

TEMA: CONTROLADORES.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE SAN ANDRÉS TUXTLA

División Ingeniería Mecatrónica IMCT-2010-229

Periodo: Febrero – Junio 2025 Grupo: 611A



ITSSAT



INVESTIGACION DE LA UNIDAD IV

INSTRUMENTACION

Docente:

Dr. José Ángel Nieves Vázquez

Unidad 4:

Controladores

Presenta:

Juan José Jiménez Reyes	221U0541
Juan José Marcial Fiscal	221U0547
Miguel de Jesús Polito Cerón	221U0552
Perla Joselin Quino Caixba	221U0555
Rocio Teoba Herrera	221U0562

San Andrés Tuxtla Veracruz

12 de Mayo de 2025

Índice

<i>Introducción</i>	2
<i>4.1 Aplicaciones de Sistemas de Lazo Abierto y Lazo Cerrado</i>	3
Sistemas de Lazo Cerrado	6
<i>4.2 Modos de Control aplicados en</i>	9
<i>instrumentación:</i>	9
<i>4.2.1 ON-OFF</i>	10
<i>4.2.2 PROPORCIONAL</i>	15
<i>4.2.3 PROPORCIONAL + INTEGRAL</i>	19
4.2.4 Proporcional + Derivativo (PD).....	21
4.2.5 PID (Proporcional-Integral-Derivativo)	24
<i>4.3 Criterios para la Selección de un controlador</i>	35
<i>4.4 Sintonización de Controladores</i>	41
<i>4.5 Comunicación del controlador con otros instrumentos</i>	44
<i>Conclusión</i>	50
<i>Referencias Bibliográficas</i>	51

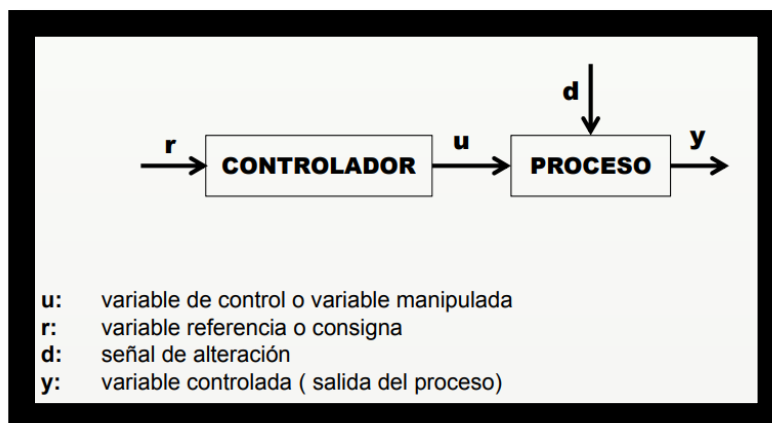
Introducción

En el campo de la automatización industrial, el control eficiente de procesos es un pilar fundamental para garantizar precisión, estabilidad y calidad. La presente investigación explora de manera sistemática los conceptos esenciales de la teoría de control, centrándose en los sistemas de lazo abierto y lazo cerrado, así como en los distintos modos de control empleados en instrumentación, incluyendo las estrategias ON-OFF, proporcional, integral, derivativa y sus combinaciones (PI, PD y PID). A través de este estudio, se analiza también el proceso de sintonización de controladores, la selección adecuada de dispositivos en función de los requerimientos del sistema, y las formas de comunicación entre controladores e instrumentos. La comprensión de estas herramientas permite optimizar la interacción entre sensores, actuadores y unidades de control, favoreciendo una operación industrial segura, eficiente y automatizada.

4.1 Aplicaciones de Sistemas de Lazo Abierto y Lazo Cerrado

Sistemas de Lazo Abierto

Los **sistemas de lazo abierto** son aquellos en los que la acción de control se lleva a cabo sin considerar la medición directa de la salida ni utilizar una señal de realimentación para corregir posibles desviaciones. En estos sistemas, el controlador actúa únicamente en función de las entradas o comandos establecidos, basándose en supuestos y en calibraciones realizadas previamente. Su rendimiento depende estrictamente de que las condiciones de operación permanezcan constantes, ya que carecen de un mecanismo que detecte o compense perturbaciones externas o variaciones en las características del proceso. Aunque tienen limitaciones importantes, estos sistemas destacan por su **simplicidad, bajo costo, facilidad de implementación y menor necesidad de mantenimiento**, lo que los hace atractivos en una gran variedad de aplicaciones industriales y domésticas.



Aplicaciones comunes de los sistemas de lazo abierto:

- **Operaciones temporizadas:**

Un ejemplo clásico son los hornos de microondas y las lavadoras domésticas. En estos dispositivos, el temporizador controla la duración del ciclo de operación. Por ejemplo, un microondas calienta los alimentos durante un tiempo preestablecido sin medir la temperatura interna del alimento ni ajustar su potencia en función de esta. Similarmente, una lavadora ejecuta ciclos de lavado, enjuague y centrifugado según tiempos fijos, sin importar si la carga de ropa es mayor o menor ni si el nivel de suciedad varía. Esta característica los hace prácticos para tareas repetitivas y bien definidas, pero los vuelve ineficaces frente a condiciones cambiantes.

- **Dosificación química:**

En muchos procesos industriales, como el tratamiento de aguas o la producción de bebidas, se emplean válvulas calibradas para suministrar un caudal específico de producto químico durante un periodo determinado. Estas válvulas operan bajo el supuesto de que el caudal se mantendrá constante y que las propiedades del fluido no cambiarán significativamente. Aunque esto puede ser suficiente en procesos bien caracterizados, no permite reaccionar frente a variaciones en la densidad, viscosidad, presión o temperatura del fluido.

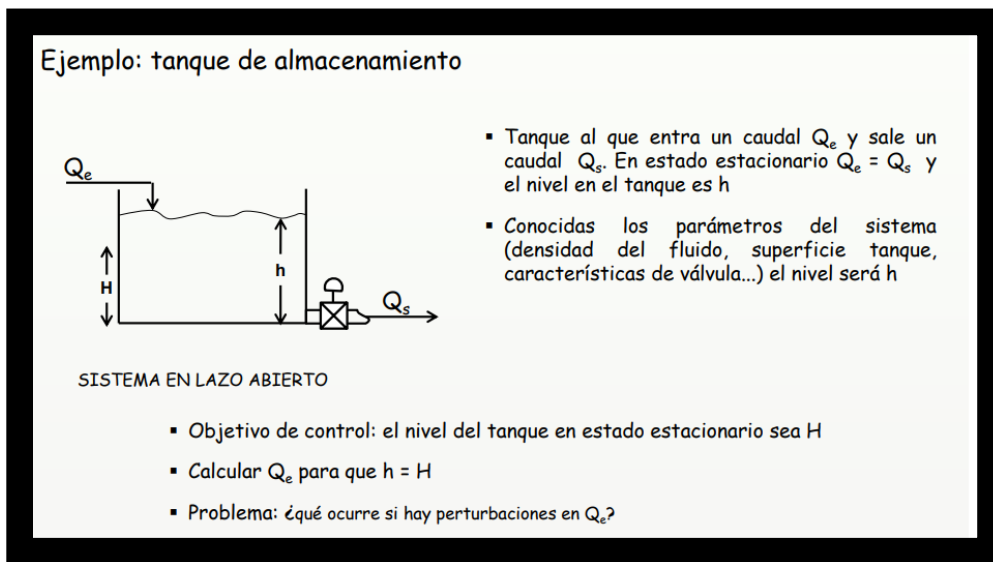
- **Control de flujo y presión en líneas de producción estables:**

En aplicaciones donde se requiere mantener un flujo constante —como en líneas de llenado de botellas o sistemas de refrigeración industrial— se ajustan válvulas manuales o automáticas a posiciones fijas. Esta estrategia funciona adecuadamente cuando las condiciones de entrada y las características del sistema son constantes, pero falla si aparecen

perturbaciones, como un cambio en la presión de suministro o un desgaste en los componentes.

- **Semáforos y sistemas de tráfico basados en temporizadores fijos:**

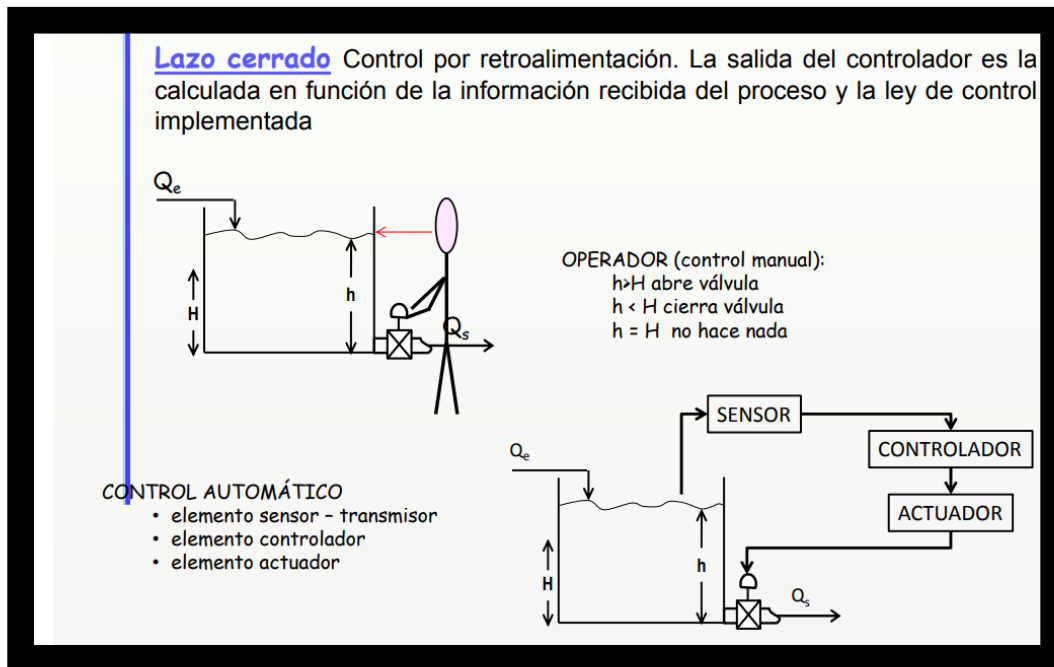
Muchos sistemas de control de tráfico, especialmente en zonas donde no se justifica un sistema inteligente, operan con temporizadores programados que determinan los ciclos de luces rojas, verdes y amarillas. Estos temporizadores no toman en cuenta el volumen real de vehículos en cada dirección, lo cual puede generar ineficiencias, como esperas innecesarias en calles vacías o congestiones en horas pico.



En resumen, los sistemas de lazo abierto ofrecen ventajas de costo, diseño sencillo y facilidad de mantenimiento, pero presentan como desventaja fundamental su incapacidad para responder a cambios inesperados en el entorno o en la carga del proceso.

Sistemas de Lazo Cerrado

Los **sistemas de lazo cerrado**, también conocidos como sistemas automáticos de control o sistemas retroalimentados, incorporan sensores que permiten medir la variable de salida (como temperatura, presión, nivel, velocidad, etc.) y compararla continuamente con un valor de referencia o punto de consigna (setpoint). A partir de la diferencia entre la salida medida y el valor deseado (error), el sistema ajusta su acción de control para reducir dicho error. Esta característica los hace inherentemente más precisos, robustos y adaptativos frente a perturbaciones externas, aunque a costa de una mayor complejidad en términos de diseño, instrumentación y mantenimiento.



Aplicaciones representativas de los sistemas de lazo cerrado:

- Control de temperatura con PID en hornos industriales y domésticos:

En procesos donde la temperatura es crítica —como en hornos industriales para tratamientos térmicos o en hornos domésticos con control digital— se emplean controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo). Estos ajustan la potencia de calentamiento de manera continua, modulando la señal enviada a las resistencias o quemadores en función del error de temperatura detectado. Este enfoque permite alcanzar y mantener temperaturas precisas, compensando pérdidas de calor, fluctuaciones ambientales o cambios en la carga térmica.

- **Regulación de nivel en tanques de almacenamiento:**

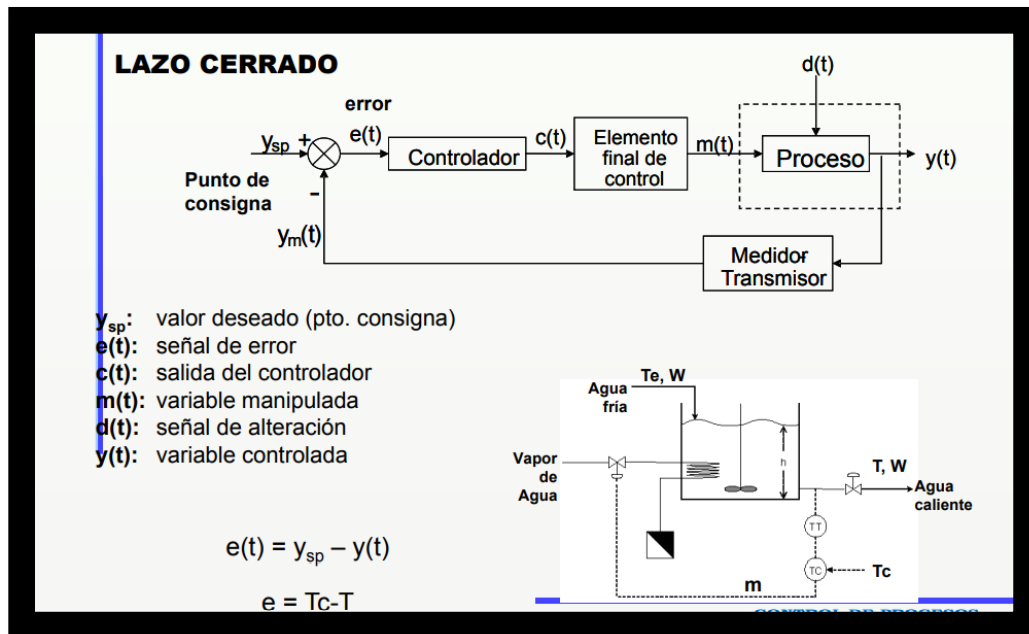
En plantas de procesos, el control de nivel en tanques es fundamental para evitar desbordamientos o niveles insuficientes. Los sensores de nivel miden constantemente el volumen de líquido, y el controlador ajusta la apertura de una válvula de entrada (o la velocidad de una bomba) para mantener el nivel en el rango deseado. Este tipo de control es ampliamente usado en industrias químicas, alimentarias y farmacéuticas.

- **Control de velocidad y posición en motores eléctricos y sistemas robóticos:**

En aplicaciones de robótica, automatización industrial y vehículos eléctricos, es imprescindible controlar con precisión la velocidad y posición de los actuadores. Para ello, se emplean sistemas de realimentación que utilizan codificadores (encoders), tacómetros u otros sensores que miden la respuesta real del motor. El controlador ajusta la señal de mando para corregir errores y garantizar desplazamientos suaves, exactos y rápidos, algo indispensable en brazos robóticos, impresoras 3D y sistemas CNC.

- **Gestión de presión en sistemas hidráulicos y neumáticos:**

En sistemas de transmisión de potencia, ya sean hidráulicos o neumáticos, el control de presión es fundamental para garantizar seguridad y rendimiento. Los sensores de presión miden continuamente el valor real, y el controlador ajusta válvulas o bombas para mantener la presión deseada frente a perturbaciones como variaciones de carga, fugas o cambios en la temperatura del fluido.



4.2 Modos de Control aplicados en instrumentación:

Antes de abordar en detalle los distintos modos de control aplicados en instrumentación, conviene exponer un breve resumen que sintetice sus características fundamentales y establezca el marco para los temas posteriores. A continuación, se presenta ese resumen, tras el cual se detallará el apartado 4.2 Modos de Control aplicados en instrumentación y, posteriormente, los demás temas acordados.

Resumen previo

En instrumentación de procesos existen estrategias de control que cubren un amplio espectro de necesidades en cuanto a velocidad de respuesta, precisión y complejidad. De un lado, el control ON–OFF ofrece la ventaja de una implementación sumamente sencilla y económica, aunque a costa de generar oscilaciones periódicas alrededor del punto de consigna. En contraste, el control proporcional mejora la rapidez de corrección inicial modulando la señal en función del error instantáneo; no obstante, conserva un desfase permanente que depende de la ganancia elegida. Para eliminar dicho desfase, la acción integral acumula la desviación a lo largo del tiempo y ajusta la salida hasta anular por completo el error estacionario, si bien introduce cierto retardo y puede inducir oscilaciones si no se calibra adecuadamente. Por último, la acción derivativa anticipa la evolución del error basándose en su tasa de cambio, aportando amortiguamiento y reduciendo el sobreimpulso, aunque resulta sensible al ruido de medición. La combinación de estas tres acciones en el controlador PID culmina en un esquema que equilibra rapidez, exactitud y estabilidad, especialmente cuando se recurre a técnicas de sintonización clásicas o a algoritmos de autotuning capaces de ajustar automáticamente los parámetros en línea.

4.2.1 ON-OFF.

Acción de control de dos posiciones o de encendido y apagado (on/off).

En un sistema de control de dos posiciones, el elemento de actuación solo tiene dos posiciones fijas que, en muchos casos, son simplemente encendido y apagado. El control de dos posiciones o de encendido y apagado es relativamente simple y barato, razón por la cual su uso es extendido en sistemas de control tanto industriales como domésticos.

Es común que los controladores de dos posiciones sean dispositivos eléctricos, en cuyo caso se usa extensamente una válvula eléctrica operada por solenoides. Los controladores neumáticos proporcionales con ganancias muy altas funcionan como controladores de dos posiciones y, en ocasiones, se denominan controladores neumáticos de dos posiciones se muestra un sistema de control del líquido que es controlado por una acción de control de dos posiciones.

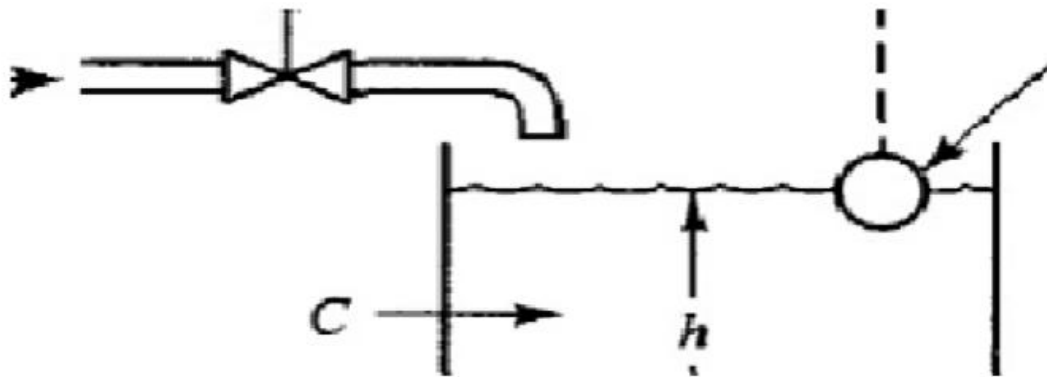


FIGURA 1 MODO OFF-ON

La salida del controlador ON-OFF, o de dos posiciones, solo puede cambiar entre dos valores al igual que dos estados de un interruptor. El controlador no tiene la capacidad para producir un valor exacto en la variable controlada para un valor de referencia dado pues el controlador produce una continua desviación del valor de referencia. La acción del controlador de dos posiciones tiene un simple mecanismo de construcción, por esa razón este tipo de controladores es de los de más amplio uso, y comúnmente utilizados en sistemas de regulación de temperatura.

Los controladores mecánicos de dos posiciones normalmente poseen algo de histéresis, por el contrario, los controladores electrónicos usualmente funcionan sin histéresis.

La histéresis está definida como la diferencia entre los tiempos de apagado y encendido del controlador.

El usar un controlador de acción de dos posiciones da como resultado una oscilación de la variable controlada, x . Para determinar la regulación del controlador, son importantes los parámetros amplitud y período de tiempo de la oscilación. La oscilación depende de muchos factores, el período de tiempo está en función del tiempo muerto del sistema y la posible histéresis del controlador. La histéresis también está directamente influenciada por la amplitud de la oscilación la cual es adicionalmente dependiente de los valores del factor de histéresis K_{is} y la magnitud del escalón en la variable de entrada.

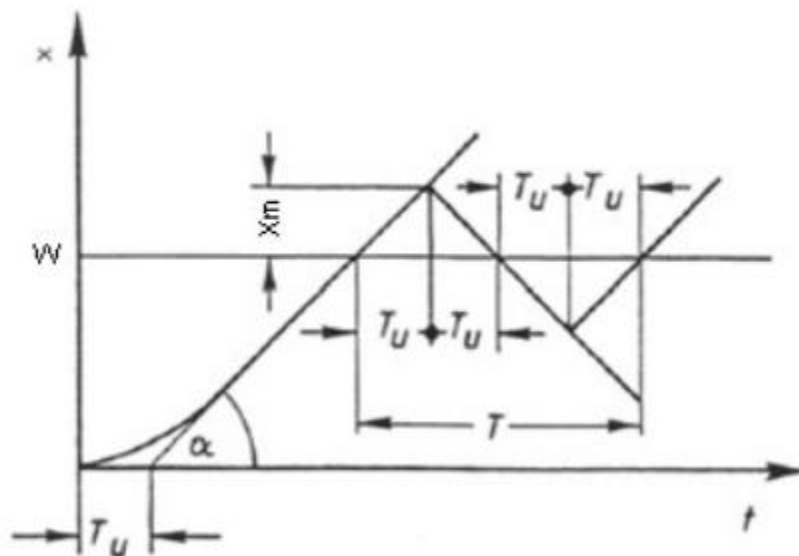


FIGURA 2 PLANTA INTEGRAL CON CONTROLADOR ON-OFF SIN HISTÉRESIS.

T_u = Tiempo muerto del sistema

w = Valor de referencia

T = Período de la oscilación

x_m = Ancho de sobreimpulso de la oscilación

La Figura 2 muestra las características dinámicas de un sistema de regulación, usando un controlador de dos posiciones en una planta integral sin compensación como un resultado del tiempo de retardo en la planta y con histéresis igual a cero, la oscilación se produce con un período de tiempo de:

$$T = 4T_u$$

La amplitud de oscilación está principalmente determinada por los valores característicos del factor de histéresis (K_{is}) y la magnitud de cambio de la variable de entrada, Δy :

$$X_M = K_{is} \times \Delta y \times T_u$$

Donde:

$$K_{is} = vx / \Delta y, \Delta y = 10V$$

$$vx = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

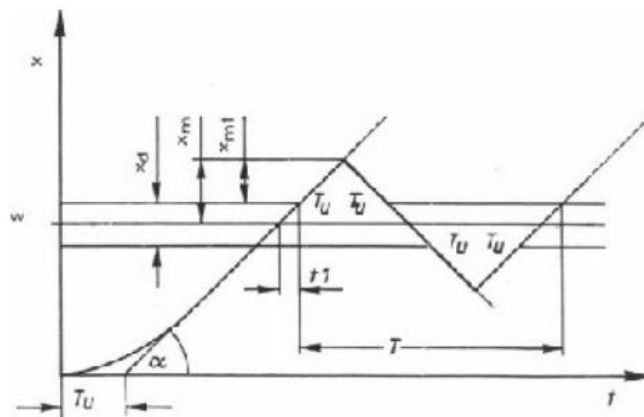


FIGURA 3 PLANTA INTEGRAL CON CONTROLADOR ON-OFF CON HISTÉRESIS XD

Si el controlador de dos posiciones posee histéresis, entonces la amplitud y período de las oscilaciones están definidos por:

$$T = 4T_u + 4t_1$$

y relacionando otras variables:

$$T = 4 \left(T_u + \frac{x_d}{2K_{is}\Delta y} \right)$$

Donde x_d es la banda de histéresis del controlador. La variable x_d debe ser sumada a la amplitud de la oscilación, y está dada por:

$$X_M = K_{is}\Delta y T_u + \frac{x_d}{2}$$

Las fórmulas dadas solo son válidas para plantas que poseen idénticos tiempos de caída y subida de la variable controlada. Para un sistema de orden superior con un controlador de dos posiciones y considerando una histéresis de cero, se puede aproximar la respuesta con las siguientes ecuaciones:

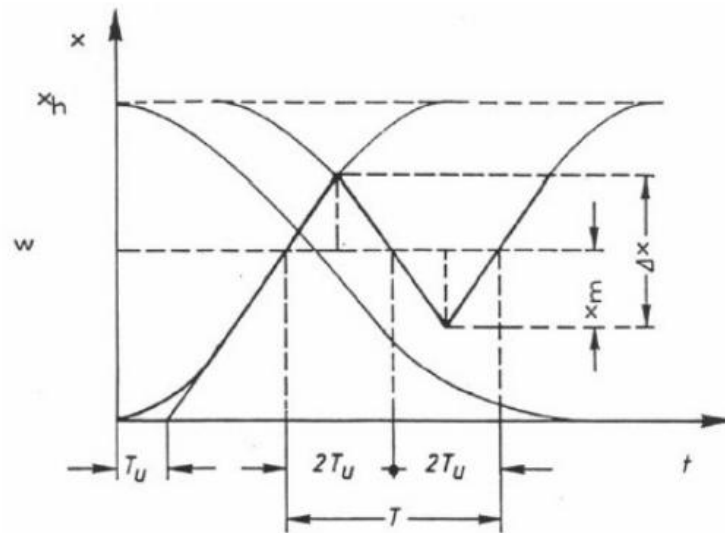


FIGURA 4 SISTEMA DE ORDEN SUPERIOR CON CONTROLADOR ON-OFF SIN HISTÉRESIS

El periodo de la oscilación será:

$$T = 4T_u$$

Al mismo tiempo X_M está dado por:

$$X_M = x_h \frac{T_u}{T_g}$$

Donde x_h es el máximo valor que toma la salida, en los módulos del laboratorio es 10V. Sin embargo, los sistemas de primer orden presentan un crecimiento exponencial, por lo que se presenta el siguiente método de cálculo para la amplitud:

$$X_M = \frac{x_h}{2} (1 - e^{-T_u / T_g})$$

Si el controlador tiene histéresis, la amplitud de la oscilación será:

$$X_M = \frac{x_h}{2} \left[1 - \left(1 - \frac{2x_d}{x_h} \right) e^{-T_u / T_g} \right]$$

4.2.2 PROPORCIONAL

Acción de control proporcional para un controlador con acción de control proporcional, la relación entre la salida del controlador $u(t)$ y la señal de error $e(t)$ es:

$u(t) = k_p e(t)$ o bien, en cantidades transformadas por el método de Laplace $U(s) = k_p E(s)$ en donde k_p se considera la ganancia proporcional cualquiera que sea el mecanismo real y la forma de la potencia de operación, el controlador proporcional es, en esencia, un amplificador con una ganancia ajustable. El controlador proporcional es el tipo más simple de controlador, con excepción del controlador de dos estados (del cual se hace mención en la primera parte del texto) la ecuación con que se describe su funcionamiento es la siguiente:

$$M(T) = M + K_C \cdot C(R) \cdot R(T) - C(R) \quad \text{O} \quad M(T) = M + K_C \cdot E(R)$$

DONDE:

$M(T)$ = Salida del controlador, psig o ma

$R(T)$ = Punto de control, psig o ma

$C(R)$ = Variable que se controla, psig o ma; ésta es la señal que llega del transmisor.

$E(R)$ = Señal de error, psi o ma; ésta es la diferencia entre el punto de control y la variable que se controla.

K_C = Ganancia del controlador, psi/psi ó ma/ma

M = Valor base, psig o ma.

El significado de este valor es la salida del controlador cuando el error es cero; generalmente se fija durante la calibración del controlador, en el medio de la escala 9 psig o 12 ma.

Es interesante notar que es para un controlador de acción inversa; si la variable que se controla, $c(t)$, se incrementa en un valor superior al punto de control, $r(t)$, el error se vuelve negativo y, como se ve en la ecuación, la salida del controlador, $m(t)$, decrece. La manera común con que se designa matemáticamente un controlador de acción directa es haciendo negativa la ganancia del controlador, k_c ; sin embargo, se debe recordar que en los controladores industriales no hay ganancias negativas, sino únicamente positivas, lo cual se resuelve con el selector inverso/directo.

El k_c negativo se utiliza cuando se hace el análisis matemático de un sistema de control en el que se requiere un controlador de acción directa. Se ve que la salida del controlador es proporcional al error entre el punto de control y la variable que se controla; la proporcionalidad la da la ganancia del controlador, k ; con esta ganancia o sensibilidad del controlador se determina cuánto se modifica la salida del controlador con un cierto cambio de error esto se ilustra gráficamente.

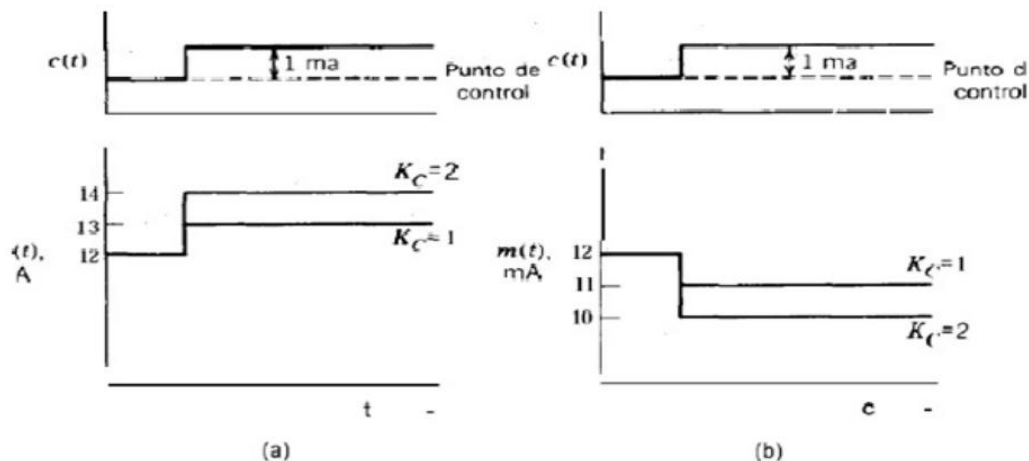


FIGURA 5 MODO PROPORCIONAL

Efecto de la ganancia del controlador sobre la salida del controlador. A controlador de acción directa. B controlador de acción inversa.

Los controladores que son únicamente proporcionales tienen la ventaja de que solo cuentan con un parámetro de ajuste; k_c , sin embargo, adolecen de una gran desventaja, operan con una desviación, o "error de estado estacionario" en la variable que se controla. A fin de apreciar dicha desviación gráficamente, considérese el circuito de control de nivel que se muestra en la Figura 82; supóngase que las condiciones de operación de diseño son $q_i = q_o = 150$ gpm y $h = 6$ pies; supóngase también que, para que pasen 150 gpm por la válvula de salida la presión de aire sobre ésta debe ser de 9 psig. Si el flujo de entrada se incrementa, q_i , la respuesta del sistema con un controlador proporcional es como se ve. El controlador lleva de nuevo a la variable a un valor estacionario pero este valor no es el punto de control requerido; la diferencia entre el punto de control y el valor de estado estacionario de la variable que se controla es la desviación. Se muestran dos curvas de respuesta que corresponden a dos diferentes valores del parámetro de ajuste k_c , se aprecia que cuanto mayor es el valor de k_c , tanto menor es la desviación, pero la respuesta del proceso se hace más oscilatoria; sin embargo, para la mayoría de los procesos existe un valor máximo de k_c , más allá del cual el proceso se hace inestable. En la figura 83 se observan las variaciones de K_c y k_c , con respecto al punto de control tomado el error de estado originando desviación en la señal.

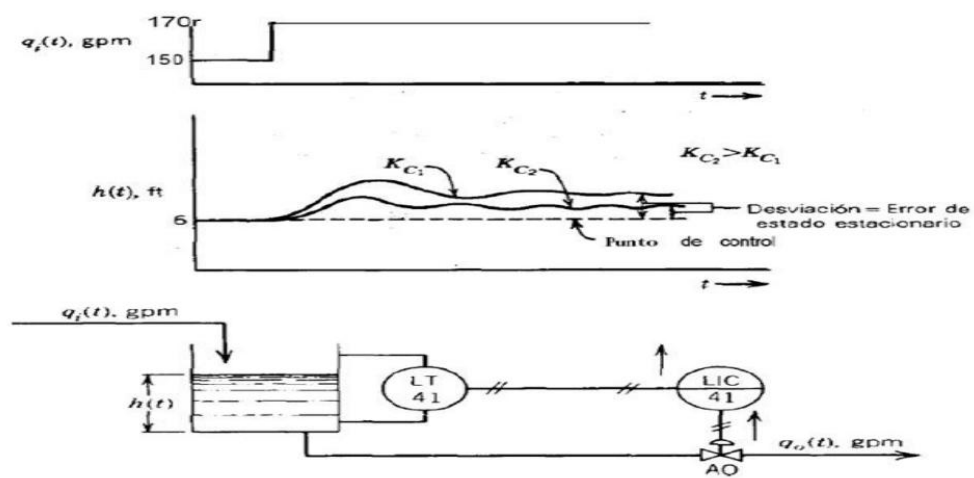


FIGURA 6 TEORÍA DE CONTROL PROPORCIONAL O ACCIÓN PROPORCIONAL

4.2.3 PROPORCIONAL + INTEGRAL

La mayoría de los procesos no se pueden controlar con una desviación, es decir, se deben controlar en el punto de control, y en estos casos se debe añadir inteligencia al controlador proporcional, para eliminar la desviación. Esta nueva inteligencia o nuevo modo de control es la acción integral o de reajuste y, en consecuencia, el controlador se convierte en un controlador proporcional-integral (pi) (ver figura 84). La siguiente es su ecuación descriptiva:

$$MT = M + KC * CR * RT - CR + KC * TI * RT - CR * DT$$

$$MT = M + KC * ET + KC * TI * ET * DT$$

Donde:

Ti; Tiempo de integración o reajuste minutos/repetición. Por lo tanto, el controlador pi tiene dos parámetros, kc, y Ti, que se deben ajustar para obtener un control satisfactorio. Para entender el significado físico del tiempo de reajuste, ti, considérese el ejemplo hipotético que se muestra, donde 7, es el tiempo que toma al controlador repetir la acción proporcional y, en consecuencia, las unidades son minutos/repetición. Tanto menor es el valor de ti, cuanto más pronunciada es la curva de respuesta, lo cual significa que la respuesta del controlador se hace más rápida.

Respuesta del controlador proporcional integral (pi) (acción directa) a un cambio escalón en el error. Otra manera de explicar esto es mediante la observación de la ecuación, tanto menor es el valor de T_i , cuanto mayor es el término delante de la integral, $K_c T_i$ y, en consecuencia, se le da mayor peso a la acción integral o de reajuste. De la ecuación también se nota que, mientras está presente el término de error, el controlador se mantiene cambiando su respuesta y, por lo tanto, integrando el error, para eliminarlo; recuérdese que integración también quiere decir sumatoria. la función de transferencia del controlador es: $K_p(1 + 1/sT_i)$.

En donde K_p , es la ganancia proporcional y T_i se denomina tiempo integral. Tanto K_p como T_i son ajustables. el tiempo integral ajusta la acción de control integral, mientras que un cambio en el valor de K_p afecta las partes integral y proporcional de la acción de control. El inverso del tiempo integral T_i se denomina velocidad de reajuste. La velocidad de reajuste es la cantidad de veces por minuto que se duplica la parte proporcional de la acción de control. La velocidad de reajuste se mide en términos de las repeticiones por minuto. Si la señal de error $e(t)$ es una función escalón unitario, la salida del controlador $u(t)$ se convierte en lo que se muestra.

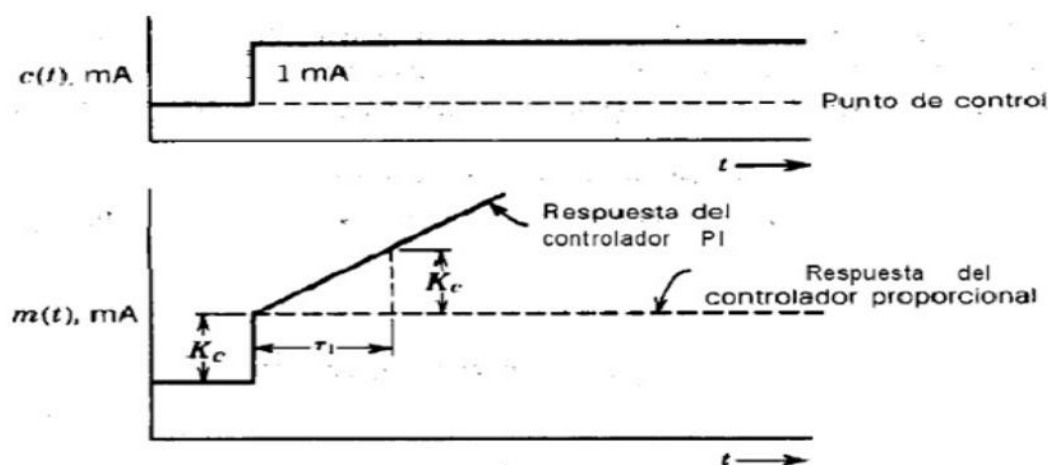


FIGURA 7 MODO PROPORCIONAL + INTEGRAL

4.2.4 Proporcional + Derivativo (PD)

Fundamentos técnicos del control PD

El controlador PD combina acción proporcional y derivativa:

- **Ecuación en tiempo continuo:**

$$u(t) = K_P \cdot e(t) + K_D \cdot \frac{d}{dt} e(t)$$

En el dominio de Laplace, su función de transferencia es

$$K(s) = K_P + K_D \cdot s$$

es decir, añade un cero en

$$s = -\frac{K_P}{K_D}$$

- **Respuesta dinámica:** El término derivativo “predice” el error futuro, aportando amortiguamiento y adelantando la acción de control. Esto acelera la respuesta transitoria y reduce oscilaciones respecto a un controlador solo proporcional. En lazo cerrado, la fase del controlador PD aporta hasta $+90^\circ$ a altas frecuencias, aumentando el margen de fase y mejorando la estabilidad.
- **Filtro antiruido:** En la práctica se suele incluir un pequeño polo de filtro (constante de tiempo) en el término derivativo:

$$K(s) = K_P + \frac{K_D \cdot s}{T_f \cdot s + 1}$$

Esto limita la ganancia a altas frecuencias y atenúa el ruido. Por ejemplo, para un sistema de primer orden $G(s) = 1/(25s + 1)$ con $K(s) = 10 + s/(0.05s + 1)$, el tiempo de respuesta efectivo en lazo cerrado se redujo de 25 s a $\approx 2.5\text{ s}$.

Aplicaciones prácticas del control PD

El PD se usa en sistemas donde se requiere respuesta rápida y buena estabilidad sin necesidad de eliminar totalmente el error estacionario. Ejemplos típicos:

- **Procesos por lotes (química):** Regulación de pH o temperatura donde se tolera un offset en régimen estacionario. En estos casos, el PD acelera la corrección tras perturbaciones sin buscar error cero.
- **Servomecanismos y motores:** Control de posición y velocidad en robots o actuadores. Por ejemplo, servomotores DC/Bldc emplean PD (a veces con compensación de gravedad) para acelerar el movimiento y evitar oscilaciones.
- **Automatización industrial:** Sistemas de control de posición, velocidad o nivel en lazo rápido (como válvulas y actuadores neumáticos) usan PD para mejorar el seguimiento de setpoint. También aparece en control de vuelo y estabilidad automotriz (para anticipar perturbaciones rápidas).
- **Instrumentación:** En sistemas de medición y control de temperatura/flujo de respuesta rápida, la acción D puede amortiguar vibraciones o fluctuaciones bruscas. En general se emplea en lazos dinámicos donde prima la rapidez y estabilidad, más que la precisión absoluta en régimen estacionario.

Ventajas y desventajas del control PD

- **Ventajas:** Mejora la estabilidad y amortigua el sistema, reduciendo sobreimpulso y oscilaciones. Acelera la respuesta transitoria (tiempo de subida menor). Además, al no tener integrador es más sencillo que un PID (menos parámetros que ajustar) y no sufre *windup*. Puede combinarse con otras acciones (por ejemplo PID en cascada) para ajustes finos.
- **Desventajas:** No elimina el error estacionario (el offset permanente persiste). Es muy sensible al ruido en la señal de error, por lo que exige filtrado y hardware de mejor resolución. Comparado con P puro, el PD es más complejo (requiere medir la derivada). Frente a un PID, el PD resulta en menos precisión final (sin corrección integral) aunque es más simple y rápido.

Ejemplos ilustrativos

Figura: Respuesta escalón en lazo cerrado con controlador PD. La curva azul muestra cómo el sistema alcanza rápidamente la referencia (línea punteada) sin gran sobreimpulso, gracias a la acción derivativa diseñada (por ejemplo $K_p = 10$, $K_D = 1$, con filtro $T_f = 0.05$.)

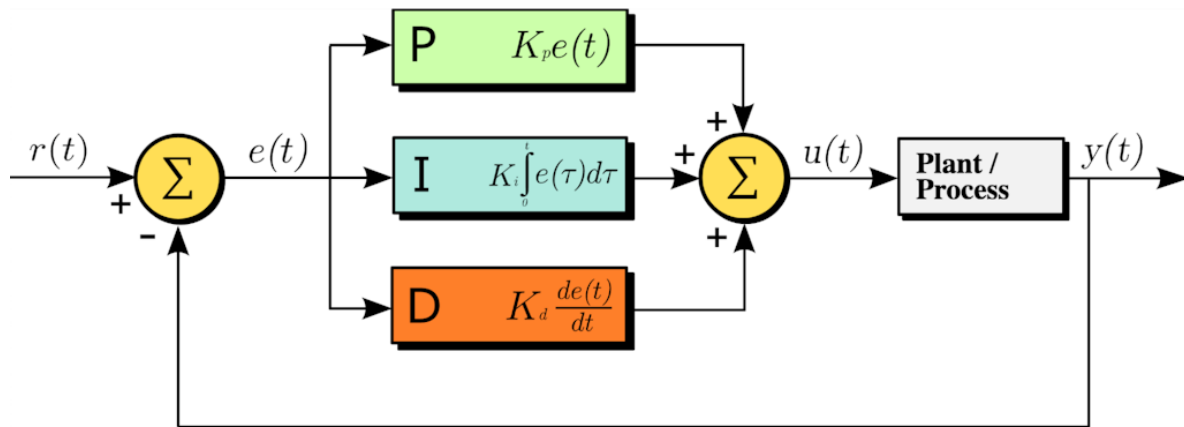
El gráfico anterior ejemplifica la mejora en la respuesta transitoria aportada por el término D. Sin el derivativo, la respuesta con solo K_P sería más lenta y oscilatoria. En el diagrama de bloques típico de un sistema de control, el controlador PD se implementa sumando la rama proporcional K_P y la derivativa K_D sobre la señal de error. Al incrementar la ganancia derivativa, se observa menor tiempo de establecimiento y amortiguamiento adicional.

En resumen, el control PD **anticipa** el error utilizando la derivada, lo que conduce a un sistema más rápido y amortiguado que con P puro. Sin embargo, para una regulación sin error estacionario se requiere añadir acción integral, dando lugar al clásico PID.

4.2.5 PID (Proporcional-Integral-Derivativo)

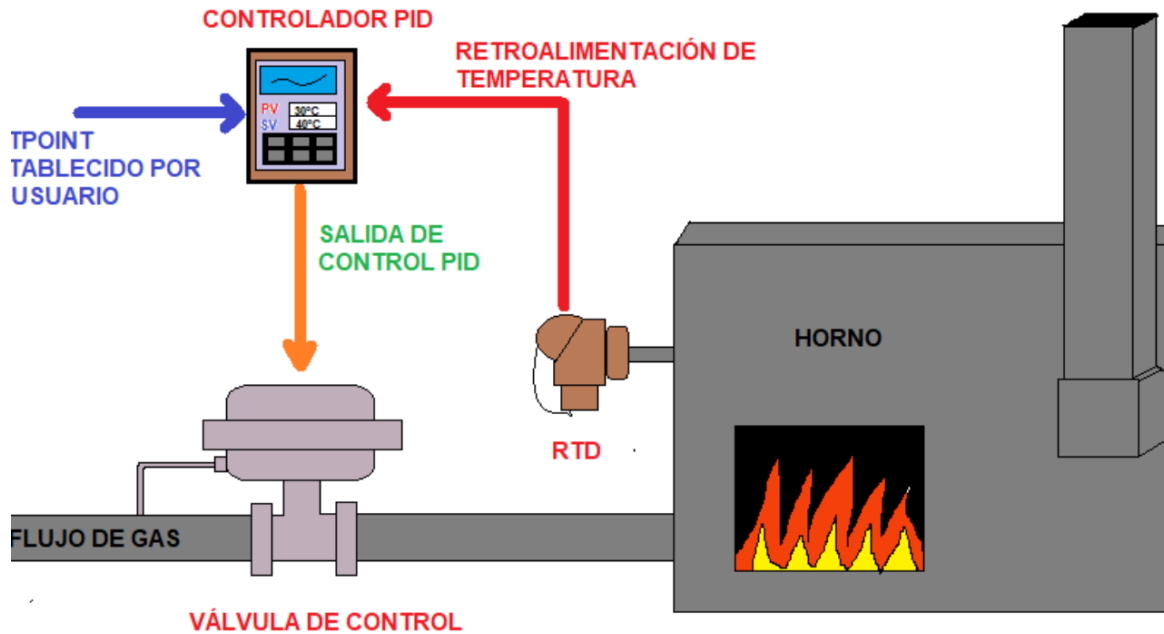
¿Qué es un controlador PID?

Un controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) es un mecanismo de control por realimentación (bucle cerrado) ampliamente utilizado en sistemas de control industrial y otras aplicaciones que requieren una regulación continua. Su popularidad se debe a su robustez, simplicidad relativa de implementación y buen rendimiento en una gran variedad de sistemas dinámicos.



¿Cuál es su propósito fundamental en los sistemas de control?

El propósito fundamental de un controlador PID es mantener una variable de proceso (PV - Process Variable) en un valor deseado o punto de ajuste (SP - Setpoint). Lo hace calculando continuamente un valor de "error" ($e(t)$) como la diferencia entre el SP y la PV, $e(t) = SP - PV$. Luego, aplica una corrección basada en los términos proporcional, integral y derivativo de este error para ajustar la salida del controlador (OP - Output) y, por ende, la acción del actuador sobre el proceso. El objetivo es minimizar este error a lo largo del tiempo, llevándolo idealmente a cero.



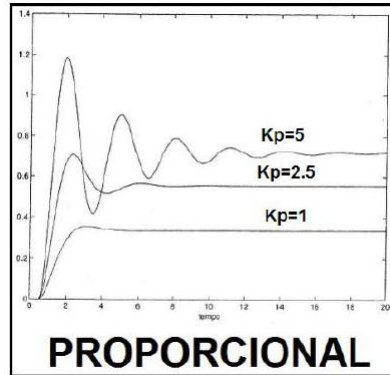
El controlador PID calcula una señal de salida (OP) que es la suma de tres términos:

$$OP(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out}$$

- **Término Proporcional (P):**

- **Cómo responde al error actual:** El término proporcional produce una salida que es directamente proporcional al error actual. Si el error es grande, la salida de control también lo será; si el error es pequeño, la salida será pequeña $P_{out} = K_p \cdot e(t)$.
- **Efecto de la ganancia proporcional (K_p) en la respuesta del sistema:**
 - **Aumento de K_p :** Aumenta la velocidad de respuesta del sistema. Reduce el error de estado estacionario (aunque no siempre lo elimina por completo en presencia de perturbaciones). Puede llevar a una respuesta más oscilatoria y, si es demasiado alto, a la inestabilidad del sistema (rebasamiento excesivo u oscilaciones sostenidas).

- **Disminución de Kp:** Hace la respuesta más lenta y menos oscilatoria, pero puede resultar en un error de estado estacionario mayor.



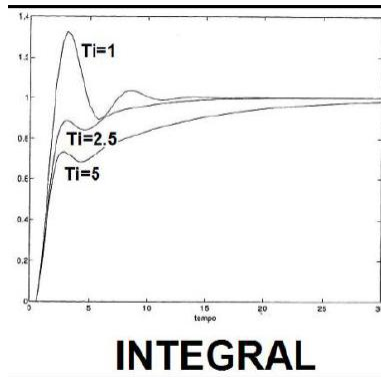
- **Término Integral (I):**

- **Cómo responde a la acumulación de errores pasados:** El término integral suma (integra) el error a lo largo del tiempo. Su acción continúa mientras exista un error, incluso si este es pequeño. Su propósito principal es eliminar el error de estado estacionario.

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

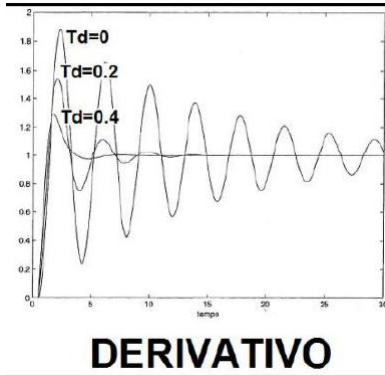
- **Efecto de la ganancia integral (Ki) en la eliminación del error de estado estacionario y posibles efectos secundarios:**
 - **Aumento de Ki:** Acelera la eliminación del error de estado estacionario. Sin embargo, un valor demasiado alto puede causar un mayor rebasamiento (overshoot) y oscilaciones, e incluso inestabilidad.
 - **Disminución de Ki:** Ralentiza la eliminación del error de estado estacionario.
 - **Saturación integral (Integral Windup):** Si el error persiste durante mucho tiempo (por ejemplo, debido a la saturación del

actuador), el término integral puede acumular un valor muy grande. Cuando el error finalmente cambia de signo, este valor acumulado (windup) puede causar un rebasamiento significativo y un retraso en la respuesta del sistema para volver al punto de ajuste. Se requieren técnicas anti-windup para mitigar este problema.



- **Término Derivativo (D):**
 - **Cómo responde a la tasa de cambio del error (predicción del error futuro):** El término derivativo responde a la rapidez con la que cambia el error. Actúa como un "freno" o "amortiguador", anticipando el comportamiento futuro del error y generando una acción de control que contrarresta los cambios rápidos. $D_{out} = K_d \frac{de(t)}{dt}$
 - **Efecto de la ganancia derivativa (K_d) en la mejora de la estabilidad, reducción del rebasamiento y su sensibilidad al ruido:**
 - **Aumento de K_d :** Mejora la estabilidad del sistema, reduce el rebasamiento y el tiempo de establecimiento. Permite usar una ganancia proporcional (K_p) más alta.
 - **Disminución de K_d :** Puede llevar a una respuesta más oscilatoria.

- **Sensibilidad al ruido:** La acción derivativa es muy sensible al ruido de alta frecuencia en la señal de error, ya que el ruido se caracteriza por cambios rápidos. Esto puede causar que la salida del controlador sea errática y "nerviosa", desgastando los actuadores. Por ello, a menudo se aplica un filtro a la acción derivativa o se utiliza con precaución.



La Ecuación del Controlador PID

- **Dominio del Tiempo:** La forma estándar de la ecuación del controlador PID en

el dominio del tiempo es: $u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$

Donde:

- $u(t)$: Salida del controlador (señal de control).
- $e(t)$: Error (SP-PV).
- K_p : Ganancia proporcional.
- K_i : Ganancia integral.
- K_d : Ganancia derivativa.
- t : Tiempo.
- τ : Variable de integración.

A veces, las ganancias se expresan en términos del tiempo integral (T_i) y el tiempo derivativo (T_d):

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}$$

$$K_d = K_p \cdot T_d$$

La ecuación se convierte en: $u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$

- **Dominio de Laplace:** Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación del PID (asumiendo condiciones iniciales cero):

$$U(s) = K_p E(s) + \frac{K_i}{s} E(s) + K_d s E(s)$$

$$U(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \right) E(s)$$

La función de transferencia del controlador PID es:

$$C(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right)$$

Sintonización de Controladores PID (Tuning)

- **Importancia de la sintonización:** La sintonización es el proceso de ajustar los parámetros del controlador (K_p, K_i, K_d o K_p, T_i, T_d) para lograr el rendimiento deseado del sistema de control. Un controlador mal sintonizado puede llevar a una respuesta lenta, oscilaciones excesivas, inestabilidad o un rendimiento subóptimo del proceso.
- **Métodos comunes de sintonización:**
 - **Manual:** Este método implica ajustar las ganancias basándose en la experiencia del operador y la observación de la respuesta del sistema. Generalmente se comienza con K_i y K_d en cero, se aumenta K_p hasta obtener una respuesta oscilatoria, luego se ajusta K_i para eliminar el error de estado estacionario y finalmente K_d para mejorar la estabilidad y reducir el rebasamiento. Es un proceso iterativo.
 - **Reglas de Ziegler-Nichols:** Son métodos heurísticos desarrollados empíricamente.
 - **Método de la oscilación (o del lazo cerrado):** Se pone el controlador en modo solo proporcional (K_i y K_d desactivados o $T_i = \infty, T_d = 0$). Se incrementa K_p (llamado K_u , ganancia última) hasta que el sistema comienza a oscilar de forma sostenida y estable. Se registra K_u y el período de oscilación (P_u). Luego, se calculan

los parámetros PID usando tablas predefinidas por Ziegler y Nichols.

- **Método de la curva de reacción (o del lazo abierto):** Se aplica un cambio escalón en la entrada del proceso (en lazo abierto o con el controlador en manual) y se registra la respuesta. Se determinan parámetros de la curva como el retardo (L) y la constante de tiempo (T) o la máxima pendiente. Estos valores se usan en fórmulas para calcular K_p, T_i, T_d .
- **Métodos basados en software y auto-sintonización (Autotuning):** Muchos sistemas de control digital (DCS, PLC) y software especializado (como MATLAB, Simulink) ofrecen herramientas de auto-sintonización. Estos algoritmos pueden aplicar automáticamente estímulos al sistema, analizar la respuesta y calcular los parámetros PID óptimos según ciertos criterios de rendimiento.
- **Objetivos típicos de la sintonización:**
 - **Estabilidad:** El sistema no debe oscilar sin control.
 - **Respuesta rápida:** El sistema debe alcanzar el punto de ajuste rápidamente después de un cambio o perturbación.
 - **Mínimo rebasamiento (Overshoot):** La variable de proceso no debe exceder significativamente el punto de ajuste.
 - **Sin error de estado estacionario:** La variable de proceso debe coincidir con el punto de ajuste una vez que el sistema se ha estabilizado.
 - **Robustez:** El controlador debe funcionar bien a pesar de las variaciones en los parámetros del proceso o perturbaciones externas.
 - **Minimizar el desgaste del actuador:** Evitar cambios rápidos y agresivos en la salida del controlador.

Ventajas de los Controladores PID

- **Simplicidad conceptual y de implementación:** La estructura básica del PID es fácil de entender y, en muchos sistemas modernos, su implementación digital es sencilla.
- **Robustez:** Funcionan razonablemente bien para una amplia gama de procesos lineales o aproximadamente lineales, incluso si el modelo exacto del proceso no se conoce.
- **Familiaridad y amplia aceptación:** Son la técnica de control más conocida y utilizada en la industria, lo que significa que hay una gran cantidad de personal técnico familiarizado con su operación y sintonización.
- **Buen rendimiento general:** Para muchos sistemas, un PID bien sintonizado puede proporcionar un control excelente.
- **Coste-efectividad:** Su implementación en software o hardware dedicado suele ser económica.

Desventajas y Limitaciones de los Controladores PID

- **No son óptimos para sistemas altamente no lineales:** El PID es un controlador lineal. Su rendimiento puede degradarse significativamente en procesos con no linealidades fuertes.
- **Problemas con retardos de tiempo significativos (Dead Time):** Los retardos de tiempo grandes pueden hacer que el sistema sea difícil de controlar con un PID estándar y pueden requerir estrategias de control más avanzadas (como el controlador Smith Predictor).
- **Sistemas con dinámicas complejas o de orden muy alto:** Pueden ser difíciles de controlar eficazmente solo con un PID.

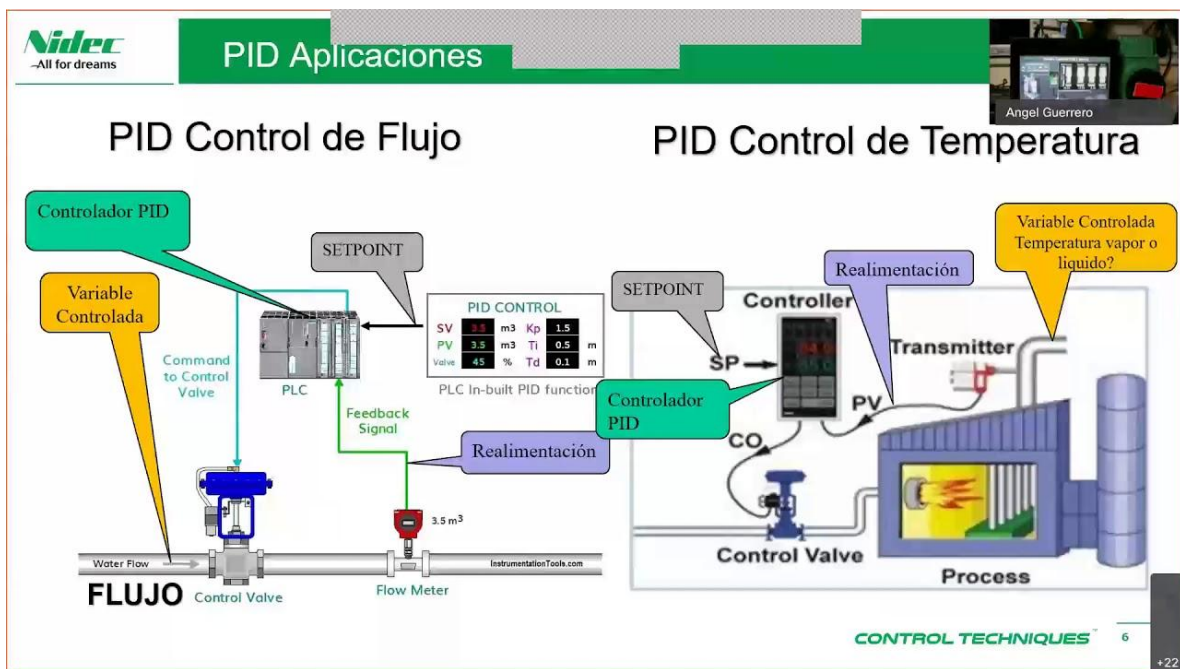
- **La sintonización puede ser un proceso iterativo y que consume tiempo:** Aunque existen métodos sistemáticos, encontrar los parámetros óptimos puede requerir esfuerzo y experiencia, especialmente para procesos complejos o con requisitos de rendimiento muy estrictos.
- **Sensibilidad del término derivativo al ruido:** El ruido en la medición de la variable de proceso puede ser amplificado por la acción derivativa, causando una salida de control ruidosa y desgaste del actuador. Se suelen usar filtros, pero esto añade complejidad.
- **"Integral Windup":** Si no se gestiona con técnicas anti-windup, la acumulación del término integral durante la saturación del actuador puede llevar a un rebasamiento grande y una recuperación lenta.
- **Respuesta subóptima en comparación con técnicas avanzadas:** Para sistemas que lo requieren, técnicas de control moderno (control predictivo, adaptable, robusto, etc.) pueden ofrecer un rendimiento superior, aunque a costa de una mayor complejidad.

Aplicaciones Comunes de los Controladores PID

Los controladores PID se encuentran en una vastísima cantidad de aplicaciones, incluyendo:

- **Control de temperatura:** Hornos industriales, sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), reactores químicos, extrusoras de plástico.
- **Control de nivel:** Tanques de almacenamiento de líquidos, calderas.
- **Control de flujo:** Tuberías en procesos químicos, sistemas de riego, dosificación de ingredientes.
- **Control de presión:** Sistemas neumáticos e hidráulicos, calderas, reactores.
- **Control de velocidad:** Motores eléctricos (variadores de frecuencia), turbinas.

- **Control de posición:** Servomotores en robótica, máquinas herramienta CNC, sistemas de seguimiento solar.
- **Robótica:** Control de las articulaciones y efectores finales de los robots.
- **Sistemas de piloto automático:** Drones, barcos, aviones (control de altitud, rumbo, velocidad).
- **Industria automotriz:** Control de crucero, ralentí del motor.
- **Procesos industriales generales:** Plantas químicas, refinerías, fábricas de papel, centrales eléctricas, tratamiento de aguas.



4.3 Criterios para la Selección de un controlador

Los controladores son dispositivos fundamentales que regulan el comportamiento de procesos industriales o de laboratorio. Su adecuada selección es vital para garantizar **estabilidad, precisión y eficiencia** en el sistema. Un controlador mal seleccionado puede generar inestabilidad, respuestas lentas o incluso daños al proceso.

Existen distintos tipos de controladores como **PID, lógicos programables (PLC), DCS (Distributed Control Systems)** y **controladores industriales dedicados**. Cada uno tiene aplicaciones específicas y se selecciona con base en diversos **criterios técnicos y económicos**.

Table: Controller selection criteria

Characteristics	Relay/timer	Smart relay	PLC	PAC
Maximum I/O	10	20	Up to 2,000	Up to 100,000
Footprint	Largest	Smallest	Depends on I/O quantity	Depends on I/O quantity
Local expansion capability	n/a	n/a	Medium	High
Remote expansion capability	n/a	n/a	Medium	High
Programming languages	n/a	Ladder, some function blocks	Ladder and maybe others, specialty function blocks	Multiple-Ladder, structured text, function block, etc.
Programming software cost	n/a	Free to low	Free to medium	Medium to high
Hardware cost	Lowest	Low	Medium	High
Program memory	n/a	Low	High	Very high
Ease of use	Easiest	Easy	Medium	Difficult
Flexibility	Very low	Low	High	High
Connectivity to other systems	Hard-wired only	One communication port and protocol	Multiple communication ports and protocols	Multiple communication ports and protocols

PRINCIPALES CRITERIOS DE SELECCIÓN

Tipo de proceso a controlar

- ✓ **Dinámica del proceso:** Es necesario entender la respuesta del sistema (rápida, lenta, estable o inestable).
- ✓ **Tipo de variable:** Presión, temperatura, caudal, nivel, velocidad, entre otros.
- ✓ **Naturaleza del proceso:** Procesos continuos (ej. refinerías) o procesos por lotes (ej. farmacéuticas).

Requerimientos de control

- **Exactitud**
- **Estabilidad**
- **Tiempo de respuesta**
- **Tipo de control:**
 - Control **On-Off** (todo o nada)
 - Control **Proporcional**
 - Control **PID** (Proporcional, Integral, Derivativo)
 - Control adaptativo, robusto o predictivo.

Tipo de controlador

- ❖ **Controladores PID analógicos o digitales:** Comunes para la mayoría de los procesos industriales.
- ❖ **PLC (Controladores Lógicos Programables):** Útiles para múltiples entradas y salidas, automatización y procesos discretos.
- ❖ **Sistemas DCS:** Usados para plantas grandes con miles de variables distribuidas geográficamente.
- ❖ **Controladores embebidos:** Integrados en sensores o actuadores para tareas específicas.

Capacidad de comunicación e integración

- **Protocolos de comunicación:** Modbus, Profibus, Ethernet/IP, CANopen, etc.

- **Compatibilidad** con sistemas SCADA, HMI, sensores y actuadores.
- **Capacidad de expansión:** Posibilidad de agregar más módulos o canales.

CONTROLADORES PARA AUTOMATIZACIÓN

○ **PLC- Controladores Lógicos Programables**

Los PLCs comenzaron su existencia como un reemplazo de los sistemas basados en lógica de relés usados en la industria automotriz. Posteriormente su funcionalidad se expandió para incluir entradas y salidas analógicas como 0-10 VCC o 4-20 mA. Los PLCs se usaban originalmente solo en tareas de automatización discreta (o de fábrica). La adición de capacidades analógicas ha permitido que se utilicen más ampliamente.

○ **DCS- Sistemas de Control Distribuido**

Los DCSs se desarrollaron para actuar como sistemas de control de procesos tales como refinerías de petróleo y plantas de tratamiento de agua. Actualmente los PLCs pueden cumplir con muchas de estas funciones, pero los DCSs se integran más estrechamente con las pantallas de interfaz de operador (como sistemas HMI, interfaz de máquina humana) y los sistemas de configuración de ingeniería.

○ **PAC- Controladores Programables de Automatización**

Los PACs (controladores programables de automatización) aprovechan las capacidades de procesamiento de computadoras para realizar las mismas funciones que los PLCs y DCSs. En realidad, los PLCs y DCSs son controlados por computadoras, pero estas usan tecnologías patentadas. Los PACs se asemejan más estrechamente a las computadoras de escritorio en cuanto a su funcionalidad, pero son más robustos para soportar las condiciones de uso en planta.

Criterios que pueden ayudar a seleccionar un tipo de controlador entre relés, temporizadores, instrumentos analógicos, relés inteligentes, controladores lógicos programables (PLC) y controladores de automatización programables (PAC).

Relés, temporizadores e instrumentos analógicos: A pesar de la proliferación de relés inteligentes y micro PLC económicos, cada año se construyen miles de sistemas de control con estos componentes básicos. La gran ventaja de estos sistemas es su simplicidad, ya que incluso el técnico más inexperto puede comprenderlos y solucionar sus problemas. No requieren programación; por lo tanto, no se necesitan licencias de software ni PC. Cuando el número de relés y temporizadores supera los cuatro, lo mejor es actualizar a un relé inteligente.

Relés inteligentes: Con el paso de los años, han adquirido mayor capacidad, difuminando la diferencia entre ellos y los micro PLC. Los relés inteligentes se pueden programar con software para PC, pero muchos también se pueden programar desde la pantalla del panel frontal. La lógica de escalera o los bloques de funciones son el lenguaje predilecto, y las capacidades analógicas varían de escasas a nulas.

PLC: Estos potentes controladores abarcan desde microcontroladores con aproximadamente 32 puntos de entrada/salida (E/S) integrados hasta sistemas completos capaces de gestionar miles de E/S. Los PLC se programan con software para PC, y cualquier cambio en el programa requiere una PC. Sin embargo, muchos parámetros se pueden ajustar con una interfaz de operador local, integrada con una combinación de PLC y unidades de interfaz hombre-máquina (HMI), una clase emergente de controladores que combina un PLC con una interfaz gráfica (Tabla 1).

Tabla 1: Criterios de selección del controlador

Características	Relé/temporizador	Relé inteligente	PLC	PAC
E/S máxima	10	20	Hasta 2.000	Hasta 100.000
Huella	Más grande	Pequeñísimo	Depende de la cantidad de E/S	Depende de la cantidad de E/S
Capacidad de expansión local	n / A	n / A	Medio	Alto
Capacidad de expansión remota	n / A	n / A	Medio	Alto
Lenguajes de programación	n / A	Escalera, algunos bloques de funciones	Escalera y tal vez otros bloques de funciones especiales	Escalera múltiple, texto de estructura, bloque de función, etc.
Costo del software de programación	n / A	Libre a bajo	Libre a medio	Medio a alto
Costo del hardware	Más bajo	Bajo	Medio	Alto
Memoria del programa	n / A	Bajo	Alto	Muy alto
Facilidad de uso	Lo más fácil	Fácil	Medio	Difícil
Flexibilidad	Muy bajo	Bajo	Alto	Alto
Conectividad con otros sistemas	Sólo cableado	Un puerto de comunicación y protocolo	Múltiples puertos y protocolos de comunicación	Múltiples puertos y protocolos de comunicación

PAC: La línea divisoria entre PLC de alta gama y PAC se vuelve a difuminar, pero esta vez. Sin embargo, los PAC ofrecen más capacidades que los PLC, especialmente para el control de sistemas muy complejos. Los PAC pueden gestionar control de movimiento avanzado, incorporar sistemas de visión y realizar control avanzado de bucles analógicos, un conjunto de tareas que podrían sobrecargar excesivamente un PLC.

Los sistemas de control distribuido (DCS) se excluyeron intencionalmente de este análisis, ya que la mayoría se basan actualmente en PAC. Si bien existen numerosas excepciones, estos criterios constituyen un buen punto de partida para la selección de controladores (Tabla 1). La Tabla 2 muestra el estado actual y el futuro previsto de estos mercados.

4.4 Sintonización de Controladores

Sintonizar un sistema de control realimentado significa regular parámetros en el controlador para lograr implementar un control robusto en el proceso. “Robusto” en este contexto es usualmente definido como la estabilidad de las variables de procesos a pesar de los cambios de carga, una rápida respuesta ante los cambios de setpoint, oscilaciones mínimas y un offset mínimo (error entre el setpoint y la variable de proceso) en el tiempo.

“**Control Robusto**” es mucho más fácil de definir que de lograrlo. El control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) es el algoritmo de control realimentado más usado en la industria, es importante que el ingeniero y/o técnico instrumentista entienda como se sintonizan estos controladores de manera efectiva y con una mínima inversión de tiempo.

En otras palabras, ***Los controladores son instrumentos que manipulan las distintas variables que hay*** en el proceso industrial que compensan los efectos de las perturbaciones del sistema. **Algunos de los controladores pueden no estar sintonizados** de la manera adecuada haciendo que el sistema este propensos a efectos que no son óptimos.

Un controlador PID es un mecanismo de control que a través de lazos de retroalimentación permite regular variables como la presión, la temperatura, la velocidad y el flujo y otras variables dentro del proceso industrial, **con estos controladores se puede calcular la diferencia entre la variable real y la variable deseada.**

La sintonización de los controladores es útil para aquellos casos en que la obtención de información sobre variables que son inherentes al proceso industrial no se conoce y resulta complicado obtener información sobre ellas.

Los procesos industriales están constantemente en función de perturbaciones que no son deseables, lo que hace que el sistema en su totalidad se desvíe del punto de operatividad que se desea.

MÉTODOS PARA LA SINTONIZAR DEL CONTROLADOR

Los métodos que se usan para sintonizar un controlador se basan en estudios que son experimentales y se hacen en base a la respuesta en diferentes tipos de sistema y experimentos que pueden dar resultados que no son los óptimos en primera instancia. Estos parámetros funcionan como puntos de partida que se van ajustando hasta que se obtiene una respuesta deseada.

Las variables inherentes al conocimiento del proceso industrial, como el modelo del proceso, el esquema de control y las restricciones del modelo que se imponen son algunas de las variables que se pueden completar cuando se sintoniza un controlador.

TIPOS DE RESPUESTA DE UN CONTROLADOR PID EN EL PROCESO DE SINTONIZACIÓN

Existen métodos cuantitativos de sintonización PID, estos intentan hacer un mapeo de las características del proceso industrial y con esto se obtienen como respuesta parámetros confiables PID para el controlador. Se pueden clasificar las respuestas

de este proceso en tres grupos: las integrativas, las auto-regulatorias y las inestables.

- **Tipo integrativo o integrating**

Este proceso responde con la variación de su valor planificado (PV) de manera constante, hacia arriba o hacia abajo en una proporción igual a la magnitud del cambio, del estímulo, escalón o impulso producido con el elemento final del control de válvula, que puede ser la válvula de control.

- **Tipo auto-regulatorios o self- regulating**

Este tipo de respuesta responde ante el estímulo, y luego se fija un nuevo valor planificado (PV). El estímulo puede ser un escalón unitario, o las variaciones de una apertura en la válvula de control.

- **Tipo inestables o Runaway**

Estos tipos de procesos se definen por la respuesta ante un estímulo. De manera general, se define por el cambio manual que es repentino sobre una señal de salida que tiene incidencia sobre el proceso, ya sea la posición de una válvula de control o de algún otro elemento final de control.

4.5 Comunicación del controlador con otros instrumentos

La comunicación entre controladores y los instrumentos en un sistema de control se establece a través de señales, ya sean analógicas o digitales, y protocolos que definen cómo se intercambia la información. Los controladores usan interfaces como USB, Ethernet o Bluetooth para comunicarse con los instrumentos. Además, la comunicación puede ser de tipo punto a punto o en red, utilizando protocolos como TCP/IP o CAN.

FORMAS DE COMUNICACIÓN

Señales analógicas

- Señales de corriente: 4-20 mA (más común)
- Señales de voltaje: 0-10 V
- Características:
 - Simples y ampliamente utilizadas
 - Limitadas en distancia y en protección frente a interferencias

Señales digitales

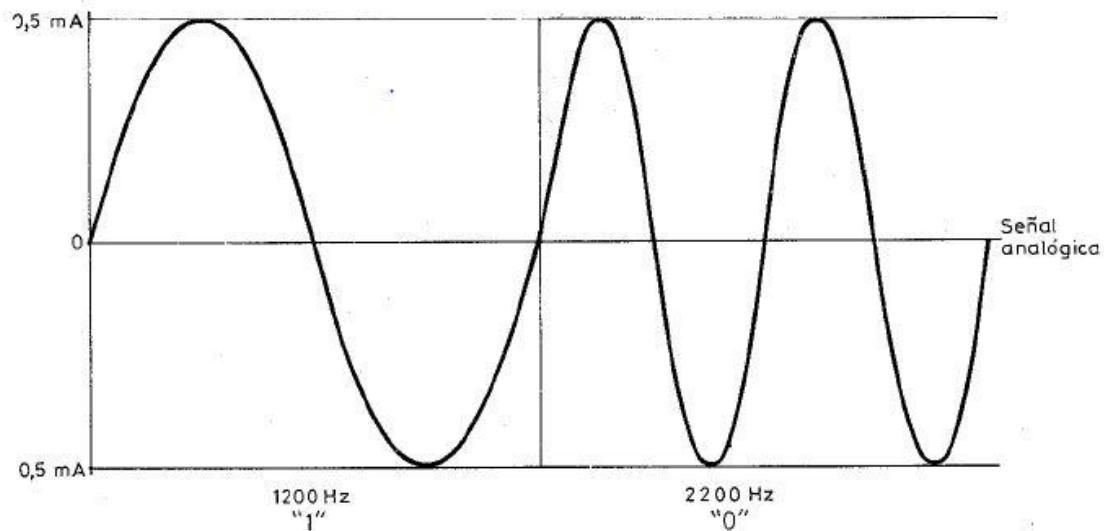
- Usan codificación binaria para transmitir información más compleja
- Más resistentes al ruido
- Usan señales discretas (0 o 1) para transmitir datos, ofreciendo mayor precisión y facilidad de manejo.

La mayor parte de las comunicaciones entre los instrumentos de proceso y el sistema de control se basan en señales analógicas. (neumáticas 0,2-1 bar utilizadas en pequeñas plantas y válvulas de control y electrónicas de 4 a 20 mA de corriente

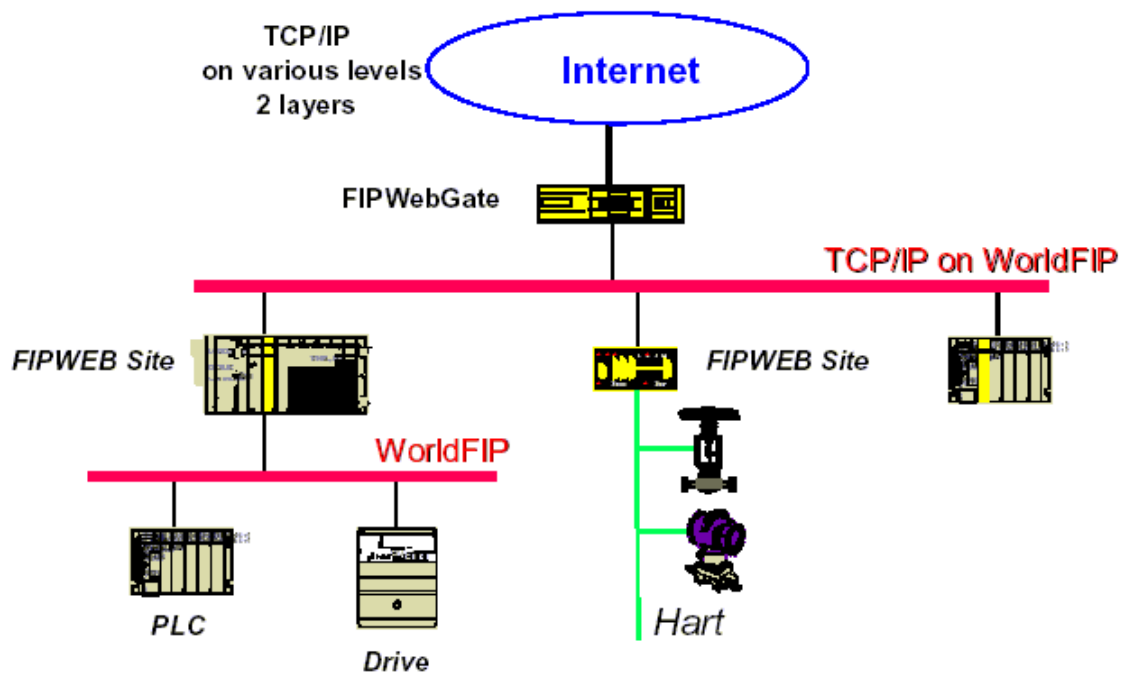
continua cc). Sin embargo, los instrumentos digitales capaces de manejar grandes volúmenes de datos y guardarlos en unidades históricas están aumentando día a día sus aplicaciones. Su precisión es unas diez veces mayor que la de la señal clásica de 4 a 20 mA. En lugar de enviar cada variable por un par de hilos de 4 a 20 mA, transmiten secuencialmente las variables a través de un cable de comunicaciones llamado bus.

La tecnología de buses de campo o Field bus es un protocolo de comunicaciones digital de alta velocidad que está en camino de sustituir a la clásica señal analógica de 4-20 mA. en todos los sistemas de control distribuido DCS y control lógico programable PLC, instrumentos de medida, transmisión y válvulas de control. La arquitectura de buses de campo conecta estos aparatos con computadores que pueden trabajar para muchos niveles en la dirección de la planta. Los protocolos desarrollados por los fabricantes no permiten al usuario final la intercambiabilidad o interoperatividad de sus instrumentos, es decir que no es posible sustituir un instrumento de un fabricante por otro similar de otro fabricante, ni intercambiar instrumentos de funcionalidad equivalente.

El protocolo HART (highway –addressable –remote-transducer) fue desarrollado por Rosemount inc. Agrupa la información digital sobre la señal analógica clásica de 4 a 20 mA. La señal digital usa dos frecuencias individuales de 1200 y 2200 Hz que representan los dígitos 1 y 0 y que forman una onda senoidal que se superpone sobre el lazo de corriente de 4-20mA. Como la señal promedio de una onda senoidal es cero, no se añade ninguna componente de CC a la señal analógica de 4-20mA a continuación podemos ver las señales que constituyen el protocolo HART. Este protocolo tiene la capacidad de soportar hasta 256 variables aparte de que los transmisores pueden conectarse entre sí a través de un bus y comunicarse con 15 aparatos. (PLC, computadoras).



El WorldFIP utiliza sistemas de comunicaciones sincronizadas en tiempo basados en protocolo FIP (Factory instrumentation, protocol) de la industria francesa que garantiza una comunicación rápida en el control de procesos. Lo integran SCHNEIDER ELECTRIC, HONEYWELL, BAILEY, CEGELEC, ALLEN BRADLEY.



ISP que significa (interoperable Systems Project) se basa en varios sistemas entre ellos PROFIBUS, estándar alemán en que el aparato (HOST) pasa un testigo (TOKEN) de aparato en aparato dándole así un acceso al circuito. Lo integran SIEMENS, ROSEMOUNT, FISHER CONTROLS, YOKOGAWA, FOXBORO, ABB.

En Europa existen normativas de la CEGELEC (EN-82150) y está en marcha una iniciativa europea que puede reunir características de las normas FIP, PROFIBUS, Y P-NET.

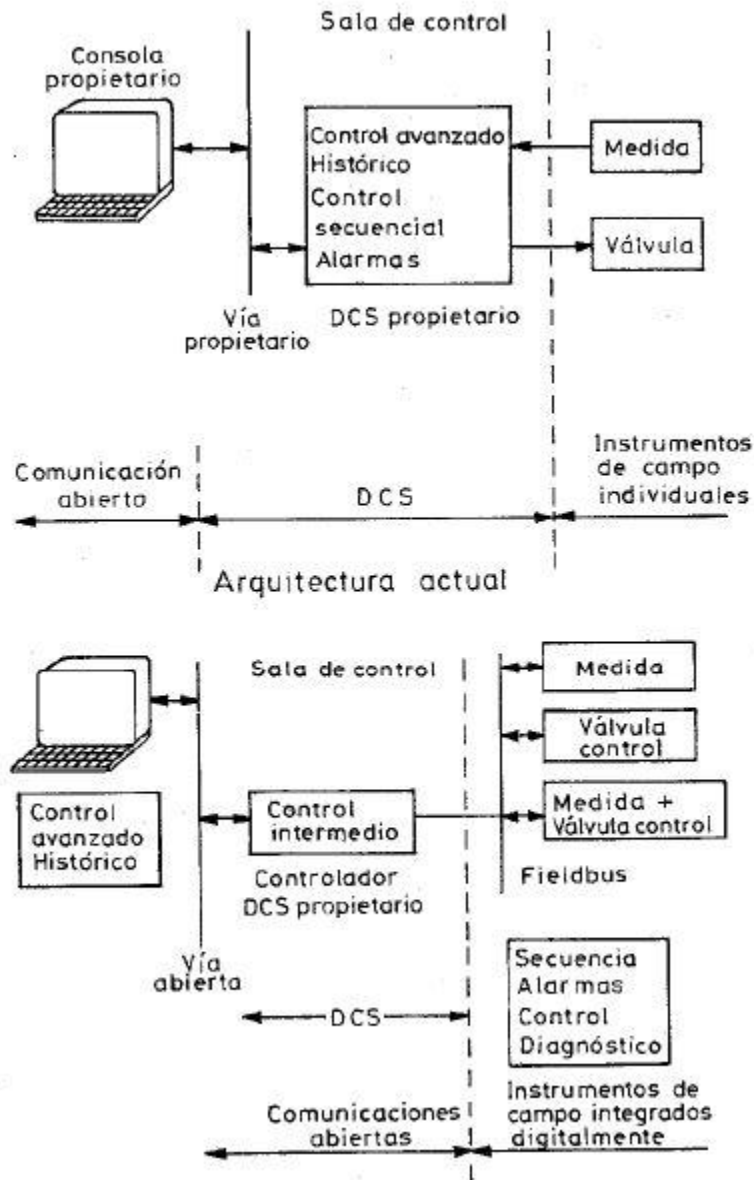
La normativa ISP-SP50, que inicialmente tenía que terminarse en 1989 se ha retrasado debido a la política de competencia de fabricantes de instrumentos y al día de hoy no es un estándar universal.

El sistema totalmente abierto desde la sala de control hasta los instrumentos de campo se conseguirá con el fieldbus estándar. Este proporciona el control automático y secuencial, alarmas, inteligencia en los instrumentos de campo. A continuación en el siguiente gráfico pueden verse las arquitecturas actual y futura de fieldbus. Cabe señalar que el sistema totalmente abierto puede combinar con UNIX, ethernet, con la base de datos relational Oracle y con Windows lo que reduce la necesidad de interfaces. Asimismo, el sistema abierto combinado con el software comercial puede conducir a una potencial pérdida de seguridad de los datos por lo que los suministradores propietarios del sistema lo desarrollarán con el mayor de los cuidados.

Actualmente los fabricantes están investigando continuamente en la evolución de sus equipos por lo que no están excesivamente interesados en que exista un solo estándar. Por otro lado, al realizar en un tiempo mínimo las máximas aplicaciones posibles de su bus de campo (FIELDBUS) propietario, el fabricante puede conseguir una cierta irreversibilidad del mercado de tal modo que los propios usuarios pueden forzar la normalización del protocolo de comunicaciones que emplean.

Existen también asociaciones, fusiones y alianzas de colaboración entre empresas orientadas a conseguir un segmento importante del mercado. Todo ello contribuye a la desorientación del usuario que antes de tomar una decisión debe ponderar las ventajas de los sistemas de comunicación actuales y soluciones futuras.

De todas maneras, es deseable que los usuarios puedan disponer de un protocolo estándar y que éste pueda incorporarse lo más pronto posible a los grandes sistemas de control distribuido. Por otra parte, esos sistemas deben usar de forma transparente la infraestructura de comunicaciones de datos existente.



COMPARATIVA DE TRANSMISORES

A continuación, podemos apreciar una tabla de comparación de transmisores neumáticos, electrónicos, convencionales e inteligentes estos últimos en versiones de señal de salida de 4 a 20mA y señal digital de salida

<i>Transmisor</i>	<i>Señal</i>	<i>Precisión</i>	<i>Ventajas</i>	<i>Desventajas</i>
Neumático	3-15 psi 0,2-1 bar	$\pm 0,5 \%$	Rapidez Sencillo	Aire limpio No guardan información Distancias limitadas Mantenimiento caro Sensible a vibraciones
Electrónico convencional	4-20 mA c.c.	$\pm 0,5 \%$	Rapidez	Sensible a vibraciones deriva térmica
Electrónico Inteligente	4-20 mA c.c.	$\pm 0,2 \%$	Mayor precisión Intercambiable Estable, Fiable Campo de medida más amplio Bajo coste mantenimiento	Lento (para variables rápidas puede presentar problemas)
Electrónico Inteligente Señal digital	Digital	$\pm 0,1 \%$	Mayor precisión Más estabilidad Fiable Autodiagnóstico Comunicación bidireccional Configuración remota Campo de medida más amplio Bajo coste mantenimiento	Lento (para variables rápidas puede presentar problemas) Falta normalización de las comunicaciones No intercambiable con otras marcas

Conclusión

El estudio integral de los sistemas de control e instrumentación permite entender la importancia de seleccionar, configurar y sintonizar correctamente los controladores para responder eficazmente a las demandas de los procesos industriales. Los controladores PID, en particular, se destacan por su versatilidad y capacidad para regular múltiples variables bajo diferentes condiciones operativas. Además, la evolución de las tecnologías de comunicación ha permitido integrar dispositivos mediante protocolos digitales que mejoran la precisión, eficiencia y escalabilidad de los sistemas. En conjunto, este conocimiento constituye una base sólida para enfrentar los retos del diseño e implementación de sistemas de control modernos, donde la adaptación, la inteligencia y la interoperabilidad son cada vez más esenciales.

Referencias Bibliográficas

- [1] Universidad Don Bosco © | Inicio. Accedido el 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible: https://www.udb.edu.sv/udb_files/recursos_guias/electronica-ingenieria/sistemas-de-control-automatico/2019/iii/guia-8.pdf
- [2] “Protocolos de comunicación para instrumentos de medición”. ANTECH INGENIERIA. Accedido el 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.antechsv.com/2018/10/protocolos-de-comunicacion-para.html>
- [3] A. Watkins. “How does distributed I/O communicate with the controller?” Google Translate. Accedido el 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible: [https://www-controldesign-com.translate.goog/connections/i-o/article/33006277/how-does-distributed-i-o-communicate-with-the-controller? x tr sl=en& x tr tl=es& x tr hl=es& x tr pto=sge#:~:text=Los%20dispositivos%20de%20E/S%20y%20el%20controlador%20se%20comunican,Transmisión/Protocolo%20de%20Internet\).](https://www-controldesign-com.translate.goog/connections/i-o/article/33006277/how-does-distributed-i-o-communicate-with-the-controller? x tr sl=en& x tr tl=es& x tr hl=es& x tr pto=sge#:~:text=Los%20dispositivos%20de%20E/S%20y%20el%20controlador%20se%20comunican,Transmisión/Protocolo%20de%20Internet).)
- [4] Flix Instrumentación. “Flix Instrumentación | LA SINTONIZACIÓN DE LOS CONTROLADORES”. Mantenimiento Industrial. Accedido el 12 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.flix-instrumentacion.com/blog/la-sintonizacion-de-los-controladores>
- [5] Universidad Don Bosco, “Tema: Sistemas de lazo abierto y lazo cerrado,” PDF, 2019. [En línea]. Disponible: https://www.udb.edu.sv/udb_files/recursos_guias/electronica-ingenieria/sistemas-de-control-automatico/2019/ii/guia-2.pdf
- [6] Universidad del Azuay, “SISTEMAS DE CONTROL,” PDF, 2008. [En línea]. Disponible: <https://dSPACE.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/217/1/07271.pdf>
- [7] Cartagena99.com, “Control de Procesos TEMA 7. LAZOS DE CONTROL,” PDF, 2014. [En línea]. Disponible: <https://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/TEMA%207%20Acciones%20de%20Control%20S y C.PDF>

- [8] ResearchGate, “Actualización del método de sintonización de controladores de Ziegler y Nichols,” PDF, 2005. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/260058710_Actualizacion_del_mtodo_de_sintonizacion_de_controladores_de_Ziegler_y_Nichols
- [9] TechTarget en español, “¿Qué es un sistema de control de lazo cerrado?,” PDF, 2022. [En línea]. Disponible: <https://www.techtarget.com/es/definicion/Lazo-de-control-cerrado>
- [10] Flip PDF vía PubHTML5, “Acciones básicas de control,” PDF, s.f. [En línea]. Disponible: https://pubhtml5.com/qdld/zrkg/Acciones_b%C3%A1sicas_de_control/
- [11] LibreTexts Español, “Control de P, I, D, PI, PD y PID,” 2022. [En línea]. Disponible: https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Din%C3%A1mica_y_Control_de_Procesos_Qu%C3%ADmicos_%28Woolf%29/09%3A_Control_proporcional-integral-derivado_%28PID%29/9.02%3A_Control_de_P%2C_I%2C_D%2C_PI%2C_PD_y_PID
- [12] Universidad Don Bosco, “Tema: Comportamiento de los controladores P, PI y PID,” PDF, 2019. [En línea]. Disponible: https://www.udb.edu.sv/udb_files/recursos_guias/electronica-ingenieria/sistemas-de-control-automatico/2019/ii/guia-4.pdf
- [13] Colaboradores de los proyectos Wikimedia. “Controlador PID - Wikipedia, la enciclopedia libre”. Wikipedia, la enciclopedia libre. Accedido el 10 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible: https://es.wikipedia.org/wiki/Controlador_PID
- [14] “Explicación sobre el controlador PID y la teoría”. Mess- und Prüfsysteme, bei Emerson - NI. Accedido el 10 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.ni.com/es/shop/labview/pid-theory-explained.html?srsId=AfmBOopomKaJQSoLQbjlnIjo8eL4445BPoF4uC5kgYbY8KOGI13ipYhs&>

- [15] Cátedras Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología – Sitios de las cátedras Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán. Accedido el 10 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible: <https://catedras.facet.unt.edu.ar/controldeprocesos/wp-content/uploads/sites/85/2016/02/TP4A.pdf>
- [16] “¿Cuáles son algunas aplicaciones y desafíos comunes de control PID en entornos industriales?” LinkedIn: Log In or Sign Up. Accedido el 10 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible: [https://www.linkedin.com/advice/1/what-some-common-pid-control-applications-challenges?lang=es&";](https://www.linkedin.com/advice/1/what-some-common-pid-control-applications-challenges?lang=es&)

LISTA DE COTEJO INVESTIGACION

INSTRUMENTACIÓN

INVESTIGACIÓN U4.

Nombre del estudiante: Rocio Teoba Herrera.

Tema: Controladores.

Portada y Desarrollo de temas	25	15
Entrega en tiempo y forma	5	5
Claridad en la información	10	10
Total	40 %	40 %

TEMA: CONTROLADORES.

INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR DE SAN ANDRÉS TUXTLA

División Ingeniería Mecatrónica IMCT-2010-229

Periodo: Febrero – Junio 2025 Grupo: 611-A



ITSSAT



PRÁCTICA UNIDAD 4

INSTRUMENTACION

Docente:

DR. JOSE ANGEL NIEVES VAZQUEZ

Unidad 4:

APLICACIÓN DE UN PID EN UN SISTEMA DE CONTROL DE PROCESOS

Presenta:

Juan José Jiménez Reyes	221U0541
Juan José Marcial Fiscal	221U0547
Miguel de Jesús Polito Cerón	221U0552
Perla Joselin Quino Caixba	221U0555
Rocio Teoba Herrera	221U0562

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	2
OBJETIVOS	3
MATERIALES Y HERRAMIENTAS	4
FUNDAMENTO TEÓRICO	6
ARQUITECTURA DEL SISTEMA	7
PROCEDIMIENTO	8
DISEÑO DEL CONTROLADOR PID	10
ADQUISICIÓN DE DATOS CON LA TARJETA DISCOVERY STM32F407..	13
OBTENCIÓN Y SIMULACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL PROCESO TÉRMICO	15
ANÁLISIS DE RESULTADOS	18
CONCLUSIÓN	20
BIBLIOGRAFÍA	21
FIGURA 1 MICROCONTROLADOR STM23F407 DISCOVERY	4
FIGURA 2 LIBRERIA WAIJUNG	5
FIGURA 3 DIAGRAMA DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR	7
FIGURA 4 ECUACIÓN 1	10
FIGURA 5 ECUACIÓN 2	10
FIGURA 6 ECUACIÓN 3	10
FIGURA 7 ECUACIÓN 4	10
FIGURA 8 TABLA 1	11
FIGURA 9 TABLA 2	12
FIGURA 10 CONTROLADOR PID	12
FIGURA 11 INTERFAZ PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS DEL PROCESO	14
FIGURA 12 ALMACENAMIENTO DE DATOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA.	15
FIGURA 13 DATOS OBTENIDOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL MODELO DEL PROCESO TÉRMICO	16
FIGURA 14 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE NUESTRO SISTEMA	16
FIGURA 15 PROCESO TÉRMICO A 22°C Y CAMBIO A 25 °C	18

INTRODUCCIÓN

En los sistemas de control industrial, el mantenimiento de variables dentro de rangos específicos es esencial para garantizar la eficiencia, seguridad y calidad de los procesos. Uno de los controladores más utilizados para este fin es el PID (Proporcional-Integral-Derivativo), debido a su capacidad para corregir errores entre una señal de referencia y una variable de proceso mediante una combinación de acciones correctivas. Esta práctica tiene como objetivo aplicar un controlador PID para regular la temperatura en un sistema de control de procesos, analizando el comportamiento dinámico del sistema y ajustando los parámetros del controlador para obtener una respuesta estable, precisa y rápida. La implementación permitirá comprender la influencia de cada componente del PID en la dinámica térmica y cómo una correcta sintonización puede optimizar el desempeño del sistema.

OBJETIVOS

1. *Modelar dinámicamente un proceso térmico simple en Simulink.*
2. *Diseñar e implementar un controlador PID mediante programación en MATLAB.*
3. *Integrar el bloque de código MATLAB Function en un modelo de Simulink.*
4. *Sintonizar los parámetros K_P , K_I , K_D para optimizar la respuesta del sistema (tiempo de establecimiento, sobreimpulso y error en estado estacionario).*
5. *Analizar resultados de simulación y comparar distintas estrategias de sintonización.*

MATERIALES Y HERRAMIENTAS

- *MATLAB (versión R2022b o superior) con Simulink y Control System Toolbox.*
- *Computadora con al menos 8 GB RAM.*
- *Licencia activa de MATLAB/Simulink.*
- *Datos experimentales o parámetros nominales del proceso térmico:*
 - *Ganancia estática del horno: $K=2.5$*
 - *Constante de tiempo: $\tau=120$ s*
 - *Retardo muerto (dead time): $L=10$ s*

COMPONENTES

TARJETA STM23F407 DISCOVERY

La STM32F4 es un microcontrolador electrónico perteneciente a la familia de dispositivos STM32. Este dispositivo de alta gama tiene múltiples características que lo convierten en una opción ideal para diversas aplicaciones en distintos ámbitos de la electrónica.

La STM32F4 es una tarjeta que se destaca por su alta velocidad de procesamiento, capacidad de manejar múltiples tareas simultáneamente y amplia variedad de periféricos integrados. Entre estos periféricos se incluyen puertos USB, CAN, Ethernet, SPI e I2C, lo que la hace una opción versátil para una amplia variedad de aplicaciones.

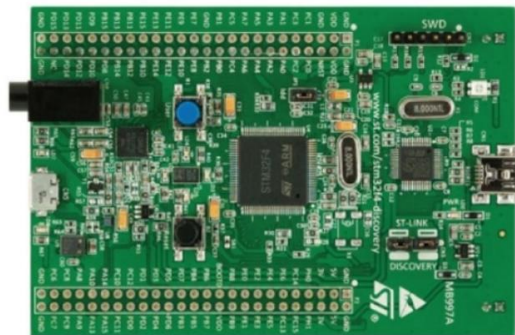


FIGURA 1 MICROCONTROLADOR STM23F407 DISCOVERY

LIBRERÍA WAIJUNG

La creación de la librería se enfocó en brindar soporte a diferentes familias de microcontroladores y simplificar su programación mediante bloques de Simulink.

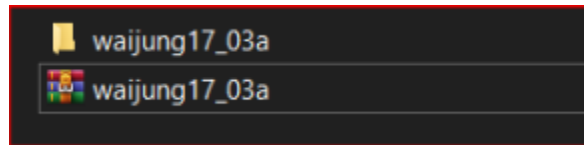


FIGURA 2 LIBRERIA WAIJUNG

FUNDAMENTO TEÓRICO

Un proceso térmico de primer orden con retardo se puede aproximar por la función de transferencia:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ls}$$

donde:

- *K es la ganancia estática,*
- *τ la constante de tiempo,*
- *L el retardo muerto.*

*El controlador **PID** en forma paralela se define como:*

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\sigma) d\sigma + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

Donde:

$$e(t) = r(t) - y(t)$$

ARQUITECTURA DEL SISTEMA

A través del presente trabajo se pretende implementar dos tipos de controladores, sobre una tarjeta **STM32F407**, aprovechando la potencialidad y las facilidades de programación que brinda **Matlab** de **Simulink**. En la Figura 1 se presenta la arquitectura del sistema. Como elemento principal se tiene la tarjeta STM32F407 sobre la cual se ejecutará el controlador. En adición, esta tarjeta también se encargará de la adquisición de datos del proceso y también tendrá conexión con un computador con Matlab. Cabe indicar que el computador no es un elemento necesario para que funcione el controlador. En este caso, se utilizará el computador únicamente como instrumento de programación y visualización de las variables del controlador.



FIGURA 3 DIAGRAMA DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR

El proceso para controlar es un proceso térmico basado en una niquelina. Este proceso cuenta con un elemento de medición de temperatura con su respectivo transmisor. El transmisor ha sido configurado para que entregue un voltaje entre 0 y 10 voltios. De igual manera la señal de control debe ingresar a la planta bajo el mismo estándar. Por consiguiente, la arquitectura mostrada en la Figura 2 también incluye un sistema electrónico de adaptación de las señales.

PROCEDIMIENTO

MODELADO DEL PROCESO EN SIMULINK

- Abra Simulink y cree un nuevo modelo
- Inserte un bloque Transfer Fcn y configure la función de transferencia $1 \frac{K}{\tau s + 1} \tau s + 1K$.
- Agregue un bloque Transport Delay con retardo L. Conecte la salida del Transfer Fcn a la entrada del retardo.
- Añada un Step (o Signal Generator) para la consigna de temperatura $r(t)$.
- Coloque un Scope para observar la respuesta $y(t)$.

IMPLEMENTACIÓN DEL PID EN MATLAB FUNCTION

- Inserte un bloque MATLAB Function.
- Defina en su interior la función:

```
function u = pid_control(e, dt)
    %# parámetros iniciales
    persistent Kp Ki Kd integ prev_e
    if isempty(integ)
        Kp = 2.0;    % valor inicial
        Ki = 0.05;
        Kd = 10.0;
        integ = 0;
        prev_e = 0;
    end
    % cálculo de términos
    integ = integ + e*dt;
    deriv = (e - prev_e)/dt;
    u = Kp*e + Ki*integ + Kd*deriv;
    prev_e = e;
end
```

Conecte las señales de error $e(t)$ (resultado de restar la salida del retardo a la consigna) y el paso de tiempo dt (use un bloque **Clock** y **Discrete Derivative**, o ajuste un solver fijo).

SINTONIZACIÓN DE PARÁMETROS

1. Ejecute la simulación con los valores iniciales $(K_P, K_I, K_D) = (2, 0.05, 10)$
2. Observe en el **Scope** el tiempo de establecimiento t_s , el sobreimpulso M_p y el error en estado estacionario e_∞ .
3. Modifique progresivamente: K_P K_I K_D

<i>Prueba</i>	<i>K_P</i>	<i>K_I</i>	<i>K_D</i>	<i>t_s</i>	<i>M_p</i> (%)	<i>e_∞</i>
<i>1</i>	<i>2.0</i>	<i>0.05</i>	<i>10.0</i>	<i>240</i>	<i>15</i>	<i>0.5</i>
<i>2</i>	<i>3.0</i>	<i>0.05</i>	<i>12.0</i>	<i>180</i>	<i>25</i>	<i>0.2</i>
<i>3</i>	<i>2.5</i>	<i>0.1</i>	<i>8.0</i>	<i>200</i>	<i>10</i>	<i>0</i>
...	...	...	...	...	...	...

DISEÑO DEL CONTROLADOR PID

El diseño del controlador PID parte del modelo de tres polos y un cero obtenido en el apartado anterior. Para este caso se utilizará la herramienta de sintonía de controladores PID que posee Matlab. Cabe indicar que el controlador se implementará en tiempo discreto utilizando la siguiente ecuación:

$$\frac{u(z)}{e(z)} = \frac{1}{1-z^{-1}} * \left(kp + ki * T + \frac{Kd}{T} \right) + \frac{z^{-1}}{1-z^{-1}} * \left(-2 \frac{Kd}{T} - kp \right) + \frac{z^{-2}}{1-z^{-1}} * \left(\frac{Kd}{T} \right)$$

FIGURA 4 ECUACIÓN 1

La ecuación discreta del PID se divide en la parte proporcional, la parte integral y la parte derivativa, las cuales se multiplican a las ganancias K1, K2 y K3, respectivamente. En la ECUACIÓN 1 z representa el operador en tiempo discreto discreto. La parte proporcional (Kp) del controlador se especifica a través de (2), mientras que la parte integral (Ki) y la parte derivativa (Kd) se especifican a través de (3) y (4), respectivamente.

$$\frac{1}{1-z^{-1}} * \left(kp + ki * T + \frac{Kd}{T} \right) \quad K1 = \left(kp + ki * T + \frac{Kd}{T} \right)$$

FIGURA 5 ECUACIÓN 2

$$\frac{z^{-1}}{1-z^{-1}} * \left(-2 \frac{Kd}{T} - kp \right) \quad K2 = \left(-2 \frac{Kd}{T} - kp \right)$$

FIGURA 6 ECUACIÓN 3

$$\frac{z^{-2}}{1-z^{-1}} * \left(\frac{Kd}{T} \right) \quad K3 = \left(\frac{Kd}{T} \right)$$

FIGURA 7 ECUACIÓN 4

El controlador se ha diseñado para cumplir con las especificaciones que se muestran la tabla 1.

PARÁMETROS DE LA RESPUESTA AL IMPULSO DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA	
PÁRAMETRO	VALOR
Tiempo de subida (T_u)	367 s
Tiempo de establecimiento (T_s)	<600 s
Pico máximo (M_p)	1.02

FIGURA 8 TABLA 1

Se hace uso de la aplicación del Matlab (PID Tuner) para la sintonía del controlador, donde se pueden observar las restricciones temporales que impone las condiciones de diseño.

Cabe mencionar que para el diseño del controlador se eligió un controlador PI, La acción derivativa no será efectiva debido a diversos factores. En primer lugar, el proceso térmico tiene cierta cantidad de ruido y la acción derivativa siempre aumenta el ruido ya que es tomado como error. Además, el proceso térmico es un sistema dinámico lento, lo que hace que el uso de la acción derivativa no sea factible. Si el sistema se mueve hacia el punto de referencia a una velocidad considerable, la inercia del sistema puede causar que se pase de largo sin poder detenerse en el objetivo deseado. En resumen, debido a la presencia de ruido y la dinámica del sistema térmico, la acción derivativa no es una opción viable para el control de este proceso.

En la tabla 2 se indican los valores que nos brinda el controlador mediante PI tuner.

CONSTANTES OBTENIDAS PARA EL CONTROLADOR PI	
PÁRAMETRO	VALOR
K_i	0.003156
K_p	0.78727

FIGURA 9 TABLA 2

Con los valores de las constantes ya calculadas se puede desarrollar en simulink el controlador PI. Para el diseño empezamos con los bloques de configuración de la tarjeta STM32F4 haciendo uso del bloque Target Setup, el cual ayuda a elegir la serie de la tarjeta que se utilizará. También se utilizarán los bloques: UART SETUP, HOST SERIAL PORT, UART Tx y UART Rx, los cuales sirven para la conexión del puerto USB y obtención de datos para poder graficar las variables de interés. En la figura 14 se puede ver el diagrama de conexión del controlador PID. También se ha agregado el ADC para el control de la referencia y alimentación de la resistencia calefactora. Además, se ha agregado el bloque Discrete Controller PID en el cual ingresaremos los valores calculados de K_p y K_i .

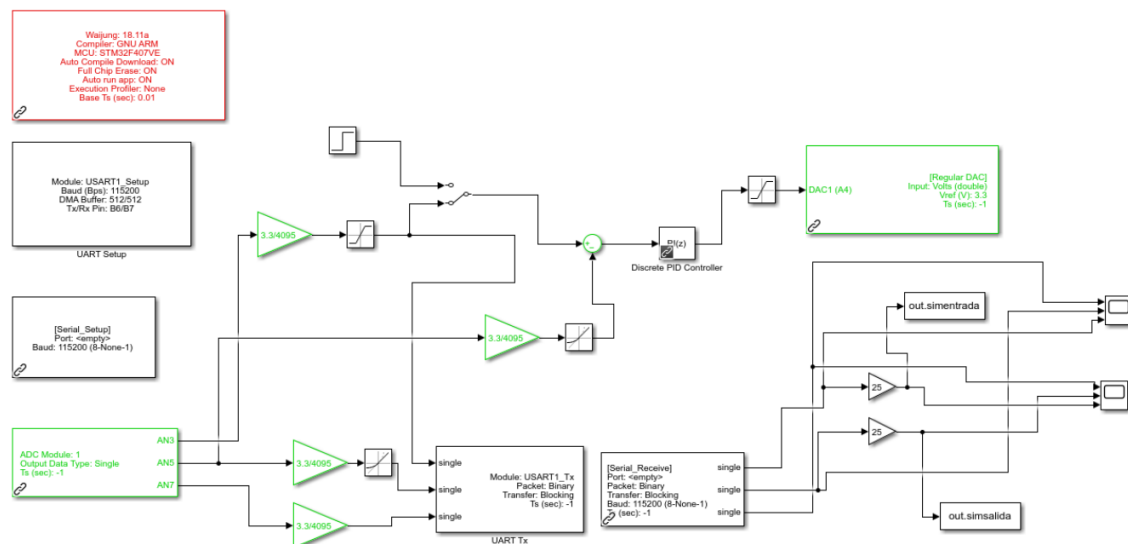


FIGURA 10 CONTROLADOR PID

ADQUISICIÓN DE DATOS CON LA TARJETA DISCOVERY STM32F407.

Para la adquisición de datos del proceso se ha creado una interfaz de conexión en simulink juntamente con la librería Waijung. A través de este instrumento virtual se ha logrado la adquisición de la temperatura de la cámara, para poder obtener la función de transferencia del sistema.

Para el diseño de esta interfaz (véase la Figura 4) se han utilizado los bloques de entradas (ADC) y salida analógica (DAC), para obtener la temperatura de la cámara y también para enviar las señales de actuación hacia el proceso. Además, en el diseño existen diferentes bloques matemáticos los cuales sirven para hacer la transformación a unidades de ingeniería de los voltajes que suministran los transmisores de temperatura.

También se han utilizado bloques para construir la parte gráfica del diseño. Para la obtención de datos se utilizó los bloques de configuración del puerto serial (TTL), bloque de configuración UART TX y bloque configuración Host Serial RX. Por otra parte, los datos del proceso son almacenados mediante el bloque To Workspace. Dado que el diseño trabajará en tiempo real, se ha configurado el tiempo de muestreo a 0.01s tanto en los bloques de configuración del sistema y los parámetros de simulación, así obteniendo la interfaz de comunicación donde al momento de la simulación aparecerá la gráfica de la señal de excitación y la temperatura de la cámara. Cabe mencionar que los bloques To Workspace enviarán los datos del proceso directamente al workspace de Matlab.

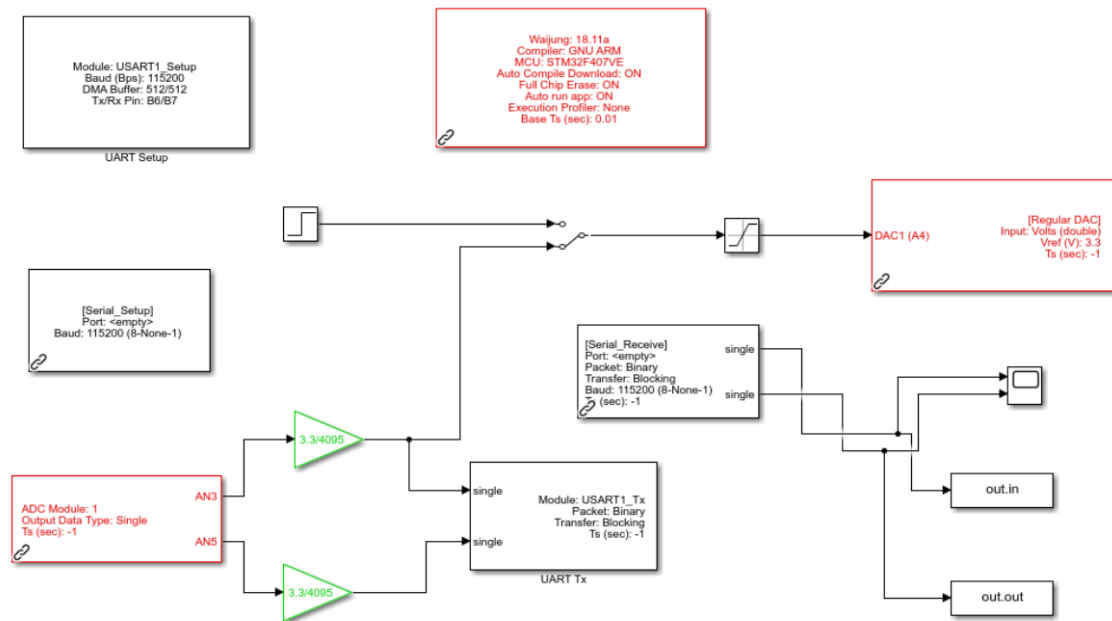


FIGURA 11 INTERFAZ PARA LA OBTENCIÓN DE DATOS DEL PROCESO

OBTENCIÓN Y SIMULACIÓN DE LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DEL PROCESO TÉRMICO.

Una vez implementada la interfaz para la adquisición, los datos son capturados y guardados directamente en el Workspace de Matlab. Por esta razón se debe entrar al command Window y con la ayuda de los comandos, que se pueden apreciar en la figura 3.2. Se procede a guardar los datos para la estimación de la función de transferencia del proceso.

```
tiempo=out.simentrada.Time  
entrada=out.simentrada.Data  
salida=out.simsalida.Data  
save disPID2 tiempo entrada salida
```

FIGURA 12 ALMACENAMIENTO DE DATOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL SISTEMA.

Una vez almacenado los datos se puede realizar la identificación del modelo. En este caso se utilizará Matlab para obtener la función de transferencia del proceso térmico.

Para realizar la identificación se ha llevado el proceso a un punto de operación inyectando una señal de voltaje de 0.75 V. Con este voltaje la temperatura se ha elevado a 18.75°C, hasta que el sistema alcance el régimen permanente en donde se ha suspendido la captura de datos. En la Figura 3.3 se muestra los datos de entrada y salida que han sido capturados y graficados con Matlab. Cabe indicar que el voltaje enviado al proceso actúa sobre la niquelina, lo cual hace que se eleve la temperatura. También se debe indicar que la identificación de datos se realiza considerando una señal de voltaje en la salida del proceso. Este es el voltaje que entrega el sensor de temperatura. La constante de conversión de voltaje a temperatura es de 10.

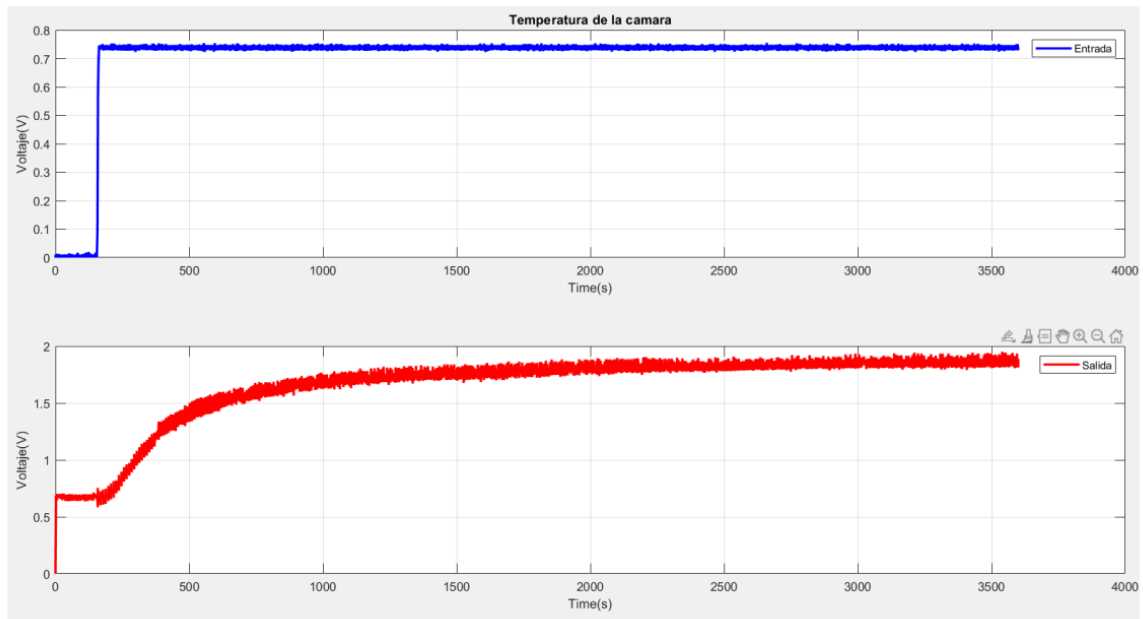


FIGURA 13 DATOS OBTENIDOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DEL MODELO DEL PROCESO TÉRMICO

Los parámetros característicos del sistema se muestran en la Figura7

struct with fields:

```

RiseTime: 1.2804e+03
SettlingTime: 3.0369e+03
SettlingMin: 1.4781
SettlingMax: 1.6416
Overshoot: 0
Undershoot: 0
Peak: 1.6416
PeakTime: 8.0328e+03

```

FIGURA 14 PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE NUESTRO SISTEMA

La función de transferencia que se ajusta más a la planta del proceso térmico es la siguiente:

$$sys4 = \frac{0.0001074s + 1.429e - 07}{s^3 + 0,02212s^2 + 0,0001116s + 8,703e - 08}$$

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se logra evidenciar los efectos significativos que tiene la no linealidad del proceso. A medida que nos alejamos del punto de operación el controlador empeora notándose una oscilación considerable. Esto deja ver que la ganancia estática del sistema es mayor mientras sube la temperatura. Esta ganancia estática se multiplica con la ganancia proporcional del controlador y hace que este sea muy agresivo.

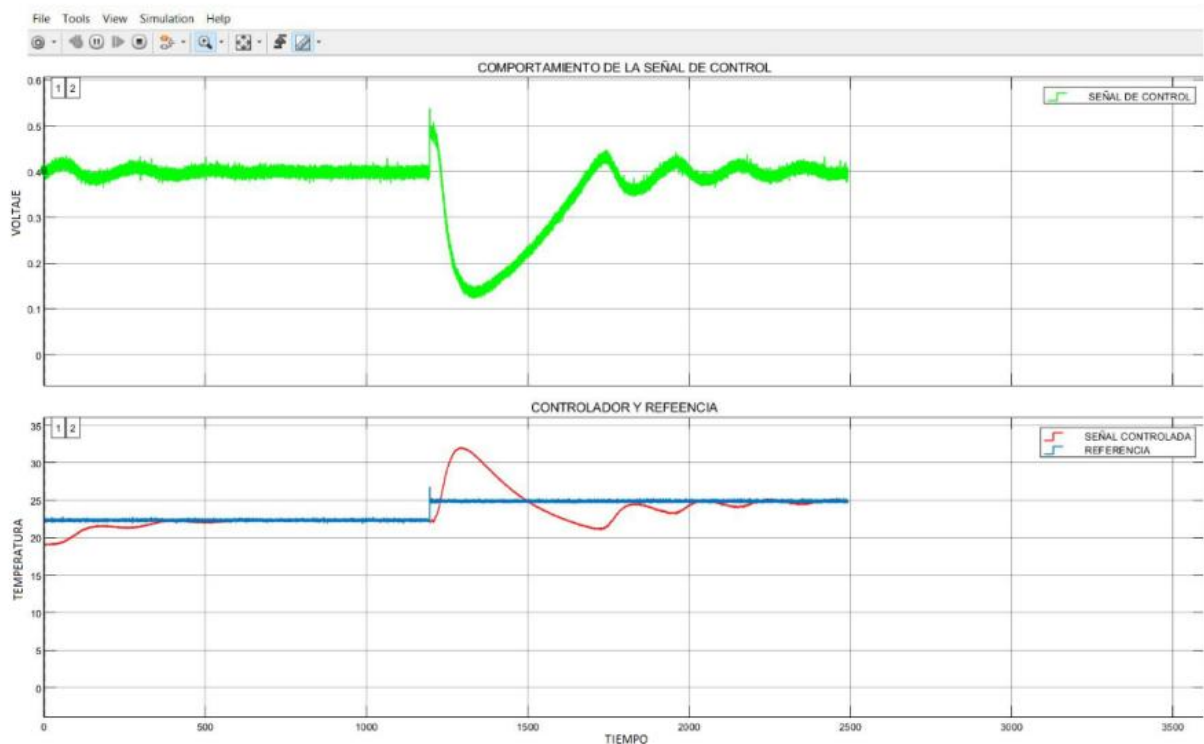
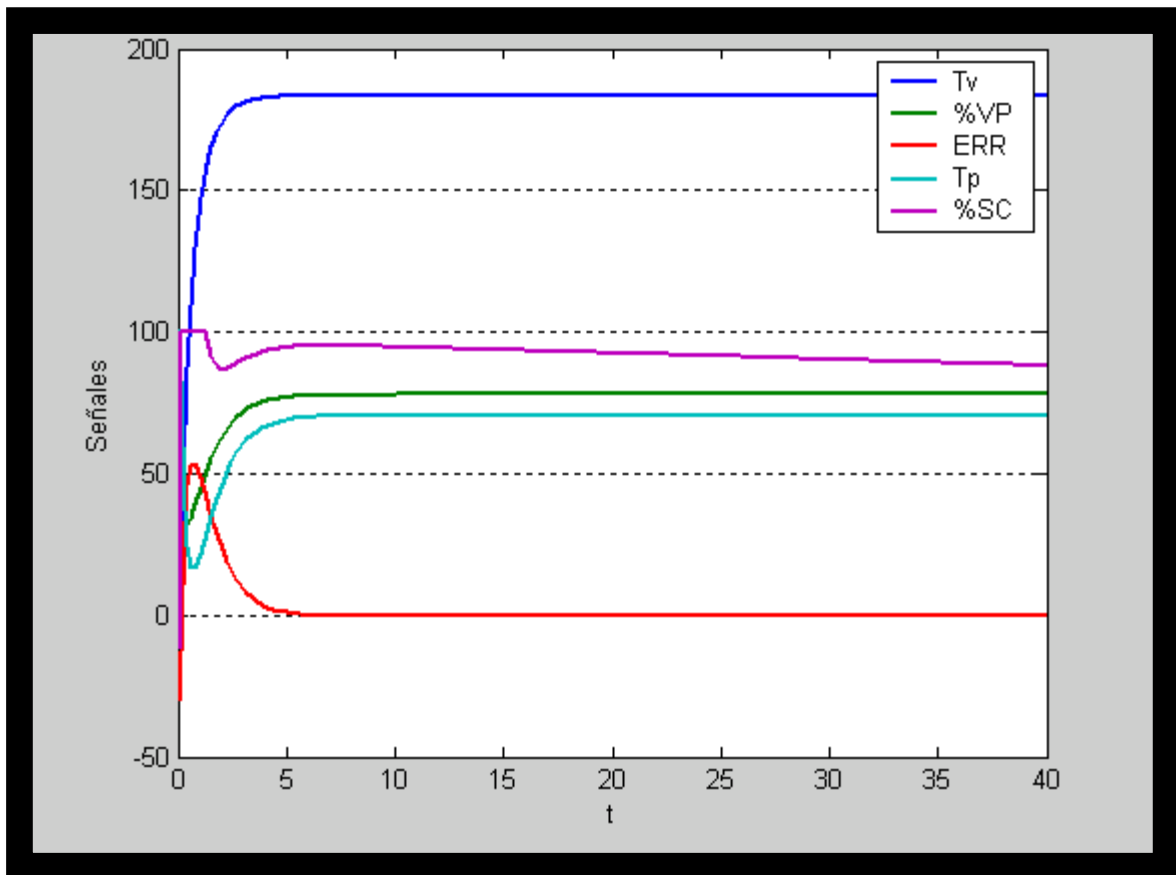


FIGURA 15 PROCESO TÉRMICO A 22°C Y CAMBIO A 25 °C

- **Efecto de KP:** Aumentos en KP reducen t_s pero elevan M_p .
- **Efecto de KI:** Valores moderados eliminan el error en estado estacionario sin inducir excesivas oscilaciones lentas.
- **Efecto de KD:** Incrementos en KD atenúan las oscilaciones, mejorando la estabilidad del lazo cerrado.

Se concluye que la mejor combinación encontrada $K_p = 2.5$, $K_I = 0.1$, $K_D = 8$

Ofrece un compromiso óptimo entre rapidez ($t_s \approx 200$ s), bajo sobreimpulso ($M_p \approx 10\%$) y error nulo en estado estable.



CONCLUSIÓN

La implementación del controlador PID en el sistema de control de temperatura permitió observar de forma práctica la influencia de los parámetros proporcional, integral y derivativo sobre la respuesta del sistema. A través del ajuste adecuado de estos parámetros, se logró una regulación eficiente de la temperatura, reduciendo el error en estado estacionario, mejorando el tiempo de respuesta y minimizando las oscilaciones. Esta práctica refuerza la importancia del diseño y la sintonización de controladores en aplicaciones industriales reales, donde el comportamiento de las variables debe mantenerse dentro de márgenes aceptables para asegurar la estabilidad y el rendimiento del proceso.

BIBLIOGRAFÍA

- [1]“PID controller tuning - MATLAB & simulink”. MathWorks - Creador de MATLAB y Simulink - MATLAB y Simulink - MATLAB & Simulink. Accedido el 15 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible: <https://es.mathworks.com/help/control/pid-controller-design.html>
- [2]UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE. Accedido el 15 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible: <https://journal.espe.edu.ec/ojs/index.php/maskay/article/download/144/138/347>
- [3]Colaboradores de los proyectos Wikimedia. “Controlador PID - Wikipedia, la enciclopedia libre”. Wikipedia, la enciclopedia libre. Accedido el 15 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible: https://es.wikipedia.org/wiki/Controlador_PID
- [4]A. J. R. Luna. “Análisis control de nivel y temperatura en simulink alejandro cordero | PDF | ciencias físicas”. Scribd. Accedido el 15 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible: <https://es.scribd.com/document/665453715/Analisis-Control-de-Nivel-y-Temperatura-en-Simulink-Alejandro-Cordero>
- [5]Fabian Andres Robles Cortes. Control pid temperatura matlab , simulink + arduino. (14 de diciembre de 2021). Accedido el 15 de mayo de 2025. [Video en línea]. Disponible: <https://www.youtube.com/watch?v=M8UNnsiRVmI>
- [6]Repositorio Institucional de la Universidad Politécnica Salesiana: Página de inicio. Accedido el 15 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/24739/1/UPS-CT010494.pdf>

LISTA DE COTEJO DE PRÁCTICAS

INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL.

PRÁCTICA NÚMERO 4.

Nombre del estudiante: Rocio Teoba Herrera.

Tema: APLICACIÓN DE UN PID EN UN SISTEMA DE CONTROL DE PROCESOS

Portada	5 %	5 %
Introducción	10 %	10 %
Desarrollo	25 %	25 %
Conclusiones	5 %	5 %
Referencias	5 %	5 %
Entrega en tiempo y forma	10 %	10 %
Total	60 %	60 %