CONTROL INDUSTRIAL

INTRODUCCIÓN

Cada día es mas frecuente el uso de dispositivos, circuitos, equipos y métodos electrónicos en la industria; con lo cual se ha conseguido automatizar muchos procesos, disponer de dispositivos de seguridad mas efectivos, y medir y controlar variables con suma exactitud, tales como la temperatura, le presión, la velocidad, etc.

Esto ha permitido la implantación de estrategias de control y supervisión de operaciones industriales mas eficientes, confiables y precisas, de las cuales se obtienen por ejemplo los siguientes beneficios:

- Se minimiza la probabilidad de error, ya que el operario no debe intervenir físicamente en labores monótonas o peligrosas, con lo cual, su función se limitará a la supervisión de vigilancia del proceso bien sea desde una sala de control en la propia planta o desde centros de control remotos e incluso a través de Internet.
- Se reducen significativamente los costos y se mejora la calidad, ya que se pueden fabricar dispositivos de casi cualquier complejidad, muy uniformes y con muy pequeñas variaciones de sus características entre ellos, cosas que obtener mediante un control manual es sumamente complicado de lograr.
- Se pueden ejecutar tareas que están fuera del alcance físico humano, como por ejemplo medir y controlar con precisión grandes fuerzas, presiones y temperaturas, o bien manipular objetos muy pesados o muy pequeños.

Todos estos beneficios, entre otros tantos, son posibles gracias a que los sistemas de control han sido diseñados para realizar tareas conservando los parámetros de un proceso dado, dentro de unos limites o tolerancias específicas con un mínimo de intervención humana.

Tipos de Sistemas de control industrial

Un sistema es simplemente una combinación de elementos relacionados entre si, necesarios para realizar una o varias funciones que ninguno podría hacer por si mismo. Este concepto no es exclusivo de los sistemas físicos como los de la industria, ya que se aplica también a cualquier sistema abstracto y dinámico, tales como sistemas biológicos, químicos, económicos, etc.

En el caso de un sistema de control, la función del mismo es mantener cualquier variable de interés, dentro de unos límites

determinados, o alterarla de cierta manera deseada. Los sistemas de control pueden ser de *lazo cerrado* o de *lazo abierto*, dependiendo de si la variable controlada tiene o no efecto sobre la variable manipulada.

Los sistemas de control industrial, tanto de lazo cerrado como de lazo abierto, están enfocados principalmente al control de procesos., los cuales están caracterizados por una serie de pasos o cambios graduales que se suceden uno a continuación del otro, de manera relativamente fija y que conducen al objetivo buscado.

Los procesos industriales son muy variados, dependiendo del tipo de producto que se quiere obtener al final, pero siempre en todos los casos, la función del sistema de control es permitir el mantenimiento y regulación de la variable controlada (temperatura, presión, caudal, velocidad, etc.) de una manera mas eficiente, rápida y confiable de cómo lo haría un operario.

Los sistemas de control pueden ser a su vez, continuos o discretos.

— **Discretos**: En un proceso discreto, sobre el producto que está siendo fabricado se ejecuta una secuencia de operaciones precisas. Este tipo de proceso son típicos de productos hechos de mezclas de ingredientes, incluyendo alimentos, petróleos, jabones, medicamentos, etc.

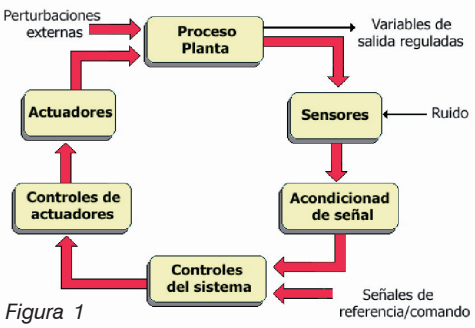
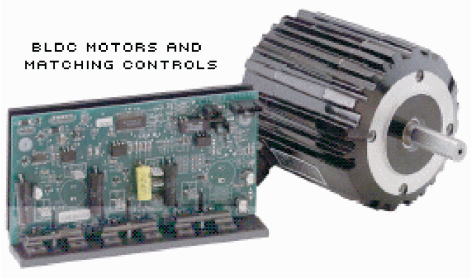


Figura 1

— **Continuos**: Permanentemente están entrando y saliendo materias primas de cada etapa y realizándose una o más operaciones de medida que pasa el producto. Ejemplos típicos de este tipo de proceso, son los textiles, las bolsas plásticas, el papel, etc.

Elementos generales de los sistemas de control

Los elementos generales que conforman los sistemas de control son, el controlador del sistema, los actuadores, los controles del actuador, los sensores y las interfaces de señal, figura 1.



El **controlador** del sistema proporciona la "inteligencia" para el sistema de control. Su función primara es actuar como e, administrador de tiempos y de tráfico de señales del sistema, de modo que todas las funciones ocurran en el orden y el instante correctos. Este controlador puede ser un ordenados, un sistema microprocesado, un PLC, un conjunto de relés, etc.

Los **actuadores** o transductores de salida se comportan como los músculos del sistema de control, convirtiendo la potencia eléctrica aplicada a ellos en alguna forma de acción física. Algunos ejemplos de actuadores son los motores, los solenoides, las válvulas, etc.

Los **controles de los actuadores**, como su nombre lo indica, controlan individualmente la velocidad de motores, la apertura o cierre de válvulas, la energización o desenergización de solenoides, etc.

Los **sensores** o **transductores** de entrada actúan como los sentidos del sistema de control, convirtiendo los parámetros a ser medidos, controlados o supervisados, en señales eléctricas equivalentes que pueden ser interpretadas por el controlador.

La salida de un sensor causa que el controlador active alguna forma de actuador para comenzar, terminar, regular o interrumpir un proceso.

Los sensores, actuadores y controladores, operan todos sobre una gran va-

riedad de niveles y tipos de señales, a menudo incompatibles; por tanto deben emplearse interfaces o circuitos de acondicionamiento adecuados para convertir señales de un tipo a otro, llevar o transmitir señales de un sitio a otro, aislar etapas entre si, etc.

Sistemas de control de lazo abierto y lazo cerrado.

Como dijimos anteriormente, los sistemas de control pueden ser clasificados como sistemas de lazo abierto o manuales, o de lazo cerrado o automáticos.

Un sistema de control es de **lazo abierto** cuando la variable de salida no afecta la acción de control. En otras palabras, no se sensa la salida (variable controlada) ni se realimenta para compararla con la entrada (señal de referencia o set point). Por tanto, no utiliza sensores y a cada entrada de referencia le corresponde una condición operativa fija. Como resultado de esto, la precisión del sistema depende de la calibración del mismo. Este tipo de sistemas se utilizan en aplicaciones relativamente sencillas, donde no se requiere mucha exactitud.

Un sistema es de lazo cerrado cuando utiliza elementos adicionales para medir o sensar la variable de salida, realimentarla procesada a la entrada, compararla con la señal de referencia y utilizar la diferencia (señal de error) para obtener la respuesta de salida deseada. Por tanto, mantiene una relación preestablecida entre la entrada y la salida, de modo que es capaz de autocorregirse en caso de una perturbación externa.

La señal de *realimentación* o *feedback* es producida a partir de un sensor que mide la variable de salida y la convierte en una señal adecuada para ser procesada por el controlador del sistema y comparada con la señal de referencia. El sistema de la figura 1, es de este tipo. Los sistemas de lazo cerrado se denominan también realimentados o automáticos y son más utilizados en control industrial.

La realimentación puede ser positiva o negativa, dependiendo de si la señal de realimentación tiene o no la misma polaridad de la señal de comando, es decir si las dos señales se suman o restan para producir la señal de error.

La realimentación negativa, llamada también **feedback degenerativo**, es la más utilizada en sistemas de control industriales debido a su capacidad de autocorregirse continuamente y su habilidad para seguir la señal de referencia de una manera confiable, su capacidad de reaccionar ante cambios o perturbaciones súbitas, y otros efectos benéficos importantes.

La realimentación positiva, por su parte, denominada también feedback regenerativo, es rara vez utilizada en control industrial debido a que puede causar inestabilidad, es decir la pérdida del control de la variable de salida por parte de la señal de entrada.

Una variante de los sistemas realimentados o de lazo cerrado, son los sistemas de control **feedforward** o **anticipativos**, en los cuales, como su nombre lo indica, previenen cualquier error antes de que este ocurra. Sin embargo, este tipo de sistemas tienen algunas limitaciones que los hacen inherentemente inexactos; ya que por ejemplo, pueden existir perturbaciones no medibles difíciles de detectar, como por ejemplo un sensor defectuoso, o la simple exactitud del calculo. Además, muchos procesos tienen tiempos de respuesta muy largos; por estas razones, el control feedforward es rara vez utilizado como tal en sistemas de control industriales. En su lugar se emplea combinado con control realimetado convencional. Así se consigue una mejor compensación de las perturbaciones grandes y los tiempos de respuesta prolongados.

ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL

El primer y mas importante proceso en el análisis y diseño de un sistema de control automático es desarrollar alguna forma de *modelo* matemático idealizado que describa, de la manera más aproximada a la realidad, el comportamiento de la planta y permita predecirlo sin necesidad de disponer del sistema físico como tal.

De todas maneras, debemos tener en cuenta, que un modelo, no es mas que una idealización de la realidad, con lo cual, este es inherentemente inexacto, puesto que se deben hacer varias suposiciones para simplificarlo. Por esta razón, un sistema de control basado en un modelo debe ser diseñado de modo que tenga en cuenta todos los factores críticos necesarios para garantizar el buen desempeño de la planta y sea capaz de acomodarse los factores o perturbaciones no considerados o ignorados deliberadamente en su concepción original.

DEFINICIÓN DE SISTEMAS FÍSICOS

De acuerdo al comportamiento del sistema y a la forma del modelo matemático que lo describe, podemos definir nuestro sistema de algunas de las siguientes formas:

- ***Sistema dinámico***:

Su comportamiento solo puede ser descrito mediante ecuaciones diferenciales. Su contraparte son los **sistemas estáticos**, los cuales pueden ser representados mediante ecuaciones algebraicas.

- ***Sistema Lineal***:

Sistema que puede ser representado mediante ecuaciones lineales. La mayoría de los sistemas del mundo real, son sin embargo **no lineales**, pero se aproximan a sistemas lineales dentro del rango de interés para simplificar su análisis.

- ***Sistema de parámetros concentrados***

Sistema que puede ser representado mediante ecuaciones diferenciales o de diferencia ordinarias. Muchos sistemas sin embargo, son de **parámetros distribuidos**, es decir, su comportamiento depende tanto del tiempo como del espacio y deben ser descritos mediante ecuaciones diferenciales parciales.

- ***Sistema determinístico***

Son sistemas cuyas entradas y parámetros se conocen exactamente, es decir no son aleatorios. Su contraparte son los sistemas **estocásticos**, en los cuales, por lo menos una entrada o parámetro es afectado por perturbaciones no predecibles.

- ***Sistema de tiempo continuo***

Son aquellos sistemas que pueden ser representados mediante ecuaciones diferenciales. La mayoría de los sistemas físicos son de este tipo Su contraparte, son los sistemas de **tiempo discreto** o **muestreados**, los cuales se representan mediante ecuaciones de diferencia. Es muy frecuente, que sistemas lineales sean discretizados, para poderlos controlar o diseñar utilizando un ordenador.

- ***Sistema invariante en el tiempo***

Sistema cuyos parámetros no varían con el tiempo. Su contraparte son los sistemas **variantes en le tiempo.**

DISEÑO DEL CONTROLADOR.

Una vez ha sido desarrollado y verificado el modelo de la planta, el siguiente paso es diseñar el sistema d control de la misma. Las opciones disponibles son muy variadas, dependiendo de los objetivos buscados, por ejemplo estabilidad, velocidad de respuesta, reducción de consumo de energía, etc. Un primer enfoque es recurrir a técnicas de control clásico, basadas en el análisis de el domino de la frecuencia, las cuales hacen uso extensivo de la *transformada de Laplace* para sistemas continuos y de la *transformada z* para los sistemas discretos.

Estas técnicas clásicas son adecuadas para sistemas con una entrada y una salida, sin embargo, pierden su solidez ante sistemas de control con muchas entradas y salidas.

Cuando este es el caso, deben recurrirse a técnicas de control moderno, basadas en el análisis en el dominio del tiempo., las cuales hacen uso extensivo de los conceptos de variables de estado, vector de estado, y espacio de estados.

Un nivel de sofisticación más avanzado se consigue empleando técnicas de control inteligente, los cuales son capaces potencialmente de proporcionar un nivel de robustez muy elevado, no obtenible con

Controller Gain (Kc)	Proportional Band (PB) %
0.1	1000
0.2	500
0.5	200
1	100
2	50
5	20
10	10

$$PB = \frac{100\%}{K_c}$$

Table 1. Relationship between Kc and PB

otras técnicas de control. Estas técnicas están basadas principalmente en el uso de redes neuronales artificiales y fuzzy logic (lógica difusa), e inspirada en modelos biológicos de aprendizaje e inteligencia.

Naturalmente, existen otros enfoques al diseño de sistemas de control, los cuales incluyen técnicas como el control predictivo, el control de estructuras variables y el control secuencial, etc.

EL CONTROLADOR PID

El controlador PID, llamado así, por las funciones que realiza (acciones de control Proporcionales, Integrales y Derivativas) es usado ampliamente en la mayoría de los procesos de control automáticos en la industria de hoy. Los controladores PID son confiables para el control de flujo, presión, nivel y otra gran cantidad da variables de procesos industriales.

Control Manual

Sin controladores automáticos, todas las tareas de control deben ser hechas manualmente. Por ejemplo: Para mantener constante la temperatura del agua descargada de un calentador industrial de gas, un operario deberá estar pendiente del indicador de temperatura y ajustar la válvula de control de gas consecuentemente. Si la temperatura del agua empieza a elevarse, el operario deberá cerrar un poco la válvula, solo lo suficiente para lograr que el agua vuelva a la temperatura deseada; de igual manera, si la temperatura del agua desciende, el operario deberá abrir la válvula de gas de modo que aumente la temperatura solo lo necesario para que el agua regrese al valor de temperatura seleccionado.

Control Automático

Para liberarnos del tedioso trabajo del operario del anterior proceso de control, podemos automatizar este, instalando por ejemplo un controlador PID. Este controlador tiene un punto de referencia o Set point, el cual el operario selecciona según la temperatura deseada. También tendremos que automatizar la válvula de control instalando un actuador (o quizás un posicionador) de modo que la salida del controlador pueda cambiar la posición de la válvula. Y para terminar, debemos proporcionarle al controlador una indicación de la temperatura o variable del proceso, instalando un transmisor de temperatura.

Así, cuando ya tenemos todo montado y trabajando, nuestro controlador PID compara la variable del proceso con su punto de referencia y calcula la diferencia entre las señales, entregándonos la señal de error.

Basándose en este error, debido a su estructura interna, el controlador proporciona la medida de control necesaria, que posiciona la válvula de control de modo que la temperatura se mantenga siempre los mas cercana posible a su punto de referencia.

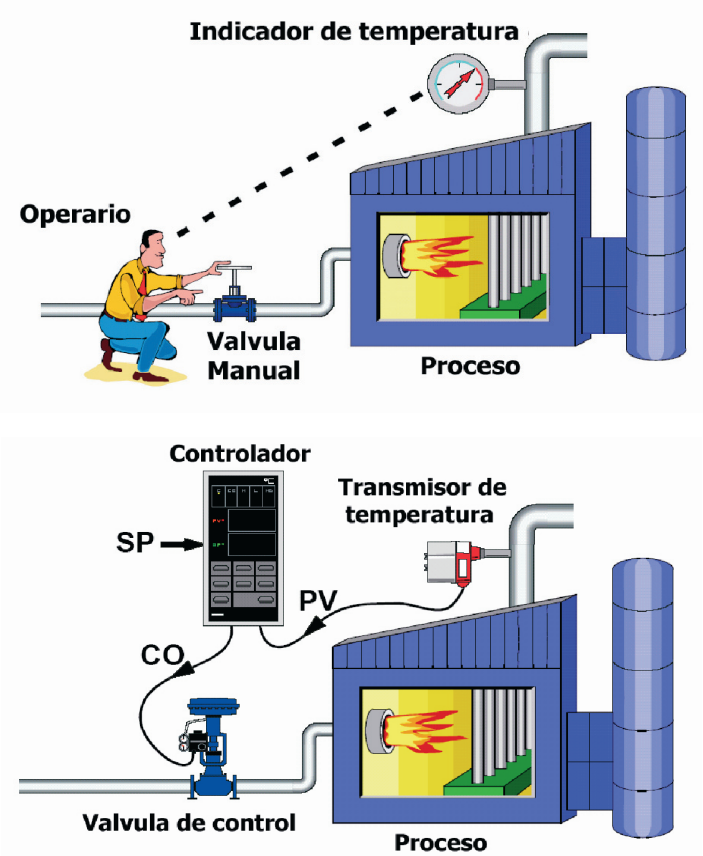


Figura 2.

Modelos de control P, I y D.

Como vimos anteriormente, el controlador PID, tiene tres modos de control combinados en uno solo; P, I y D. Cada uno de estos modos reacciona de una manera diferente al error y también el grado de acción de control de cada uno de ellos se ajusta por separado.

Control proporcional (P)

El modo de control proporcional, cambia la salida del controlador en proporción al error. La magnitud de esa proporción se denomina Ganancia del Controlador (Kc), o constante proporcional P, y su comportamiento se pude expresar como:

C(t) = Kp e(t)

Aunque la mayoría de los controladores utilizan la ganancia del controlador (Kc) como parámetro proporcional, algunos otros emplean una Banda Proporcional (PB), la cual se expresa en porcentaje.

La tabla 1 muestra la relación entre Kc y PB.

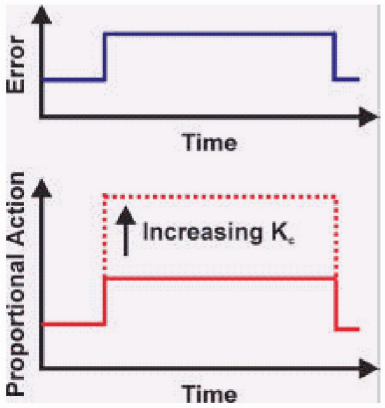
El uso de un controlador únicamente proporcional, tiene un gran inconveniente de *offset* (desvío). Este desvío, es un error continuo, que no puede ser eliminado solo con un control proporcional, veamos por que.

Consideremos por ejemplo, un control de nivel de agua en el tanque de la figura 3, con un control proporcional.

Mientras el flujo de salida del tanque se mantenga constante, el nivel (el cual es nuestra variable del proceso en este caso) se mantendrá en su punto de referencia o SetPoint (SP).

Pero si el operario debe incrementar el flujo de salida del tanque, el nivel de este empezará a descender, debido al desequilibrio entre el flujo de entrada y el de salida.

Mientras el nivel del tanque disminuye, el error aumenta, y nuestro controlador aumenta la salida de control proporcional a este error (figura 4). Consecuentemente, la válvula de entrada se abre, de



Proportional ControlAction

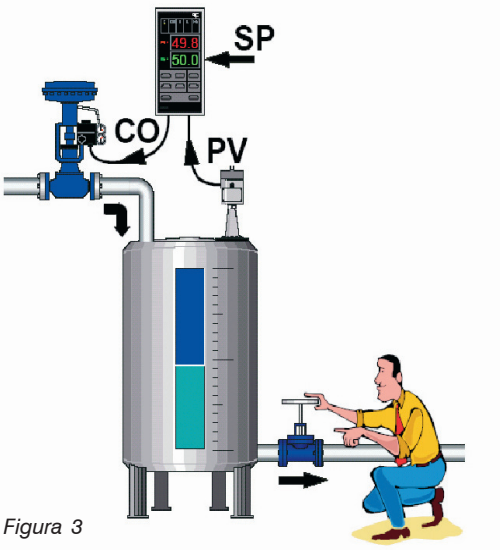


Figura 3

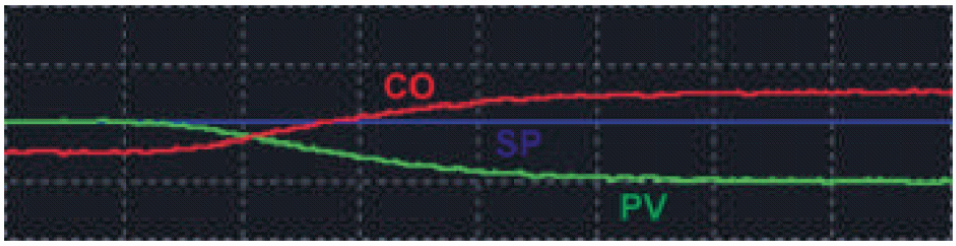
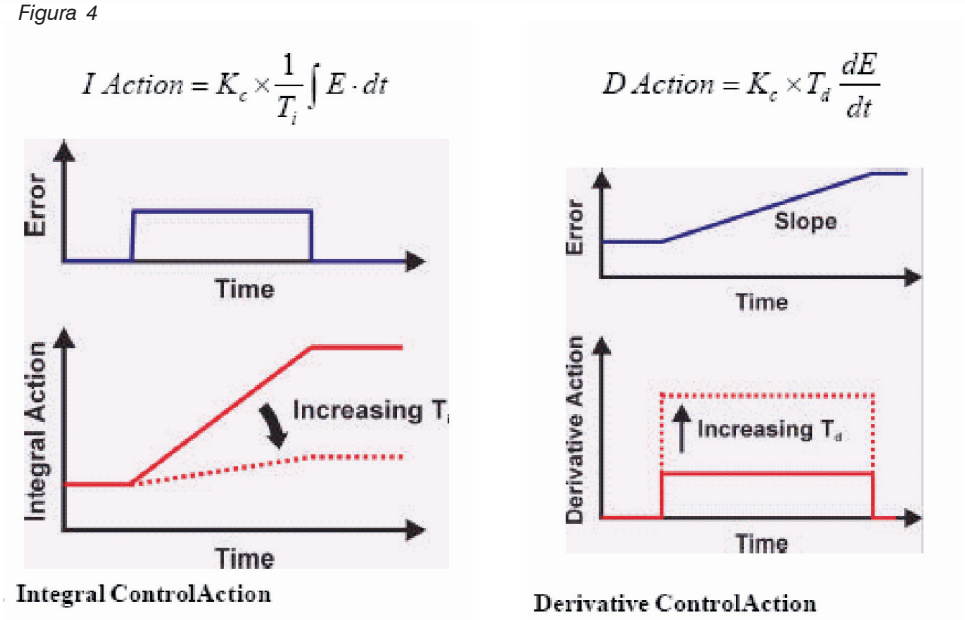


Figura 4



modo que mas flujo de agua entra al tanque.

Como el nivel continua en descenso, la válvula continúa abierta hasta el punto en el que el flujo de entrada alcanza el flujo de salida. En este momento, el nivel del tanque se mantiene constante y así lo hace el error. Entonces, debido a que el error se mantiene constante, nuestro controlador P, mantendrá la salida constante y la válvula de control se mantendrá en esta posición. Como vemos, el sistema mantiene el balance con el nivel del tanque por debajo de su punto de referencia.

A este error residual se le conoce como *offset* (desvío).

Con el controlador P, esta desviación se mantendrá hasta que el operario manualmente altere la salida del controlador para removerla. Para eliminar la necesidad de que sea el operario quien "remueva" esta desviación, podemos entonces agregar una acción de control integral, la cual se encarga automáticamente de removerla.

Control Integral (I)

Como dijimos anteriormente, el uso de un controlador proporcional, siempre deja por corregir un error.

La acción integral permite anular este error, haciendo que la señal de control C(t), crezca proporcionalmente al producto error x tiempo

La acción integral se representa por una rampa, en la cual, la pendiente es determinada por el tamaño del error, la ganancia del controlador y el tiempo integral (Ti), también llamado parámetro I del controlador.

En la figura 5, podemos observar el mismo caso anterior, esta vez controlado por un controlador PI. Alli se observa, como la acción integral eleva los suficientemente lejos la salida del controlador como para traer de nuevo el nivel a su punto de referencia.

Control derivativo (D)

Las acciones de control proporcionales e integrales no permiten resolver completamente todos los el problemas de control. La primera deja un error permanente y la segunda podría causar inestabilidad o exceso de tiempo de respuesta. La acción de control derivativa complementa la labor efectuada por las dos anteriores, ayudando a obtener un menor tiempo de respuesta.

Así pues, el modo de control derivativo produce una salida basado en la velocidad de cambio del error. Este tiene un parámetro ajustable llamado Tiempo derivativo (Td), el cual es el parámetro D del controlador.

El control derivativo aparentemente tiene capacidades predictivas o anticipativas. Técnicamente esto no es verdad, pero si es cierto que un controlador PID proporciona una acción mucho mas temprana que la que podemos obtener con cualquier control P o PI.

Si comparamos las figuras, podemos observar que la inclusión de la acción derivativa, reduce el tiempo que le lleva al nivel volver a su punto de referencia (SP).

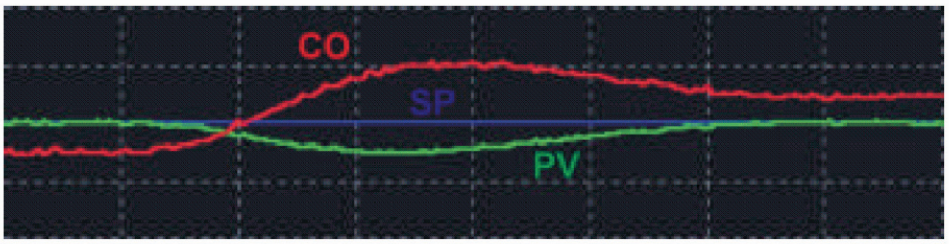


Figura 5

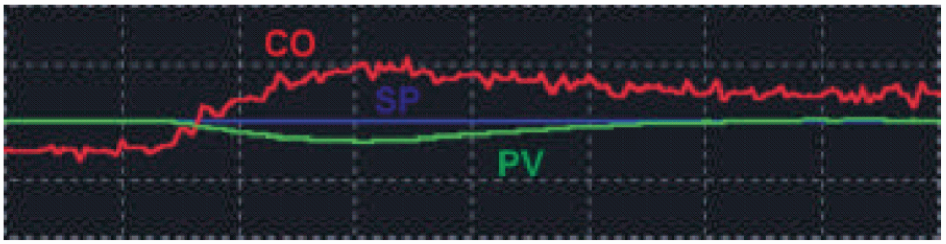


Figura 6