

9.2: CONTROL DE P, I, D, PI, PD Y PID

9.2.1: INTRODUCCIÓN

Los controles de proceso son necesarios para diseñar plantas seguras y productivas. Una variedad de controles de proceso se utilizan para manipular procesos, sin embargo, el más simple y a menudo más efectivo es el **controlador PID**. El controlador intenta corregir el error entre una variable de proceso medida y el punto de ajuste deseado calculando la diferencia y luego realizando una acción correctiva para ajustar el proceso en consecuencia. Un controlador PID controla un proceso a través de tres parámetros: Proporcional (P), Integral (I) y Derivada (D). Estos parámetros se pueden ponderar, o ajustar, para ajustar su efecto en el proceso.

Mucho más práctico que el típico controlador de encendido/apagado, los controladores PID permiten realizar ajustes mucho mejores en el sistema. Si bien esto es cierto, hay algunas ventajas de usar un controlador de encendido/apagado, incluyendo que son (1) relativamente simples de diseñar y ejecutar y (2) los sensores y actuadores binarios (como un controlador de encendido/apagado) son generalmente más confiables y menos costosos.

Aunque hay algunas ventajas, hay grandes desventajas al usar un esquema de controlador de encendido/apagado. Son (1) ineficientes (usar este control es como conducir con gas lleno y descansos completos), (2) pueden generar ruido cuando se busca estabilidad (puede sobrepasar o subsuperar drásticamente un punto de ajuste) y (3) usar físicamente válvulas e interruptores (girando continuamente válvulas/interruptores completamente encendido y apagado por completo causas que se desgasten mucho más rápido).

Para permitir un control mucho mejor y ajustes de ajuste fino, la mayoría de los procesos industriales utilizan un esquema de controlador PID. Esta sección proporcionará una breve introducción sobre los controladores PID así como los métodos para modelar un sistema controlado en Excel.

La **ganancia de proceso** (K) es la relación de cambio de la variable de salida (variable de respuesta) al cambio de la variable de entrada (función de forzamiento). Define específicamente la sensibilidad de la variable de salida a un cambio dado en la variable de entrada.

$$K = \frac{\Delta \text{Output}}{\Delta \text{input}}$$

La ganancia solo puede describirse como un parámetro de estado estacionario y no dar conocimiento sobre la dinámica del proceso y es independiente de las variables de diseño y operación. Una ganancia tiene tres componentes que incluyen el signo, el valor, las unidades. El signo indica cómo responde la salida a la entrada del proceso. Un signo positivo muestra que la variable de salida aumenta con un aumento en la variable de entrada y un signo negativo muestra que la variable de salida disminuye con un aumento en la variable de entrada. Las unidades dependen del proceso considerado que dependen de las variables mencionadas.

Por ejemplo, la presión se incrementó de 21 psi a 29 psi. Este cambio aumentó la posición de la válvula de 30% vp a 22% vp.

$$K = \frac{(29 - 21) \text{ psi}}{(22 - 30) \% \text{vp}} = -1.0 \text{ psi}/(\% \text{vp})$$

Tiempo muerto (t_0) es el entre el cambio en una variable de entrada y cuando comienza la variable de salida. El tiempo muerto es importante porque afecta a la controlabilidad del sistema de control. Un cambio en el punto de ajuste no es inmediato debido a este parámetro. El tiempo muerto debe ser considerado en los procesos de afinación y modelado.

9.2.2: TIPOS DE CONTROL

Los controles de proceso son instrumentos utilizados para controlar un parámetro, como la temperatura, el nivel y la presión. Los controladores PID son un tipo de controlador continuo porque ajustan continuamente la salida frente a un controlador de encendido/apagado, cuando se observan las condiciones de avance o avance hacia atrás. Un ejemplo de un controlador de temperatura se muestra en la Figura 9.2.1.

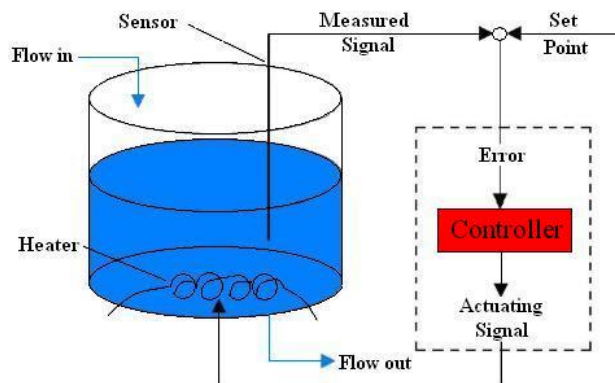


Figura9.2.1: Controlador de temperatura en un CSTR

Como se muestra en la Figura 1, el controlador de temperatura controla la temperatura de un fluido dentro de un CSTR (Reactor de Tanque Agitado Continuo). Un sensor de temperatura primero mide la temperatura del fluido. Esta medición produce una señal de medición. La señal de medición se compara entonces con el punto de ajuste, o ajuste de temperatura deseado, del controlador. La diferencia entre la señal medida y el punto de ajuste es el error. En base a este error, el controlador envía una señal de accionamiento a la bobina de calentamiento, que ajusta la temperatura en consecuencia. Este tipo de control de proceso se conoce como control basado en errores porque la señal de accionamiento se determina a partir del error entre el ajuste real y el deseado. Los diferentes tipos de controles basados en errores varían en la forma matemática en la que traducen el error en una señal de accionamiento, de los cuales los más comunes son los controladores PID. Además, es fundamental comprender el control de retroalimentación y retroalimentación antes de explorar los controles P, I y D. Control de Feed Forward Control

9.2.3: I, D, PI, PD, CONTROL PID

Como se mencionó anteriormente, los controladores varían en la forma en que correlacionan la entrada del controlador (error) con la salida del controlador (señal de accionamiento). Los controladores más utilizados son los controladores **proporcional-integral-derivativo (PID)**. Los controladores PID relacionan el error con la señal de accionamiento ya sea de manera proporcional (P), integral (I) o derivada (D). Los controladores PID también pueden relacionar el error con la señal de accionamiento usando una combinación de estos controles.

9.2.3.1: CONTROL PROPORCIONAL (P)

Un tipo de acción utilizada en los controladores PID es el control proporcional. El control proporcional es una forma de control de retroalimentación. Es la forma más simple de control continuo que se puede utilizar en un sistema de bucle cerrado. El control P-only minimiza la fluctuación en la variable de proceso, pero no siempre lleva el sistema al punto de ajuste deseado. Proporciona una respuesta más rápida que la mayoría de los otros controladores, permitiendo inicialmente que el controlador solo P responda unos segundos más rápido. Sin embargo, a medida que el sistema se vuelve más complejo (es decir, un algoritmo más complejo) la diferencia de tiempo de respuesta podría acumularse, permitiendo que el controlador P posiblemente responda incluso unos minutos más rápido. Aunque el controlador solo P ofrece la ventaja de un tiempo de respuesta más rápido, produce una desviación del punto de ajuste. Esta desviación se conoce como el desplazamiento, y por lo general no se desea en un proceso. La existencia de un desplazamiento implica que el sistema no podría mantenerse en el punto de ajuste deseado en estado estacionario. Es análogo al error sistemático en una curva de calibración, donde siempre hay un error establecido, constante que impide que la línea cruce el origen. El desplazamiento se puede minimizar combinando el control solo P con otra forma de control, como el control I o D. Es importante señalar, sin embargo, que es imposible eliminar por completo el desplazamiento, que se incluye implícitamente dentro de cada ecuación.

P-control correlaciona linealmente la salida del controlador (señal de accionamiento) con el error (diferencia entre la señal medida y el punto de ajuste). Este comportamiento del control P se ilustra matemáticamente en la Ecuación ref {1} (Scrcck, *et. al*).

$$c(t) = K_c e(t) + b \quad (9.2.1)$$

donde

- $c(t)$ = salida del controlador
- K_c = ganancia del controlador
- $e(t)$ = error
- b = sesgo

En esta ecuación, el sesgo y la ganancia del controlador son constantes específicas de cada controlador. El sesgo es simplemente la salida del controlador cuando el error es cero. La ganancia del controlador es el cambio en la salida del controlador por cambio en la entrada al controlador. En los controladores PID, donde las señales generalmente se transmiten electrónicamente, la ganancia del controlador relaciona el cambio en el voltaje de salida con el cambio en el voltaje de entrada. Estos cambios de voltaje están entonces directamente relacionados

con la propiedad que se está cambiando (es decir, temperatura, presión, nivel, etc.). Por lo tanto, la ganancia en última instancia relaciona el cambio en las propiedades de entrada y salida. Si la salida cambia más que la entrada, K_c será mayor que 1. Si el cambio en la entrada es mayor que el cambio en la salida, K_c será menor que 1. Idealmente, si K_c es igual a infinito, el error se puede reducir a cero. Sin embargo, esta naturaleza infinitesimal de K_c aumenta la inestabilidad del bucle porque el error cero implicaría que la señal medida es *exactamente* igual al punto de ajuste. Como se mencionó en la conferencia, la igualdad exacta nunca se logra en la lógica de control; en cambio, en la lógica de control, se permite que el error varíe dentro de un cierto rango. Por lo tanto, hay límites para el tamaño de K_c , y estos límites son definidos por el sistema. Las representaciones gráficas de los efectos de estas variables en el sistema se muestran en PID Tuning vía Métodos Clásicos.

Como puede verse a partir de la ecuación anterior, el control solo P proporciona una relación lineal entre el error de un sistema y la salida del controlador del sistema. Este tipo de control proporciona una respuesta, basada en la señal que ajusta el sistema para que se eliminen las oscilaciones, y el sistema vuelve al estado estacionario. Las entradas al controlador son el punto de ajuste, la señal y el sesgo. El controlador calcula la diferencia entre el punto de ajuste y la señal, que es el error, y envía este valor a un algoritmo. Combinado con el sesgo, este algoritmo determina la acción que debe tomar el controlador. A continuación, en la Figura 2 se muestra una representación gráfica de la salida del controlador P para un incremento escalonado en la entrada en el tiempo t_0 . Esta gráfica es exactamente similar a la gráfica de entrada por pasos en sí.

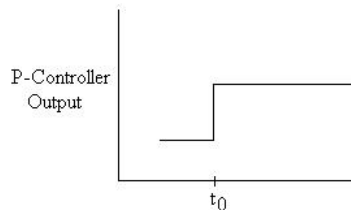


Figura 2. Salida del controlador P para entrada escalonada.

Para ilustrar esta relación lineal de control P, considere el control solo P que controla el nivel de un fluido en un tanque. Inicialmente, el flujo hacia el tanque es igual al flujo que sale del tanque. Sin embargo, si el flujo que sale del tanque disminuye, el nivel en el tanque aumentará debido a que entra más fluido que el que sale. El sistema de control solo P ajustará el flujo que sale del tanque para que vuelva a ser igual al flujo hacia el tanque, y el nivel volverá a ser constante. Sin embargo, este nivel ya no es igual al nivel inicial en el tanque. El sistema está en estado estacionario, pero hay una diferencia entre el punto de ajuste inicial y la posición actual en el tanque. Esta diferencia es el desplazamiento del control P.

9.2.3.2: CONTROL INTEGRAL (I)

Otro tipo de acción utilizada en los controladores PID es el control integral. El control integral es una segunda forma de control de retroalimentación. A menudo se usa porque es capaz de eliminar cualquier desviación que pueda existir. Así, el sistema vuelve tanto al estado estacionario como a su configuración original. Un error negativo hará que la señal al sistema disminuya, mientras que un error positivo hará que la señal aumente. Sin embargo, los controladores solo I son mucho más lentos en su tiempo de respuesta que los controladores solo P porque dependen de más parámetros. Si es esencial no tener compensación en el sistema, entonces se debe usar un controlador I-only, pero requerirá un tiempo de respuesta más lento. Este tiempo de respuesta más lento se puede reducir combinando el control solo I con otra forma, como el control P o PD. Los controles de solo I se utilizan a menudo cuando las variables medidas deben permanecer dentro de un rango muy estrecho y requieren un control de ajuste fino. Los controles I afectan al sistema al responder a errores pasados acumulados. La filosofía detrás del control integral es que las desviaciones se verán afectadas en proporción a la suma acumulada de su magnitud. La ventaja clave de agregar un i-Control a su controlador es que eliminará el desplazamiento. Las desventajas son que puede desestabilizar el controlador, y hay una windup del integrador, lo que aumenta el tiempo que tarda el controlador en realizar cambios.

i-Control correlaciona la salida del controlador con la integral del error. La integral del error se toma con respecto al tiempo. Es el error total asociado a lo largo de una cantidad de tiempo especificada. Este comportamiento I-control se ilustra matemáticamente en la Ecuación\ ref {2} (Scrcck, et. al).

$$c(t) = \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + c(t_0) \quad (9.2.2)$$

donde

- $c(t)$ es la salida del controlador
- T_i es el tiempo integral
- $e(t)$ es el error
- $c(t_0)$ es la salida del controlador antes de la integración

En Ecuación\ ref {2}, el tiempo integral es la cantidad de tiempo que tarda el controlador en cambiar su salida por un valor igual al error. La salida del controlador antes de la integración es igual a la salida inicial en el tiempo $t=0$, o la salida del controlador en el momento un paso

antes de la medición. Las representaciones gráficas de los efectos de estas variables en el sistema se muestran en PID Tuning vía Métodos Clásicos.

La tasa de cambio en la salida del controlador para el control solo I está determinada por una serie de parámetros. Mientras que el controlador solo P fue determinado por e , la tasa de cambio para I-only depende tanto de e como de T_i . Debido a la relación inversa entre $c(t)$ y T_i , esto disminuye la tasa de cambio para un controlador I-only.

El controlador solo I opera esencialmente de la misma manera que un controlador solo P. Las entradas son nuevamente el punto de ajuste, la señal y el sesgo. Una vez más, se calcula el error, y este valor se envía al algoritmo. Sin embargo, en lugar de simplemente usar una relación lineal para calcular la respuesta, el algoritmo ahora usa una integral para determinar la respuesta que se debe tomar. Una vez evaluada la integral, se envía la respuesta y el sistema se ajusta en consecuencia. Debido a la dependencia de T_i , el algoritmo tarda más en determinar la respuesta adecuada. Una representación gráfica de la salida del controlador I para un aumento de paso en la entrada en el tiempo t_0 se muestra a continuación en la Figura 3. Como era de esperar, esta gráfica representa el área bajo la gráfica de entrada de pasos.

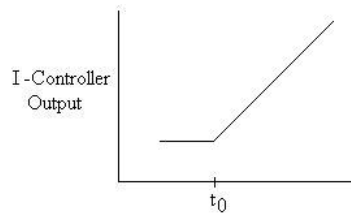


Figura 3. Salida de controlador I para entrada escalonada.

9.2.3.3: DERIVADA (D) CONTROL

Otro tipo de acción utilizada en los controladores PID es el control derivado. A diferencia de los controles solo P y solo I, el control D es una forma de control de avance. D-control anticipa las condiciones del proceso analizando el cambio en el error. Funciona para minimizar el cambio de error, manteniendo así el sistema en una configuración consistente. El principal beneficio de los controladores D es resistir el cambio en el sistema, siendo el más importante de estas oscilaciones. La salida de control se calcula en base a la tasa de cambio del error con el tiempo. Cuanto mayor sea la tasa de cambio de error, más pronunciada será la respuesta del controlador.

A diferencia de los controladores proporcionales e integrales, los controladores derivados no guían el sistema a un estado estacionario. Debido a esta propiedad, los controladores D deben estar acoplados con controladores P, I o PI para controlar correctamente el sistema.

D-control correlaciona la salida del controlador con la derivada del error. La derivada del error se toma con respecto al tiempo. Es el cambio en el error asociado con el cambio en el tiempo. Este comportamiento del control D se ilustra matemáticamente en la Ecuación\ ref {3} (Screck, *et. al*).

$$c(t) = T_d \frac{de}{dt} \quad (9.2.3)$$

donde

- $c(t)$ es la salida del controlador
- T_d es la constante de tiempo derivada
- de es el cambio diferencial en el error
- dt es el cambio diferencial en el tiempo

Las representaciones gráficas de los efectos de estas variables en el sistema se muestran en PID Tuning vía Métodos Clásicos.

Matemáticamente, el control derivado es lo opuesto al control integral. Aunque existen controles solo I, los controles solo D no existen. Los controles D miden solo el cambio de error. Los controles D no saben dónde está el punto de ajuste, por lo que generalmente se usa junto con otro método de control, como P-only o un control de combinación PI. El control D se usa generalmente para procesos con salidas de proceso que cambian rápidamente. Sin embargo, al igual que el control I, el control D es matemáticamente más complejo que el control P. Dado que un algoritmo informático tardará más tiempo en calcular una derivada o una integral que simplemente relacionar linealmente las variables de entrada y salida, agregar un control D ralentiza el tiempo de respuesta del controlador. A continuación, en la Figura 4 se muestra una representación gráfica de la salida del controlador D para un incremento escalonado en la entrada en el momento t_0 . Como era de esperar, esta gráfica representa la derivada de la gráfica de entrada por pasos.

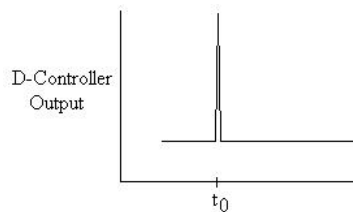


Figura 4. Salida del controlador D para entrada escalonada.

9.2.4: EFECTOS DEL CONTROLADOR EN UN SISTEMA

Las siguientes imágenes están destinadas a dar una representación visual de cómo los controladores P, I y D afectarán a un sistema.



Descripción

Figura 5. Muestra de datos estables.

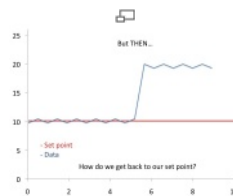


Figura 6. Alteración de datos.

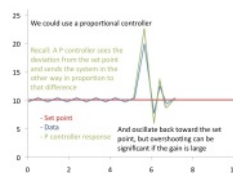


Figura 7. Efecto del controlador P sobre los datos.

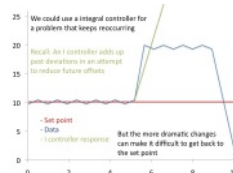


Figura 8. Efecto i-Controller sobre los datos.

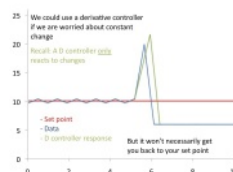


Figura 9. Efecto del controlador D sobre los datos.

Continuar leyendo para ver los resultados de combinar controladores.

9.2.4.1: CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL (PI)

Una combinación es el **control PI**, que carece del control D del sistema PID. El control PI es una forma de control de retroalimentación. Proporciona un tiempo de respuesta más rápido que el control I-only debido a la adición de la acción proporcional. El control PI impide que el sistema fluctúe, y también es capaz de devolver el sistema a su punto de ajuste. Aunque el tiempo de respuesta para el control PI es más rápido que el control solo I, sigue siendo hasta un 50% más lento que el control solo P. Por lo tanto, con el fin de aumentar el tiempo de respuesta, el control PI a menudo se combina con el control solo D.

PI-control correlaciona la salida del controlador con el error y la integral del error. Este comportamiento de control PI se ilustra matemáticamente en la Ecuación\ ref {4} (Scrccek, *et. al*).

$$c(t) = K_c \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right) + C \quad (9.2.4)$$

donde

- $c(t)$ es la salida del controlador,
- K_c es la ganancia del controlador,
- T_i es el tiempo integral,
- $e(t)$ es el error, y
- C es el valor inicial del controlador

En esta ecuación, el tiempo integral es el tiempo requerido para que la porción de solo I del controlador coincida con el control proporcionado por la parte de solo P del controlador.

La ecuación indica que el controlador PI opera como un controlador PID simplificado con un término derivado cero. Alternativamente, el controlador PI también se puede ver como una combinación de las ecuaciones de control solo P y solo I. El término sesgo en el control P-only es igual a la acción integral del control I-only. El control de solo P solo está en acción cuando el sistema no está en el punto establecido. Cuando el sistema está en el punto establecido, el error es igual a cero, y el primer término cae fuera de la ecuación. Entonces, el sistema está siendo controlado solo por la parte del controlador solo I. En caso de que el sistema se desvíe nuevamente del punto establecido, se promulgará el control P-only. Una representación gráfica de la salida del controlador PI para un aumento de paso en la entrada en el tiempo t_0 se muestra a continuación en la Figura 5. Como era de esperar, esta gráfica se asemeja a la combinación cualitativa de las gráficas P-only y I-only.

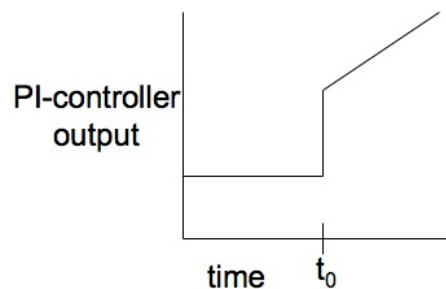


Figura 10. Salida de controlador PI para entrada escalonada.

9.2.4.2: EFECTOS DE K_c Y T_i

Con un sistema de control PI, la actividad del controlador (agresividad) aumenta a medida que K_c y T_i disminuyen, sin embargo, pueden actuar individualmente sobre la agresividad de la respuesta de un controlador. Considere la Figura 11 a continuación con el gráfico central siendo un caso base de sistema lineal de segundo orden.

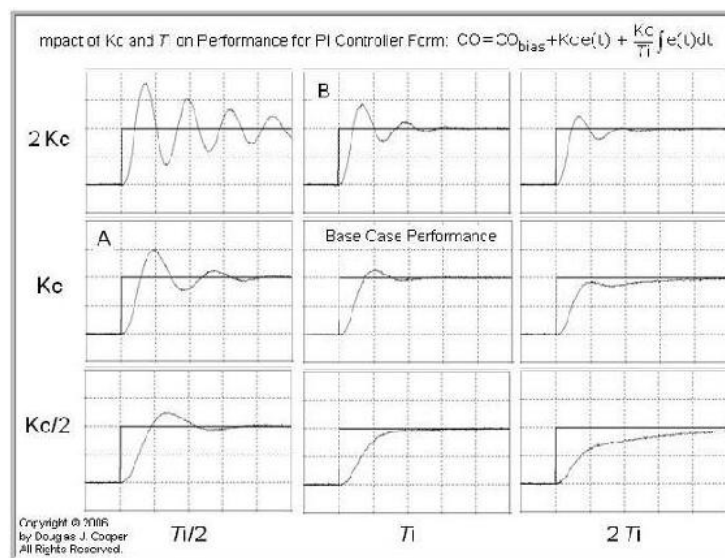


Figura 11. Efectos de K_c y T_i [2]

La gráfica muestra cómo T_i y K_c afectan el rendimiento de un sistema, ya sea que ambos lo estén afectando o cada uno lo esté haciendo de manera independiente. Independientemente del tiempo integral, aumentar la ganancia del controlador (mover de abajo hacia arriba en la parcela) aumentará la actividad del controlador. De manera similar, la disminución del tiempo integral (moviéndose de derecha a izquierda en la gráfica) aumentará la actividad del controlador independientemente de la ganancia del controlador. Como era de esperar, aumentar K_c y disminuir T_i complicaría la sensibilidad y crearía el escenario controlador más agresivo.

Con solo dos parámetros que interactúan en los sistemas de control PI, gráficas de rendimiento similares aún pueden causar confusión. Por ejemplo, las gráficas A y B de la figura se ven muy similares a pesar de que diferentes parámetros se ven afectados en cada una de ellas. Esto podría causar más problemas y crear un sistema tremendamente agresivo si se corrige el parámetro incorrecto. Si bien el ensayo y el error pueden ser factibles para un sistema PI, se vuelve engorroso en PID donde se introduce un tercer parámetro y las parcelas se vuelven cada vez más similares.

Otra observación destacable es la parcela con K_c normal y T_i doble. La gráfica representa cómo el término proporcional es práctico pero la integral no está recibiendo suficiente peso inicialmente, provocando la ligera oscilación antes de que el término integral pueda finalmente ponerse al día y ayudar al sistema hacia el punto de ajuste.

9.2.4.3: CONTROL DE DERIVADOS PROPORCIONALES (PD)

Otra combinación de controles es el PD-control, que carece del I-control del sistema PID. El control de PD es una combinación de control de avance y retroalimentación, ya que opera tanto en las condiciones actuales del proceso como en las condiciones del proceso predichas. En PD-Control, la salida de control es una combinación lineal de la señal de error y su derivada. PD-control contiene la amortiguación del control proporcional de la fluctuación y la predicción del error de proceso del control derivado.

Como se mencionó, PD-Control correlaciona la salida del controlador con el error y la derivada del error. Este comportamiento PD-control se ilustra matemáticamente en la Ecuación 5 (Skrcek, *et al.*).

$$c(t) = K_c \left(e(t) + T_d \frac{de}{dt} \right) + C \quad (9.2.5)$$

donde

- $c(t)$ = salida del controlador
- K_c = ganancia proporcional
- e = error
- C = valor inicial del controlador

La ecuación indica que el controlador PD opera como un controlador PID simplificado con un término integral cero. Alternativamente, el controlador PD también se puede ver como una combinación de las ecuaciones de control solo P y solo D. En este control, el propósito del control solo D es predecir el error para aumentar la estabilidad del sistema de bucle cerrado. El control P-D no se usa comúnmente debido a la falta del término integral. Sin el término integral, no se minimiza el error en el funcionamiento en estado estacionario. El control P-D se usa generalmente en bucles de control de pH por lotes, donde no es necesario minimizar el error en el funcionamiento en estado estacionario. En esta aplicación, el error se relaciona con la señal de accionamiento tanto a través del término proporcional como derivado. Una representación gráfica de la salida del controlador PD para un aumento de paso en la entrada en el tiempo t_0 se muestra a continuación en la Figura 6. Nuevamente, esta gráfica es una combinación de las gráficas P-only y D-only, como se esperaba.

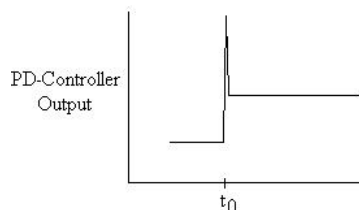


Figura 12. Salida del controlador PD para entrada escalonada.

9.2.4.4: CONTROL PROPORCIONAL-INTEGRAL-DERIVADO (PID)

El control proporcional-integral-derivado es una combinación de los tres tipos de métodos de control. El control PID es el más utilizado porque combina las ventajas de cada tipo de control. Esto incluye un tiempo de respuesta más rápido debido al control solo P, junto con el desplazamiento decrecido/cero de los controladores combinados derivados e integrales. Este desplazamiento se eliminó mediante el uso adicional del I-control. La adición de D-control aumenta en gran medida la respuesta del controlador cuando se usa en combinación porque predice perturbaciones al sistema midiendo el cambio en el error. Por el contrario, como se mencionó anteriormente, cuando se usa individualmente, tiene un tiempo de respuesta más lento en comparación con el control P-only más rápido. Sin embargo, aunque el controlador PID parece ser el controlador más adecuado, también es el controlador más caro. Por lo tanto, no se utiliza a menos que el proceso requiera la precisión y estabilidad proporcionada por el controlador PID.

PID-control correlaciona la salida del controlador con el error, integral del error y derivada del error. Este comportamiento de control de PID se ilustra matemáticamente en la Ecuación 6 (Scrcsek, *et. al*).

$$c(t) = K_c \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de}{dt} \right) + C \quad (9.2.6)$$

donde

- $c(t)$ = salida del controlador
- K_c = ganancia del controlador
- $e(t)$ = error
- T_i = tiempo integral
- T_d = constante de tiempo derivada
- C = valor inicial del controlador

Como se muestra en la ecuación anterior, el control PID es la combinación de los tres tipos de control. En esta ecuación, la ganancia se multiplica por los términos integral y derivado, junto con el término proporcional, porque en el control de combinación PID, la ganancia afecta también a las acciones I y D. Debido al uso del control derivado, el control PID no se puede usar en procesos donde hay mucho ruido, ya que el ruido interferiría con el aspecto predictivo, feedforward. Sin embargo, el control PID se utiliza cuando el proceso no requiere compensación y un tiempo de respuesta rápido. Una representación gráfica de la salida del controlador PID para un aumento de paso en la entrada en el tiempo t_0 se muestra a continuación en la Figura 7. Esta gráfica se asemeja a la combinación cualitativa de las gráficas P-only, I-only y D-only.

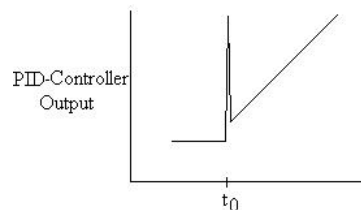


Figura 7. Salida de controlador PID para entrada escalonada.

Además del control PID, los controles P-, I- y D- se pueden combinar de otras maneras. Estas combinaciones alternativas son simplificaciones del control PID.

NOTA: ORDEN DE E (T)

El orden de los elementos en la $e(t)$ puede variar dependiendo de la situación. Podría ser el elemento fijo menos el elemento variable o al revés. Para ilustrar mejor el concepto pasemos a un ejemplo. Digamos que está creando un control PID para controlar el nivel de fluido en un tanque manipulando la válvula de salida. Cuando el nivel de fluido en el tanque excede su valor establecido, querrá que la válvula se abra más para permitir más flujo fuera del tanque. Se busca una respuesta positiva. Por lo tanto su $e(t)$ debe dar un valor positivo cuando el nivel de fluido es mayor que el conjunto. En este caso tu $e(t)$ será $(V - V_{set})$. La misma lógica se puede utilizar para otros sistemas para determinar cuál debe ser la $e(t)$ en los controles PID.

9.2.5: MODELADO DE CONTROLADORES PID CON EULER EN EXCEL

Como ocurre con muchos sistemas de ingeniería, los controladores PID se pueden modelar en Excel a través de métodos numéricos como el Método de Euler. Primero comienza con el valor inicial para un parámetro dado. Determine el cambio en ese parámetro en un cierto paso de tiempo sumando los tres controladores P, I y D en ese paso, los cuales se encuentran usando las ecuaciones enumeradas en la sección P, I, D, PI, PD, PID Control anterior. Toma este cambio, multiplíquelo por el tiempo-paso elegido y agrégalo al valor anterior del parámetro de interés. Para obtener información más detallada consulte Resolución numérica de ODE en Excel. Un ejemplo de un problema de ingeniería química que utiliza este método se puede ver en el Ejemplo 4 a continuación.

9.2.5.1: SOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE MODELADO PID EN EXCEL

Al configurar una hoja de cálculo de Excel para modelar un controlador PID, es posible que reciba un mensaje de error que indica que ha creado una referencia circular. Digamos que está controlando el caudal de un reactivo (B) a un reactor que depende de la concentración de otro reactivo (A) ya dentro del reactor. Sus ecuaciones PID se ven de la siguiente manera:

$$FB = 1 + K_c \left[(A - A_{set}) + \frac{1}{\tau_i} \int (A - A_{set}) dt + \tau_d \frac{d(A - A_{set})}{dt} \right]$$

y

$$x_i = \frac{d(A - A_{set})}{dt}$$

Después de haber configurado sus columnas para $A - A_{set}$, $d(A - A_{set})/dt$, x_i , y las celdas para sus parámetros como K_c , τ_i y τ_d , necesitará configurar su columna PID con su ecuación PID en ella. Después de ingresar su ecuación en la primera celda de la columna PID, es posible que reciba el mensaje de error de referencia circular cuando intente arrastrar la ecuación hacia abajo a las otras celdas de su columna.

Hay dos cosas que puedes hacer:

1. Es probable que necesites iniciar tu ecuación PID en la segunda o tercera celda de tu columna PID. Ingrese valores razonables en el primer par de celdas antes de iniciar la ecuación PID, y encontrará que estos valores no deberían afectar el resultado final de su controlador.
2. También puedes intentar disminuir el tamaño del paso (Δt).

9.2.5.2: TABLAS DE RESUMEN

A continuación se muestra un resumen de las ventajas e inconvenientes de los tres controles que se muestran en la Tabla 1.

Cuadro 1. Ventajas y desventajas de los controles

	Proportional (P)	Integral (I)	Derivative (D)
Advantages	<ul style="list-style-type: none"> + Fast response time - Minimizes fluctuation 	<ul style="list-style-type: none"> + Cancels small offset + Returns system to steady state 	<ul style="list-style-type: none"> + Keeps system at consistent setting + Controls processes with rapidly changing outputs
Disadvantages	<ul style="list-style-type: none"> - Contains large offset - Does not bring system to desired set point 	<ul style="list-style-type: none"> - Slow response time 	<ul style="list-style-type: none"> - Slow response time - Requires combined use with another controller

A continuación se muestra una guía para los usos típicos de los distintos controladores en la Tabla 2.

Cuadro 2. Usos típicos de controladores P, I, D, PI y PID

Controller	Estimates	When to use	Examples
P	Present	Systems with slow response, systems tolerant to offset	Float valves, thermostats, humidistat
I	Back	Not often used alone, as is too slow	Used for very noisy systems
D	Forward	Not used alone because it is too sensitive to noise and does not have set point	None
PI	Present & back	Often used	Thermostats, flow control, pressure control
PID	All time	Often used, most robust, but can be noise sensitive	Cases where the system has inertia that could get out of hand: i.e. temperature and concentration measurements on a reactor to avoid runaway.

A continuación se muestra un resumen de las definiciones de los términos y símbolos en la Tabla 3.

Cuadro 3. Definiciones de términos y símbolos.

Term or Symbol	Definition
Bias	Controller output when the error is equal to zero
Change in Error, Δe	Differential change in error used in the Derivative Action equation
Change in Time, Δt	Differential change in time used in the Derivative Action equation
Controller	Instrument used to adjust a system properly such as temperature, pressure, and level. Controller vary on three main aspects: (1) The way they correlate error and actuating signal (such as PID controllers) (2) The way they work relative to the data they gather (feedback Vs. feedforward) (3) The way they adjust the system setting (on-off Vs. continuous)
Controller Gain, K_c	Ratio of the change in output to the change in input
Controller Output, $e(t)$	Voltage output from the controller, usually relating to the actuating signal
Controller Output before Integration, $e(t)$	Constant used in the Integral Action equation
Derivative Time Constant, T_d	Constant used in the Derivative Action equation
Error, $e(t)$	The difference between the measured signal and the set point
Offset	Systematic error that prevents the system from being at the desired set point during steady state
Integral Time, T_i	The time it takes the controller to change the output by a value equal to the error

✓ EJEMPLO9.2.1

Hypothetical Industries acaba de ponerte a cargo de uno de sus reactores por lotes. Su tarea es encontrar una manera de mantener un nivel de consigna dentro del reactor. Tu jefe quiere usar algún tipo de regulador regulador, pero no está muy seguro de cuál usar. Ayude a su jefe a encontrar el tipo de controlador adecuado. Es sumamente importante que el nivel dentro del reactor esté en el punto de consigna. No se pueden tolerar grandes fluctuaciones y errores.

Solución

Usted querría usar un controlador PID. Debido a la acción del control P, el sistema responderá a un cambio muy rápidamente. Debido a la acción de I control, el sistema es capaz de ser devuelto al valor de consigna. Finalmente, debido a que es muy crítico que el sistema permanezca en un punto de ajuste constante, el control D medirá el cambio en el error y ayudará a ajustar el sistema en consecuencia.

✓ EJEMPLO9.2.2

Vuelves a tu preparatoria y notas un horno en tu antigua clase de química. El horno se utiliza para eliminar el agua de las soluciones. Utilizando tus conocimientos de ChE 466, comienzas a preguntarte qué tipo de controlador utiliza el horno para mantener su temperatura establecida. Te das cuenta de que algunos estudiantes de secundaria están ansiosos por aprender, y decides compartir tus conocimientos con ellos con la esperanza de inspirarlos a convertirse en Ingenieros Químicos. Explíqueles el tipo de controlador que probablemente se encuentre dentro del horno, y cómo funciona ese controlador.

Solución

Dado que el horno solo se usa para eliminar el agua de una solución, la fluctuación, el error y el retraso entre el punto de ajuste y la temperatura real son aceptables. Por lo tanto, el controlador más fácil y simple de usar sería el controlador On-Off. El controlador de encendido-apagado enciende el mecanismo de calentamiento cuando la temperatura en el horno está por debajo de la temperatura establecida. Si la temperatura del horno aumenta por encima de la temperatura establecida, el controlador apagará el mecanismo de calentamiento.

✓ EJEMPLO9.2.3

Habiendo seguido tu consejo, tu jefe de Hypothetical Industries decide instalar un controlador PID para controlar el nivel en el reactor por lotes. Cuando arranca el reactor por primera vez, el controlador inicialmente recibió una entrada de paso. A medida que el reactor alcanza el estado estacionario, el nivel en el reactor tiende a fluctuar, enviando entradas de pulso al controlador. Para una entrada de pulso, proporcione una representación gráfica de la salida del controlador PID.

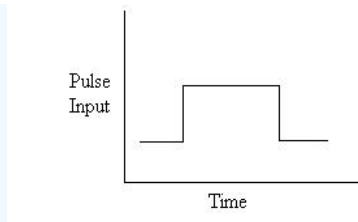


Figura 8. Entrada de pulso.

Solución

La salida del controlador PID será una combinación de las salidas del controlador P-only, I-only y D-only. Análogamente a la salida del controlador P para la entrada de paso, la salida del controlador P para la entrada de pulso se parecerá exactamente a la entrada.

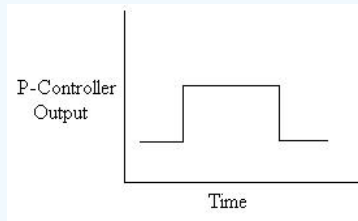


Figura 9. Salida del controlador P para entrada de impulsos.

La salida del controlador I representa el área debajo del gráfico de entrada. A diferencia de la entrada de paso, el área debajo del gráfico de entrada de pulso volvió a caer a cero una vez que el pulso ha pasado. Por lo tanto, en lugar de aumentar continuamente, el gráfico de salida del controlador I se nivelará al final.

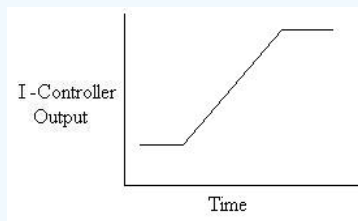


Figura 10. Salida de controlador I para entrada de impulsos.

La salida del controlador D representa la derivada de la gráfica de entrada. La derivada a la primera discontinuidad de la gráfica sería infinito positivo. La derivada de la segunda discontinuidad descendente es el infinito negativo.

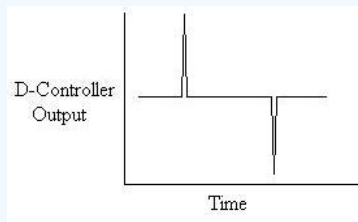


Figura 11. Salida del controlador D para entrada de impulsos.

Combinando las características cualitativas de los tres gráficos podemos determinar la salida del controlador PID para una entrada de pulso.

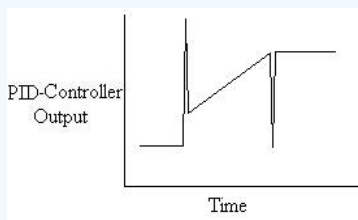


Figura 12. Salida de controlador PID para entrada de pulsos.

✓ EJEMPLO9.2.3

Diferentes tipos de perturbaciones son posibles a la hora de determinar la robustez del controlador PID. Estas diferentes perturbaciones se utilizan para simular cambios que puedan ocurrir dentro de su sistema. Para un reactor CSTR, usted decide calentar su sistema para tener en cuenta el frío clima exterior. La perturbación en la temperatura de entrada es una perturbación de rampa, como se muestra en la figura #. Si el controlador responde a la temperatura de entrada, ¿cuál será la salida del controlador PID?

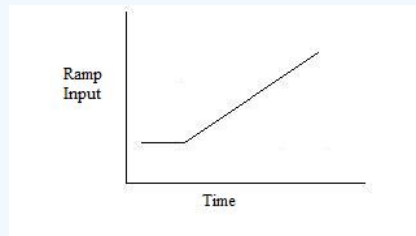


Figura 13. Entrada de rampa.

Solución

Usando un controlador con un controlador solo p, veremos un cambio proporcional en la salida del controlador correspondiente al cambio de la variable de entrada. Ver la figura 14 a continuación

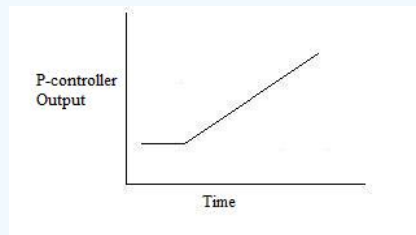


Figura 14. Salida del controlador P para entrada en rampa.

Usando un controlador I-only, veremos el controlador correspondiente al área debajo de la gráfica, que en este caso, parece aumentar exponencialmente con la geometría de rampa.

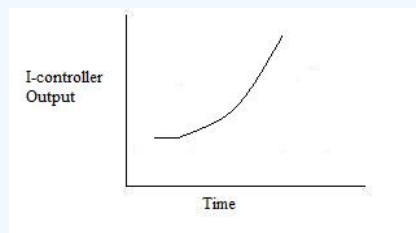


Figura 15. Salida de controlador I para entrada en rampa.

Usando un controlador solo D, veremos una respuesta escalonada a la perturbación de la rampa. Esto se debe a que el componente D corresponde a la derivada, y una entrada de rampa muestra una pendiente constante (positiva en este caso) que es diferente a la pendiente de condición inicial (cero generalmente). Véase la figura 16.

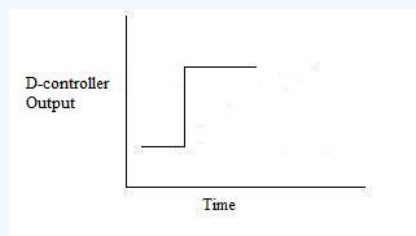


Figura 16. Salida del controlador D para entrada en rampa.

Usando un controlador PID, los tres componentes entran en juego en la salida del controlador. Como es de esperar, el resultado será solo una simple adición de las tres gráficas de componentes separadas.

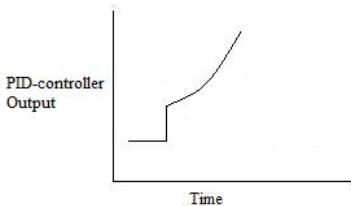


Figura 17. Salida del controlador D para entrada en rampa.

✓ EJEMPLO9.2.6

A continuación se presenta un P&ID del proceso $A+B \rightarrow C$.

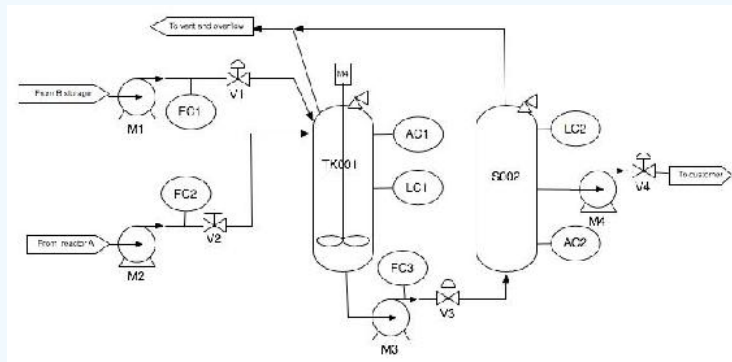


Figura 18. P&ID para un proceso de reacción.

¿Cuál es la expresión del controlador PID en V3 controlando el volumen en TK001 a un punto de consigna de 50 litros? Nota: El controlador PID utiliza LC1 para medir el volumen.

Solución

La ecuación general para un controlador PID es:

$$c(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt + T_d \frac{de}{dt} \right] + C$$

donde

- $c(t)$ = salida del controlador
- K_c = ganancia del controlador
- $e(t)$ = error
- T_i = tiempo integral
- T_d = constante de tiempo derivada
- C = valor inicial del controlador

Por lo tanto, para este ejemplo, la solución es:

$$F_{out} = offset + K_c \left[(V_1 - V_{set}) + \frac{1}{T_i} \int (V_1 - V_{set}) dt + T_d \frac{d(V_1 - V_{set})}{dt} \right]$$

✓ EJEMPLO9.2.6

En este problema, se determinarán las ecuaciones diferenciales que describen un sistema particular de primer orden con un controlador PID. Esto está diseñado para mostrar cómo se pueden modelar o explicar matemáticamente los sistemas bien definidos. Como complemento a este problema, visite [Construcción de diagramas de bloques](#). Tenga en cuenta que este es un ejemplo de solución que utiliza operadores integrodiferenciales en lugar de transformaciones de Laplace. Aquí hemos establecido $K_p = 1$.

Considere un proceso general de primer orden:

$$\tau p Y'(t) + Y(t) = X(t)$$

Donde $Y(t)$ es la salida del sistema y $X(t)$ es la entrada. Agregue un controlador PID al sistema y resuelva una ecuación diferencial simple y simple. El operador o ecuación para un controlador PID está por debajo. Supongamos que no hay tiempo muerto en la medición.

$$G = K_c \left[1 + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t d\tau + \tau_D \frac{d}{dt} \right]$$

Solución: Utilice la construcción de diagramas de bloques como referencia a la hora de resolver este problema.

Ecuaciones que definen el sistema,

- Proceso: $\tau_p Y'(t) + Y(t) = X(t)$
- Controlador: $X(t) = G \varepsilon(t)$
- Comparador: $\varepsilon(t) = R(t) - M(t)$
- Medida: $M(t) = Y(t)$

Cuando estas ecuaciones se combinan en una ecuación, se obtiene la siguiente ecuación. Esto se logra sumando la medición al comparador al controlador a la ecuación del proceso.

$$\tau_p Y'(t) + Y(t) = G(R(t) - Y(t))$$

Sustituir el operador del controlador y luego evaluar los rendimientos:

$$\tau_p Y'(t) + Y(t) = K_c \left[1 + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t d\tau + \tau_D \frac{d}{dt} (R(t) - Y(t)) \right]$$

$$\tau_p Y'(t) + Y(t) = K_c \left[R(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t R(\tau) d\tau + \tau_D \frac{d}{dt} R(t) - Y(t) - \frac{1}{\tau_I} \int_0^t Y(\tau) d\tau - \tau_D \frac{d}{dt} Y(t) \right]$$

Debido a que hay una integral en la ecuación diferencial, es necesario tomar la derivada con respecto al tiempo.

$$\tau_p Y''(t) + Y'(t) = K_c \left[R'(t) + \frac{1}{\tau_I} R(t) - \tau_D R''(t) - Y'(t) + \frac{1}{\tau_I} Y(t) - \tau_D Y''(t) \right]$$

$$\tau_p Y''(t) + Y'(t) = K_c (R'(t) - Y'(t)) + \frac{K_c}{\tau_I} (R(t) - Y(t)) + K_c \tau_D (R''(t) - Y''(t))$$

Para poner esto en notación estándar para resolver una ecuación diferencial de segundo orden, la $Y(t)$ necesidad de estar en un lado, y los $R(t)$ términos tienen que estar en el lado opuesto. También, el coeficiente del $Y(t)$ término tiene que ser uno.

$$\frac{\tau_I (\tau_p - K_c \tau_D)}{K_c} Y''(t) + \frac{\tau_I (1 + K_c)}{K_c} Y'(t) - Y(t) = \tau_I \tau_D R''(t) + \tau_I R'(t) + R(t)$$

La ecuación anterior puede entonces resolverse a mano o usando un programa como Mathematica. Si se usa un programa de computadora, se pueden elegir diferentes valores para los parámetros de control K_c , τ_I , τ_D , y la respuesta a un cambio en el sistema se puede evaluar gráficamente.

Ejercicio9.2.1

¿Qué tipo de controlador se muestra por la siguiente ecuación?

$$c(t) = K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt \right]$$

- Feedforward
- PID
- Derivada
- Integral Proporcional

Contestar

d

Ejercicio9.2.2

¿Qué tipo de controlador aumenta la estabilidad del sistema al mantenerlo en una configuración consistente?

- a. Derivada
- b. Proporcional
- c. Encendido-apagado
- d. Integral

Contestar

a

Ejercicio9.2.3

¿Qué tipo de controlador aumenta la velocidad de respuesta para alcanzar el punto de ajuste deseado más rápido al tiempo que elimina el desplazamiento?

- a. Encendido-apagado
- b. Proporcional
- c. Integral
- d. Proporcional-Integral

Contestar

d

Un laboratorio de microbiología descubrió una nueva cepa mortal de bacterias, llamada P. Woolfi, en el suministro de agua de la ciudad. Para esterilizar el agua, la bacteria tiene que ser asesinada por calor a una temperatura de 105 grados centígrados. Sin embargo, esto está por encima del punto de ebullición del agua a 1 atm y la bacteria solo es susceptible al calor cuando está en líquido debido a la formación de esporas cuando está en gas o vapor. Para lograr esta esterilización se sugirió utilizar una autoclave para mantener el agua en estado líquido manteniéndola a una presión de 5 atm mientras se calienta durante 30 segundos. La clave automática solo puede manejar hasta 7 atm de presión antes de explotar, por lo que para garantizar que el proceso se esté ejecutando con las especificaciones deseadas, se debe crear un Modelo de Controlador PID en Excel. Consulte la figura 18 para una representación visual del sistema.

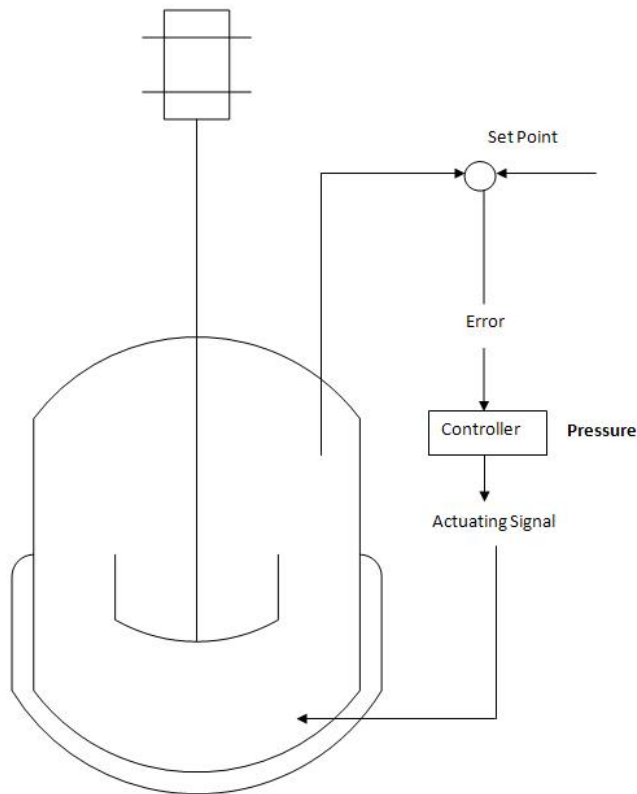


Figura 18. Clave automática con controles PID para temperatura y presión

Haga clic en este enlace para obtener la solución Excel elaborada

Explicación:

Para simular la situación real de presión variable en el sistema, la columna B llama a una ecuación para generar una fluctuación aleatoria en la presión. Pset es simplemente la especificación deseada. Error es la diferencia entre la presión establecida y la señal medida. du/dt es la suma de los términos P, I y D. Las ecuaciones utilizadas para calcular cada una de ellas se pueden encontrar en el artículo, estas toman en cuenta el error asociado a cada paso de tiempo. du/dt es el parámetro que se varía para corregir la diferencia entre la presión medida y la presión deseada.

9.2.6: REFERENCIAS

- Astrom, Karl J., Hagglund, Tore., "Control PID Avanzado", La Sociedad de Instrumentación, Sistemas y Automatización.
- Cooper, Douglas J. "Libro de texto electrónico de control de procesos práctico" <http://www.controlguru.com>
- Scrcsek, William Y., Mahoney, Donald P., Young, Brent R. "Un enfoque en tiempo real para el control de procesos", 2a Edición. John Wiley & Sons, Ltd.

This page titled 9.2: Control de P, I, D, PI, PD y PID is shared under a CC BY 3.0 license and was authored, remixed, and/or curated by Ardemis Boghossian, James Brown, Sara Zak, & Sara Zak via source content that was edited to the style and standards of the LibreTexts platform; a detailed edit history is available upon request.

- 9.2: P, I, D, PI, PD, and PID control by Ardemis Boghossian, James Brown, Sara Zak is licensed CC BY 3.0. Original source: <https://open.umn.edu/opentextbooks/textbooks/chemical-process-dynamics-and-controls>.