



En la época previa al auge y desarrollo de la automatización industrial, en el campo de la regulación y control eran los operarios los que, manualmente, realizaban las modificaciones que su experiencia y buen criterio aconsejaban, para mantener la variable de salida controlada, para alcanzar los resultados finales deseados. Hoy en día, en las aplicaciones industriales, se utilizan los ordenadores como elemento de control.

El regulador o controlador constituye el elemento básico de un sistema de control, ya que determina su comportamiento, condicionando la acción de los actuadores en función de la señal de error obtenida.



Curiosidad

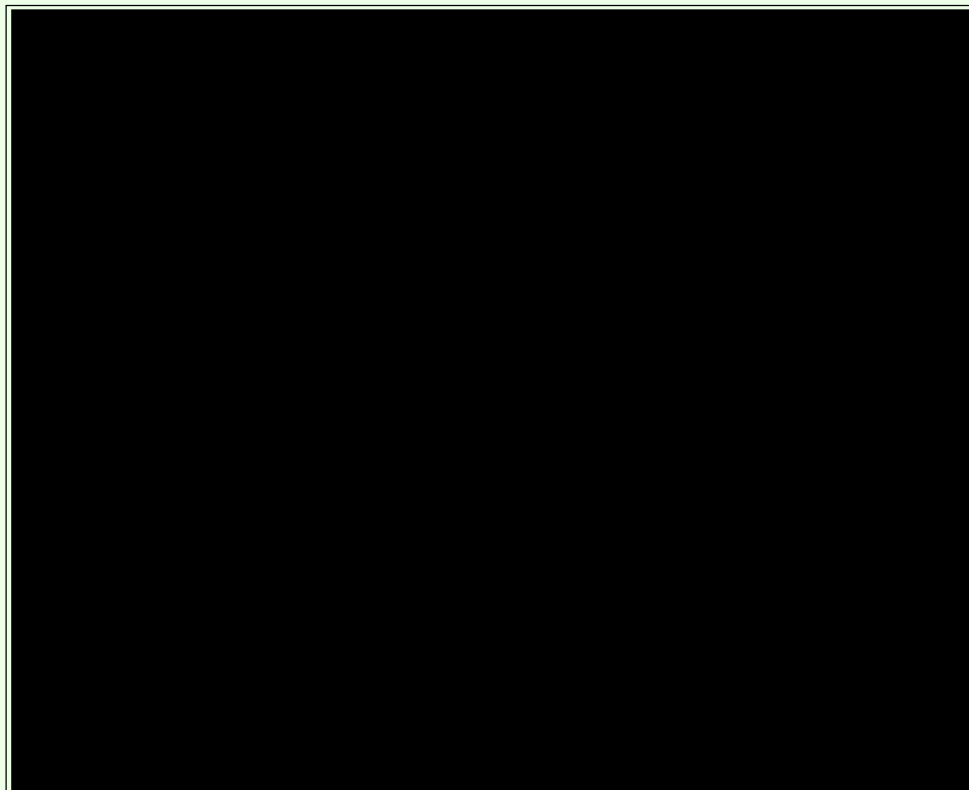
Los ingenieros industriales, tienen como emblema el siguiente:



Imagen 01. [pradadingenieros](#). ©

O versiones de este emblema como puedes ver en la web del [colegio de ingenieros industriales](#), en la que en la parte de arriba se ven dos bolas en un mecanismo que es el denominado, regulador de bolas.

El regulador de bolas es, probablemente, el primer sistema de control en una máquina. Su misión era que la máquina de vapor no se embalsase. Si tienes curiosidad, visita la entrada de la [wikipedia sobre la máquina de vapor](#), o una explicación sobre el funcionamiento del regulador o este video en que se ve el regulador en pleno funcionamiento.



Multimedia 01. [youtube](#). ©

1. Tipos de controladores



En un sistema con un sistema de control, según sea la forma en que conteste el actuador, distinguiremos distintos tipos de acciones de control, algunas de ellas solamente utilizarán acciones llamadas básicas, aunque lo más común es que respondan mediante una combinación de estas acciones básicas.

<i>Acciones Básicas</i>	<i>Combinación de acciones básicas</i>
Proporcional (P)	Proporcional - Integrador (PI)
Derivativa (D)	Proporcional - Derivativa (PD)
Integral (I)	Proporcional - Integral - Derivativa (PID)

Al controlador derivativo también se le llama diferencial.

1.1 Controlador de acción Proporcional (P)





Ejercicio resuelto

Más que un ejercicio te proponemos, antes de ver teóricamente qué es un controlador de acción proporcional, un ejemplo.

El control de nivel por flotador que ves en la figura, es un ejemplo de regulación proporcional (que esencialmente es como funciona la cisterna del baño de tu casa)

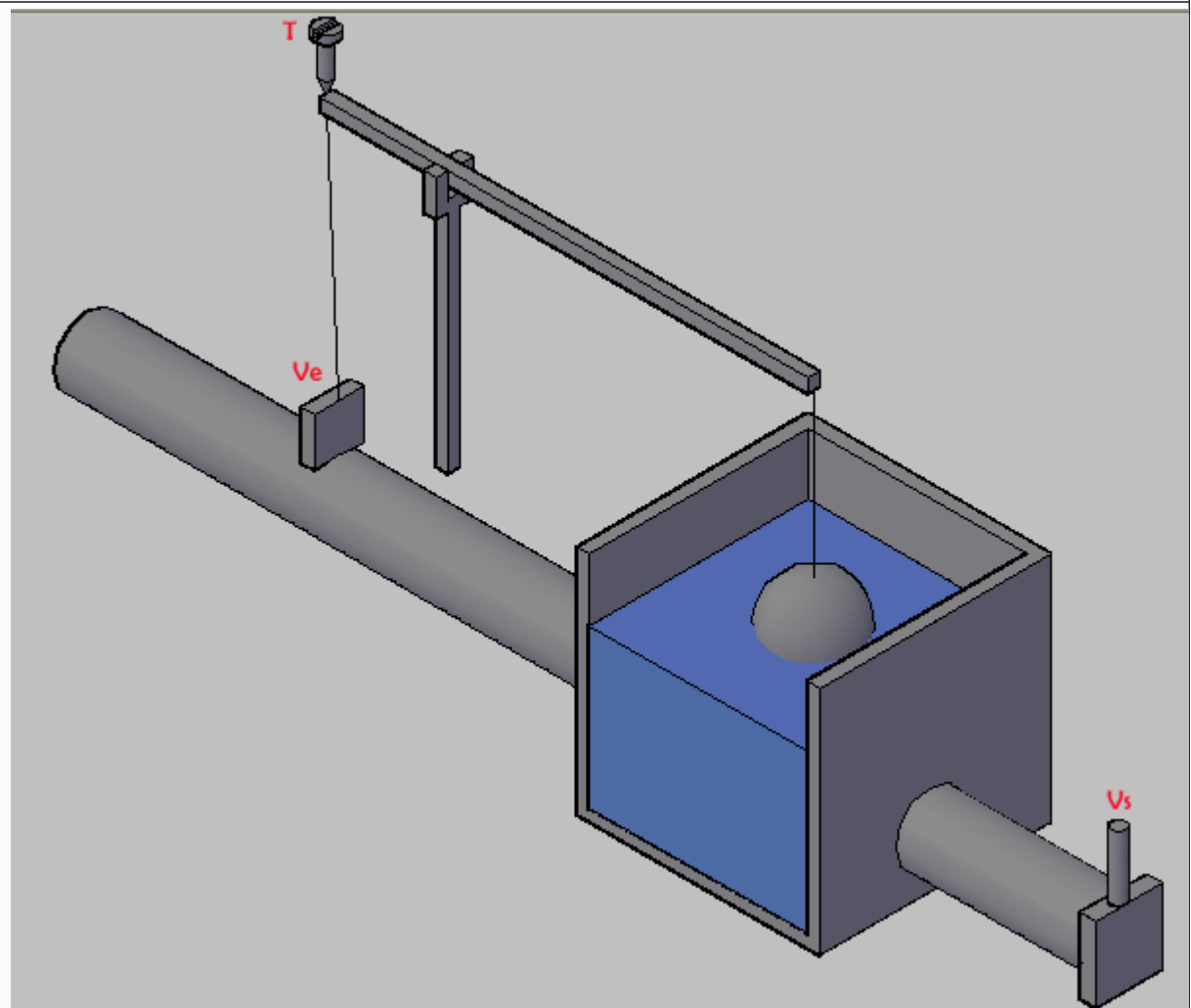


Imagen 02. Elaboración propia.

La válvula de control V_e consigue que el caudal de entrada de fluido en el depósito sea igual al flujo de salida, a base de mantener el nivel constante en el depósito. Regulando la posición del tornillo T , ajustamos el nivel deseado.

Si ocurre un aumento del caudal de salida (por abrir V_s), disminuye el nivel del depósito, que es detectado por el flotador, que por medio de una palanca, modifica la posición la válvula V_e , aumentando el caudal de entrada hasta conseguir que sea igual al de salida. Entonces, el flotador estará más bajo que al principio, produciéndose un error permanente.

En estos controladores la señal de accionamiento es proporcional a la señal de error del sistema. Recuerda: La Señal de error es la obtenida en la salida del comparador entre la señal de referencia y la señal realimentada, como vimos en el tema 1.

Es el más sencillo de los distintos tipos de control y consiste en amplificar la señal de error antes de aplicarla a la planta o proceso.

La función de transferencia de este tipo de reguladores es una variable real, denominada **K_p** (constante de proporcionalidad) que determinará el grado de amplificación del elemento de control.

Si **y(t)** es la señal de salida (salida del controlador) y **e(t)** la señal de error (entrada al controlador), en un sistema de control proporcional tendremos:

$$y(t) = K_p \cdot e(t)$$

Que en el dominio de Laplace, será:

$$Y(s) = K_p \cdot E(s)$$

Por lo que su función de transferencia será:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = K_p$$

Donde Y(s) es la salida del regulador o controlador, E(s) la señal de error y K_p la ganancia del bloque de control.

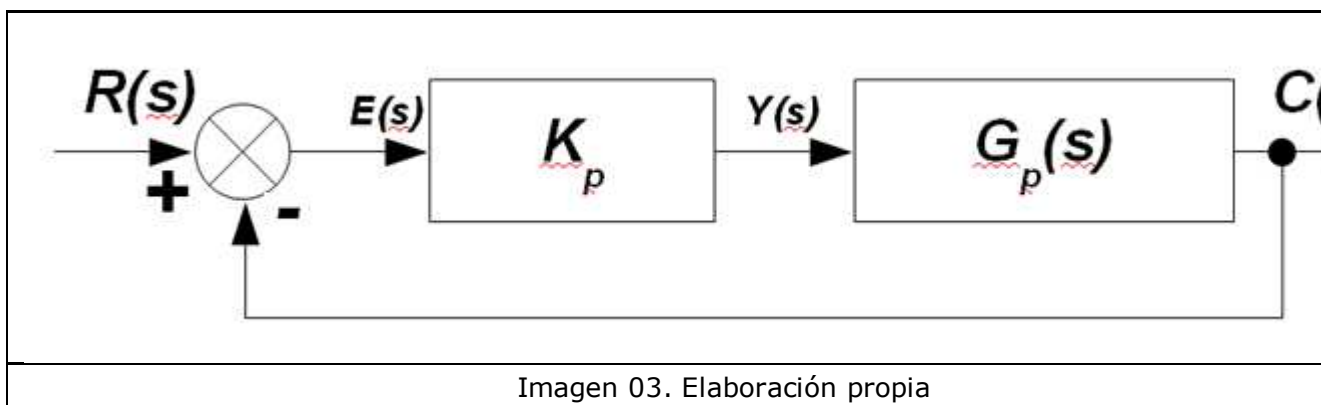


Imagen 03. Elaboración propia

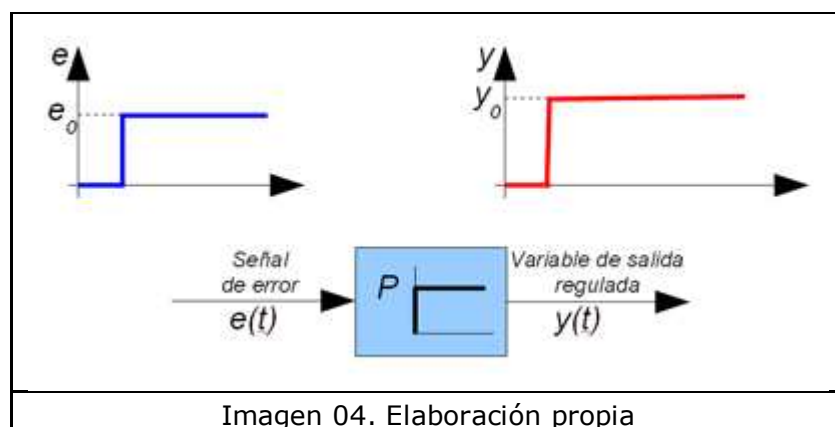


Imagen 04. Elaboración propia

Teóricamente, en este tipo de controlador, si la señal de error es cero, también lo será la salida del controlador. La respuesta, en teoría es instantánea, con lo cual el tiempo no intervendría en el control. En la práctica, no ocurre esto, si la variación de la señal de entrada es muy rápida, el controlador no puede seguir dicha variación y presentará una trayectoria exponencial hasta alcanzar la salida deseada.

1.2. Controlador de acción Integral (I)



En estos reguladores el valor de la acción de control es proporcional a la integral de la señal de error, por lo que en este tipo de control la acción varía en función de la desviación de la salida y del tiempo en el que se mantiene esta desviación.

Si consideramos que:

- $y(t)$ = Salida integral
- $e(t)$ = Error (diferencia entre el valor medido medición y el punto de consigna PC)
- T_i = Tiempo integral

La salida de este regulador es:

$$y(t) = \frac{1}{T_i} \cdot \int e(t) dt$$

Que en el dominio de Laplace, será:

$$Y(s) = \frac{1}{T_i \cdot s} \cdot E(s)$$

Por lo que su función de transferencia será:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = \frac{1}{T_i \cdot s}$$

La respuesta temporal de un regulador integral es:

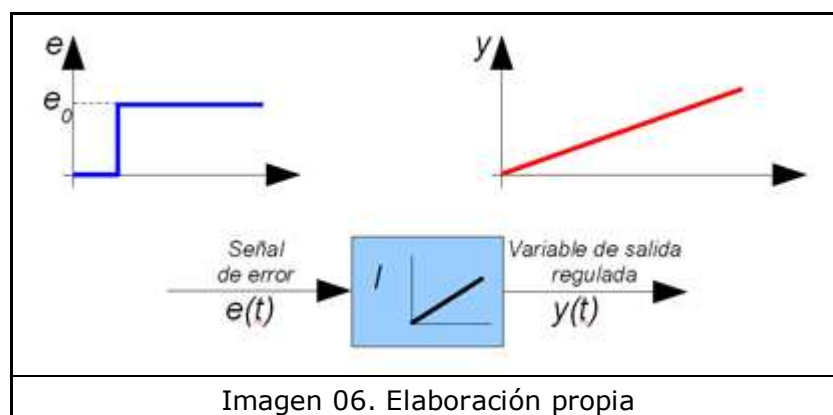


Imagen 06. Elaboración propia

La velocidad de respuesta del sistema de control dependerá del valor de K_i que es la pendiente de la rampa de acción integral.

El inconveniente del controlador integral es que la respuesta inicial es muy lenta, y, el controlador no empieza a ser efectivo hasta haber transcurrido un cierto tiempo. En cambio anula el error remanente que presenta el controlador proporcional.

1.3. Controlador de acción proporcional e integral (PI)



En realidad no existen controladores que actúen únicamente con acción integral, siempre actúan en combinación con reguladores de una acción proporcional, complementándose los dos tipos de reguladores, primero entra en acción el regulador proporcional (instantáneamente) mientras que el integral actúa durante un intervalo de tiempo. (T_i = tiempo integral)

La Función de transferencia del bloque de control PI responde a la ecuación:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = K_P \cdot \left(\frac{1}{T_i \cdot s} + 1 \right)$$

Donde K_p y T_i son parámetros que se pueden modificar según las necesidades del sistema. Si T_i es grande la pendiente de la rampa, correspondiente al efecto integral será pequeña y, su efecto será atenuado, y viceversa.

Respuesta temporal de un regulador PI.

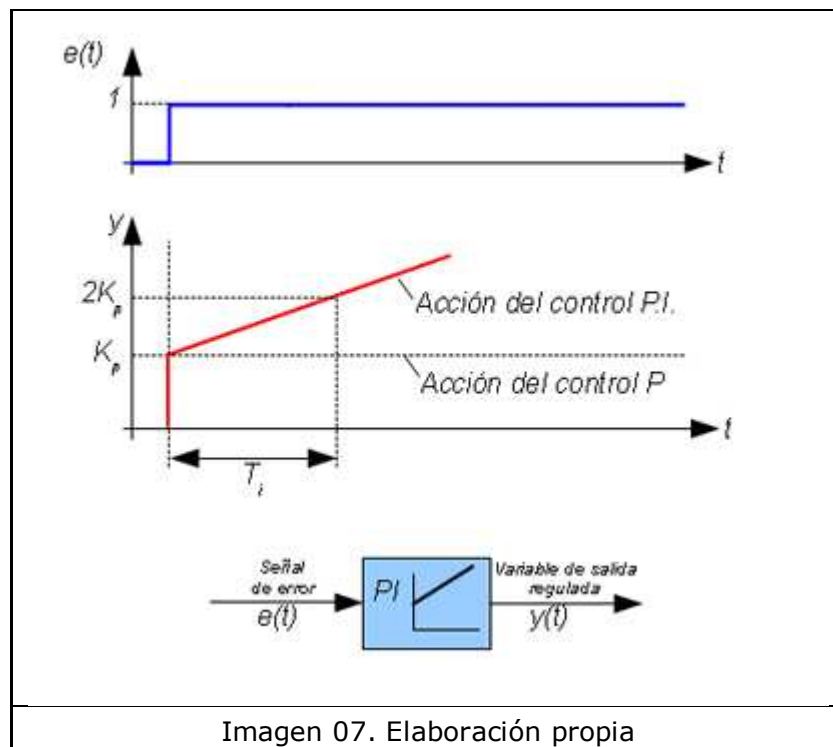


Imagen 07. Elaboración propia

Por lo tanto la respuesta de un regulador PI será la suma de las respuestas debidas a un control proporcional P, que será instantánea a detección de la señal de error, y con un cierto retardo entrará en acción el control integral I, que será el encargado de anular totalmente la señal de error.



Ejercicio resuelto

De nuevo, en vez de un ejercicio, un **Ejemplo de control del nivel de un depósito con un regulador integral**.

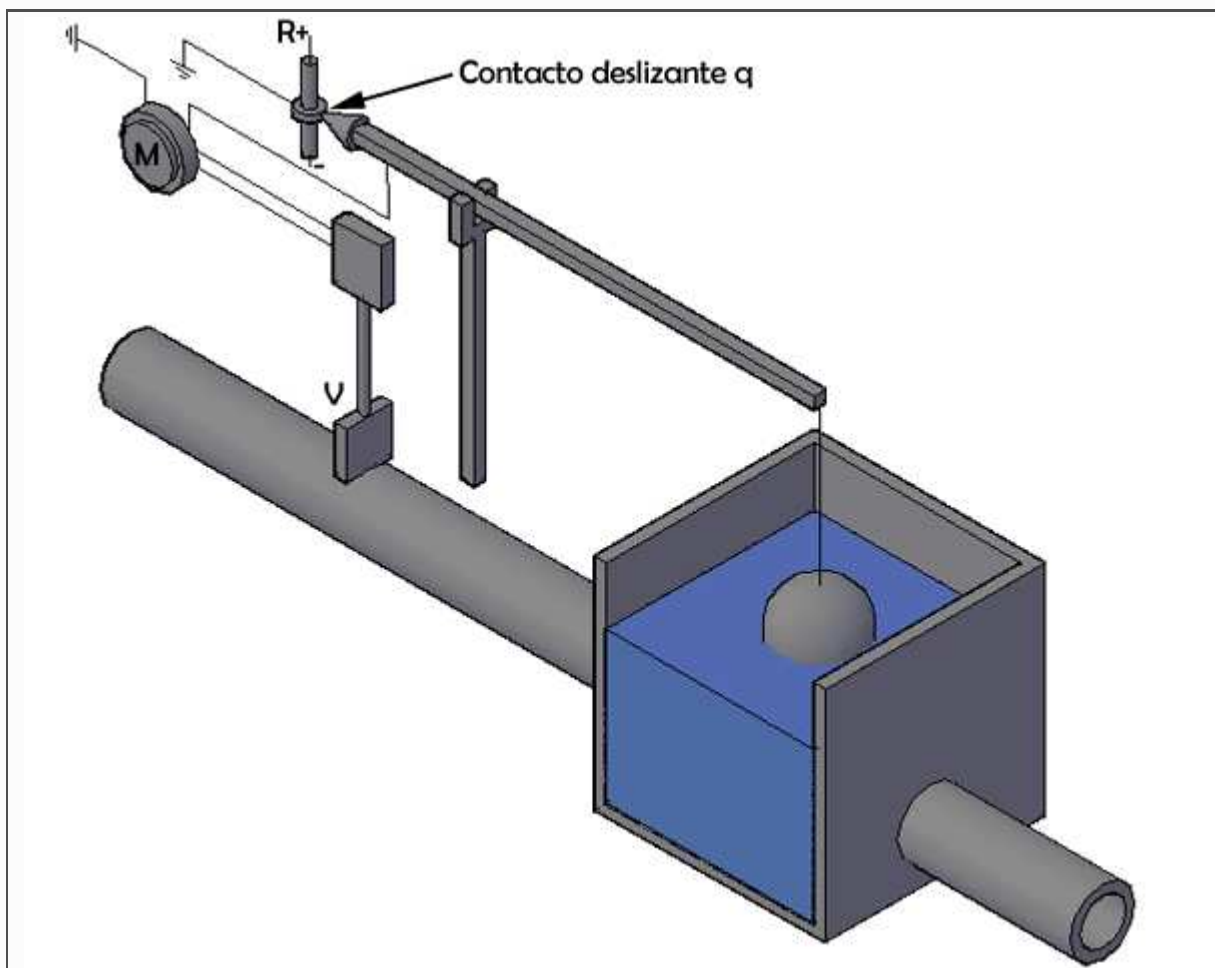


Imagen 08. elaboración propia

Ahora la válvula de regulación **V**, está gobernada con un motor de c.c. (**M**) que gira según la tensión aplicada, en función de la posición de un contacto deslizante **q** que hace variar la tensión aplicada al motor de c.c., lo que determina apertura o cierre de la válvula **V** según la variación del flotador y durante el tiempo que exista la variación.

Si descendiera el nivel debido a un incremento de consumo, el contacto **q** se desliza sobre el reostato **R**, aumentando la tensión que alimenta al motor lo que provoca una apertura de la válvula, que continuará mientras el nivel no alcance el nivel prefijado y la tensión de alimentación del motor vuelva a anularse.

1.4. Controlador de acción proporcional y derivativa (PD)



El controlador derivativo se opone a desviaciones de la señal de entrada, con una respuesta que es proporcional a la rapidez con que se producen éstas.

Si consideramos que:

- $y(t)$ = Salida diferencial.
- $e(t)$ = Error (diferencia entre medición y punto de consigna [PC]. El PC no es otra cosa que el nivel deseado al que queremos que vuelva el sistema)
- T_d = Tiempo diferencial, se usa para dar mayor o menor trascendencia a la acción derivativa.

La salida de este regulador es:

$$y(t) = t_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$

Que en el dominio de Laplace, será:

$$Y(s) = T_d \cdot s \cdot E(s)$$

Por lo que su función de transferencia será:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = T_d \cdot s$$

Si la variable de entrada es constante, no da lugar a respuesta del regulador diferencial, cuando las modificaciones de la entrada son instantáneas, la velocidad de variación será muy elevada, por lo que la respuesta del regulador diferencial será muy brusca, lo que haría desaconsejable su empleo.

El regulador diferencial tampoco actúa exclusivamente (por eso no lo hemos vuleto a explicar separadamente como si hemos hecho con el integral -aunque el integral puro tampoco existe-), si no que siempre lleva asociada la actuación de un regulador proporcional (y por eso hablamos de regulador PD), la salida del bloque de control responde a la siguiente ecuación:

$$y(t) = K_P \cdot t_d \cdot \frac{de(t)}{dt} + K_P \cdot e(t)$$

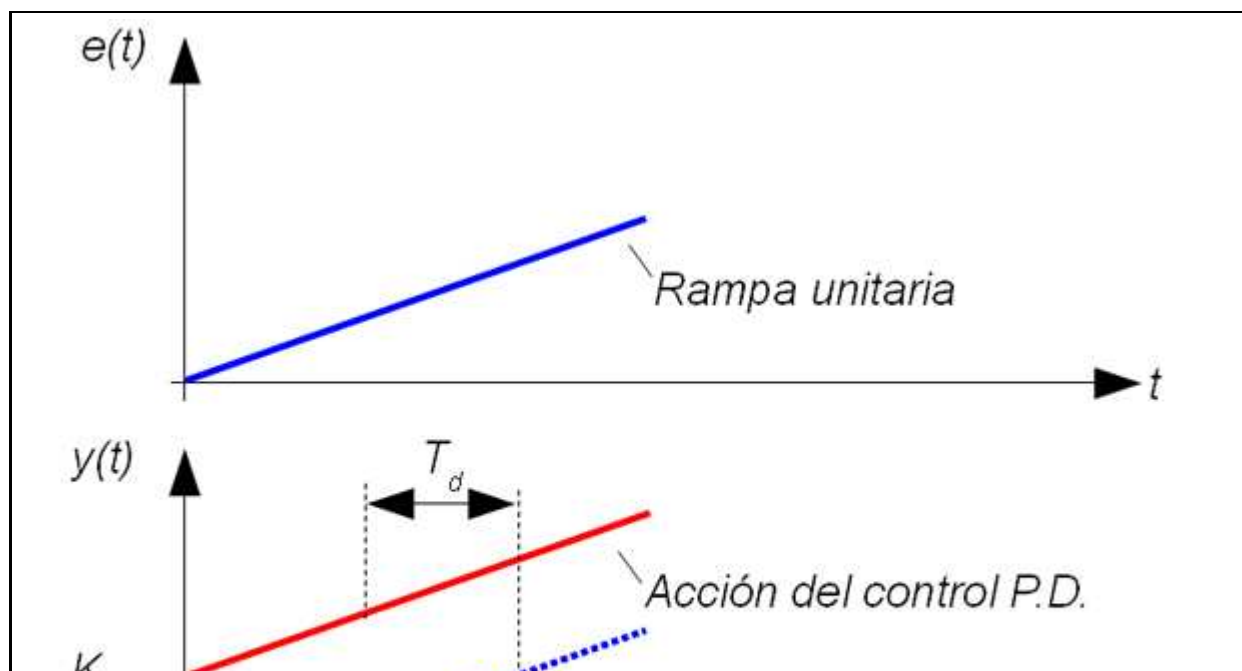
K_P y T_d son parámetros ajustables del sistema. A T_d es llamado tiempo derivativo y es una medida de la rapidez con que un controlador PD compensa un cambio en la variable regulada, comparado con un controlador P puro.

Que en el dominio de Laplace, será:

$$Y(s) = K_P \cdot T_d \cdot s \cdot E(s) + K_P \cdot E(s)$$

Y por tanto la función de transferencia del bloque de control PD será:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = K_P \cdot (T_d \cdot s + 1)$$



1.5. Controlador de acción proporcional, integral y derivativa (PID)



Es un sistema de regulación que trata de aprovechar las ventajas de cada uno de los controladores de acciones básicas, de manera, que si la señal de error varía lentamente en el tiempo, predomina la acción proporcional e integral y, mientras que si la señal de error varía rápidamente, predomina la acción derivativa. Tiene la ventaja de ofrecer una respuesta muy rápida y una compensación de la señal de error inmediata en el caso de perturbaciones. Presenta el inconveniente de que este sistema es muy propenso a oscilar y los ajustes de los parámetros son mucho más difíciles de realizar.

La salida del regulador viene dada por la siguiente ecuación:

$$y(t) = K_P \cdot e(t) + K_P \cdot t_d \cdot \frac{de(t)}{dt} + K_P \cdot \frac{1}{t_i} \cdot \int e(t) dt$$

Que en el dominio de Laplace, será:

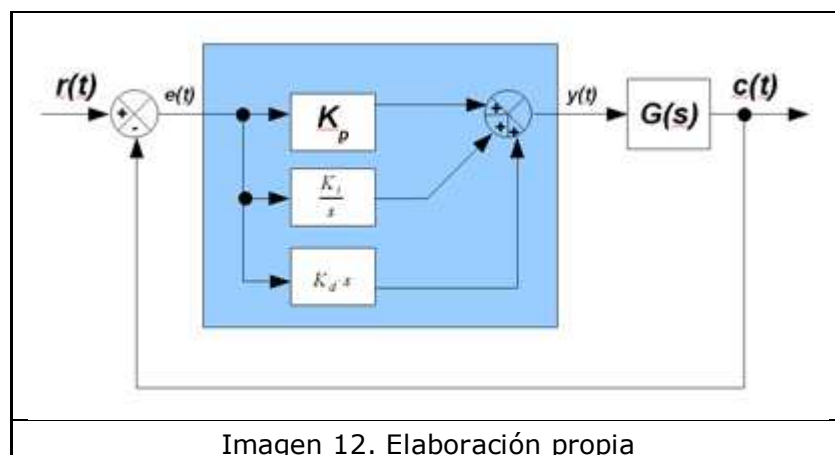
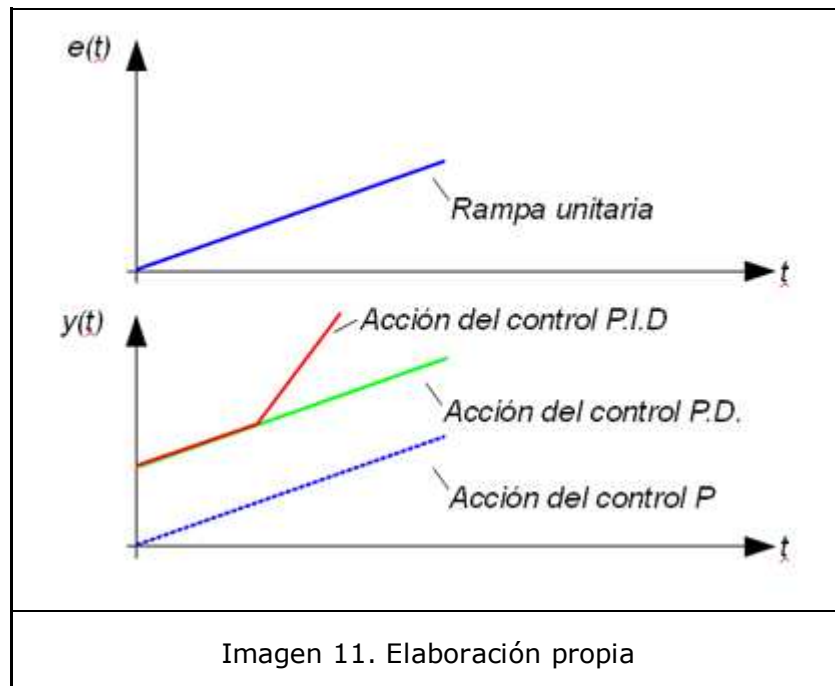
$$Y(s) = K_p \cdot E(s) + K_p \cdot T_d \cdot s \cdot E(s) + K_p \cdot \frac{1}{T_i \cdot s} \cdot E(s)$$

Y por tanto la función de transferencia del bloque de control PID será:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{E(s)} = K_P \left(a + T_d \cdot s + \frac{1}{T_i \cdot s} \right)$$

Donde K_p , T_i y T_d son parámetros ajustables del sistema

La respuesta temporal de un regulador PID sería la mostrada en la figura siguiente:

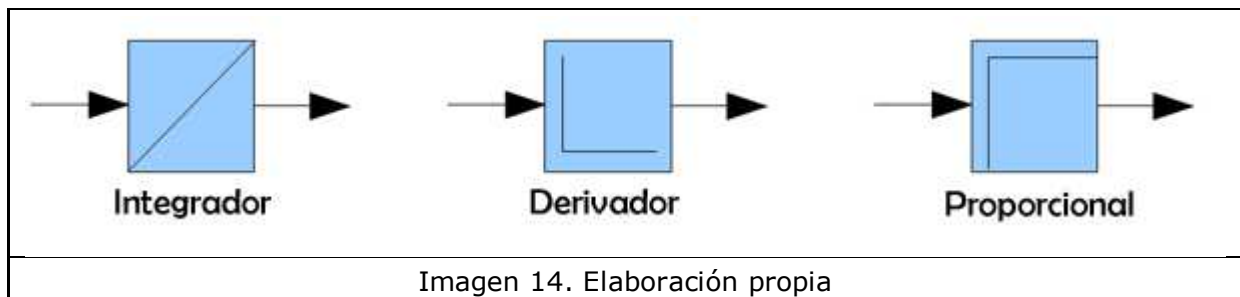


Un ejemplo: Un sistema de control PID, sería la conducción de un automóvil.

Cuando el cerebro (controlador) da una orden de cambio de dirección o velocidad a las manos y/o los pies (actuadores), si la maniobra corresponde con una situación normal de conducción, el control predominante del sistema es el proporcional, que modificará la dirección hasta la deseada con más o menos precisión. Una vez que la dirección esté próxima al valor deseado, entra en acción el control integral que reducirá el posible error debido al control proporcional, hasta posicionar el volante en el punto preciso. Si la maniobra se efectúa lentamente, la acción del control diferencial no tendrá apenas efecto. Si por el contrario es preciso que la maniobra se realice rápidamente, entonces, el control derivativo adquirirá mayor importancia, aumentando la velocidad de respuesta inicial del sistema, para a posteriori entrar en acción el control proporcional y finalmente el integral. Si fuese necesaria una respuesta muy rápida, entonces prácticamente solo intervendría el sistema de control derivativo, quedando casi anulados los efectos de un control proporcional e integral, con ello se consigue una gran inmediatez en la respuesta, aunque como se prima la velocidad de respuesta es a costa de que se pierda precisión en la maniobra.

Símbolos empleados para identificar los tres tipos de controles.

Símbolos empleados para identificar los tres tipos de controles.



2. Controlador analógico, digital, híbrido, el ordenador como elemento de control



El tipo de control puede ser de tres tipos: analógico, digital e híbrido

en función del tipo de la señal que use el detector de error, en caso de ser un sistema en bucle cerrado, o en el regulador en caso de ser un sistema en bucle abierto. Vamos a ver cada uno:

- **Controles o computadores analógicos:** Las variables están representadas por ecuaciones con cantidades físicas continuas. El proceso directo de la señal analógica está ligado al uso de amplificadores operacionales y sus propiedades.
- **Controladores o computadores digitales:** Funcionan con variables discontinuas codificadas, son utilizados generalmente para la resolución de problemas referidos al funcionamiento óptimo global de una planta industrial, la toma de decisiones es una función inherente a los controladores digitales.
- **Controladores o computadores analógico-digitales:** Son los denominados controladores híbridos, los controles de funcionamiento más sofisticados suelen ser de este tipo, ya que es probable que tengan que procesar diversas señales de ambos tipos.

Las ventajas más significativas de los controladores digitales ante a los analógicos son:

Los controladores digitales pueden realizar cálculos muy complejos a una velocidad muy alta y con el grado de exactitud que se necesite, con un coste relativamente reducido, mientras que en los analógicos el coste aumenta rápidamente ante la complejidad de los cálculos si se requiere una elevada exactitud y no es posible alcanzar la misma velocidad de resolución.

Los controladores digitales son mucho más versátiles, simplemente cambiando el programa de aplicación, se pueden modificar absolutamente las operaciones a realizar.

En la actualidad la función de controlador dentro de un sistema de control suele desempeñarla un ordenador, porque presenta una serie de ventajas como son:

- Potencialidad: Realización de acciones de control de elevada complejidad.
- Control multivariable: Es capaz de controlar simultáneamente varios procesos o varias variables de un mismo proceso.
- Flexibilidad: Fácil cambio de estrategias de control, modificando o sustituyendo el programa.
- Precisión: Es capaz de presentar un margen de precisión tan fino como se necesite.
- Inmunidad: Al actuar con señales digitales, éstas son inmunes al ruido y a las distorsiones, pudiendo regenerarse en caso de ser necesario.
- Versatilidad: Además de la propia función de control puede desempeñar otras simultáneamente, estadísticas, informes, emisión de alarmas,...

Tiene no obstante un grave inconveniente y es que un fallo en el sistema paraliza todo el proceso, así como el que para controlar sistemas sencillos se necesita elementos de software y hardware sofisticados.

Otra desventaja significativa, es que a día de hoy el precio de este tipo de controladores es bastante superior a los controladores continuos, aunque el precio se reduce día a día de forma exponencial.

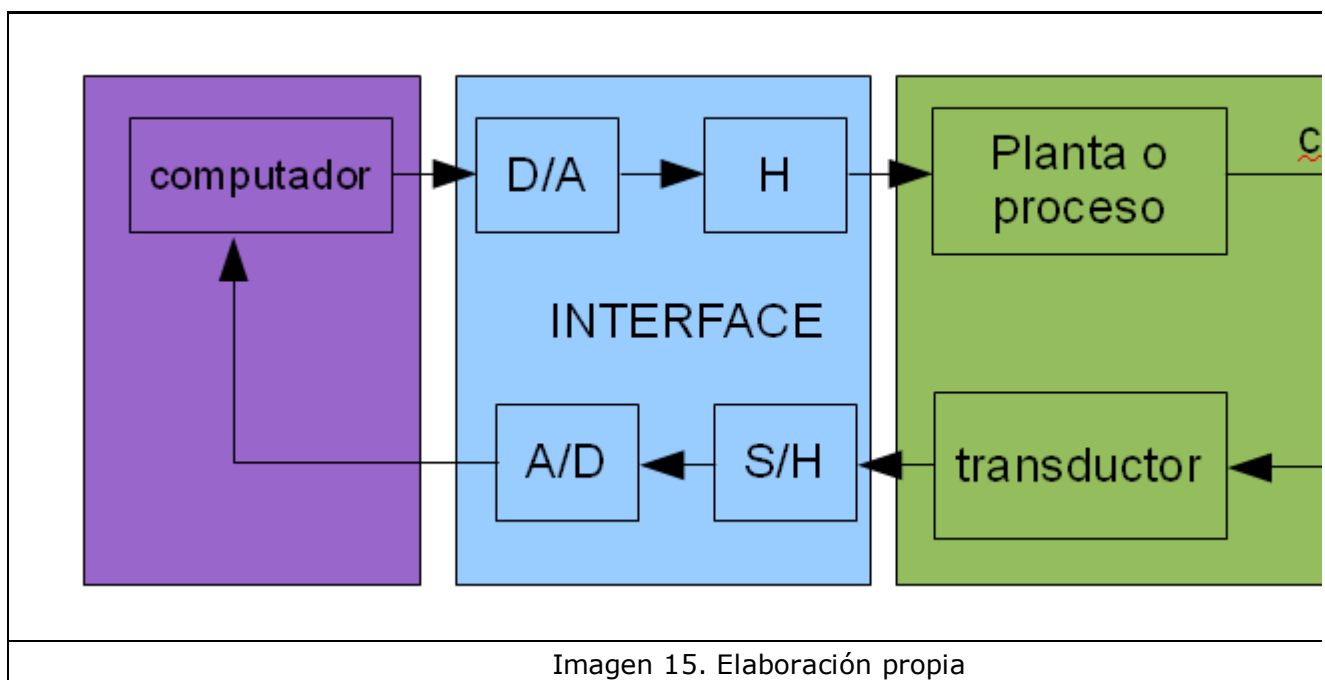


Imagen 15. Elaboración propia

En el esquema se puede observar el principio de funcionamiento de un control digital directo, en el la señal controlada es captada por un transductor, posteriormente se adecúa (S/H) y se convierte de analógica en digital (en el A/D), ya que el computador trabaja con este tipo de señales. Una vez procesada la señal por el computador se vuelve a transformar de digital en analógica (en el D/A), se amplifica (en el H), si fuese necesario y se ataca con ella a la planta o proceso a controlar, para tratar de conseguir que la señal de salida adquiriera el valor deseado.