

Optimización de sintonización de controladores PID bajo el criterio IAE aplicados a procesos térmicos

Optimization of tuning PID controllers under IAE criteria applied to thermal processes

Jorge Duarte* y Wilman Orozco**

ABSTRACT

Equations tuning for PID controllers integrated approach are widely used in industry. Have developed different types of tuning equations including the most used is the IAE. In the literature several types of tuning equations are reported, but these look satisfactory operation of the control loop but not the optimal operation with a minimum value in the response of the controlled variable. In this research, the response is optimized when IAE equations tuning is used in PID controllers, which seeks to minimize the deviation of the controlled variable to the set point for regulatory control, in order to decrease the value of IAE, which is necessary in critical applications such as the paper industry, where the management of temperature deviation is critical for the final product quality.

Keywords: IAE, Process Gain process, Transfer Function, PID Controller.

RESUMEN

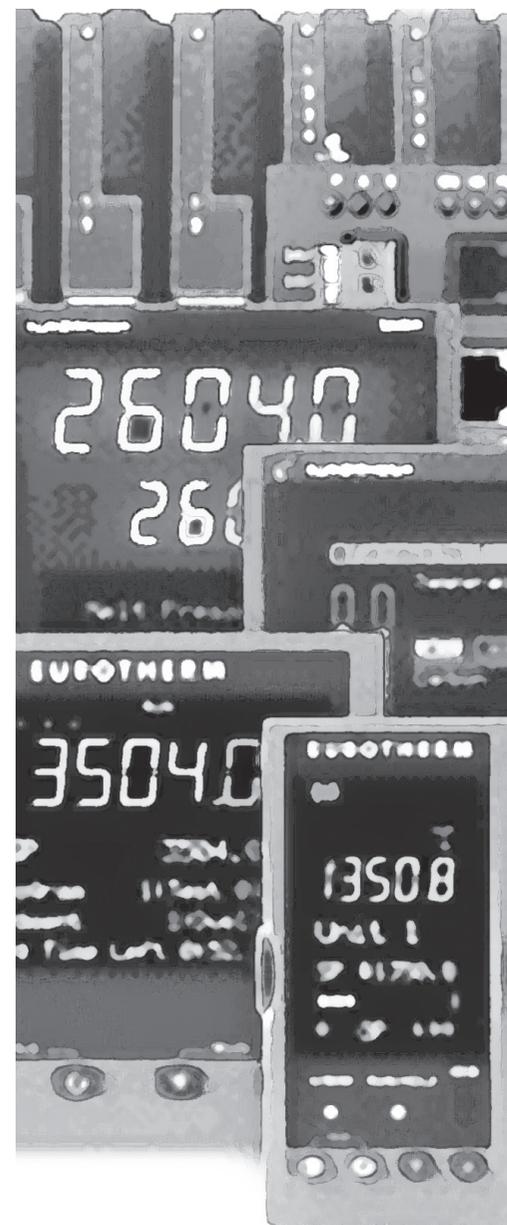
Las ecuaciones de sintonía de criterio integral en controladores PID son ampliamente utilizadas en el ámbito industrial. Se han desarrollado diferentes tipos de ecuaciones de sintonía entre ellas una de la más utilizadas es la IAE. En la literatura se reportan varios tipos de ecuaciones de sintonía, pero estas buscan una operación satisfactoria del lazo del control más no el punto óptimo de operación con un valor mínimo de desviación en la respuesta de la variable controlada. En este artículo se optimiza esta respuesta cuando se utilizan ecuaciones de sintonía IAE en controladores tipo PID, el cual busca minimizar la desviación de la variable controlada respecto al Set Point para un control regulatorio, con el fin de que el valor de IAE disminuya, lo que es necesario en aplicaciones críticas como la industria papelera, donde el manejo de la desviación de la temperatura es crítico para la calidad del producto final.

Palabras clave: IAE, Ganancia del proceso, Función de transferencia, Controlador PID.

Fecha de recepción: 2015-02-07 - Fecha aceptado: 2015-06-24

* Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Antonio Nariño Sede Pto. Colombia, jorge.duarte@uan.edu.co

** Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Antonio Nariño Sede Pto. Colombia, wilman.orozco@uan.edu.co



1. INTRODUCCIÓN

En los procesos industriales donde se presenta intercambio de calor es común encontrar la necesidad de estabilizar la respuesta del sistema de manera rápida, y por las características del proceso que se maneja se debe cumplir que las variables controladas sean manejadas por sistemas de control robusto, como se ha demostrado en trabajos anteriores [1]. En muchas aplicaciones de la industria papelera se utilizan sistemas de control basados en la estrategia de control PID, y por su robustez, esta sintonizados a través de la metodología IAE. En este caso la oscilación no es crítica, pero es de interés que se minimice lo más rápido posible alrededor del Set Point. En otros casos industriales, como el del mezclado de la pasta de papel con papel reciclado, se requiere que la temperatura del agua se mantenga lo más cerca posible cerca del Set Point, ya que una operación por largo tiempo por encima de la temperatura óptima causa una degradación en la contextura de la pasta de papel, por lo que se ha sido necesario el diseño de ecuaciones de sintonía específicas para ese tipo de casos, en donde el criterio para el desarrollo de estas expresiones es diferente [2].

Teniendo en cuenta lo anterior, autores como Smith [3] presentan ecuaciones de sintonización basadas en el criterio de IAE, el cual busca que la variable controlada se establezca de manera rápida alrededor del Set Point. La falencia del enfoque anterior es que se consigue una rápida estabilización pero no la óptima, es decir, que se logre el mínimo IAE sin que la variable de control se vuelva inestable como consecuencia de la sintonización del lazo de control. En base a este contexto, se desarrolló un procedimiento de optimización en donde se inició con la caracterización de un proceso típico de suministro de agua caliente (Intercambio de Calor) que se detalla en la literatura [3]. Del proceso en referencia se conocen todas las variables físicas necesarias para generar un modelo con la ayuda de la herramienta Simulink[®]. Después de la caracterización del proceso, se generó una función objetivo, la cual depende de dos parámetros variables a y b , las cuales al

modificarse van a permitir minimizar el área bajo la curva de la función variable controlada - tiempo, sin que se presente inestabilidad. Con lo anterior, se encontrará cual es el IAE óptimo, el cual se conseguirá con el ajuste fino del controlador, variando la ganancia de este. Los resultados obtenidos serán comparados con los obtenidos en un proceso con un controlador PID utilizando las técnicas típicas de sintonización.

2. TRABAJOS PREVIOS

Se han desarrollado varias investigaciones para optimizar la respuesta de lazos de control para diferentes procesos industriales. Uno de estos estudios fue el desarrollado por Echeverry [4], el cual está basado en un proceso con un reactor quimiostato para la fermentación en continuo de las *Zymomonas Mobilis*. En este tipo de reactores se presentan situaciones difíciles de manejar por el sistema de control, ya que los microorganismos usados para esta fermentación exhiben un comportamiento cinético altamente oscilatorio, por lo que proponen manejar diferentes variables manipuladas, observando cual conjunto operacional ofrece un mejor desempeño.

Por la naturaleza dinámica de los procesos, son variadas las ecuaciones de sintonización y las técnicas de control que se han desarrollado buscando el mejor desempeño del sistema de control. En algunos casos se ha utilizado técnicas de Lógica Difusa para optimizar la respuesta del lazo de control. Bimal [5] desarrolló una aplicación de redes neuronales para la optimización paramétrica, donde se utiliza optimización multi-objetivo, la cual en ingeniería ha abierto un gran interés para la resolución de problemas de control. La optimización multi-objetivo también ha sido aplicada en el diseño de sistemas de control basados en estrategias PID en diversas ocasiones para control de procesos industriales. Calistru [6] presenta el desarrollo de ecuaciones de sintonía PID usando criterio integral y aplicando una optimización basada en la fórmula de Krasovschii-Pospelov, cuyos resultados son aplicables a muchos procesos industriales petroquímicos.

3. DEFINICIÓN DE IAE

La presente investigación busca la optimización de la función de desempeño en controladores PID, la cual se denomina IAE. Los controladores PID son aquellos que dentro de su lógica tiene una componente Proporcional (búsqueda del Set Point), una Integral (disminuir la desviación del Set Point) y una Derivativa (predicción) [3]. Esta, en forma general representa el área bajo la curva de la variable controlada en el tiempo, la cual se desvía respecto al Set Point por la acción de una perturbación en una de las variables de entrada al proceso. Como se mencionó previamente, en muchos procesos industriales existe el interés de mantener la mayor parte del tiempo la variable controlada muy cerca del Set Point después de una perturbación. Para esto, se requiere desarrollar una función que al ser minimizada se obtenga el valor mínimo de IAE y a la vez que pueda realizarse una sintonización fina sin afectar la estabilidad del lazo de control, como lo describe Alfaro [7]. Para entender la funcionabilidad del IAE, en la Fig. 1 se muestra esquemáticamente este parámetro para un controlador PID, cuya minimización representa la disminución de fluctuaciones alrededor del Set Point. Lo anterior indica, que a escala industrial es posible sintonizar controladores que además de permitir estabilizar la variable controlada, lo hagan de manera rápida alrededor del Set Point sin afectar la robustez del sistema de control [8].

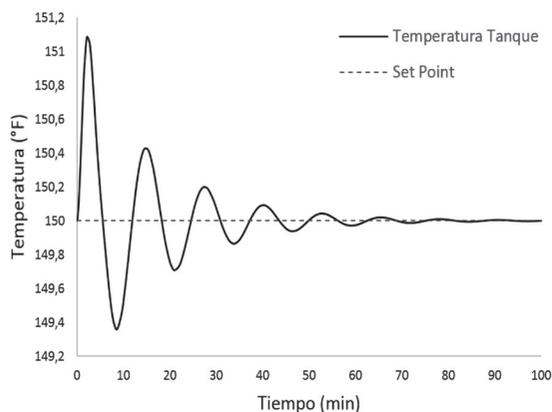


Figura 1. Definición Esquemática de la Función Objetivo a Optimizar

Desarrollos experimentales propuestos por Ziegler [9] corroboraron que las oscilaciones y la respuesta ante las perturbaciones eran función de los parámetros de sintonización del controlador PID y que con pequeñas variaciones en la ganancia se puede lograr disminuciones en el IAE. También constato, que la sintonización más allá de cierto punto permite bajar el valor del IAE, pero el sistema se vuelve oscilatorio alrededor del Set Point, por lo que debe haber un punto crítico hasta donde el programador pueda manejar la sintonía del controlador PID para disminuir el IAE sin sacrificar robustez.

Como premisa se tiene que la función del controlador PID en un sistema de control es la de amortiguar la respuesta de este ante perturbaciones [10], por lo que se propone simular el comportamiento de la variable controlada (en este caso la temperatura en el tanque) como una variable amortiguada en el tiempo y constatar con datos experimentales si esta suposición es correcta y valida. Tomando en cuenta lo anterior, esta función de Temperatura amortiguada - tiempo va a ser integrada para encontrar el área bajo la curva, lo cual va a representar nuestra función objetivo (IAE), y luego será optimizada para encontrar los parámetros óptimos para minimizar el área bajo la curva de esta función.

Para observar la importancia de tener un valor de referencia para minimizar el IAE, tomaremos el caso del proceso en estudio, en donde el controlador ha sido sintonizado con ecuaciones de IAE disponibles en la literatura [3]. Los resultados en el desempeño del lazo de control y específicamente de la variable controlada (Temperatura de tanque) ante una perturbación del 20% en el flujo de alimentación se pueden observar en la Figura 2.

En la figura anterior se ilustra el comportamiento con la sintonía dada por las ecuaciones de IAE y su valor de IAE. Se observa una mejora en la respuesta de la variable de ingeniería debido al ajuste fino de sintonización (aumento de la ganancia del controlador por método de prueba y error). El problema de seguir aumentando la ganancia, es que en algún valor crítico, la respuesta del lazo de control se vuelve inestable,

- Optimización de sintonización de controladores PID bajo el criterio IAE aplicados a procesos térmicos •

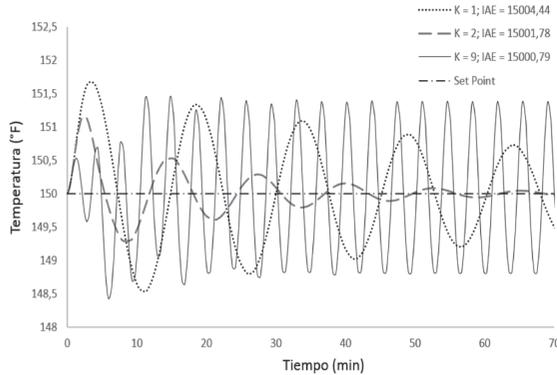


Figura 2. Comportamiento de IAE modificando ganancia del controlador

lo que en la vida real conllevaría a problemas en la durabilidad de la válvula de control y la calidad final del producto. Lo anterior ilustra el hecho de que se alcanza un IAE crítico, donde sí se busca bajar más de este punto, el sistema de control presenta una respuesta oscilatoria amplificada, como se ilustra anteriormente y lo confirman autores como Huang [11].

IV. CARACTERIZACIÓN DE PROCESO TIPO PARA ANÁLISIS

Para iniciar la construcción de la función objetivo, primero es necesario realizar una caracterización del proceso. Para esto, tomaremos un proceso térmico del clásico de control Smith [3], donde encontramos un modelo completo para la simulación de un proceso real en Simulink. El proceso de estudio consta de tanque de mezclado donde se calienta la mezcla a través de un serpentín que conduce vapor de agua (Figura 3). El modelo tiene como principal característica que su respuesta en lazo abierto ante una perturbación es auto-regulada y sin oscilaciones, lo que hace posible aproximar la dinámica del proceso a una función de transferencia FOPDT (primer orden más tiempo muerto).

A. Caracterización del proceso FOPDT

Para la caracterización se tomara como modelo de referencia el proceso industrial de intercambio de calor en un tanque mezclador como el que se muestra en la Figura 3. El lazo de control del

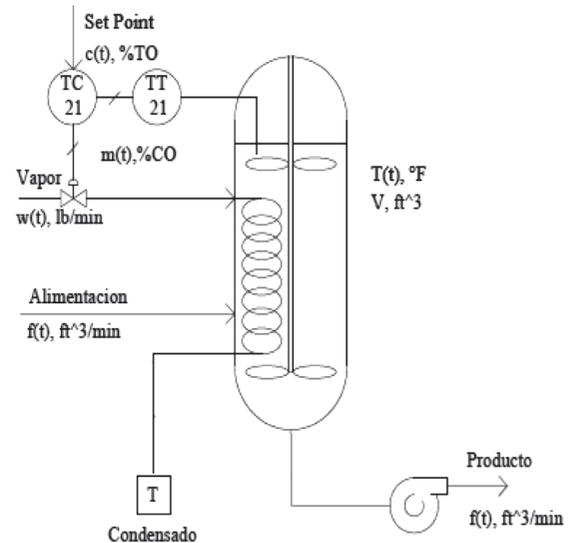


Figura 3. Proceso mezclado con intercambio de calor [3]

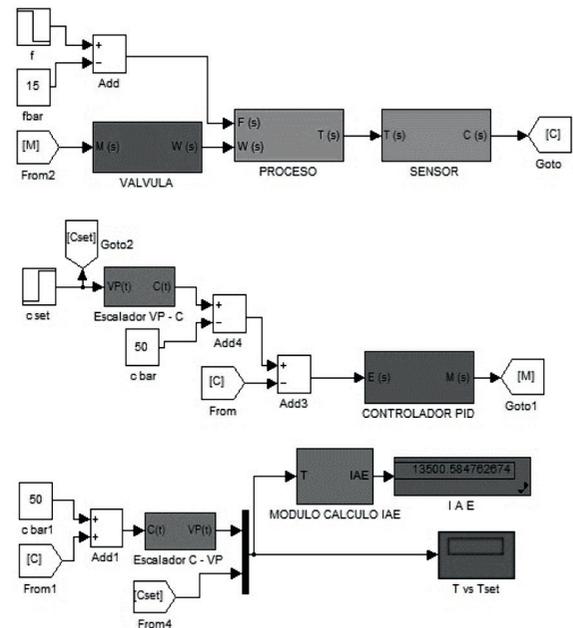


Figura 4. Modelo implementado en Simulink

proceso, está compuesto por un controlador tipo PID, un sensor/transmisor de temperatura y una válvula de control para manejar el flujo de vapor de agua en el serpentín.

En la Figura 4 se observa la implementación del modelo de estudio en Simulink, en donde las variables fueron definidas por Smith [3].

La Figura 5 muestra comparativamente la respuesta del proceso simulado y la modelada como un proceso FOPDT, mostrando la similitud

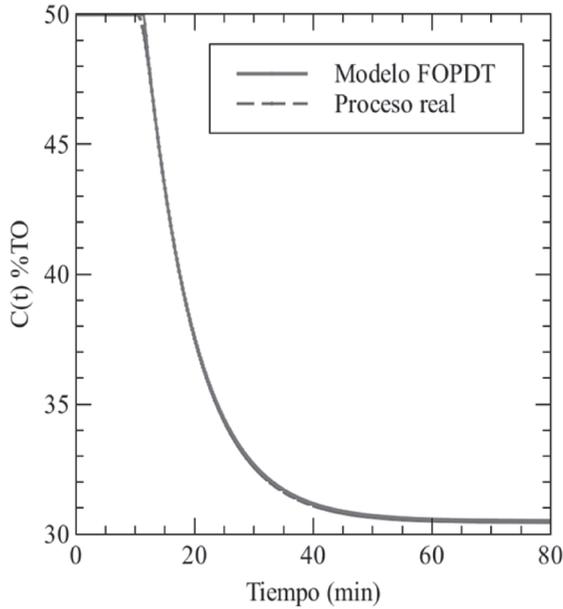


Figura 5. Comparativo de respuesta en lazo abierto del proceso real y modelo FOPDT

entre ambas respuestas, por lo que lo representa significativamente. Tomando en cuenta lo anterior, los datos obtenidos son válidos para utilizarlos en la ecuación de sintonía IAE.

En este proceso en particular es necesario minimizar la desviación de la temperatura por encima del Set Point, ya que afecta las propiedades finales del producto final. A través de la caracterización en lazo abierto (Figura 5), se determinó la ganancia, la constante de tiempo y el tiempo muerto del proceso. Esto es: $K_p=1,0367$, $\tau_p=1,3689$ y $t_0=1,9538$.

B. Calculo de Sintonía Inicial IAE

Las ecuaciones de sintonía para IAE fueron determinadas por Murril y otros [12] y están plasmadas en Smith [3]. A continuación se relacionan las expresiones a utilizar, las cuales dependen de K_p , τ_p y t_0 .

$$K_C = \frac{1,435}{K_p} \left(\frac{t_0}{\tau_p} \right)^{-0,921} \quad (1)$$

$$\tau_I = \frac{\tau_p}{0,878} \left(\frac{t_0}{\tau_p} \right)^{0,749} \quad (2)$$

$$\tau_D = 0,482 \tau_p \left(\frac{t_0}{\tau_p} \right)^{1,137} \quad (3)$$

Reemplazamos los valores de K_p , τ_p y t_0 de nuestro proceso de estudio en (1), (2) y (3), y obtenemos $K_C = 1,0107$, $\tau_I = 2,0031$ y $\tau_D = 0,9997$. Los parámetros anteriores son los de sintonización para el controlador PID del proceso en estudio. Hasta esta parte, se ha descrito el procedimiento normal que se realiza en la práctica para la sintonización de controladores PID. Lo nuevo es el procedimiento de optimización que se propone para mejorar el desempeño del lazo de control, el cual se describe a continuación.

V. DEFINICIÓN DE FUNCIÓN DE OPTIMIZACIÓN: IAE MEJORADO

Primero reemplazamos los valores característicos obtenidos anteriormente en la simulación del proceso en Simulink, como se ilustra en la Figura 6.

Luego, verificamos la respuesta que tiene el proceso ante una perturbación característica. Esto en el proceso de estudio la perturbación es un cambio en el flujo de entrada. Smith [3] define los parámetros de la perturbación típica, la cual es un descenso en el flujo de alimentación del tanque $15 \text{ ft}^3/\text{min}$ a $12 \text{ ft}^3/\text{min}$. La situación anterior se podría explicar por la entrada en operación de una máquina que está ubicada en un área anterior y que consume $3 \text{ ft}^3/\text{min}$ de manera constante desde que arranca hasta el final de su operación. Introducimos los valores de este

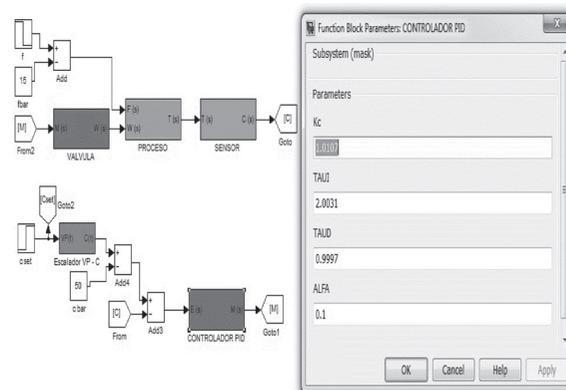


Figura 6. Valores característicos de proceso en estudio

- Optimización de sintonización de controladores PID bajo el criterio IAE aplicados a procesos térmicos •

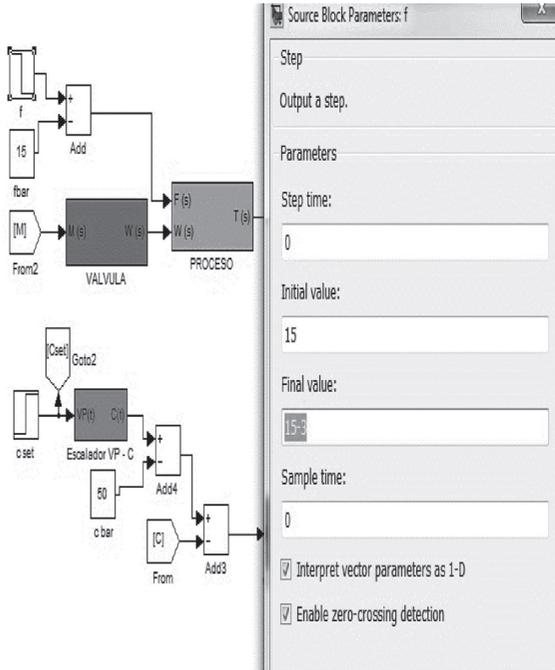


Figura 7. Perturbación en modelo de análisis

escenario en el modelo, los cuales se reemplazan en Simulink como se observa en la Figura 7.

Al correr el modelo, podemos observar que su tiempo de estabilización esta alrededor de los 100 min, por lo cual el tiempo de amortiguamiento es bastante elevado, lo cual resalta el hecho de que es necesario optimizar la respuesta para que sea lo más cercana al Set Point (minimizar el IAE) porque las temperaturas máximas se van a dar por un tiempo prolongado.

Ahora tomamos los valores máximos y mínimos en el primer periodo. Si la suposición de que la función de Temperatura se puede describir como una función amortiguada en el tiempo, tomando estos dos primeros puntos debe tener la capacidad de reproducir el resto de puntos a los largo de t. Al simular el modelo, obtenemos los datos del modelo simulado en Matlab, los cuales se organizan en la Tabla I.

Tabla I. Datos puntos máximos - mínimos de la curva de respuesta T vs t

T (°F)	t (min)
151,801	4
148,705	11,6

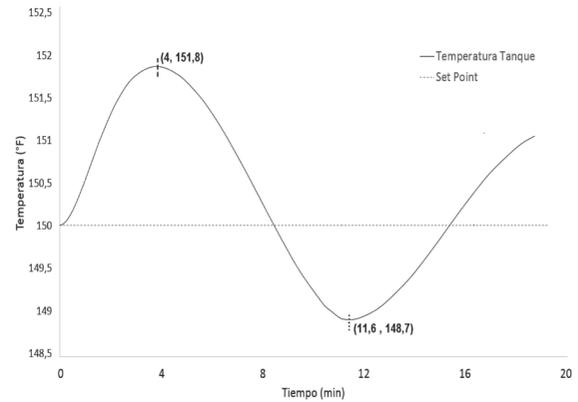


Figura 8. Máximo y Mínimo primer periodo - respuesta del sistema

Los valores anteriores para nuestro proceso en estudio se pueden observar en la Figura 8.

Con los puntos anteriores construimos la función amortiguada, la cual según Zill [13] tiene la siguiente estructura:

$$T = T_{sp} + a * \exp(-b * t) * \sin\left(\frac{t}{\frac{P}{2\pi}}\right) \quad (4)$$

Donde P está determinado por la naturaleza del proceso, el cual para este caso es $\frac{P}{2\pi} = 2,4669$ según lo observado en la Figura 8. Para nuestro caso de estudio el $T_{sp} = 150$ °F, por lo que (4) queda:

$$T = 150 + a * \exp(-b * t) * \sin\left(\frac{t}{2,4669}\right) \quad (5) \quad [T \text{ en } ^\circ\text{F}]$$

Conocemos dos puntos con coordenadas (t,T) que se resaltaron en la Figura 8, por lo que si reemplazamos en (5) y resolvemos las ecuaciones resultantes obtenemos que $a = 2,1629$ y $b = 0,045224$.

Tomando (5) y reemplazando los valores de a y b, la función que describiría la temperatura en el tanque a lo largo del tiempo para nuestro proceso de estudio sin optimizar es:

$$T = 150 + 2,1629 * \exp(-0,045224 * t) * \sin\left(\frac{t}{2,4669}\right) \quad (6)$$

El comportamiento de (6) se ilustra en la Figura 9.

Donde comparando punto a punto con la Figura 8 se encontró que describe la función de temperatura de manera apropiada (con un error

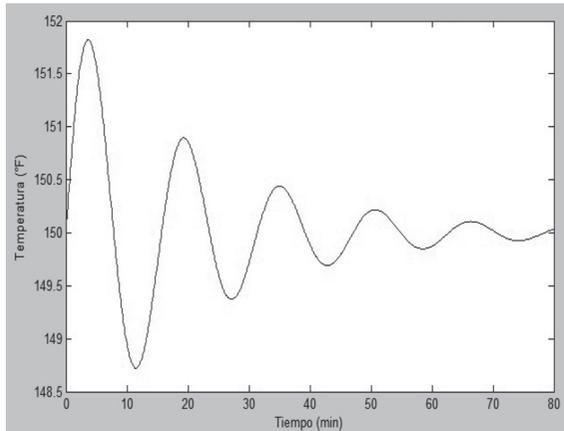


Figura 9. Respuesta del sistema con modelo propuesto - Generada en Matlab

relativo del 0,47%), lo que significa que nuestra función objetivo la podemos formular como amortiguada, por lo que puede tener la forma general de (5).

Luego, nuestra meta es minimizar el área bajo la curva de la función $T(t)$, por lo cual procedemos a integrar a (5) de 0 a t , para obtener la función IAE - Modificada.

$$IAE_{mod} = \int_0^t T dt = \int_0^t \left[150 + a * \exp(-b * t) * \sin\left(\frac{t}{2,4669}\right) \right] dt$$

Integrando la expresión anterior se obtiene que:

$$IAE_{mod} = 150 * t + \frac{a * \exp(-b * t)}{\left[b^2 + \left(\frac{1}{2,4669} \right)^2 \right]} * \left[-b * \text{sen}\left(\frac{t}{2,4669}\right) - \left(\frac{1}{2,4669} \right) * \cos\left(\frac{t}{2,4669}\right) \right] + \frac{a * \left(\frac{1}{2,4669} \right)}{\left[b^2 + \left(\frac{1}{2,4669} \right)^2 \right]} \quad (7)$$

Donde (7) es nuestra función objetivo con dos variables a optimizar.

6. METODOLOGÍA DE OPTIMIZACIÓN: VARIABLES A OPTIMIZAR

Encontrando la función objetivo (7), se procede con la optimización teniendo en cuenta que las variables a optimizar son a y b , con el fin de minimizar nuestra función IAE. El tiempo de estabilización del proceso ya se conoce, el cual es 100 min. Nuestro interés no es que establezca más rápido el proceso, sino que en el mismo tiempo de

estabilización se logre bajar el IAE sin sacrificar la estabilidad del proceso. Para la optimización utilizaremos el algoritmo desarrollado por Venkataraman [14], utilizando el método de paso descendente, pero que fue modificado para trabajar con dos variables y se le introdujeron algunos datos de entrega que son de interés en el desarrollo de la optimización. El método de paso descendente provee una evolución natural para el gradiente. El gradiente de una función en un punto es la dirección de más rápido aumento en el valor de la función en ese punto. La dirección de descenso se puede obtener revertiendo el gradiente (o multiplicándolo por -1). El próximo paso sería considerar el vector descenso como una dirección de búsqueda, después de todo lo que se busca es que la función decrezca a través de iteraciones sucesivas. Esta serie de pasos da como resultado el algoritmo de paso descendente que se va a aplicar a continuación.

7. PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

Venkataraman [14] desarrolló un algoritmo de paso descendente, el cual permite encontrar el mínimo local de manera rápida. Para definir el desarrollo del algoritmo, se introducen los datos de entrada definidos por el autor, que son:

[-10 10]: es el intervalo del gráfico que muestra los resultados de optimización.

[2,1629 0,045224]: es la semilla donde se va a iniciar la optimización. Para nuestro caso son los valores de a y b que describen el proceso a optimizar, y que fueron calculados en el apartado V. Se verificara que parámetros a y b son necesarios para optimizar la función (minimizar el IAE).

[20]: es el número de iteraciones máximas a realizar para llegar al mínimo, con el fin de garantizar una rápida convergencia.

[0.01]: es la tolerancia deseada para el proceso de iteración de la optimización.

Al correr el algoritmo de optimización encontramos que el mínimo IAE se alcanza en $a = 2,16239$ y $b = 0,02628$ (resaltado en el círculo), lo cual se puede verificar en la Fig. 10, en donde se ilustra la respuesta de los pasos de optimización del algoritmo implementado.

- Optimización de sintonización de controladores PID bajo el criterio IAE aplicados a procesos térmicos •

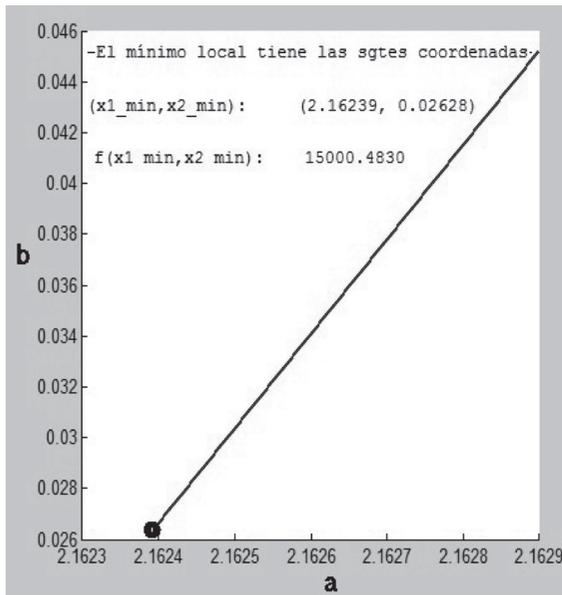


Figura 10. Gráfico con pasos de Optimización Función Objetivo

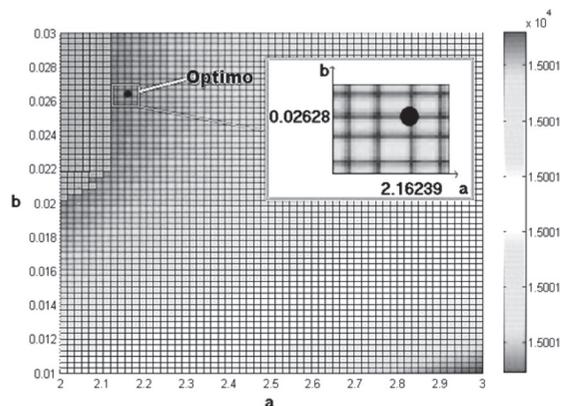


Figura 11. Coordenadas del óptimo en la superficie de respuesta

Luego, para verificar si esta respuesta minimiza el IAE, procedemos a graficar la función IAE y verificamos el punto calculado para la superficie de respuesta de la función de optimización. Graficando en Matlab se observan los resultados obtenidos en la Figura 11.

Lo anterior reconfirma que, en intervalo de análisis el punto a y b encontrado conducen a un mínimo en la función IAE (área más oscura de la Figura 11). A continuación se realiza la validación experimental en el modelo desarrollado en Simulink, con el fin de verificar que la respuesta alcanzada en ese nivel de IAE es estable y que disminuirla más allá de este valor conduce a inestabilidad en el lazo de control.

8. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Para la validación utilizaremos la simulación del proceso en Simulink, cuya estructura se observó en la Figura 4. Procedemos a graficar el comportamiento de la Temperatura tomando en cuenta los valores de sintonía calculados con (1), (2) y (3), cuyos valores son $K_C = 1,0107$, $\tau_I = 2,0031$ y $\tau_D = 0,9997$. El gráfico de respuesta y el valor de IAE se puede observar en la Figura 12.

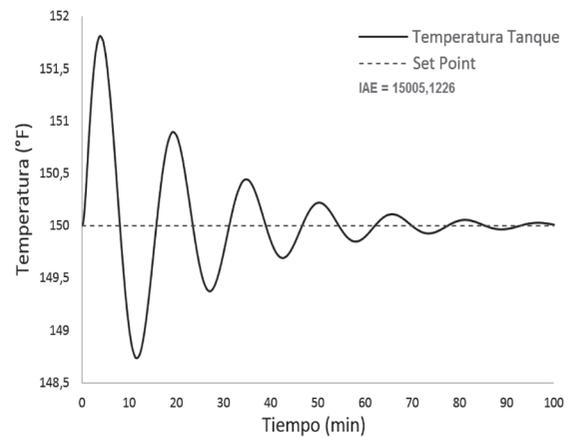


Figura 12. Respuesta del sistema con sintonía IAE inicial

Se observa que el IAE característico del lazo de control es 15005,1226. El proceso de optimización arrojó que el IAE Mejorado que se puede obtener es de 15000,4830, sin sacrificar estabilidad. Adicional a esto, es necesario verificar que la temperatura máxima este por debajo de las demás iteraciones, para que se cumpla el propósito de que este lo más cercano al Set Point, que es el segundo objetivo de la optimización [15]. Empezamos a variar el parámetro de ganancia del controlador, que es el que permite el control de las oscilaciones de la variable de control y la reducción de IAE. Se aumenta la ganancia y los resultados obtenidos de la respuesta del lazo de control se organizan en la Tabla 2.

Se puede observar en la Tabla 2 varios comportamientos interesantes. La primera es que efectivamente podemos mejorar la sintonía del controlador basándonos en el criterio de optimización, por lo cual quedo demostrado que se puede disminuir el IAE por debajo del punto actual de operación sin sacrificar estabilidad.

Tabla 2. Datos de respuesta Temperatura controlada para diferentes Kc

Kc	IAE	T máx (°F)	Respuesta
1	15005,1	151,82	Estable
3	15001,7085	150,92	Estable
6	15000,8542	150,60	Estable
9	15000,5796	150,48	Estable
10	15000,1682	150,60	No estable

Aumentando la ganancia del controlador, se logró llegar hasta un IAE de 15000,4830 (mínimo IAE) y se observó que las temperaturas máximas se acercan al Set Point, que es otro de los objetivos del proceso de optimización propuesto. Luego, cuando se excede el valor de IAE mínimo permisible, se aumenta la temperatura máxima del tanque, lo que demuestra que la respuesta no es la deseada. Para ratificar lo anterior, se grafica la variable de respuesta Temperatura del tanque variando de la ganancia del controlador de Kc=1 (Inicial), luego con Kc=9 (Mejorado) y Kc=10 (Inestable), cuyas respuestas se pueden observar en la Figura 13.

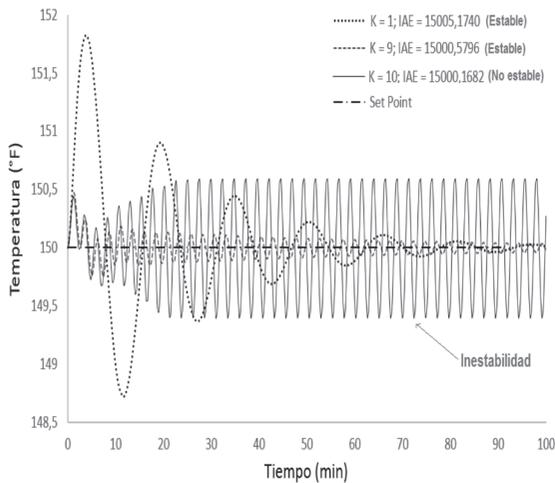


Figura 13. Respuesta Temperatura tanque con Kc=1, Kc=9 y Kc=10

Se confirma que si se excede el IAE Mejorado el sistema de control nunca estabiliza en el Set Point y por lo contrario, oscila alrededor de este con un valor mayor al de la máxima amplitud del primer periodo, por lo cual el sistema es incondicionalmente inestable. Lo anterior se observa en la práctica cuando solo se ajusta los

parámetros de sintonización a prueba y error, sin tener un procedimiento de ajuste fino [7]. Otra ventaja del procedimiento propuesto es la posibilidad de garantizar que el lazo de control no va a funcionar con reajuste excesivo, que es un fenómeno nocivo en el cual la válvula de control abre y cierra el 100% para intentar compensar el comportamiento del lazo de control y que según Vizúete [16] es una de las mayores causa de falla en este tipo de actuadores finales.

9. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los numerosos tipos de procesos en la industria que utilizan controladores PID, es de importancia la implementación de procedimientos de sintonización fina para diferentes tipos de aplicaciones. Las ecuaciones de sintonización que se encuentran actualmente en la literatura han sido ampliamente utilizadas y muestran un buen desempeño del lazo de control, pero algunas de estas son muy robustas, ya buscan garantizar estabilidad más no optimizar la respuesta de la variable de control. Actualmente el proceso de mejora en la sintonización se desarrolla con un proceso de prueba y error, sin brújula y basados en la experiencia de los programadores.

En la presente investigación se ilustra una metodología para realizar un proceso de optimización y mejora del desempeño del lazo de control sin perder estabilidad. El desarrollo de este procedimiento de sintonización fina fue validado con simulaciones y se logró demostrar que era factible mejorar la sintonización de un controlador PID realizando un procedimiento de optimización multivariable con las ecuaciones de IAE, en búsqueda de minimizar este parámetro. Como el criterio de IAE se desarrolla bajo el precepto de que la respuesta sea amortiguada (Figura 12), se formuló un metodología para variar sistemáticamente los parámetros a y b de (5) con el fin de conseguir disminución del IAE y acercar la respuesta hacia el Set Point [17].

De la metodología propuesta, se constató que cuando se disminuye el IAE por debajo del valor crítico de sintonía (vía aumento de la ganancia del controlador), el comportamiento

del sistema es errático e inestable, lo cual no es deseable porque causa fallas mecánicas en los elementos finales de control. Adicional a esto, se amplifica la perturbación que entra al sistema, o sea que nunca se alcanza el Set Point (Figura 13), lo cual afecta la calidad del producto o proceso que se está controlando. También se debe tener en cuenta que si tiene una referencia de la sintonía del controlador con los métodos tradicionales, el programador sabrá hasta dónde llegar, gracias a la ayuda de las herramientas de optimización. Este tipo de herramientas son variadas, pero en la presente investigación se aplicó el procedimiento de paso descendente, ya que ofrece una rápida convergencia y estabilidad [14]. En la Tabla II se observa la influencia de la ganancia del proceso sobre la estabilidad del, en donde no se logra una mejora significativa del IAE en las últimas dos ganancias, pero si sacrifica por completo la estabilidad del proceso.

En los casos críticos donde la respuesta óptima está muy alejada de la caracterización, será necesaria la ayuda adicional de otros métodos de optimización como el de *sección dorada* para encontrar un intervalo de aplicación del paso descendente, en donde se encuentre el mínimo local y luego afinar la búsqueda por el método expuesto en este trabajo.

Los resultados obtenidos desde el punto de vista de control son muy satisfactorios, ya que se pasó de un IAE de 15005,1226 con un valor máximo de temperatura por perturbación de 151,82 °F a obtener un IAE de 15000,5796 con un valor máximo de temperatura de 150,48 °F, que en algunas aplicaciones críticas es un delta de temperatura considerable y que conlleva a un lazo de control más estable y con mejor desempeño alrededor del Set Point.

REFERENCIAS

- [1] J. Duarte, G. Amador, J. García, A. Fontalvo, R. Vasquez Padilla, M. Sanjuan, y A. Gonzalez. "Auto-ignition control in turbocharged internal combustion engines operating with gaseous fuels" en *Energy*, Vol. 71, pp. 137-147, 2014.
- [2] J. Duarte and G. Amador, Desarrollo de ecuaciones de sintonía para controladores tipo PID aplicados al control de temperatura en intercambiadores de calor, en *INGE@ UAN, Tendencias en la Ingeniería*, Vol. 4, pp.21-28, 2013.
- [3] C.A. Smith and A.B. Corripio, "Principles and practice of automatic process control", John Wiley & Sons, pp. 200,1997.
- [4] N. Echeverry, O. Quintero, M. Ramírez y H. Álvarez, Control de un bio-reactor para fermentación alcohólica en continuo, en *CLCA 04*, INAUT Argentina, 2004.
- [5] B. Bimal, P. Nitin, and K. Rajashekara, "A neuro-fuzzy based on-line efficiency optimization control of a stator flux-oriented direct vector-controlled induction motor drive", en *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 44, pp. 270–273, 1997.
- [6] C. Calistru, "A symbolic optimization approach for tuning of PID controllers", en *Proceedings of the 4th IEEE Conference on Control Applications*, pp. 170–175, 1995.
- [7] V. Alfaro. Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores, en *Ingeniería CR*, Vol. 1, pp. 1-12, 2011.
- [8] O. Arrieta and V. Alfaro, Sintonización de controladores PI y PID utilizando los criterios integrales IAE e ITAE, en *Ingeniería CR*, Vol 1, pp. 1-12, 2011.
- [9] N.B. Ziegler, J.G. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers", en *Transactions ASME*, Vol. 64, pp. 759-769, 1942.
- [10] G. Buttazzo, M. Velasco, P. Marti, y G. Fohler, "Managing quality-of-control performance under overload conditions" en *Real-Time Systems ECRTS 2004, Proceeding 16th Euromicro Conference IEEE*, pp. 53–60, 2004.
- [11] H. Huang y J. Jeng, "Monitoring and assessment of control performance for single loop systems", en *Industrial & engineering chemistry research*, Vol. 5, pp. 1297–1309, 2002.
- [12] P. Murril, C. Smith y A. López, "Controller tuning relationships based on integral

performance criteria”, en Instrumentation Technology, Vol. 14, pp. 51-57, 1967.

[13] D.G. Zill, Ecuaciones Diferenciales con Aplicaciones, Editorial Thomson, pp. 215, 1997.

[14] P. Venkataraman, “Applied Optimization with MATLAB Programming”, John Wiley & Sons Inc., pp.84-96, 2002.

[15] S.S. Rao, “Introduction to Optimization, in Engineering Optimization: Theory and

Practice”, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, pp.124-132, 2009.

[16] M. Vizuite, Diseño e implementación de un sistema de control y monitoreo para los clarificadores de la planta de Puengasi, tesis Universidad Politécnica Salesiana Ecuador, pp.15-18, 2012.

[17] V. Alfaro, Métodos de sintonización de controladores PID, Revista Ingeniería CR, Vol. 1, pp. 12, 2011.