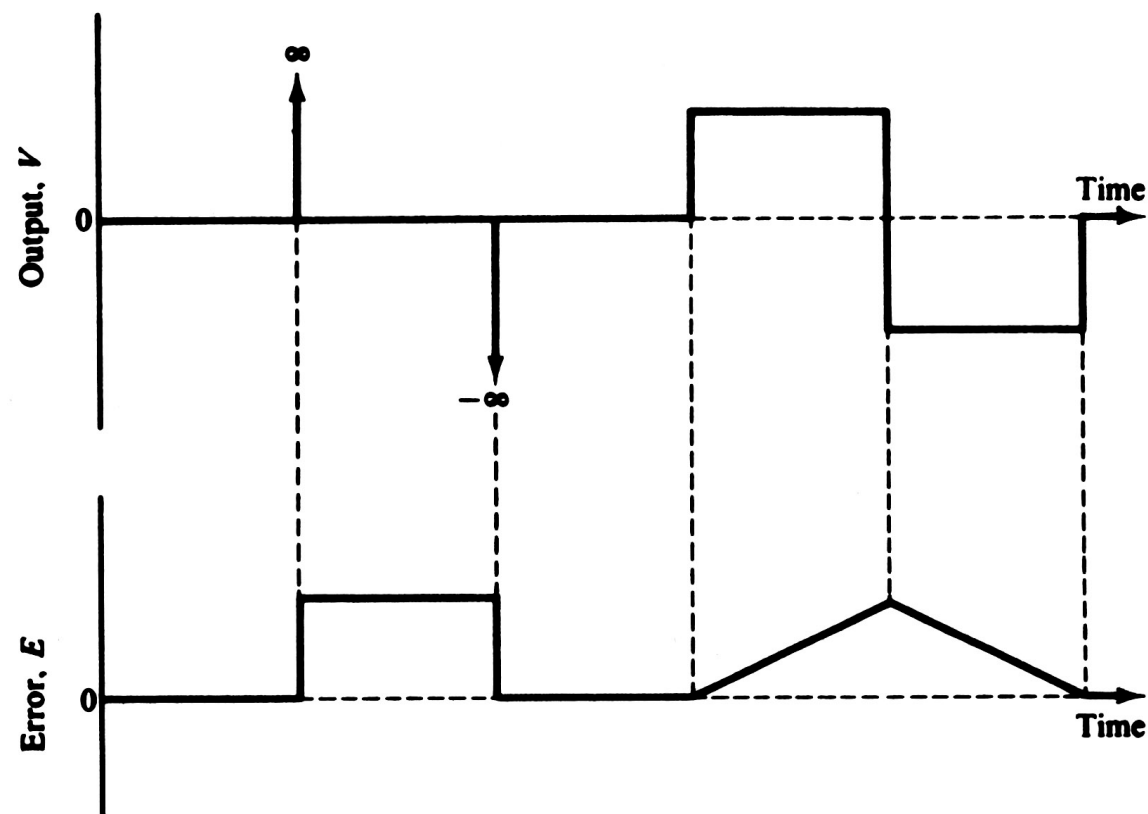
EJEMPLO DE CONTROLADOR PI

- Un controlador PI tiene $P = 2$ e $I = 0,02 \text{ s}^{-1}$.
- La salida en $t = 0$, vale $v = 32 \%$ y se tiene la señal de error de la figura.
- Graficar la salida del controlador hasta $t = 100 \text{ s}$.



CONTROL DERIVATIVO

- La salida del controlador cambia en forma proporcional a la derivada de la señal de error.
- Intenta anticipar el error observando su velocidad de cambio, y adecuando la salida para reducir el error esperado.
- Sólo aporta cuando el error está cambiando, por esta razón nunca se usa sólo.



CONTROLADOR DERIVATIVO IDEAL

Time-Domain Equation

$$v = D \frac{de}{dt}$$

Frequency-Domain Equation

$$V = DsE$$

Transfer Function

$$\frac{V}{E} = Ds$$

CONTROL PROPORCIONAL - DERIVATIVO

- La acción derivativa reduce la tendencia a oscilar y permite mayores ganancias proporcionales.
- El controlador PD se usa en procesos con cambios de carga repentinos, cuando el modo P sólo no es capaz de mantener error dentro de una banda aceptable.
- El modo D provee una acción anticipadora que reduce el máximo error y además, permite mayores ganancias P, lo que permite reducir el offset proporcional.

CONTROLADOR PROPORCIONAL DERIVATIVO

Time-Domain Equation

$$v = Pe + PD \frac{de}{dt} - \alpha D \frac{dv}{dt} + v_0$$

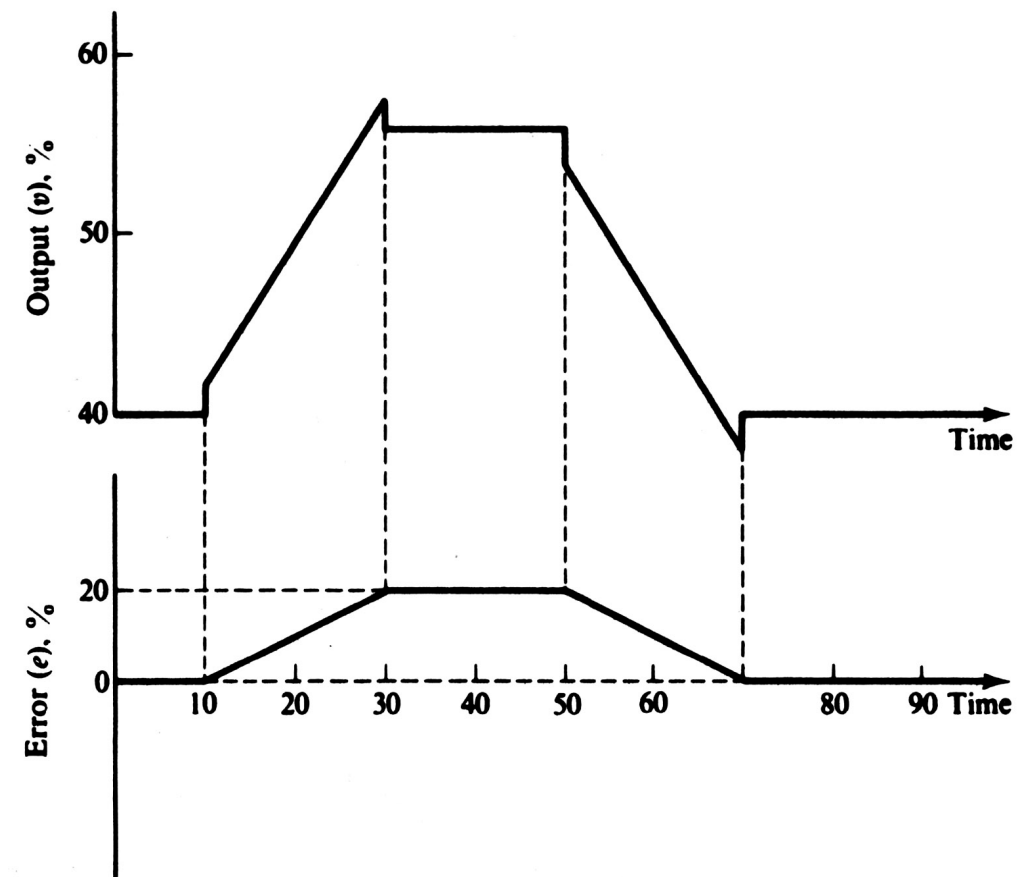
Frequency-Domain Equation

$$V = PE + PDsE - \alpha DsV$$

Transfer Function

$$\frac{V}{E} = P \left(\frac{1 + Ds}{1 + \alpha Ds} \right)$$

$0 < \alpha < 1$

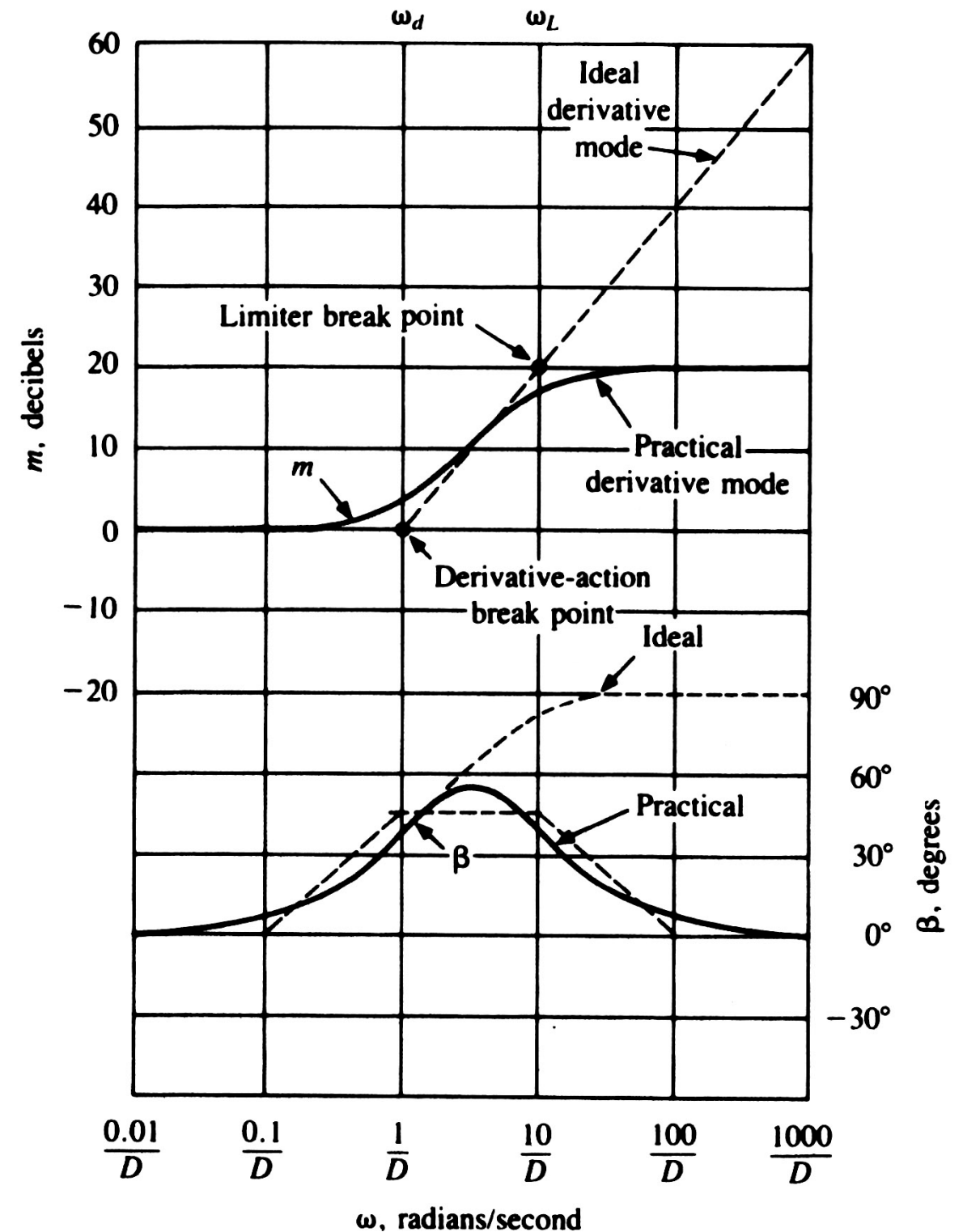


DIAGRAMAS DE BODE

Se distinguen 3 zonas en relación al punto de quiebre a frecuencia $1/D$:

- $w \ll 1/D$ – zona de predominio del modo proporcional
- $w \sim 1/D$ – zona de transición
- $w \gg 1/D$ – zona de predominio del modo derivativo

En la práctica se agrega un polo a aprox. una década a la derecha de distancia que limita la ganancia a altas frecuencias (el ideal tiende a ganancia infinita al crecer).



CONTROLADOR PID

- Combina los modos proporcional, integral y derivativo; se usa cuando no se puede mantener el error dentro de límites aceptables con configuraciones más sencillas.
- El integral elimina el offset proporcional causado por grandes cambios de carga.
- El modo derivativo reduce tendencias a oscilar e intenta anticipar los cambios en la señal de error. Especialmente útil para cambios de carga rápidos.

CONTROLADOR PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO

Time-Domain Equation

$$v = Pe + PI \int_0^t e dt + PD \frac{de}{dt} - \alpha D \frac{dv}{dt} + v_0$$

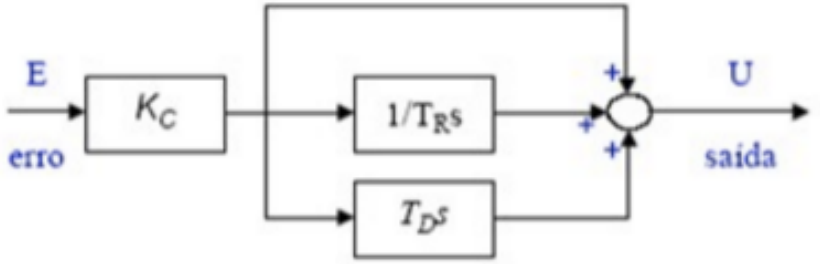
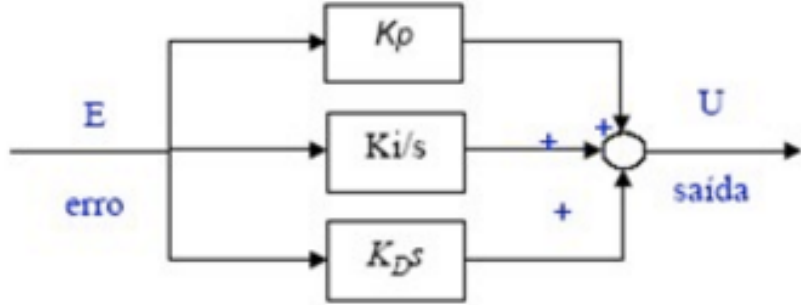
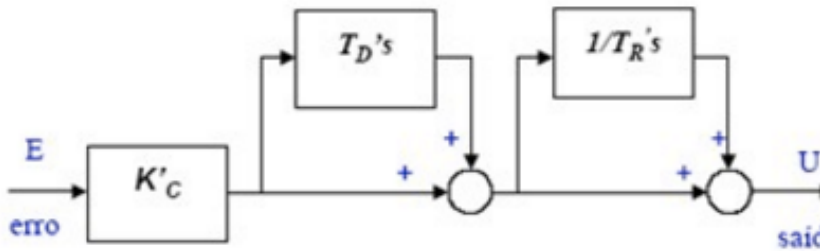
Frequency-Domain Equation

$$V = PE + P \left(\frac{I}{s} \right) E + PDsE - \alpha DsV$$

Transfer Function

$$\frac{V}{E} = P \left(\frac{I + s + Ds^2}{s + \alpha Ds^2} \right)$$

IMPLEMENTACIONES EQUIVALENTES

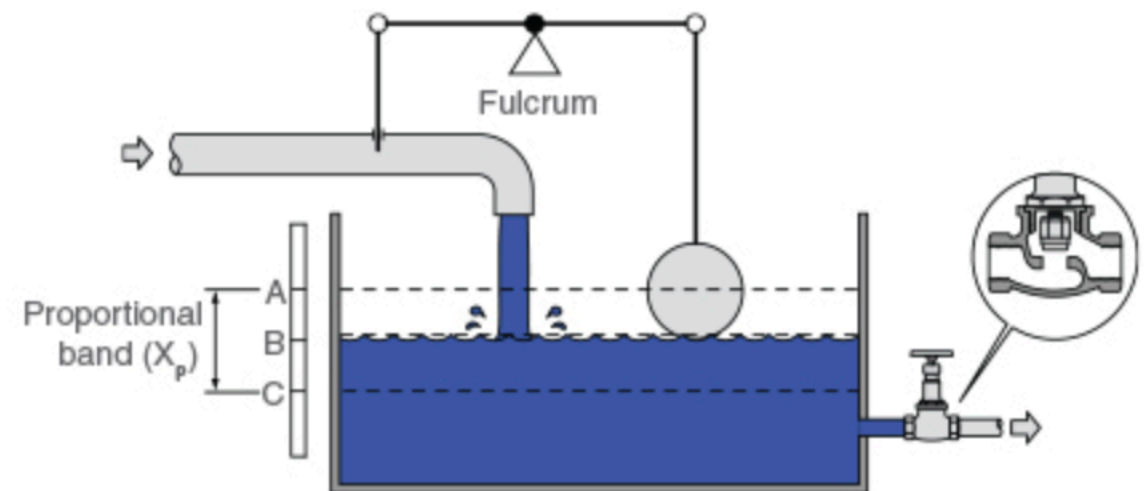
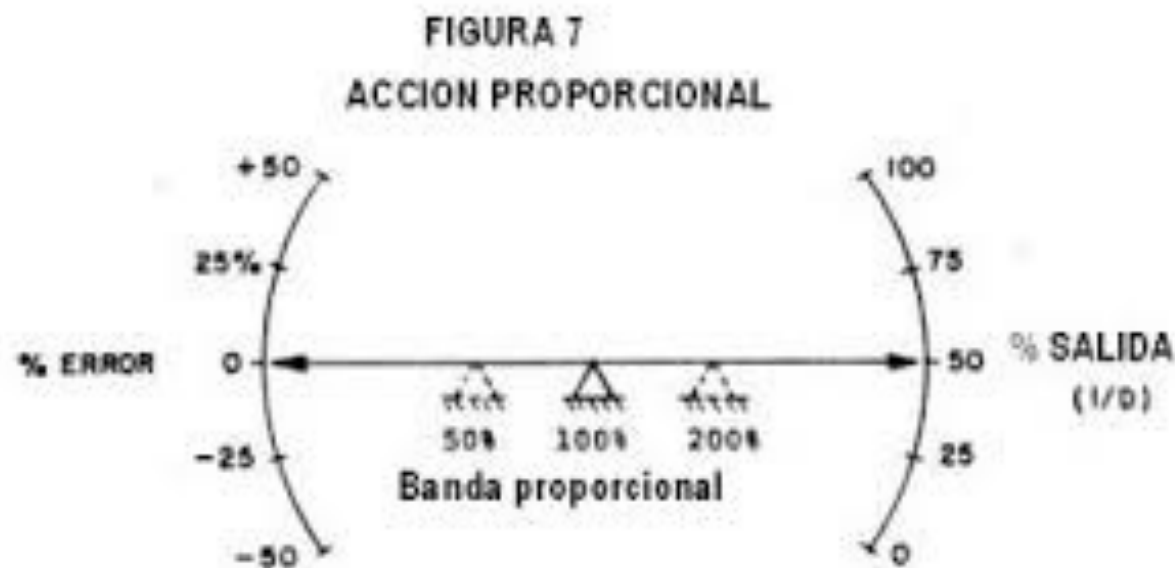
<p><i>PID Estándar</i></p>	$PID_{ISA}(s) = K_P \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot s} + \frac{T_d \cdot s}{\epsilon \cdot T_d \cdot s + 1} \right)$	
<p><i>PID Paralelo</i></p>	$PID_{paral}(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D \cdot s}{\eta \cdot K_D \cdot s + 1}$	
<p><i>PID Serie</i></p>	$PID_{serie}(s) = \hat{K}_P \cdot \left(1 + \frac{1}{\hat{T}_{IS}} \right) \cdot \left(1 + \frac{\hat{T}_d \cdot s}{\delta \cdot \hat{T}_d \cdot s + 1} \right)$	

ACCIÓN PROPORCIONAL

- A veces referida como Banda proporcional, y la equivalencia es:

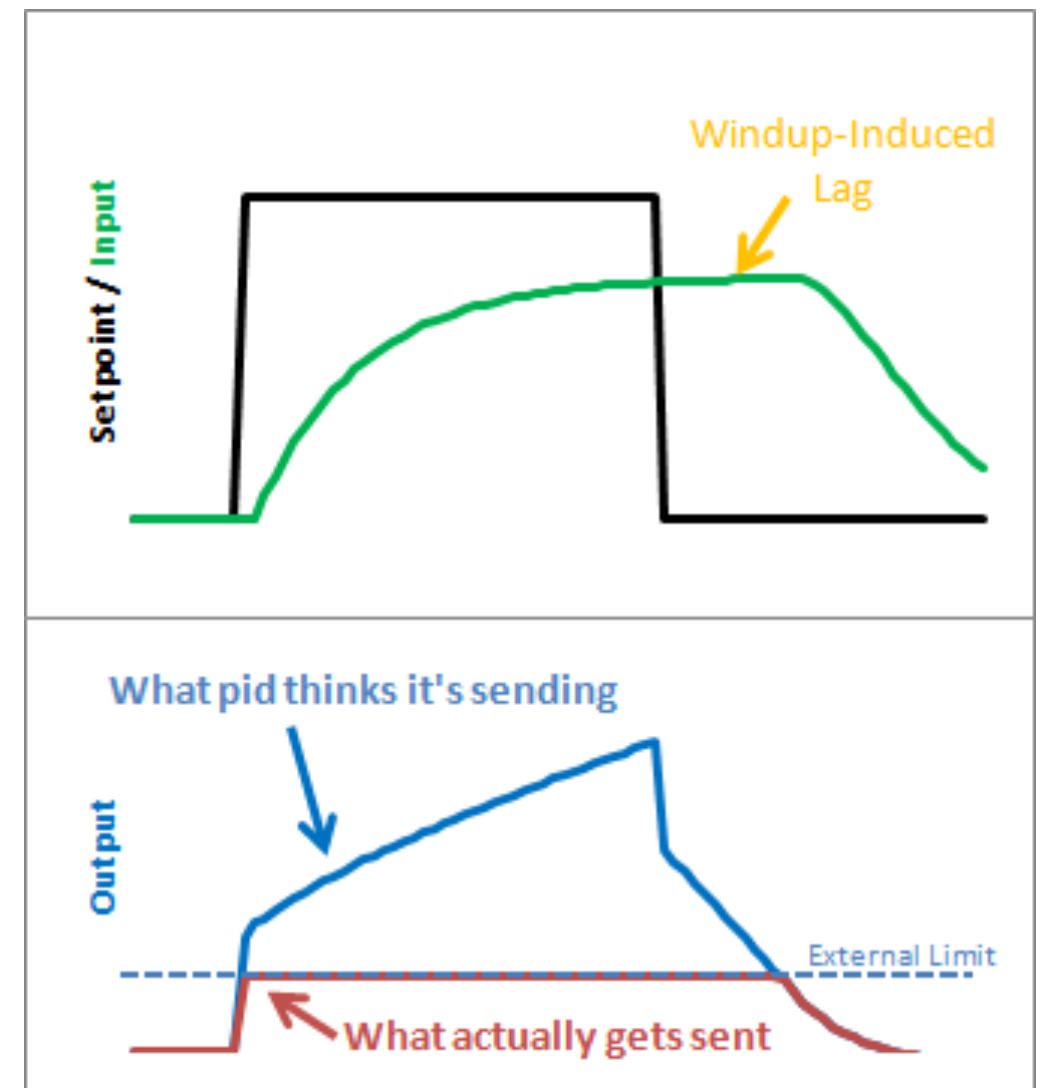
$$PB(\%) = \frac{100}{K_P}$$

- La Banda proporcional se define como el porcentaje de cambio de la entrada del sistema requerido (como porcentaje del fondo de escala) para cambiar la salida del controlador de 0% a 100%.



ACCIÓN INTEGRADORA

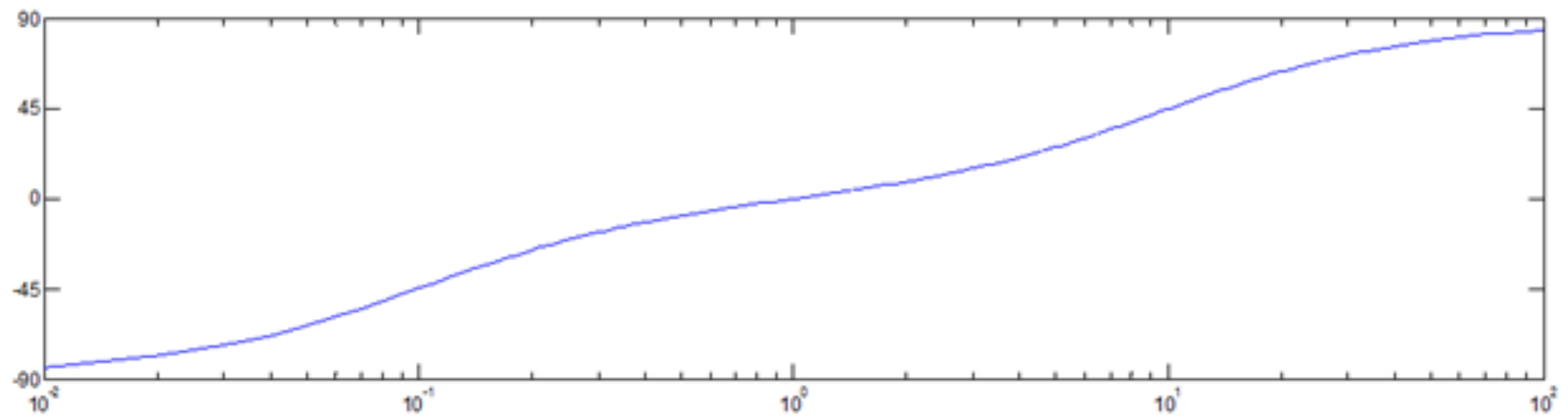
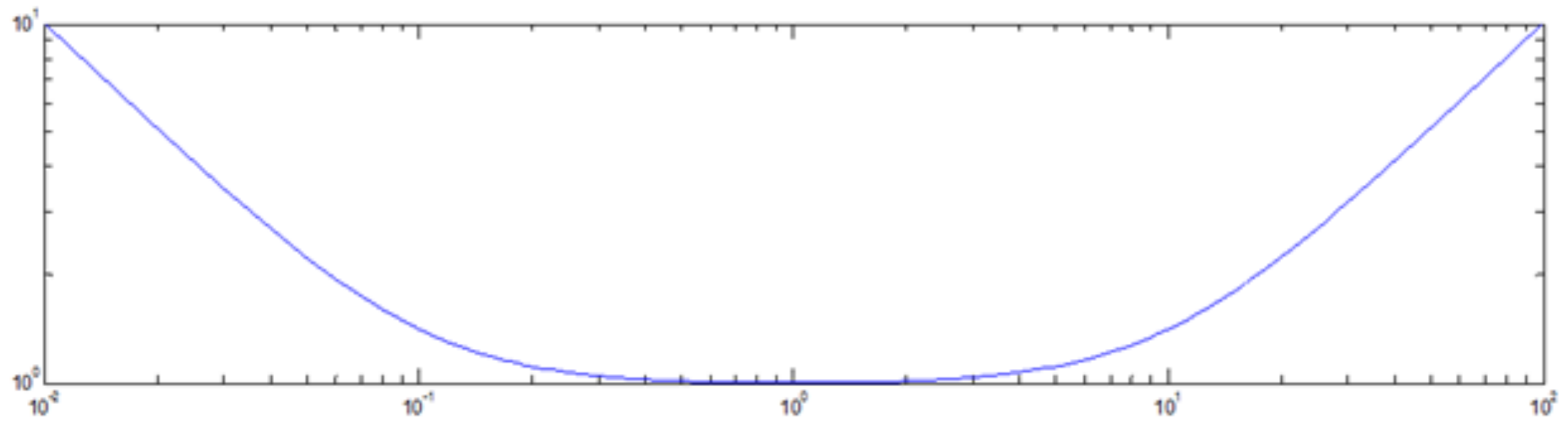
- Es responsable de la respuesta lenta (filtro pasabajos)
- Aumenta el tipo del sistema en 1 (reduce el error en régimen, si el sistema sigue siendo estable)
- Tiende a inestabilizar el sistema
- Hace aparecer el efecto indeseable denominado wind-up (cuando el actuador satura y el PID cree que en realidad sigue aumentando su salida).



ACCIÓN DERIVATIVA

- Es responsable de la respuesta rápida (filtro pasaaltos)
- Su acción desaparece con errores ctes.
- Llamada modo predictivo por actuar sobre la tendencia del error
- Tiende a generar acciones de control demasiado grandes en respuesta a altas frecuencias en la señal de error (debido a ruido o cambios bruscos de set-point)
- La implementación típica incorpora un polo cerca de una década después del cero. (Típicamente ε entre 0,1 y 0,2.)
A menor ε , mayor el rango de frecuencias donde la respuesta es similar a la de un derivador puro.

RESPUESTA EN FRECUENCIA PID



RESPUESTA EN FRECUENCIA PID+COMPENSACIÓN

