

Model identification and comparative evaluation of PID controller tuning methods for a catalytic regeneration process in Scilab-XCOS

Gerardo Lanza ^{*,a} , Francisco Arteaga-Bravo ^b 

^aInnovent, C.A. Automatización y Controles Industriales, Valencia, Venezuela.

^bCentro de Investigación y Tecnología en Automatización, Electrónica y Control (CITAEC), Departamento de Sistemas y Automática, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

La selección de este artículo fue realizada en el marco de la Jornada de Investigación de la Escuela de Ingeniería Eléctrica "Prof. César Rodolfo Ruiz" Octubre 2020, siendo la evaluación, arbitraje, aceptación y edición a cargo de Revista Ingeniería UC.



<https://doi.org/10.54139/revinguc.v28i1.19>

Abstract.- In this paper, model identification and feedback control are presented for a catalytic regeneration process, having as controlled variable the temperature of the catalyst layer. To represent the system, an approximate first-order model, obtained by identification methods is used. Two methods are used for PID controller tuning, a direct synthesis method and an organized approximate trial and error method. The first one requires the precise determination of the dominant characteristics of the process based on identification techniques, while the second one is an improvement-extension of the original Ziegler-Nichols method, taking as an essential condition that to have a well-tuned loop there must be a predictable relationship between the period of oscillation and the integral time. These procedures are applicable to control loops with self-regulated processes using proportional integral controller. A comparative analysis of these methods is developed and the simulations are performed in Scilab-XCOS. Conclusions are established on the method that is more appropriate for PID Controller tuning based on the simulations performed.

Keywords: model identification; PID tuning; feedback control; catalytic regeneration; Scilab-XCOS.

Identificación de modelo y evaluación comparativa de métodos de sintonización de controlador PID para proceso de regeneración catalítica en Scilab-XCOS

Resumen.- En este trabajo se presenta la identificación de modelo y el control por realimentación de un proceso de regeneración catalítica, teniendo como variable controlada la temperatura de la capa de catalizador. Para representar el sistema se utiliza un modelo aproximado de primer orden, obtenido por métodos de identificación. Para la sintonización del controlador PID se utilizan dos métodos, un método de síntesis directa y un método organizado aproximado de ensayo y error. El primero requiere la determinación precisa de las características dominantes del proceso en base a técnicas de identificación, mientras que el segundo es una mejora-extensión del método original de Ziegler-Nichols, tomando como condición esencial que para tener un lazo bien sintonizado debe existir una relación predecible entre el periodo de oscilación y el tiempo integral. Estos procedimientos son aplicables a lazos de control con procesos autorregulados usando controlador proporcional integral. Se desarrolla un análisis comparativo de estos métodos y las simulaciones se efectúan en Scilab-XCOS. Se establecen conclusiones sobre el método que resulta más apropiado para la sintonización del controlador PID en base a las simulaciones realizadas.

Palabras clave: identificación de modelo; sintonización de PID; control por realimentación; regeneración catalítica; Scilab-XCOS.

Recibido: 22 de octubre, 2020.

Aceptado: 12 de diciembre, 2020.

1. Introducción

En esta investigación se aborda el problema de la identificación de modelo y una evaluación comparativa de dos métodos de sintonización de controlador PID para el proceso de regeneración

* Autor para correspondencia:

Correo-e: glanza@innovent.com.ve (G. Lanza)

catalítica en el ambiente del software libre Scilab-XCOS. Se aplica el método de control PID feedback simple para controlar la temperatura T_C de la capa del catalizador del regenerador. En este proceso el objetivo que se persigue es la regeneración del catalizador del reactor químico. Una descripción de este proceso se puede encontrar en Smith y Corripio [1]. Este proceso se representa por un modelo aproximado de primer orden con retardo, obtenido a partir de técnicas de identificación. La importancia de este modelo radica en que las características del proceso son utilizadas por el enfoque de sintonización denominado Síntesis Directa, en el cual el resultado del entonamiento o sintonización depende del modelo del proceso, razón por la que también se le llama diseño basado en modelo [2, 3]. El segundo enfoque o método de sintonización a ser aplicado en este trabajo se denomina método organizado aproximado de ensayo y error, propuesto por Harold Wade en 2005. Este método puede ser visualizado como una estrategia organizada de ensayo y error para obtener el entonamiento del controlador PID con el número mínimo de cambios de parámetros y de perturbaciones al proceso que se está controlando [4].

Inicialmente, se debe realizar la identificación del modelo del proceso, usando técnicas de identificación experimental mediante señales especiales. Esta visión o enfoque, es designado por algunos autores como identificación clásica o también identificación empírica de modelo. La señal de prueba empleada con más frecuencia es la señal escalón, y es la señal utilizada en este estudio. Esta señal de prueba tipo escalón se puede aproximar en la práctica por la apertura o cierre súbito de una válvula que tiene incidencia en el proceso. En la aplicación de identificación experimental, el modelo se determina efectuando pequeños cambios de la variable de entrada alrededor de un punto de operación. La respuesta dinámica que resulta se usa entonces para determinar el modelo. Este procedimiento resulta en una linealización experimental del proceso, válida para una región alrededor de las condiciones nominales de operación. La información sobre el comportamiento dinámico del proceso se obtiene

registrando los valores de la entrada aplicada y la correspondiente respuesta del proceso. Existen diversos procedimientos tanto de lazo abierto (controlador en modo “manual”) como de lazo cerrado (controlador en modo “automático”) para obtener un modelo aproximado del proceso. Los métodos de lazo abierto se denominan métodos basados en la curva de reacción. En este trabajo se aplica el método denominado “Bump Test” o Prueba Escalón para aproximar el proceso mediante un modelo de primer orden que es el utilizado en la mayoría de los métodos de sintonización de controladores PID. Este modelo del proceso es entonces empleado en el método de sintonización de Síntesis Directa [5, 6, 7, 8, 9].

En el campo del control automático de procesos el objetivo a lograr es la optimización del proceso, y esto requiere colocar al proceso como el punto de partida para el control. El proceso no puede ser despreciado o subestimado, ya que eso puede implicar que nunca se vaya a lograr la optimización del mismo. Los enlaces o conexiones en la secuencia de pasos para alcanzar la optimización pueden involucrar las operaciones de calibración de transmisores, filtrado de señales, identificación de proceso y calibración de sintonización [2]. El procedimiento general de entonamiento de un controlador PID envuelve la etapa inicial de identificación donde se obtiene información sobre la dinámica aproximada del proceso (ganancia, tiempo muerto y constante de tiempo), y luego la aplicación de las reglas de sintonización para determinar los parámetros del controlador [2, 7]. Los parámetros del controlador PID deben ser ajustados tomando muy en cuenta la dinámica del proceso. Si no se considera realmente el proceso, los parámetros obtenidos para el PID serían deficientes y resultarían en respuestas muy lentas o inestables [10].

El objetivo principal de esta investigación se enfoca en la realización de un análisis y una evaluación comparativa entre dos métodos muy significativos dentro del ámbito de la sintonización de controladores PID. El primer método denominado Síntesis Directa, presentado por Kevin Starr y aplicado por la empresa ABB [2], está basado en el modelo aproximado de

primer orden obtenido mediante la aplicación de una prueba escalón (“Bump Test”) con el controlador en modo “manual”. El segundo método se denomina método aproximado organizado de prueba y error, presentado por Harold Wade en una publicación de la ISA (International Society of Automation) en el año 2005 y está basado en la premisa de que para obtener un lazo bien sintonizado se debe tener una relación predecible entre el periodo de oscilación y el tiempo integral. En este segundo método de Wade se efectúan cambios de Setpoint en el proceso y se registran los cambios estando el sistema en lazo cerrado [4].

2. Identificación de modelo del proceso

La técnica de identificación de proceso llamada “Bump Test” o Prueba de Señal se va a utilizar para encontrar el modelo del proceso de regeneración catalítica. Se inscribe dentro de la clasificación de métodos de identificación experimental o identificación mediante señales especiales, que algunos autores también denominan identificación clásica. En general en el campo de la identificación de procesos se puede establecer la siguiente clasificación: identificación analítica o de principios básicos, identificación experimental mediante señales especiales y también identificación paramétrica [5, 10].

2.1. Clasificación de los métodos de identificación de proceso

En la identificación analítica se considera el desarrollo de un modelo partiendo de los principios físico-químicos fundamentales del proceso en estudio, se plantean ecuaciones diferenciales en base a balances de masa y energía, y normalmente se obtienen modelos complejos y no lineales donde se requieren métodos para simplificar y linealizar tales modelos, siendo la principal desventaja de esta estrategia de identificación la necesidad de conocer muy bien la tecnología del proceso lo cual no siempre es factible. Debido a la complejidad de los sistemas industriales los métodos analíticos de identificación son generalmente difíciles de aplicar [5, 11].

En la identificación experimental o clásica se emplean señales especiales, siendo la señal escalón la más simple y utilizada con mucha frecuencia, además también se utilizan secuencias binarias pseudoaleatorias, y en ocasiones rampas, sinusoidales e impulsos. Estas técnicas experimentales son más directas de aplicar y son las que permiten obtener modelos aproximados a más corto plazo, aunque a veces se encuentra resistencia en personal de operaciones de planta en la introducción de señales de prueba en el proceso. Entre los procedimientos empleados para la identificación experimental se pueden nombrar entre otros los siguientes: método de tanteo (lazo cerrado), método de ganancia límite (lazo cerrado), método de curva de reacción (lazo abierto), método de “Bump Test” (lazo abierto), y en este campo se puede decir que la búsqueda de nuevos métodos es un tema abierto de investigación. También se tiene la identificación paramétrica que está basada en los llamados métodos de minimización del error de predicción, que son producto de la teoría tradicional de mínimos cuadrados [2, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12].

En este trabajo el enfoque se va a plasmar en la identificación experimental basada en el método de prueba denominado “Bump Test” o Prueba Escalón según lo explica Kevin Starr en su libro “Single loop control methods” [2].

2.2. Identificación experimental de proceso mediante “Bump Test”

La obtención del modelo es una de las etapas esenciales en la meta deseada de la optimización de proceso. Como se puede ilustrar en la Figura 1, se tienen que realizar una serie de actividades para alcanzar dicha optimización. Esta serie de acciones incluye calibración de instrumentos, filtrado de señales, obtención de modelo y entonamiento de controlador.

La importancia de obtener un modelo del proceso radica en que se tienen métodos de sintonización del controlador basados en el modelo, tal es el caso del método de síntesis directa que se empleará en este trabajo. El método de síntesis directa se basa en las características del proceso para determinar los ajustes del controlador. Por medio de un método

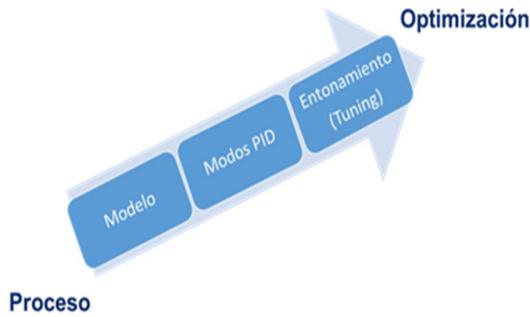


Figura 1: Secuencia de actividades hacia la optimización

de identificación experimental denominado Prueba Escalón o “Bump Test” se puede obtener un modelo aproximado del proceso y se puede predecir cómo responderá el proceso bajo ciertas condiciones. El procedimiento consiste en colocar la salida del controlador en modo manual, y registrar la salida del proceso ante una entrada de tipo escalón tal como se ilustra en la Figura 2. Este es un método de identificación experimental a lazo abierto.

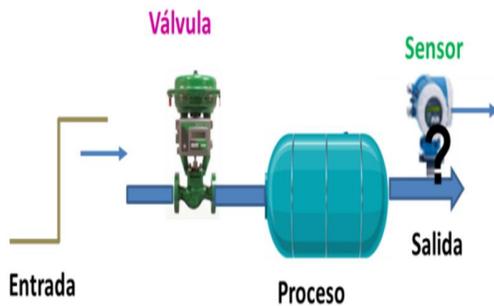


Figura 2: Esquema del procedimiento para el “Bump Test”

Se produce un cambio tipo señal escalón a la salida del controlador en modo manual para manipular la válvula de control y esta señal es la entrada al proceso. En la Figura 3 se supone que tanto el convertidor I/P como la válvula y el transmisor son ideales, y que el proceso es de 1er

orden, por lo que la salida será de primer orden. Se debe hacer un registro de los valores de la señal de salida para cada valor de la señal de entrada y así obtener la curva de respuesta y la dinámica del proceso.

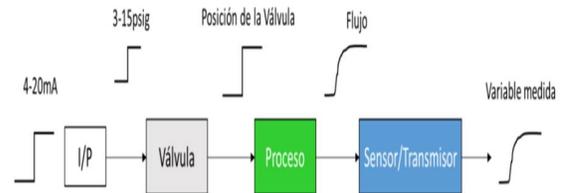


Figura 3: Diagrama de bloques de equipos para realizar el “Bump Test”

2.3. Descripción de la metodología de la Prueba Escalón (“Bump Test”)

Kevin Starr de ABB describe la siguiente metodología para la realización de la Prueba Escalón o “Bump Test”. Antes de hacer la prueba, es altamente recomendable realizar una revisión de la instrumentación de campo, actuador e instrumento de medición del lazo de control. Al iniciar la prueba escalón se debe procurar hacerla en un sentido (abriendo o cerrando la válvula) que mejore o favorezca al proceso. Al comienzo debe hacerse un cambio pequeño en el actuador, por ejemplo un cambio de magnitud de 5 o 10% y trabajando en una porción lineal del elemento final de control. Es importante permitir que el proceso se estabilice antes de generar el próximo escalón. Y también, el escalón se debe generar en direcciones diferentes (abriendo y cerrando la válvula), o sea, usar un método cíclico para la prueba escalón [2].

La prueba escalón o Bump Test se va a aplicar para los tipos de procesos llamados autorregulados. Un proceso autorregulado es aquel que, si todas las entradas son fijas, buscará su propio estado de equilibrio. Es una acción en el proceso que actúa para la restauración del equilibrio. La mayoría

de los procesos en la industria son del tipo llamado autorregulado (más del 90 % de los casos) [2, 13, 14].

2.4. Prueba Escalón “Bump Test” para un Proceso de primer orden

Un proceso de respuesta pura de primer orden no es muy común, pero puede ser usado para modelar casi todos los procesos industriales tales como flujos, presiones, filtros básicos entre otros. Para fines de análisis y diseño de sistemas de control, modelos de primer orden pueden ser perfectamente satisfactorios. Más aún, dichos modelos son el punto lógico de comienzo para el desarrollo y comprensión de modelos más complejos [2, 15].

El proceso de primer orden está definido por los dos parámetros, la ganancia de proceso K_p y la constante de tiempo τ_p . La ganancia del Proceso, K_p representa cuánto cambia en magnitud el proceso y la constante de tiempo, τ_p cuánto tiempo toma en hacerlo. La respuesta ante una entrada escalón del sistema de 1er orden descrito por la ecuación diferencial ordinaria (ecuación (1)):

$$\tau_p \frac{dY(t)}{dt} + Y(t) = K_p U(t), \quad (1)$$

viene dada por la ecuación (2)

$$Y(t) = U(t)K_p(1 - e^{-t/\tau_p}). \quad (2)$$

En la Figura 4 se muestra el esquema del “Bump Test” para el sistema o proceso de primer orden.

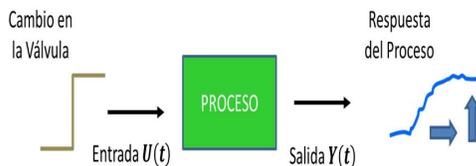


Figura 4: Prueba Escalón “Bump Test” para proceso de 1er orden

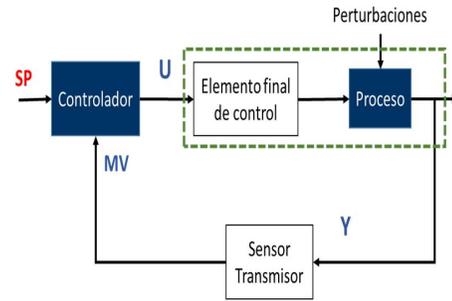


Figura 5: Diagrama del sistema de control en lazo cerrado

A continuación se muestra el esquema del lazo cerrado de control en la Figura 5, indicando la terminología empleada.

Donde SP es el Setpoint o punto de ajuste (valor deseado), PV : Variable de proceso, MV : Variable medida (“measured value” o valor medido), U es la salida del controlador o la entrada al proceso, Y es la entrada al controlador/salida del proceso.

Al efectuar la Prueba Escalón o Bump Test tal como se indica en la Figura 6, se efectúa un cambio del valor en la apertura de la válvula.

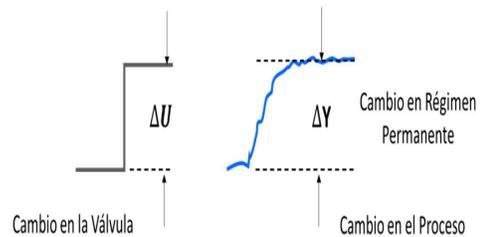


Figura 6: Cambio en la válvula y en el proceso en el “Bump Test”

Entonces la ganancia K_p se obtiene según la ecuación (3)

$$K_p = \frac{\text{Cambio en el Proceso } Y(t)}{\text{Cambio en la Entrada } U(t)} = \frac{\Delta Y(t)}{\Delta U(t)}. \quad (3)$$

En cuanto al valor de la constante de tiempo τ_p del proceso, se obtiene en base al tiempo de

transición o tiempo de ajuste dinámico que es aproximadamente igual a 4 constantes de tiempo ($4\tau_p$) del proceso. En la Figura 7 se ilustra esta aproximación en el proceso.

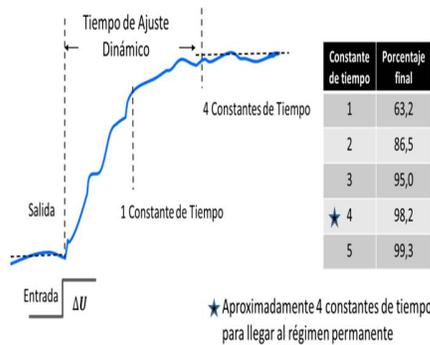


Figura 7: Aproximación de 4 constantes de tiempo del proceso

La constante de tiempo τ_p se define como el tiempo que toma el proceso en alcanzar el 63,2% de su valor en régimen permanente o estado estacionario. Es el tiempo que el proceso tarda en pasar de un valor de régimen permanente a otro para un cambio ΔU de valor del actuador. La constante de tiempo es también referida a veces como “retraso” (lag) debido a que la respuesta del proceso va por detrás del cambio en la entrada del proceso. A medida que la constante de tiempo es más pequeña, más rápido alcanza el proceso el nuevo valor de estado estacionario. La constante de tiempo guarda relación con la velocidad de respuesta del sistema y se puede aproximar usando el tiempo de transición dinámico (o tiempo de estado estacionario o régimen permanente) de acuerdo a la ecuación (4) [1, 2, 3, 16]:

Una constante de tiempo

$$\tau_p \cong \frac{\text{Tiempo de Transición Dinámica}}{4} \quad (4)$$

Es importante tomar en cuenta que las unidades de la constante de tiempo deben coincidir con las unidades de los parámetros del controlador.

A continuación se describe la dinámica del sistema de primer orden con tiempo muerto y la

forma en qué se aplica el método de “Bump Test” para determinar el modelo de este proceso.

2.5. Prueba Escalón “Bump Test” para Proceso de primer orden con retardo

En un proceso de primer orden con tiempo muerto se tienen tres parámetros para describir su dinámica: ganancia de proceso K_p , constante de tiempo τ_p y retardo de proceso (o tiempo muerto) T_{DT} . Este modelo de 3 parámetros es la representación más usada para la dinámica de procesos. El tiempo de retardo o tiempo muerto constituye un aspecto fundamental en los procesos y debe ser considerado en el diseño del sistema de control para evitar inestabilidad en el proceso y lograr una buena sintonización del controlador [17, 18].

La expresión para la salida $Y(t)$ ante un cambio escalón $\Delta U(t)$, viene dada por la ecuación (5)

$$Y(t) = U(t - T_{DT})K_p \left(1 - e^{-(t-T_{DT})/\tau_p}\right) \quad (5)$$

Al realizar el “Bump Test”, la ganancia K_p y la constante de tiempo τ_p se obtienen de la misma forma que para el proceso de primer orden, ecuaciones (3) y (4). El tiempo muerto se puede determinar haciendo el cálculo del tiempo cuando el proceso comienza a responder menos el tiempo cuando el actuador tuvo el cambio, como se muestra en la ecuación (6):

$$T_{DT} = t_{\text{respuesta del proceso}} - t_{\text{acción del actuador}} \quad (6)$$

En la Figura 8, se puede observar la aproximación del modelo de tres parámetros usada al convertir el cambio de la válvula en una respuesta del proceso.

Cuando el retardo no es dominante, o sea, T_{DT} es mucho menor que la constante de tiempo del proceso τ_p , entonces se puede usar un modelo (primer orden puro) de 2 parámetros para aproximar el proceso de primer orden con tiempo muerto. En la Figura 9 se ilustra la aproximación del proceso de primer orden con tiempo muerto usando un modelo de 2 parámetros (K_p, τ_p') [2].

Para obtener el modelo de 2 parámetros aproximado para el proceso de 1er orden con tiempo muerto se necesita:

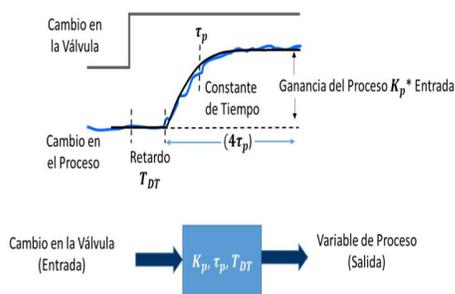


Figura 8: Aproximación del modelo de los tres parámetros K_p, τ_p , y T_{DT}

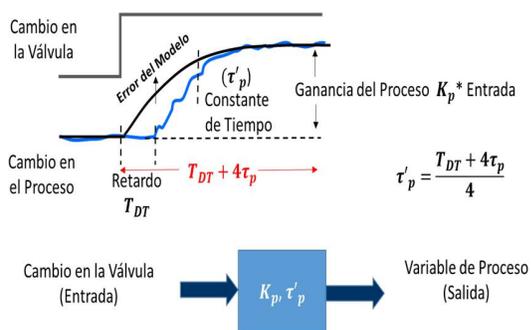


Figura 9: Aproximación del proceso de primer orden con tiempo muerto usando un modelo de 2 parámetros (K_p, τ'_p)

1. Realizar la prueba escalón o “Bump Test”.
2. Registrar la respuesta del proceso.
3. Hacer una aproximación de 1er orden sobre la respuesta observada.
4. Determinar la ganancia del proceso K_p y la constante de tiempo τ'_p del modelo aproximado de 1er orden [2].

3. Proceso de regeneración catalítica

En este trabajo se considera el proceso de regeneración catalítica descrito por Smith, Corripio [1] y que se muestra en la Figura 10.

El objetivo que se quiere lograr en este proceso es la regeneración de un catalizador de un reactor

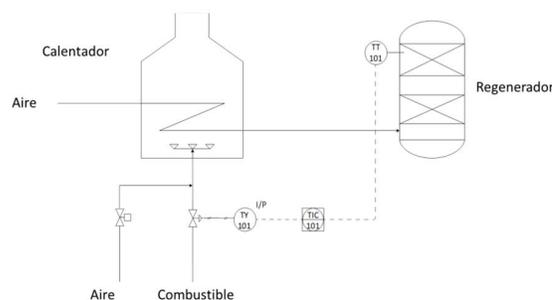
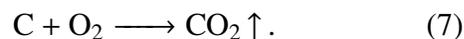


Figura 10: Control Feedback simple para un sistema de regeneración catalítica

químico. Dicho catalizador se emplea en un reactor en el cual se deshidrogena un hidrocarburo. Al transcurrir cierto tiempo, el carbón (C) queda depositado sobre el catalizador, causando su contaminación. Ante este evento, el catalizador pierde su condición y requiere ser regenerado. Para regenerarlo se procede a una etapa donde se quema el carbón depositado, soplando aire caliente en la capa de catalizador, reaccionando el oxígeno del aire con el carbón, formándose CO_2 de acuerdo con la ecuación (7):



Una vez que se ha quemado todo el carbón, el catalizador está preparado para ser aprovechado otra vez. Estamos en presencia de un proceso por lotes donde la etapa de la quema del carbón puede durar unas cuantas horas y el estudio del lazo de control puede ser realizado considerando un proceso continuo en el intervalo de tiempo que tome la regeneración.

La variable controlada en este caso es la temperatura de la capa del catalizador PV: $TT101$, variable muy importante. Una temperatura alta de la capa podría dañar el catalizador; por el contrario, si es muy baja el tiempo de la quema sería muy largo. La variable manipulada viene a ser el flujo de combustible hacia el calentador ($Out : TY101$). Y se considera la temperatura de aire de entrada como una perturbación (DV). Por fines de simplificación en este esquema de control se ha omitido el control

de relación aire/gas del horno. Del mismo modo, se muestra un solo medidor de temperatura, en la práctica real existen varios medidores y se toma el promedio o la temperatura más alta de la capa. En la Figura 11 se muestra el diagrama de bloques del sistema representado en la Figura 10 para el proceso de regeneración catalítica con control Feedback simple.

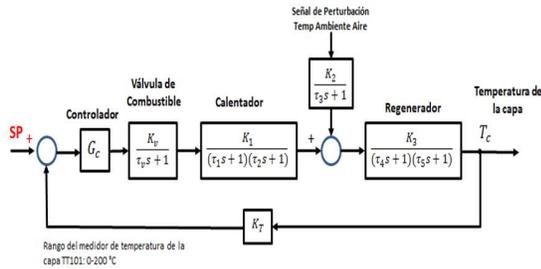


Figura 11: Diagrama de bloques del control Feedback del Regenerador Catalítico

Los valores de los distintos parámetros del sistema vienen dados por [1]:
 $\tau_1 = 3 \text{ min}$ $\tau_2 = 1 \text{ min}$ $\tau_3 = 3 \text{ min}$ $\tau_4 = 4 \text{ min}$
 $\tau_5 = 1 \text{ min}$ $\tau_v = 0,2 \text{ min}$ $K_1 = 1$ $K_2 = 1,5$
 $K_3 = 0,8$ $K_v = 3 \text{ gpm}/\%CO$ $K_T = 0,5 \text{ \%TO}/C$

4. Métodos de sintonización de controlador PID

Antes de explicar los dos métodos que son estudiados, aplicados, analizados y comparados en este trabajo, el método de síntesis directa y el método aproximado organizado de ensayo y error, inicialmente se expone un breve resumen sobre algunas de las formas de clasificación de los distintos métodos disponibles para la sintonización o entonamiento del controlador PID, o sea, la determinación óptima de los parámetros del controlador.

4.1. Clasificación de los métodos de sintonización de controlador PID

Existe una gran variedad de métodos de sintonización de un controlador PID en la bibliografía de sistemas de control, y actualmente sigue siendo un tema continuo

de investigación en el área de control de procesos. A continuación se describen brevemente algunos enfoques de clasificación de estos métodos.

4.1.1. Métodos de sintonización a lazo abierto y métodos a lazo cerrado

Una forma de clasificación está basada en el hecho de si la sintonización (la prueba o experiencia) se realiza a lazo abierto o a lazo cerrado y se le denomina por tanto métodos de sintonización a lazo abierto o métodos de lazo cerrado. Básicamente, la denominación se refiere a la naturaleza de la prueba realizada en el sistema para determinar un modelo del proceso con el cual se pueden generar unas reglas o expresiones para calcular los parámetros involucrados en la sintonización del controlador PID.

4.1.2. Métodos de sintonización con relaciones empíricas y métodos de síntesis directa [3]

Otra forma de clasificación se fundamenta en el tipo de enfoque teórico-práctico y se tienen entonces los métodos con relaciones empíricas y los métodos de sintonización con relaciones de control de modelo interno y síntesis directa (o también llamados diseño basado en modelo).

La sintonización con métodos empíricos, en forma aproximada, envuelve la realización de una prueba experimental a lazo abierto o lazo cerrado y el ajuste de la respuesta a un modelo. Los parámetros del controlador se calculan en base a este modelo y a una tabla de relaciones empíricas. No se puede imponer condiciones en las especificaciones de la respuesta dinámica del sistema. Muchos de estos métodos de relaciones empíricas se basan en datos de lazo abierto y ajustes a un modelo de primer orden con tiempo muerto. Como ejemplos se tienen el método de la curva de reacción de proceso, el método del criterio de mínimo error integral, el método de ciclo final (“ultimate-cycle”) de Ziegler-Nichols, entre otros. En estos métodos se trabaja en el entonamiento hasta que se tenga la respuesta deseada, el punto de partida no es el proceso.

En los métodos de síntesis directa y de control de modelo interno, el diseño del controlador se basa en un modelo del proceso y en una respuesta deseada de lazo cerrado (especificada generalmente para cambios de Setpoint). El resultado de la aplicación del método de síntesis directa depende del modelo del proceso. Con este método se puede obtener una respuesta sin sobreimpulso y con un tiempo de respuesta requerido

por la planta. Al método de síntesis se le llama también diseño basado en modelo, siendo el proceso y su dinámica el punto de partida, o sea, el método empieza con la identificación experimental y la especificación de la respuesta deseada del sistema [3, 19].

4.1.3. Métodos de sintonización basados en el tipo de proceso: autorregulado o integrativo

Harold Wade en su libro “Basic and Advanced Regulatory Control: System Design and Application” [13] presenta una clasificación de los métodos de entonamiento basada en el tipo de proceso, esto da origen a los llamados métodos para entonamiento de procesos autorregulados (sintonización por ensayo y error, sintonización por pruebas de lazo abierto, sintonización mediante pruebas de lazo cerrado, sintonización de mejora del estado encontrado) y métodos para procesos integrativos (sintonización de lazos de control idealizados de nivel de líquidos, y otros enfoques). El método presentado por Harold Wade denominado sintonización organizada por ensayo y error [4, 13] se explica con mucho detalle en la próxima sección para luego ser comparado con el método de síntesis directa presentado por Kevin Starr de la ABB [2].

También se puede hablar de los métodos de tipo manual y los métodos de auto-tuning presentes en el diseño y configuración de muchos controladores industriales fabricados en la actualidad. A continuación se presentan los dos métodos que son el objeto de estudio, análisis y comparación en la presente investigación.

4.2. Método de Síntesis Directa

En este método se define la respuesta de lazo cerrado que se desea obtener y se diseña el controlador de acuerdo con esa respuesta. Con la síntesis directa se seleccionan las ganancias del controlador en base a los parámetros del modelo del proceso por lo que se denomina diseño basado en modelo. A la Síntesis Directa también se le conoce como Método de no sobreimpulso ya que se puede especificar la respuesta deseada de lazo cerrado como una señal aproximada de primer orden que no presente ni oscilaciones ni sobreimpulso [2, 3].

Para la deducción o explicación de este método se va a tomar en cuenta un diagrama de bloques de lazo cerrado del sistema, donde la función de transferencia $G(s)$ representa todas las funciones de transferencia del paso

directo distintas al controlador, $G(s) = G_v(s)G_p(s)$, tal como se ilustra en la Figura 12.

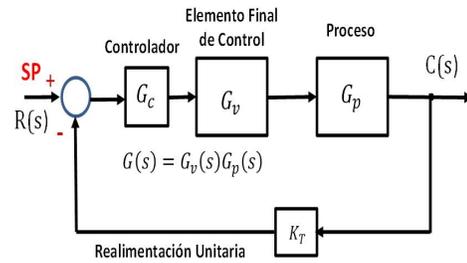


Figura 12: Diagrama de bloques del sistema de control a lazo cerrado

La función de transferencia $G_{lc}(s)$ de lazo cerrado viene dada por la ecuación (8)

$$G_{lc}(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{G_c(s)G(s)}{1 + G_c(s)G(s)}, \quad (8)$$

y a partir de la ecuación (8), la expresión para $G_c(s)$ resulta en la ecuación (9).

$$G_c(s) = \frac{1}{G(s)} \frac{C(s)/R(s)}{1 - C(s)/R(s)}. \quad (9)$$

La ecuación (9) permite obtener una expresión para el controlador $G_c(s)$ en función de la relación salida/entrada $G_{lc}(s) = C(s)/R(s)$ y del proceso $G(s)$. Si se especifica como relación salida/entrada deseada una respuesta aproximada de primer orden dada por la ecuación (10)

$$G_{lc}(s) = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{1}{\tau_{lc}s + 1}, \quad (10)$$

donde τ_{lc} es la constante de tiempo del sistema en lazo cerrado, entonces la expresión para el controlador viene dada por la ecuación (11)

$$G_c(s) = \frac{1}{G(s)} \frac{G_{lc}(s)}{1 - G_{lc}(s)} = \frac{1}{G(s)} \frac{1}{\tau_{lc}s}, \quad (11)$$

y considerando el proceso de primer orden (como resultado del “Bump Test”), se tiene la ecuación (12)

$$G(s) = \frac{K_p}{\tau_p s + 1}. \quad (12)$$

Entonces, la expresión del controlador vendrá dada por la ecuación (13)

$$\begin{aligned}
 G_c(s) &= \frac{1}{G(s)} \frac{1}{\tau_{Ic}s} \\
 &= \frac{\tau_p s + 1}{K_p} \left(\frac{1}{\tau_p s} \right) \\
 &= \frac{\tau_p}{K_p \tau_{Ic}} \left[1 + \frac{1}{\tau_p s} \right].
 \end{aligned} \tag{13}$$

Tomando en cuenta el caso del algoritmo PI en la forma Standard, No interactiva, se tiene la siguiente expresión del controlador (ecuación(14)):

Controlador PI en forma Standard $= K_C \left[1 + \frac{1}{T_I s} \right]$, (14)

por tanto, comparando las ecuaciones (13) y (14) se tiene que los valores resultantes de las Reglas de Sintonización por el método de Síntesis Directa de Controlador PI en forma Standard usando modelo aproximado de primer orden para el proceso en lazo abierto resultan en las ecuaciones (15) y (16).

Ganancia del controlador PI $K_C = \frac{\tau_p}{K_p \tau_{Ic}} = \frac{1}{K_p \tau_{ratio}}$, (15)

Tiempo integral $T_I = \tau_p$, (16)

donde $\tau_{ratio} = \left(\frac{\tau_{Ic}}{\tau_p} \right)$ está vinculado con la velocidad de respuesta, K_p es la ganancia de proceso de lazo abierto y τ_p es la constante de tiempo de lazo abierto. Se puede observar que la ganancia proporcional K_C del controlador y la ganancia de proceso K_p a lazo abierto son inversamente proporcionales y el tiempo integral T_I del controlador es igual al valor de la constante de tiempo τ_p del proceso a lazo abierto.

En la aplicación del método Síntesis Directa se pueden establecer los siguientes pasos: 1) Realización de la prueba escalón o “Bump Test” para determinar modelo aproximado del proceso como de primer orden, 2) Obtención de los parámetros del controlador que permitan la respuesta deseada en lazo cerrado (en modo automático), y 3) Consideración del valor del parámetro τ_{ratio} para establecer la velocidad de la respuesta. El

parámetro τ_{ratio} se usa para controlar la velocidad a la cual el proceso responde a una perturbación o a un cambio de Setpoint [2].

El τ_{ratio} es el único parámetro de sintonización ya que K_p y τ_p son parámetros de configuración basados en el modelo del proceso a lazo abierto. Se debe tener en cuenta el manejo de las unidades de ingeniería con las cuales se realiza la identificación del proceso, dichas unidades deben coincidir con las unidades de los parámetros del controlador [2].

El valor de τ_{ratio} debe ser determinado en base a la confiabilidad del modelo aproximado de primer orden (obtenido de la prueba escalón “Bump Test”) y también se debe tomar en cuenta el posible desgaste de la válvula y la condición del proceso aguas arriba. A continuación en la Figura 13 se ilustra la consideración que debe tenerse en la relación entre el τ_{ratio} y la confiabilidad del modelo aproximado de primer orden obtenido para el proceso a lazo abierto obtenido del “Bump Test” [2].

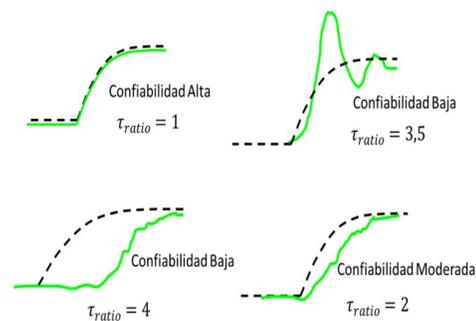


Figura 13: Relación entre el τ_{ratio} y la confiabilidad del modelo de proceso [2]

La confiabilidad del modelo es una forma de observar el error de la aproximación del modelo de 1er orden obtenido de la identificación experimental del proceso (“Bump Test”). Mientras mayor sea el error del modelo se va a requerir un valor mayor de τ_{ratio} . Para un valor alto de τ_{ratio} se obtiene una respuesta lenta del sistema y para un valor τ_{ratio} pequeño, la respuesta es rápida. En la Figura 14 se muestra la relación entre la velocidad de respuesta, el valor de τ_{ratio} , la confiabilidad del modelo y la ganancia del controlador. El tiempo integral se mantiene igual (Modo de controlador PI en forma Standard no interactiva). El valor de τ_{ratio} es una manera de cuantificar o medir el error del modelo.

Confiabilidad del Modelo de 1er Orden	τ_{ratio}	Velocidad de Respuesta	Ganancia del Controlador	Tiempo Integral
Alta	1	Rápida	$K_C = \frac{1}{K_P \cdot 1}$	$T_I = \tau_P$
	2		$K_C = \frac{1}{K_P \cdot 2}$	$T_I = \tau_P$
	3		$K_C = \frac{1}{K_P \cdot 3}$	$T_I = \tau_P$
Baja	4	Lenta	$K_C = \frac{1}{K_P \cdot 4}$	$T_I = \tau_P$

Figura 14: Relación entre τ_{ratio} y la velocidad de respuesta del sistema [2]

Con el método de síntesis directa se puede entonces obtener un proceso estable en modo automático (sistema en lazo cerrado), se puede escoger la velocidad de respuesta en base al valor de τ_{ratio} y es un método basado en el modelo del proceso, i.e., un enfoque que arranca con la determinación del modelo en lazo abierto del proceso. Se debe tener presente que se está trabajando con procesos autorregulados, con una aproximación de primer orden del modelo del proceso y con la forma PID Standard, No interactiva Modo Proporcional-Integrativo PI.

4.3. Método Organizado Aproximado de Ensayo y Error

El método basado en ensayo y error (“Trial and Error”) consiste en la realización del ajuste manual de los parámetros PID del controlador mediante tanteo, es muy utilizado en la práctica industrial cotidiana, en algunas ocasiones es más un arte que una ciencia y depende mucho de la experiencia. Sin embargo, se recomienda realizarlo de forma organizada para lograr resultados satisfactorios, en términos de calidad y tiempo invertido en el entonamiento. En muchas ocasiones, este método se emplea en lazos de control que han estado en funcionamiento (“As found state”) y que requieren ser entonados para mejorar su desempeño por presentar oscilaciones. Dichas oscilaciones pueden ser ocasionadas por cambios en el proceso o luego de algún mantenimiento de la instrumentación de campo.

En esta sección se van a describir tres métodos presentados por la Sociedad Internacional de Automatización (ISA por sus siglas en inglés) llamados: 1) Entonamiento de lazo manual, 2) Entonamiento basado

en la experiencia y 3) Método inteligente de ensayo y error “Intelligent trial-and-error” [4, 13, 20, 21, 22].

4.3.1. Entonamiento de Lazo Manual

Este método presentado por Chuck Cornell en el: “Manual de Referencia Técnica para Ingenieros de Sistemas de Control” (Control Systems Engineer Technical Reference Handbook, ISA 2012) consiste en realizar el entonamiento del lazo de control online con la planta en funcionamiento mediante ensayo y error, aplicando los siguientes pasos para un controlador PID paralelo [20]:

Con el controlador en modo manual, ajustar la salida del controlador hasta que sea posible mantener la PV deseada. Colocar el K_I y K_D en cero. Colocar el controlador en modo automático e ir incrementado K_P hasta que la PV comience a oscilar. Luego disminuir a la mitad el valor de K_P para una respuesta de 1/4 de decaimiento. Luego incrementar K_I hasta corregir el offset dentro del tiempo suficiente de respuesta del proceso (Precaución: mucho K_I podría causar inestabilidad en el proceso). Luego, si es requerido, incremente K_D hasta lograr obtener una respuesta rápida para alcanzar el setpoint ante cambios de carga o perturbaciones. (Precaución: mucho K_D podría causar una respuesta excesiva u overshoot).

En un lazo de control PID rápido, el entonamiento puede producir ligeros overshoot para alcanzar el setpoint de forma más rápida. Sin embargo, en algunos sistemas es posible que esta respuesta no sea aceptable. En ese caso, se va a requerir un valor significativamente bajo a la mitad de K_P que se había seleccionado.

Este método podría tomar mucho tiempo al requerir varios intentos de entonamiento. También, podría ocasionar situaciones riesgosas durante su ejecución.

4.3.2. Entonamiento Basado en la Experiencia

En este método presentado en el “Manual Condensado de Medición y Control de la ISA” (Condensed Handbook of Measurement and Control, ISA 2007), el entonamiento basado en la experiencia se hace introduciendo en el controlador las constantes P , I y D , partiendo de valores iniciales ya conocidos [21]. Esto se realizaría de forma aproximada y generalmente se requiere más de un intento de entonamiento. Se debe ir realizando ajustes finos de los parámetros hasta conseguir la respuesta del proceso esperada.

4.3.3. Método inteligente de ensayo y error “Intelligent trial-and-error”

Es un método en lazo cerrado que consiste en realizar el entonamiento (“Tuning”) de un controlador modo PI standard para procesos autorregulados (la mayoría de los lazos de control son de este tipo) de forma organizada, por tanteo y error. Este método fue presentado por Harold Wade, publicado en un artículo de la ISA InTech Magazine 2005 llamado: “Trial and Error: An organized procedure” [4]. La idea principal de este método es buscar un comportamiento aceptable en forma rápida, procurando un número mínimo de cambios en los parámetros y evitando causar interferencia al proceso controlado.

Este análisis tiene como punto de partida los parámetros de control encontrados en el sistema (“as-found data”), la ganancia del controlador y el tiempo integral. Se supone que se han descartado otros tipos de inconvenientes, que lo que se tiene es un problema de sintonización y que se quiere obtener un lazo estable (sin oscilaciones), el cual retorne rápido al punto de Setpoint después de algún cambio de carga. Si el lazo se encuentra oscilando, dos parámetros van a caracterizar este comportamiento del proceso, la razón de decaimiento DR y el periodo de oscilación P . El periodo de oscilación y el tiempo integral deben mostrar las mismas unidades, P en minutos y T_I en minutos (por repetición). Los valores existentes de los parámetros (“as-found data”) vienen a ser el punto de comienzo del análisis y procedimiento de sintonización del lazo de control. En el caso de usar algún método de Ziegler-Nichols se estaría comenzando desde cero, sin tomar en cuenta este valioso conocimiento inicial (llamado “as-found data”) [4, 13, 22].

Este método se fundamenta en que un lazo de control está bien entonado cuando se cumple la ecuación (17), lo cual asegura un decaimiento rápido de las oscilaciones:

$$1,5 < \frac{P}{T_I} < 2, \quad (17)$$

donde P es el período de oscilación (min) y T_I es el tiempo integral (min/rep). Las ecuaciones (18) y (19), son expresiones equivalentes que también pueden ser útiles

$$1,5T_I < P < 2T_I, \quad (18)$$

$$0,5P < T_I < 0,67P. \quad (19)$$

Se consideran respuestas aceptables aquellas que presentan un tiempo de decaimiento (“Decay Ratio”) menor a 1/4. Con este criterio se quiere establecer un compromiso o balance entre la respuesta más aceptable (sin sobre impulso) a un cambio de Setpoint y una respuesta satisfactoria a perturbación de carga.

El procedimiento se puede resumir de la siguiente forma (Reglas Si-Entonces) [4, 13, 22]:

- Si el lazo no presenta oscilaciones, entonces se debe aumentar la ganancia del control hasta lograr oscilación amortiguada en el lazo y así poder observar el periodo de oscilación.
- Si el lazo se encuentra oscilando pero el periodo de oscilación no está en el rango 1,5 a 2; entonces se debe reajustar el tiempo integral para que quede en el rango de 1/2 a 2/3 del periodo actual.
- Si el periodo de oscilación se encuentra en el rango 1/2 a 2 veces el tiempo integral T_I , entonces se debe ajustar la ganancia del controlador hasta que se tenga un 1/4 de decaimiento u otra característica deseada de amortiguamiento.

Al hacerse un cambio de un parámetro de control, el efecto de este cambio debe determinarse efectuando un cambio pequeño de Setpoint. Se sugiere cambiar un solo parámetro a la vez. Se aconseja tomar nota de cambios consecutivos de los parámetros de control y respuesta del sistema para observar el avance en cada ensayo. Generalmente, se consigue un buen desempeño después de 3 o 4 pruebas [4, 13, 22].

5. Simulaciones realizadas en Scilab-XCOS

A efectos de realizar la identificación del modelo del proceso de regeneración catalítica y la comparación de los métodos de sintonización estudiados se construyó en el software Scilab-Xcos el siguiente diagrama de bloque mostrado en la Figura 15.

Para simular lo que sería una sesión real de sintonización de un lazo de control, se realizaron ajustes manuales de los parámetros del controlador PID de tal forma de conseguir una respuesta oscilatoria típica, la cual es posible encontrar luego de una jornada de mantenimiento de planta y en específico de los instrumentos de campo y válvulas de control o por cambios en las condiciones del proceso, cuando el operador de planta reporta un desperfecto del lazo de control. A continuación, en la Figura 16 se muestra el comportamiento del lazo de control al incrementar el Setpoint de 50 % a 60 %, con unos parámetros de

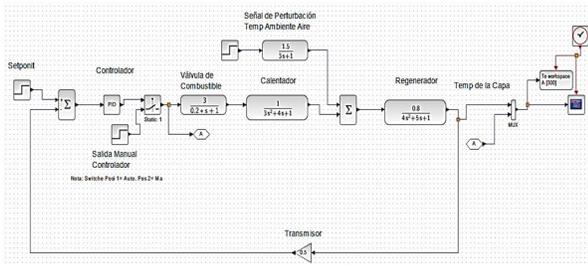


Figura 15: Diagrama de bloque del control del proceso en Scilab-Xcos

entonamiento iniciales de: $K_C = 1,27$; $K_I = 0,27$ rep/min y $T_D = 0$ min. Como información importante se tiene que el rango del instrumento de medición de temperatura de la capa es de 0 a 200 °C y que la forma del controlador en Xcos es PID Paralelo.

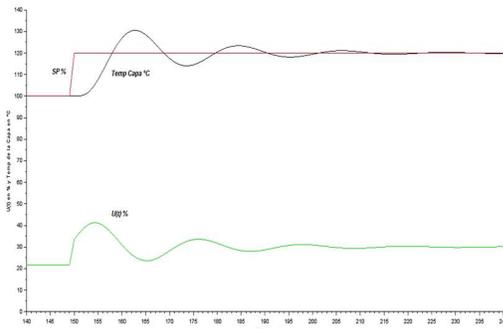


Figura 16: Comportamiento inicial del lazo de control

Como se observa, la respuesta del lazo de control es inadecuada y a partir de la misma se aplicarán los métodos de sintonización estudiados.

5.1. Simulación del lazo de control aplicando el método de síntesis directa

En esta simulación se colocó el lazo de control en modo abierto, es decir, en modo manual, colocando el selector del diagrama de bloque del sistema Xcos en la posición 2 y se realizó la prueba escalón (“Bump

Test”) variando la salida $U(t)$ un 10 % obteniendo los resultados mostrados en la Figura 17.

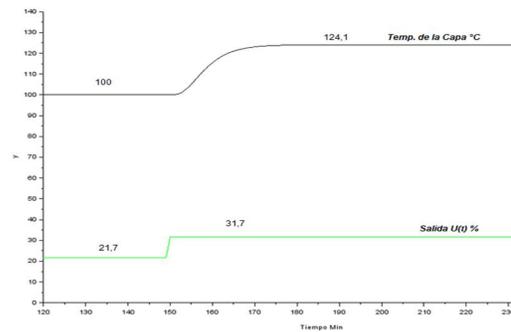


Figura 17: Prueba escalón (“Bump Test”) al proceso

Al procesar mediante Excel los datos obtenidos de la prueba escalón, representados en la Figura 18, es posible obtener los parámetros del proceso como se muestra en las ecuaciones (20) y (21).

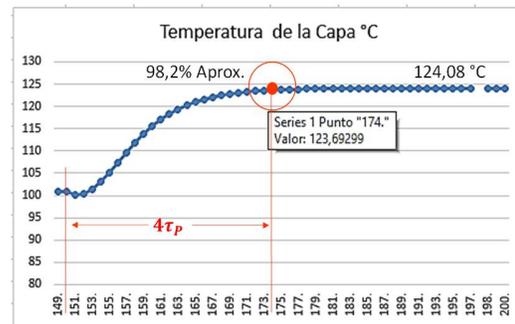


Figura 18: Datos obtenidos de la prueba escalón

$$K_p = \frac{(124,08 - 100) \text{ }^\circ\text{C}}{10 \text{ }^\circ\text{C}} 100 \% = 1,2; \quad (20)$$

$$\tau_p = \frac{(174 - 150) \text{ min}}{4} = 6 \text{ min.} \quad (21)$$

Entonces, es posible aproximar el proceso de acuerdo a la ecuación (22):

$$G_p(s) = \frac{1,2}{6s + 1}. \quad (22)$$

Se considera despreciable el tiempo muerto en la respuesta del proceso.

Al aplicar las reglas de entonamiento del método de síntesis directa se obtienen los siguientes parámetros de entonamiento: Para $\tau_{ratio} = 1$ según la ecuación (23):

$$K_C = \frac{1}{K_p \tau_{ratio}} = \frac{1}{1,2} = 0,83; \quad (23)$$

se obtiene: $K_C = 0,83$ y $T_I = 6$ min.

Para $\tau_{ratio} = 2$ según la ecuación (24):

$$K_C = \frac{1}{1,2 \cdot 2} = 0,42; \quad (24)$$

se obtiene: $K_C = 0,42$ y $T_I = 6$ min.

Al transformar T_I del controlador estándar a paralelo se obtiene por medio de la ecuación (25):

$$K_I = \frac{K_C}{T_I} = \frac{0,42}{6} = 0,07 \text{ rep/min.} \quad (25)$$

A continuación en la Figura 19 se muestra los resultados de las simulaciones al realizar un cambio de setpoint de un 50 a 60 %.

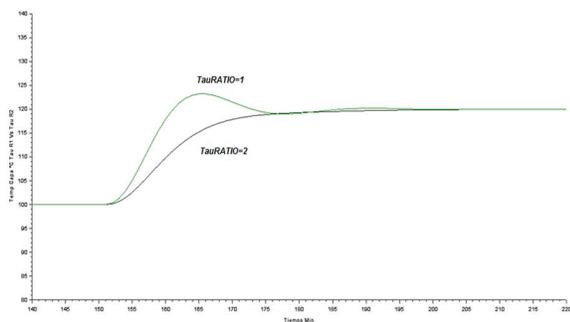


Figura 19: Respuesta del lazo de control aplicando método de síntesis directa

Como se observa en la Figura 19, la respuesta del proceso para $\tau_{ratio} = 2$ se comporta de forma bastante estable y sin sobre impulso.

5.2. Simulación del lazo de control aplicando el método organizado aproximado de ensayo y error

En esta simulación se coloca el lazo de control en lazo cerrado, es decir, en modo automático, colocando

el selector del diagrama de bloque del sistema Xcos en la posición 1. Al igual que en el punto anterior, este método se aplica al lazo de control con respuesta oscilatoria mostrado en la Figura 16. Como punto principal hay que analizar los datos de la respuesta del proceso con el objeto de evaluar la condición reflejada en la ecuación (26)

$$1,5 < \frac{P}{T_I} < 2. \quad (26)$$

Al analizar la respuesta original del proceso con Excel se encontraron los siguientes resultados mostrados en la Figura 20:

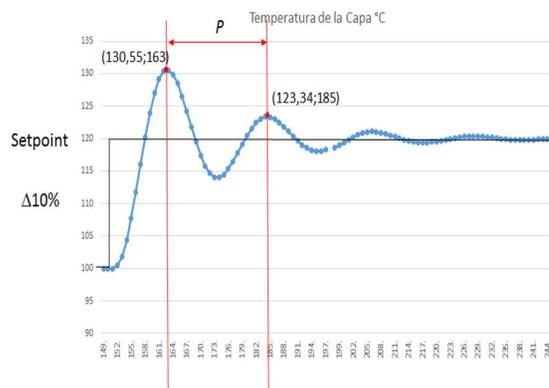


Figura 20: Análisis de la respuesta original del proceso oscilatorio

Al realizar la validación de la relación P/T_I se encontró lo siguiente: $P = 185 - 163 = 22$ min

Como el parámetro $K_I = 0,27$ rep/min del controlador PID de Xcos corresponde a un controlador PID paralelo, se debe convertir a forma estándar para hallar T_I y determinar la relación P/T_I . Al realizar los cálculos, según las ecuaciones (27), (28), (29) y (30), se obtiene:

$$\frac{K_C}{T_I} = K_I, \quad (27)$$

$$T_I = \frac{1,27}{0,27} = 4,7 \text{ min/rep,} \quad (28)$$

$$\frac{P}{T_I} = \frac{22 \text{ min}}{4,7 \text{ min/rep}} = 4,68 > 2; \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \text{Decay R} &= \frac{123,34 - 120}{130,55 - 120} \\ &= 0,32 > 1/4. \end{aligned} \quad (30)$$

Como era de esperarse, la respuesta del lazo de control se encuentra totalmente fuera de rango en los

parámetros y se requiere el entonamiento. Se efectúa un primer ajuste del T_I empleando este método organizado aproximado de ensayo y error; para lograr este ajuste se debe disminuir la relación P/T_I de tal forma que sea menor a 2. Se inicia aumentando T_I a 12 min/rep, en este caso la relación sería (ecuación (31))

$$\frac{P}{T_I} = \frac{22}{12} = 1,83 < 2. \quad (31)$$

Entonces de acuerdo a lo expresado en la ecuación (32),

$$K_I = \frac{K_C}{T_I} = \frac{1,27}{12} = 0,1 \text{ rep/min} \quad (32)$$

Los parámetros PI del controlador serían: $K_C = 1,27$ $K_I = 0,1$ rep/min. En la Figura 21 se muestra el comportamiento del lazo de control al realizar una variación en el setpoint de 60 a 50 %.

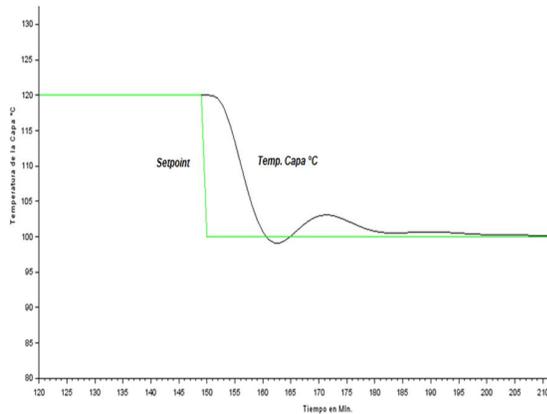


Figura 21: Respuesta del lazo de control aplicando método organizado aproximado de ensayo y error

Al analizar los datos de la respuesta del lazo de control en Excel se obtuvieron los resultados mostrados en la Figura 22.

A continuación se presenta la verificación del primer entonamiento: $P = 182 - 163 = 19$ min, de acuerdo con la ecuación (33)

$$\frac{P}{T_I} = \frac{19 \text{ min}}{12 \text{ min/rep}} = 1,58 < 2 \quad (33)$$

Al analizar los resultados se obtiene: Decay $R \approx 0$ y $1,5 < P/T_I < 2$.

Aunque se observa un leve sobre-impulso en la respuesta del lazo de control, se cumplen las condiciones de estabilidad y se logra realizar la sintonización con tan solo un intento de entonamiento.

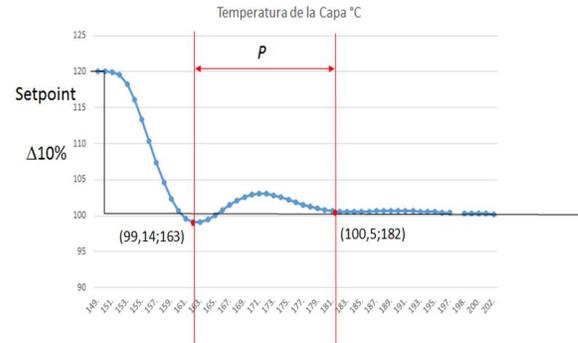


Figura 22: Análisis de respuesta del proceso con el primer intento de entonamiento

6. Evaluación comparativa de los métodos de sintonización

En este punto se evalúan en detalle las ventajas y desventajas entre el método de síntesis directa y el método organizado aproximado de ensayo y error, con el objeto de determinar la conveniencia de la aplicación de cada uno en el proceso industrial estudiado. Es evidente que al observar la respuesta original oscilatoria del lazo de control al realizar cambios de setpoint presentado en la Figura 16, se obtiene una notable mejora al emplear ambos métodos de sintonización de controladores PI. En la Figura 23 es posible obtener los resultados comparativos entre ambos métodos.

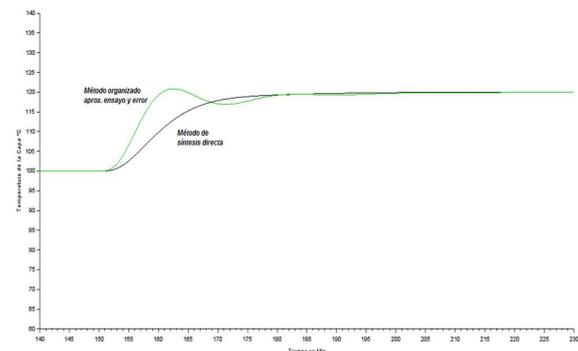


Figura 23: Resultados comparativos de los métodos de sintonización

Al detallar la respuesta del proceso en cada caso, se observa que el ajuste del controlador mediante el método

organizado aproximado de ensayo y error ocasiona un leve sobre impulso en comparación al ajuste realizado a través de síntesis directa. Se observa claramente un comportamiento más estable al realizar el ajuste del controlador mediante el método de síntesis directa. Por otro lado, al analizar el comportamiento de la salida del controlador $U(t)$ mostrado en la Figura 24, se observa que el comportamiento del controlador al realizar los ajustes mediante el método de síntesis directa tiene un comportamiento más estable en comparación al ajuste a través del método organizado aproximado de ensayo y error, el cual presenta una señal de salida más brusca.

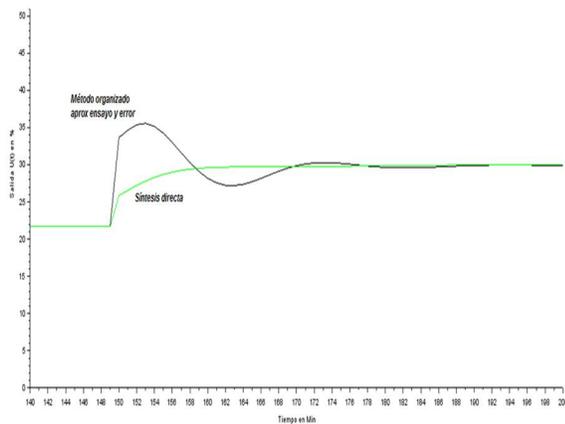


Figura 24: Resultado comparativo de la salida del controlador con ambos métodos

También se evaluó el comportamiento del proceso ante la variable de perturbación, en la Figura 25 se presentan los resultados de la simulación al realizar una variación de la temperatura del aire de entrada de 40 a 30 °C.

Se observa que el controlador ajustado mediante el método organizado aproximado de ensayo y error presentó una mejor respuesta ante la perturbación, ya que permitió estabilizar la temperatura de la capa de forma más rápida en comparación al ajuste realizado mediante el método de síntesis directa.

7. Conclusiones

La identificación experimental de procesos es una herramienta poderosa para aproximar el modelo matemático de un proceso alrededor de su punto de operación, lo cual representa una gran ventaja sobre la obtención del modelo matemático mediante sus ecuaciones o principios fundamentales, ya que en ocasiones es casi imposible conseguir toda la

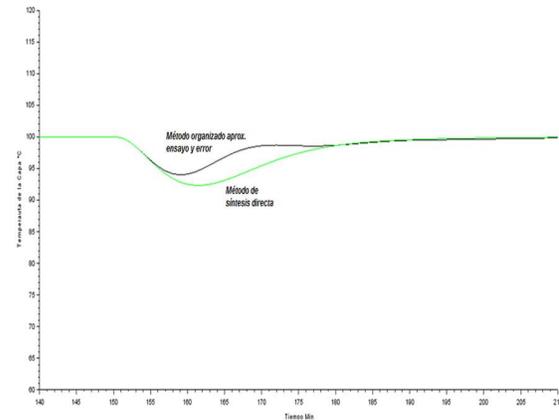


Figura 25: Resultado comparativo de los métodos ante variable de perturbación

información requerida para determinarlo. El método de identificación presentado en este trabajo es bastante eficiente, práctico y fácil de implementar, siempre y cuando se dispongan de las herramientas adecuadas de recolección de datos.

Al comparar los métodos de sintonización organizado aproximado de ensayo y error y síntesis directa es posible concluir que ambos métodos funcionan adecuadamente y permiten realizar el entonamiento de los lazos de control de forma organizada con pocos intentos de ajustes, lo cual resulta en menos perturbaciones en el proceso durante las sesiones de sintonización. El método de síntesis directa resulta ser un método bastante optimizado para procesos autorregulados, permitiendo respuestas más estables tanto de la variable del proceso como de la salida del controlador, lo cual permite conservar la integridad del elemento final de control.

En el caso del proceso de regeneración catalítica resulta más conveniente sintonizar el controlador empleando el método de síntesis directa ya que permite un control bastante fino y estable de la temperatura de la capa. Una ventaja resaltante del método organizado aproximado de ensayo y error es que por ser un método en lazo cerrado, no es necesario realizar la prueba escalón sino que puede aplicarse dicho método tomando los datos del curso normal de operación llevada a cabo por el operador.

El éxito en la aplicación de ambos métodos dependerá en gran manera del uso de herramientas de recolección de datos que permitan analizar el comportamiento de las tendencias del proceso. Si no se dispone de estas herramientas, como alternativas se puede utilizar

el entonamiento por ensayo y error basado en la experiencia o usar el Auto-Tuning y afinar manualmente los parámetros del controlador en caso de ser requerido. Además se recomienda implementar una estrategia de control en cascada para minimizar las perturbaciones por causa de las variaciones de temperatura del aire de entrada.

8. Referencias

- [1] C. Smith and A. Corripio, *Control Automático de Procesos Teoría y Práctica*. Editorial Limusa, Grupo Noriega Editores, 1994, México.
- [2] K. Starr, *Single loop control methods*. Westerville, Ohio: ABB Inc, 2015.
- [3] P. Chau, "Process control a first course with Matlab," in *Cambridge Series in Chemical Engineering*. Cambridge University Press, 2002.
- [4] H. Wade, "Trial and error: An organized procedure," *InTech Magazine*, vol. 52, no. 5, pp. 38–42, 2005.
- [5] A. Aguado Behar and M. Martínez Iranzo, *Identificación y Control Adaptativo*. Madrid: Prentice Hall, Pearson Educación, S.A., 2003.
- [6] T. Marlin, *Process Control Designing Processes and Control Systems for Dynamic Performance*. New York: McGraw-Hill, Inc., 2000.
- [7] V. Alfaro, "Identificación de procesos sobreamortiguados utilizando técnicas de lazo abierto," *Ingeniería*, vol. 11, no. 2, pp. 11–25, 2001.
- [8] V. Alfaro, "Métodos de sintonización de controladores PID que operan como reguladores," *Ingeniería*, vol. 12, no. 2, pp. 21–36, 2002.
- [9] V. Alfaro, "Identificación de modelos de orden reducido a partir de la curva de reacción del proceso," *Ciencia y Tecnología*, vol. 24, no. 2, pp. 197–216, 2006.
- [10] S. Whan-Sung, J. Lee, and I. Lee, *Process Identification and PID Control*. Singapore: IEEE Press, John Wiley & Sons, 2009.
- [11] A. Creus, *Instrumentación Industrial*. Marcombo Ediciones Técnicas S.A., 2005.
- [12] R. Perry and D. Green, *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. New York: McGraw-Hill Inc., 1984.
- [13] H. Wade, *Basic and Advanced Regulatory Control: System Design and Application*. International Society of Automation (ISA), 2017.
- [14] F. Shinskey, *Process Control System Application, Design and Tuning*. New York: McGraw-Hill, Inc., 1988.
- [15] T. Weber, *An Introduction to Process Dynamics and Control*. New York: John Wiley & Sons, 1973.
- [16] K. Ogata, *Modern Control Engineering*. New Jersey: Pearson Education, Inc., Prentice Hall, 2010.
- [17] C. Grimholt and S. Skogestad, "Optimal PI and PID control of first-order plus delay processes and evaluation of the original and improved SIMC rules," *Journal of Process Control*, vol. 70, pp. 36–46, 2018.
- [18] B. Vargas, "Efectos del retardo en el control de lazo cerrado de plantas sobreamortiguadas," *Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial*, vol. 15, no. 1, pp. 110–119, 2012.
- [19] D. Chen and D. Seborg, "PI/PID Controller Design Based on Direct Synthesis and Disturbance Rejection," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 41, pp. 4807–4822, 2002.
- [20] C. Cornell, *Control Systems Engineer Technical Reference Handbook*. USA: International Society of Automation (ISA), 2012.
- [21] N. Battikha, *Condensed Handbook of Measurement and Control*. USA: International Society of Automation (ISA), 2007.
- [22] H. Wade, "Aplicación de un procedimiento para sintonizar controladores por el método de prueba y error," *Revista Industria al día*, vol. 76, 2009.