

# *Comparativa de control de histéresis y PID para el ahorro energético en el proceso de esterilizado*

Reyes Denegri A. de J., Martínez González R. F., González Escarpeta C. R.

Maestría en Eficiencia Energética y Energías Renovables.

Departamento de Ingeniería Eléctrica-Electrónica.

Tecnológico Nacional de México Campus Veracruz

Veracruz, México.

[reyesdenegri@gmail.com](mailto:reyesdenegri@gmail.com) , [ricardo.mg@veracruz.tecnm.mx](mailto:ricardo.mg@veracruz.tecnm.mx) , [carlos.ge@veracruz.tecnm.mx](mailto:carlos.ge@veracruz.tecnm.mx)

**Resumen.-** En el presente trabajo se muestra como el rendimiento de un control de histéresis puede ser igualado y excedido por un control PID en aplicaciones que requieren una alta estabilidad y precisión. El sistema PID tiene la capacidad de ajustar variaciones de hasta 0.1 °C. Se realiza una comparación entre estos dos tipos de control y se establecen las ventajas y desventajas de cada uno de ellos en esta aplicación.

**Palabras clave:** acción Proporcional, acción Derivativa, acción Integral, consumo energético, histéresis.

## I. INTRODUCCIÓN

La mayor parte de los problemas de control que aparecen en la vida real son los llamados sistemas estables. En los cuales, para una señal de entrada acotada, la salida también permanece de esta manera. Sin embargo, se tiene un grupo de sistemas que son por diseño o por naturaleza, inestables y que precisan de la acción de un elemento externo que los mantenga estables [1].

Este elemento recibe el nombre de controlador, aunque puede presentarse en formas muy diversas debido a la gran cantidad de posibilidades que se han estudiado. En esencia su acción se resume en: lectura de la salida del sistema, comparación de la salida leída con la que se desea y generación de la entrada correspondiente que lleve al sistema a la salida deseada.

Debido a lo anterior, es sumamente importante el estudio de los sistemas inestables, además de ser uno de los más destacados problemas de control que se pueden encontrar en el ámbito de la automatización.

En el estudio del ahorro energético es preciso comparar los sistemas anteriores con las nuevas tecnologías y con ello seleccionar las alternativas viables para el desarrollo de la eficiencia energética. Un ejemplo de ello son los sistemas ON-OFF o de histéresis debido que presentan variaciones en su control, ya que funcionan en dos límites de temperatura seleccionados por el usuario, los cuales indican el encendido y apagado del

sistema, provocando picos de consumo e inestabilidad en el proceso a controlar.

De esta forma, se decide llevar a cabo el desarrollo de un control inteligente de temperatura para el proceso de esterilizado dentro de una autoclave, aplicando métodos como el de histéresis y PID. El sistema consiste en una autoclave tipo olla modelo 25x-1, dentro de ella se deposita agua desmineralizada, la cual aumentará su temperatura debido a una resistencia eléctrica localizada en la base de la estructura. De igual manera, la presión deberá aumentar, debido a que es indispensable que la autoclave sea sellada herméticamente, la variable de temperatura es monitoreada mediante un termopar y la presión es indicada en un manómetro de 30 PSI.

El principal objetivo de este trabajo es demostrar la eficiencia energética del sistema propuesto, a través del análisis de las ventajas y desventajas del funcionamiento de ambos sistemas.

## II. MODELO DE HISTÉRESIS

La salida del controlador ON-OFF o de histéresis, solo puede cambiar entre dos valores al igual que los 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 que produce una continua desviación de este último [2].

La acción del controlador de dos posiciones tiene un mecanismo simple de construcción, por tal razón este tipo de controladores es ampliamente utilizado y comúnmente usado en sistemas de regulación de temperatura.

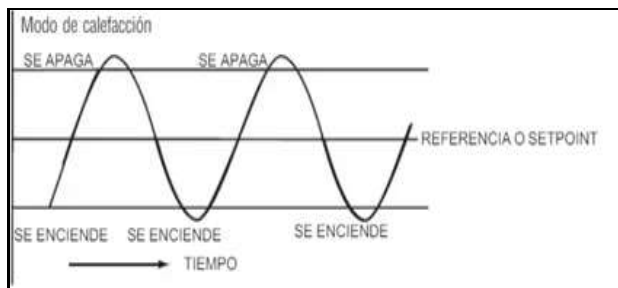
Los controladores mecánicos de dos posiciones normalmente poseen algo de histéresis, por el contrario, los controladores electrónicos usualmente funcionan sin ella.

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

de un controlador de acción ON-OFF da como resultado una oscilación de la variable controlada [3].

La forma de onda de la Figura 1, muestra la acción del ciclo de calefacción. Se observa que la temperatura se eleva más allá del punto de apagado, y desciende por debajo del punto de encendido.

Figura 1 Forma de onda del ciclo de calefacción [3]



Para este caso de estudio, el control de histéresis es implementado mediante la tarjeta controladora XH-W3001 instalada en la Autoclave.

### III. MODELO PID

Un controlador o regulador PID es un dispositivo que permite controlar un sistema en lazo cerrado para que alcance el estado de salida deseado. Este controlador está compuesto de tres elementos que proveen una acción Proporcional, Integral y Derivativa. Estas tres acciones son las que dan nombre al controlador PID [4].

Como puede verse en la Figura 2, la señal  $r(t)$  se denomina referencia e indica el estado que se desea conseguir en la salida del sistema  $y(t)$ . En un sistema de control de temperatura, la referencia  $r(t)$  será la temperatura deseada y la salida  $y(t)$  será la temperatura real del sistema controlado.

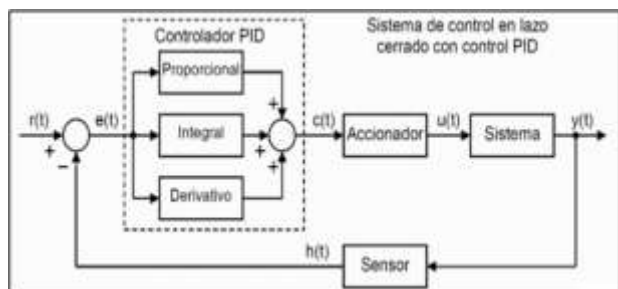


Figura 2. Esquema de PID [4]

La entrada al controlador PID es la señal de error  $e(t)$ . Esta señal indica al controlador la diferencia que existe entre el estado que se quiere conseguir o referencia  $r(t)$  y el estado real del sistema medido por el sensor, señal  $h(t)$ . Si la señal de error es grande, significa que el estado del sistema se encuentra lejos del estado de referencia deseado. Si por el contrario el error es pequeño, significa que el sistema ha alcanzado el estado deseado [4].

#### A. Acción de control proporcional

Como su nombre lo indica, esta acción de control es proporcional a la señal de error  $e(t)$ . Internamente esta acción multiplica la señal de error por una constante  $K_p$  e intenta minimizar el error del sistema. Cuando el error es grande, la acción de control también lo es, y tiende a minimizar dicho error [4].

Aumentar la acción proporcional  $K_p$  tiene efectos como:

- Incrementar la velocidad de respuesta del sistema.
- Disminuir el error del sistema en régimen permanente.
- Aumentar la inestabilidad del sistema.

#### B. Acción de control derivativo

La definición de la acción derivativa consiste en brindar al controlador una característica de anticipación del comportamiento futuro que va a tener la señal de error que recibe el propio PID [4].

Esta predicción es hecha simplemente calculando la derivada del error en el instante de tiempo actual, en otras palabras, calcula la tangente a ese punto y traza una proyección hacia el futuro del posible comportamiento que tendrá el error.

Básicamente lo que se hace con la acción derivativa es aproximar la curva del error por una recta, para anticipar lo que va a suceder en el sistema.

Incrementar la constante de control derivativa  $K_d$  tiene los siguientes efectos:

- Aumentar la estabilidad del sistema controlado.
- Disminuir la velocidad del sistema.
- El error en régimen permanente permanecerá igual.

### C. Acción de control integral

Esta acción de control como su nombre indica, calcula la integral de la señal de error  $e(t)$ . La integral se puede ver como la suma o acumulación de la señal de error. A medida que pasa el tiempo, pequeños errores se van sumando para hacer que la acción integral sea cada vez mayor. Con esto se consigue reducir el error del sistema en régimen permanente [4].

La desventaja de utilizar la acción integral consiste en que esta añade una cierta inercia al sistema y por lo tanto lo hace más inestable.

Aumentar la acción integral  $K_i$  tiene los siguientes efectos:

- Disminuir el error del sistema en régimen permanente.
- Aumentar la inestabilidad del sistema.
- Aumentar la velocidad del sistema.

Ecuación del control PID:

$$c(t) = K_p * e(t) + K_i * \int e(t) dt + K_d * \frac{\partial e(t)}{\partial t} \quad (1)$$

- $c(t)$  = señal de control
- $e(t)$  = señal de error
- $K_p, K_i, K_d$  = parámetros del controlador PID

### D. Ajuste heurístico de un controlador PID

Una vez comprendidas las diferentes acciones de un control PID, se pueden aplicar reglas sencillas para sintonizar este controlador de forma manual [4].

Acción Proporcional

- Se debe aumentar poco a poco la acción proporcional para disminuir el error (diferencia entre el estado deseado y el estado conseguido) y a su vez aumentar la velocidad de respuesta.
- Si se alcanza la respuesta deseada en velocidad y error, el PID ya está sintonizado.
- Si el sistema se vuelve inestable antes de conseguir la respuesta deseada, se debe aumentar la acción derivativa.

Acción Derivativa

- Si el sistema es demasiado inestable, se debe aumentar poco a poco la constante derivativa  $K_d$  para conseguir estabilidad en la respuesta.

Acción Integral

- Si el error del sistema es mayor que el deseado, se debe aumentar la constante integral  $K_i$  hasta que el error se minimice con la rapidez deseada.
- Si el sistema se vuelve inestable antes de conseguir la respuesta deseada, se debe aumentar la acción derivativa.

## IV. VALORES DE PRUEBA

En la implementación de las pruebas con los dos controladores analizados, se hicieron bajo variables controladas como la temperatura ambiente, el contenido de la autoclave, volumen de agua y en horarios idénticos estos valores pueden consultarse en la Tabla 1.

TABLA 1. Valores utilizados en pruebas

<i>Variables</i>	<i>Control de histéresis</i>	<i>Control PID</i>
<i>Agua desmineralizada</i>	1 litro	1 litro
<i>Temperatura Ambiente</i>	25 °C	25°C
<i>Tiempo de precalentado</i>	40 min	40 min
<i>Tiempo de esterilizado</i>	15 min	15 min
<i>Hora de realización</i>	18:00 horas	18:00 horas
<i>Presión promedio</i>	10 psi	10 psi
<i>Temperatura seleccionada</i>	109°C-110°C	110°C

Como se puede observar la única variable que muestra diferencia entre un controlador y otro es el “setpoint” o temperatura seleccionada del sistema de histéresis, esto debido a las características de estos controladores y por la limitación que ofrece la tarjeta controladora de solo poder seleccionar valores enteros después de los 100 °C.

## V. RESULTADOS

Se llevaron a cabo dos pruebas, la primera de ellas con el sistema operando sin ninguna perturbación o alteración durante su funcionamiento, realizando mediciones del control de temperatura, consumo energético y presión interna de la autoclave. En la Figura 3 se aprecia el comportamiento de control de temperatura de ambos sistemas, observando que el control PID (gráfico de línea naranja) mantiene una estabilidad mayor que el sistema de histéresis (gráfico de línea azul) y al llegar a la temperatura seleccionada no presenta sobre impulso, debido a que la salida del controlador está sujeta a un valor de PWM que disminuye conforme el error se aproxima a “0”; al contrario de su predecesor, que como se mencionó anteriormente, funciona entre dos rangos de temperatura provocando las oscilaciones que se muestran en la gráfica.

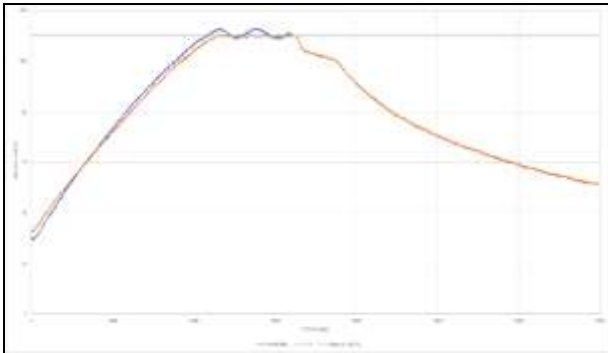


Figura 3. Prueba sin perturbaciones

En la segunda prueba se realizó el mismo ejercicio aplicando una perturbación, la cual consiste en liberar presión durante un periodo de 20 segundos para provocar el descenso en la temperatura y de esta manera visualizar el tiempo requerido por ambos controles para estabilizar nuevamente el sistema. En la Figura 4 se presenta el comportamiento anteriormente descrito, comparando la respuesta de cada controlador.

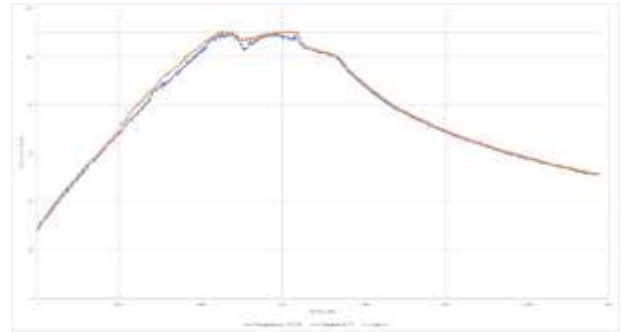


Figura 4. Prueba con perturbación de 20 segundos

En la Tabla 2 se exponen los datos recabados durante el periodo de prueba, los cuales se obtuvieron mediante un medidor de consumo eléctrico (Wathorimetro), con esta información es posible realizar los cálculos pertinentes para validar el desempeño y el ahorro energético del controlador propuesto.

TABLA 2. Resultados de prueba sin perturbación

<i>Variables</i>	<i>Control de histéresis</i>	<i>Control PID</i>
<i>Consumo eléctrico</i>	905 Wh	850 Wh
<i>Tiempo de prueba</i>	1 hora	1 hora
<i>Tiempo de trabajo real</i>	50min	40min

Para el cálculo del ahorro energético se aplicó la Ecuación 2, donde se estipula que los datos del sistema de histéresis son equivalentes al 100 por ciento del consumo eléctrico.

$$X = \frac{b \cdot d \cdot e}{a \cdot c} \quad (2)$$

Donde:

*a* y *b* son el tiempo real de trabajo.

*c* y *d* son el consumo eléctrico.

*e* es el 100 por ciento del consumo eléctrico.

Sustituyendo estos valores tenemos como resultado:

$$X = \frac{0.78333 \text{ h} \cdot 850 \text{ Wh} \cdot 100\%}{0.83333 \text{ h} \cdot 905 \text{ Wh}} = 88.29\%$$

Se puede deducir que el ahorro en el consumo eléctrico es de aproximadamente 11.71% con la aplicación del control PID.

## VI. CONCLUSIONES

En este documento se realizó una comparación que demuestra la eficiencia de un controlador PID debido a su sencillez y facilidad de implementación, siempre y cuando este sea correctamente ajustado. Además, es una buena alternativa en aplicaciones donde el tiempo de respuesta no sea tan crítico.

El controlador de histéresis analizado puede satisfacer las necesidades de un control de temperatura; sin embargo, debido a las oscilaciones que presenta y sus resultados, es altamente recomendable reemplazar dicho controlador por alguno semejante al expuesto en esta investigación, dado que presenta un ahorro energético y mayor estabilidad para procesos estándar o procesos donde pudieran existir perturbaciones externas.

Como futuros trabajos se plantea la implementación de un controlador de lógica difusa y su comparación con los sistemas existentes.

### Agradecimientos

Agradezco el apoyo brindado por el Tecnológico Nacional de México Campus Veracruz, y el apoyo financiero otorgado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, para la presentación de este trabajo en el Congreso Internacional de Verano de Potencia, Aplicaciones Industriales y exposición Industrial Guerrero 2021.

### Referencias

- [1] I. G. Baleriola, «Comparativa de diferentes técnicas de control con finalidad didáctica sobre un mecanismo bola-viga,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2016.
- [2] H. G. C. Guerrero, «Método de control de dos posiciones,» México, 2019.
- [3] Manual del PLC DL06, *Operación del control PID con el DL06*, España: Automationdirect, 2007.
- [4] C. Pardo, «Picuino,» 08 noviembre 2020. [En línea]. Available: [www.picuino.com](http://www.picuino.com). [Último acceso: 10 diciembre 2020].