

Sistema de control para procesos de producción

¹Javier Jiménez-Cabas, ²Jorge Cárdenas-Cabrera, ³Andrés Polo-Panza

^{1,2,3}Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica, Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia.

Article History

Received Dec,06th, 2020

Accepted Dec,12th, 2020

Published Dec,26th, 2020



© 2020 The Authors. This article is an Open Access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution(CC-BY)license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

Abstract

En este artículo se desarrolla una estrategia de control para un proceso de producción, conformado por un reactor con calentamiento, adquirido a través de un serpentín con vapor. Además de la variable controlada que es la concentración del producto, CB, se controlan adicionalmente el nivel y la temperatura. Se sintonizaron los controladores PID, empleando el procedimiento del modelo de primer orden más tiempo muerto (FOPDT). Finalmente, se realizaron varias simulaciones bajo condiciones de operaciones diferentes. La primera prueba realizada consistió en operar el sistema en condiciones nominales, haciendo $CB(\text{set}) = 0.4$. Se observa un sobre-pico de 0.55% para la concentración de B, que se considera bastante bajo, en cuanto al tiempo de establecimiento se observó una reducción considerable, se pasó de 30 min en un lazo abierto a 15 min en un lazo cerrado; adicionalmente, se logra un error en estado estacionario nulo con lo que se verifica la efectividad del lazo de control.

Keywords: Balance de energía, Flujo, Nivel, Reactor, Temperatura, Vapor

INTRODUCTION

El desarrollo de sistemas de control para procesos de producción constituye uno de los componentes fundamentales de la ingeniería industrial y la automatización moderna. La creciente necesidad de mejorar la productividad, garantizar la calidad de los productos y optimizar el consumo energético ha impulsado la implementación de estrategias avanzadas de supervisión y regulación de variables operativas. En este contexto, los sistemas de control automático permiten mantener condiciones estables durante las diferentes etapas de producción, reducir las perturbaciones externas y mejorar la eficiencia de los equipos industriales. En los procesos industriales que involucran transformaciones químicas, los reactores desempeñan una

función esencial, debido a que permiten desarrollar reacciones bajo condiciones específicas de temperatura, presión, concentración y nivel. La estabilidad de estas variables resulta indispensable para garantizar la calidad del producto final y evitar alteraciones que puedan comprometer la seguridad operativa. Por ello, el diseño de estrategias de control apropiadas representa una necesidad técnica para las instalaciones de producción que utilizan reactores con sistemas de calentamiento mediante vapor. Los controladores proporcional-integral-derivativo (PID) constituyen una de las tecnologías más utilizadas en los sistemas de automatización industrial. Su funcionamiento se basa en la combinación de tres acciones de control que permiten corregir las desviaciones entre el valor deseado y el valor medido de una variable. La acción proporcional responde al error actual, la integral contribuye a eliminar el error permanente y la derivativa permite anticipar determinadas variaciones dinámicas del sistema. La adecuada sintonización de estos parámetros mejora la estabilidad y el comportamiento temporal del proceso (Åström & Hägglund, 2006).

Asimismo, el modelado matemático desempeña una función importante en el diseño de sistemas de control, ya que facilita la representación de las relaciones entre las variables de entrada y salida. En aplicaciones industriales, los modelos de primer orden más tiempo muerto, conocidos como FOPDT, permiten aproximar determinadas dinámicas y establecer parámetros apropiados para la sintonización de controladores PID. Estas herramientas contribuyen a reducir las oscilaciones, mejorar el tiempo de establecimiento y limitar las desviaciones respecto a los valores de referencia. En particular, Jiménez-Cabas, Cárdenas-Cabrera y Polo-Panza (2020) desarrollaron una estrategia de control aplicada a un reactor industrial calentado mediante un serpentín de vapor. Su investigación se centró en regular la concentración del producto B, así como el nivel y la temperatura del reactor. Mediante simulaciones y técnicas de sintonización PID basadas en modelos FOPDT, los autores evaluaron la respuesta del sistema ante distintas condiciones operativas. Los resultados mostraron que, bajo condiciones nominales, el sistema alcanzó un sobreimpulso del 0,55 % y redujo el tiempo de establecimiento de aproximadamente 30 minutos en lazo abierto a 15 minutos en lazo cerrado. Además, se obtuvo un error nulo en estado estacionario para la condición evaluada. Estos resultados evidencian el potencial de las estrategias de control automático para mejorar la estabilidad de los procesos industriales.

Fundamentos teóricos de los sistemas de control industrial

Conceptos generales de automatización y control de procesos de producción

La automatización industrial constituye una de las herramientas fundamentales para mejorar la eficiencia, precisión y seguridad de los procesos de producción. Su implementación permite regular diferentes operaciones mediante dispositivos electrónicos, sensores, actuadores y sistemas computacionales que supervisan continuamente las condiciones de funcionamiento de los equipos. En los entornos industriales modernos, la automatización facilita la reducción de errores humanos, la optimización de recursos y el mantenimiento de estándares uniformes de calidad. Los sistemas de control industrial tienen como propósito regular las variables que intervienen en un proceso productivo, garantizando que sus valores permanezcan dentro de los límites previamente establecidos. Entre las variables más importantes se encuentran la temperatura, la presión, el flujo, el nivel y la concentración de determinadas sustancias. La regulación adecuada de estos parámetros permite alcanzar condiciones operativas estables y reducir las variaciones que pueden afectar las características del producto final. En los procesos de producción química, el control automático adquiere especial relevancia debido a la complejidad de las interacciones físicas y químicas que ocurren dentro de los reactores. Las variaciones de temperatura pueden modificar la velocidad de reacción, mientras que los cambios en el flujo de alimentación pueden afectar la concentración de los componentes. Por consiguiente, es necesario desarrollar estrategias de control capaces de responder oportunamente a las perturbaciones externas y mantener el comportamiento del proceso dentro de los parámetros deseados.

Importancia de la estabilidad operativa en sistemas industriales

La estabilidad operativa representa una condición indispensable para el funcionamiento adecuado de los sistemas de producción industrial. Un proceso estable permite mantener las variables controladas próximas a sus valores de referencia, evitando oscilaciones excesivas, desviaciones prolongadas y comportamientos que puedan comprometer la seguridad o la calidad de los productos. La capacidad de mantener condiciones

constantes resulta especialmente importante en industrias químicas, farmacéuticas, alimentarias y petroquímicas.

Características de los sistemas de control en lazo abierto y lazo cerrado

Los sistemas de control industrial pueden clasificarse principalmente en sistemas de lazo abierto y sistemas de lazo cerrado. En los sistemas de lazo abierto, las acciones de control se ejecutan sin utilizar información de retroalimentación sobre el resultado obtenido. Este enfoque puede ser apropiado para procesos relativamente sencillos y predecibles; sin embargo, presenta limitaciones cuando existen perturbaciones o variaciones importantes en las condiciones operativas.

Principios de funcionamiento de los controladores PID

Los controladores proporcional-integral-derivativo, conocidos como PID, se encuentran entre las estrategias de control más utilizadas en las aplicaciones industriales debido a su estructura relativamente sencilla, flexibilidad y capacidad para regular una amplia variedad de procesos. Su funcionamiento combina tres acciones que actúan sobre el error existente entre el valor de referencia y la variable medida.

Aplicaciones de los sistemas de control automático en reactores industriales

Los reactores industriales se utilizan en numerosos procesos de transformación química y requieren condiciones operativas controladas para garantizar resultados adecuados. Los sistemas de control automático permiten regular parámetros como la temperatura, presión, volumen, concentración y velocidad de alimentación, favoreciendo el desarrollo de las reacciones bajo condiciones previamente definidas.

Descripción del proceso de producción

Características generales del reactor utilizado en el proceso

El proceso de producción considerado en el estudio se desarrolla mediante un reactor que dispone de un sistema de calentamiento basado en un serpentín de vapor. Este tipo de instalación permite transferir energía térmica al fluido contenido dentro del reactor, favoreciendo el mantenimiento de las condiciones necesarias para la transformación de los componentes químicos.

Funcionamiento del sistema de calentamiento mediante serpentín de vapor

El sistema de calentamiento mediante serpentín de vapor permite suministrar energía térmica al contenido del reactor a través de una superficie de intercambio de calor. El vapor circula por el interior del serpentín y transfiere calor hacia el fluido del proceso debido a la diferencia de temperatura existente entre ambos medios.

Identificación de las variables de entrada y salida

La identificación de las variables constituye una etapa fundamental en el desarrollo de sistemas de control industrial. Las variables de entrada representan las condiciones o acciones que influyen sobre el comportamiento del proceso, mientras que las variables de salida corresponden a las magnitudes utilizadas para evaluar su respuesta.

Análisis de la concentración del producto B

La concentración del producto B representa una de las variables fundamentales del estudio, debido a que permite evaluar el comportamiento del proceso de transformación química. Mantener esta variable cerca de un valor de referencia resulta importante para garantizar condiciones consistentes de producción y reducir las desviaciones en la composición del producto final.

Relación entre temperatura, nivel, flujo y comportamiento del reactor

Las variables de temperatura, nivel y flujo mantienen relaciones dinámicas que influyen sobre el funcionamiento general de un reactor industrial. Estas interacciones deben considerarse durante el diseño del sistema de control porque una modificación en una variable puede provocar cambios simultáneos en otras magnitudes del proceso.

Modelado matemático del sistema

Formulación de los balances de materia y energía

El modelado matemático permite representar el comportamiento dinámico de los procesos industriales mediante ecuaciones que describen las relaciones entre las variables. En el caso de los reactores, los balances de materia y energía constituyen herramientas esenciales para estudiar la evolución temporal de la concentración, el nivel y la temperatura.

El balance de materia se fundamenta en el principio de conservación de la masa. De manera general, la acumulación de materia dentro de un sistema corresponde a la diferencia entre las cantidades que ingresan y salen, considerando también la generación o el consumo asociado a reacciones químicas.

Desarrollo de las ecuaciones dinámicas del reactor

Las ecuaciones dinámicas describen la evolución de las variables del reactor a medida que transcurre el tiempo. Su desarrollo requiere identificar los mecanismos que gobiernan la acumulación de materia, la generación de productos y el intercambio energético. El comportamiento dinámico del nivel puede analizarse mediante un balance volumétrico.

Identificación de las variables controladas y manipuladas

La selección de las variables controladas y manipuladas constituye una decisión importante para lograr una regulación eficiente. Las variables controladas corresponden a las magnitudes que deben mantenerse próximas a valores establecidos, mientras que las variables manipuladas representan las acciones disponibles para modificar el proceso.

Aproximación mediante modelos de primer orden más tiempo muerto (FOPDT)

Los modelos de primer orden más tiempo muerto, conocidos como FOPDT, se utilizan ampliamente para aproximar la respuesta dinámica de numerosos procesos industriales. Su principal ventaja consiste en representar comportamientos relativamente complejos mediante un número reducido de parámetros.

Análisis del comportamiento dinámico del sistema

El análisis dinámico permite evaluar cómo responde un proceso industrial cuando sus condiciones operativas cambian. Esta evaluación resulta necesaria para determinar si el sistema puede alcanzar los valores de referencia, mantener la estabilidad y rechazar perturbaciones externas.

Diseño y sintonización de los controladores PID

Selección de la estrategia de control

La selección de una estrategia de control adecuada constituye una etapa fundamental para garantizar el desempeño satisfactorio de un sistema industrial. En procesos caracterizados por interacciones entre diferentes variables, resulta necesario analizar las relaciones entre las entradas y salidas antes de establecer la estructura de regulación.

Determinación de los parámetros proporcional, integral y derivativo

La sintonización de los controladores PID consiste en determinar los valores adecuados de sus parámetros para obtener una respuesta dinámica satisfactoria. Estos parámetros influyen directamente sobre la rapidez, estabilidad y precisión del sistema.

Aplicación del procedimiento de sintonización basado en FOPDT

La sintonización basada en modelos FOPDT aprovecha la información obtenida mediante la identificación dinámica del proceso. A partir de los parámetros de ganancia, constante de tiempo y tiempo muerto, es posible aplicar reglas o métodos analíticos para determinar valores adecuados de los controladores.

Diseño de los lazos de control de concentración, nivel y temperatura

El diseño de los lazos de control requiere establecer mecanismos de medición, comparación y actuación para cada variable seleccionada. Un lazo típico comprende un sensor, un controlador, un actuador y el proceso físico que se desea regular. En el control de concentración, el objetivo consiste en mantener la composición del producto B próxima al valor de referencia. Para lograrlo, el controlador debe modificar una variable manipulada capaz de influir sobre la formación o salida del producto.

Evaluación de las interacciones entre variables mediante la matriz de ganancias relativas (RGA)

La matriz de ganancias relativas, conocida como RGA por sus siglas en inglés, constituye una herramienta utilizada para analizar las interacciones existentes entre las variables de sistemas multivariados. Su aplicación permite evaluar la conveniencia de diferentes emparejamientos entre variables manipuladas y controladas. Este análisis resulta importante cuando una acción de control puede modificar simultáneamente varias salidas del proceso.

Simulación y evaluación del sistema de control

Definición de las condiciones nominales de operación

Las condiciones nominales representan el conjunto de valores operativos utilizados como referencia para evaluar el funcionamiento de un sistema industrial. Su definición resulta indispensable porque permite establecer un punto de comparación para las diferentes simulaciones.

Simulación del funcionamiento del reactor

La simulación computacional constituye una herramienta importante para analizar sistemas de control antes de su implementación física. Mediante modelos matemáticos, es posible representar la evolución de las variables y evaluar el efecto de diferentes estrategias de regulación. En el caso de los reactores industriales, las simulaciones permiten estudiar el comportamiento de la concentración, temperatura y nivel bajo distintas condiciones operativas. También facilitan la identificación de posibles oscilaciones, respuestas lentas y problemas relacionados con las interacciones entre variables.

Evaluación de la respuesta ante perturbaciones

Las perturbaciones constituyen variaciones externas o internas que modifican las condiciones operativas de un proceso industrial. Entre ellas pueden encontrarse cambios de temperatura en la alimentación, fluctuaciones de caudal, modificaciones de composición y variaciones en el suministro de vapor.

Comparación del comportamiento en lazo abierto y cerrado

La comparación entre sistemas de lazo abierto y cerrado permite determinar el efecto de la retroalimentación sobre el desempeño dinámico. Esta evaluación resulta especialmente útil para identificar mejoras en la rapidez y precisión de las respuestas.

Medición del tiempo de establecimiento, sobreimpulso y error estacionario

La evaluación cuantitativa de un sistema de control se realiza mediante indicadores dinámicos que permiten medir la calidad de la respuesta. El tiempo de establecimiento representa el periodo necesario para que la variable permanezca dentro de un margen previamente definido alrededor de su valor final. Un tiempo menor suele indicar una respuesta más rápida, siempre que se mantenga la estabilidad.

En la prueba nominal presentada por los autores se reportan los siguientes resultados:

Indicador	Resultado reportado
Concentración de referencia de B	0,4
Sobreimpulso	0,55 %
Tiempo de establecimiento en lazo abierto	30 minutos
Tiempo de establecimiento en lazo cerrado	15 minutos
Error estacionario	Nulo
Reducción del tiempo de establecimiento	50 %

Los valores obtenidos indican que la estrategia propuesta consigue una respuesta de concentración rápida y precisa bajo las condiciones analizadas.

Análisis y discusión de resultados

Interpretación de las respuestas dinámicas del sistema

La interpretación de las respuestas dinámicas constituye una etapa esencial para determinar la efectividad de la estrategia de control desarrollada. Los resultados deben analizarse considerando tanto la rapidez con la que las variables alcanzan sus valores de referencia como su capacidad para mantener condiciones estables.

Evaluación de la precisión del control de concentración

La precisión del control de concentración representa uno de los principales criterios para valorar la estrategia propuesta. En los procesos de producción química, pequeñas desviaciones en la composición pueden afectar la uniformidad y las características del producto obtenido. La concentración de referencia establecida en el estudio permite observar el comportamiento del sistema cuando se aplica la estrategia de control PID. El sobreimpulso reportado del 0,55 % indica que la desviación transitoria máxima es relativamente pequeña respecto al valor final. Asimismo, la ausencia de error estacionario en la prueba nominal refleja la capacidad

del controlador para mantener la concentración próxima al valor deseado una vez alcanzadas condiciones estables.

Análisis de la estabilidad de la temperatura y el nivel

La estabilidad de la temperatura y del nivel resulta indispensable para mantener condiciones adecuadas de funcionamiento en un reactor industrial. Ambas variables pueden influir sobre la concentración y el comportamiento general del proceso. La regulación térmica permite mantener el suministro de energía dentro de condiciones apropiadas. Cuando la temperatura experimenta oscilaciones significativas, pueden modificarse las velocidades de reacción y las características del producto final.

Identificación de las ventajas y limitaciones de la estrategia propuesta

La estrategia de control basada en PID presenta diferentes ventajas desde una perspectiva técnica e industrial. Una de ellas es su relativa sencillez de implementación, debido a que los controladores PID se encuentran ampliamente incorporados en los sistemas modernos de automatización.

Implicaciones de los resultados para la automatización industrial

Los resultados obtenidos muestran la relevancia de utilizar estrategias de control automático para mejorar el comportamiento de los procesos de producción. La capacidad de reducir los tiempos de establecimiento y minimizar las desviaciones puede contribuir a mejorar la consistencia de las operaciones.

Conclusiones y perspectivas futuras

Principales aportaciones del sistema de control desarrollado

El estudio del sistema de control para procesos de producción permite comprender la importancia de integrar herramientas de modelado matemático, simulación y control automático en el funcionamiento de los reactores industriales. La principal aportación descrita consiste en el desarrollo de una estrategia orientada a regular la concentración del producto B, junto con variables operativas como la temperatura y el nivel del reactor. La utilización de controladores PID, sintonizados mediante aproximaciones FOPDT, proporciona un enfoque práctico para estudiar la respuesta dinámica del proceso.

Importancia de la sintonización PID en los procesos de producción

La sintonización de los controladores PID constituye uno de los aspectos esenciales para garantizar una respuesta adecuada. La selección incorrecta de los parámetros puede provocar comportamientos lentos, oscilaciones o dificultades para mantener condiciones estables. El uso de modelos FOPDT facilita la identificación de características dinámicas relevantes y permite establecer parámetros iniciales a partir de procedimientos sistemáticos. Esta metodología ofrece una alternativa al ajuste exclusivamente empírico de los controladores.

Beneficios potenciales para la calidad y eficiencia industrial

La regulación adecuada de las variables operativas puede generar beneficios importantes para la calidad y la eficiencia de los procesos industriales. Mantener concentraciones, temperaturas y niveles próximos a los valores deseados contribuye a reducir variaciones innecesarias en las condiciones de producción. Una respuesta dinámica rápida también puede disminuir el tiempo requerido para recuperar el funcionamiento normal después de determinados cambios operativos. Esto resulta relevante en procesos donde las fluctuaciones prolongadas pueden afectar la uniformidad del producto.

Limitaciones derivadas del análisis mediante simulación

Aunque las simulaciones constituyen herramientas importantes para evaluar sistemas de control, presentan limitaciones relacionadas con las aproximaciones utilizadas durante la construcción de los modelos. Los modelos matemáticos pueden simplificar determinadas características físicas del proceso, como las variaciones de propiedades del fluido, la distribución de temperatura, las dinámicas de los actuadores y la presencia de perturbaciones no consideradas inicialmente. Asimismo, las condiciones simuladas pueden diferir de las existentes en una instalación industrial real. Factores como el ruido de medición, el desgaste de las válvulas, las fluctuaciones de suministro y las incertidumbres en los parámetros pueden modificar la respuesta del controlador.

Posibilidades de implementar técnicas de control predictivo y adaptativo

Las perspectivas futuras en el desarrollo de sistemas de control industrial incluyen la incorporación de técnicas capaces de responder a procesos más complejos y condiciones operativas variables. Entre estas

alternativas destacan el control predictivo basado en modelos y el control adaptativo. El control predictivo basado en modelos, conocido como MPC, utiliza una representación matemática del proceso para estimar su comportamiento futuro y calcular acciones de control considerando objetivos y restricciones. Esta metodología puede resultar especialmente útil en sistemas multivariables donde existen interacciones significativas entre entradas y salidas.

Resumen

El artículo Sistema de control para procesos de producción, desarrollado por Jiménez-Cabas, Cárdenas-Cabrera y Polo-Panza (2020), presenta el diseño y la evaluación de una estrategia de control automático aplicada a un reactor industrial con calentamiento mediante serpentín de vapor. El objetivo principal de la investigación consiste en garantizar la regulación de la concentración del producto B, además de controlar variables operativas fundamentales como el nivel y la temperatura del reactor. La metodología se fundamenta en el análisis dinámico del proceso, la identificación de las relaciones entre las variables y la implementación de controladores proporcional-integral-derivativo (PID). Para la sintonización se utilizan modelos de primer orden más tiempo muerto (FOPDT), los cuales permiten representar el comportamiento dinámico del sistema. Asimismo, se considera la interacción entre variables para seleccionar estrategias de control apropiadas y mejorar el desempeño general del proceso. La validación de la estrategia se desarrolla mediante simulaciones bajo diferentes condiciones de operación. En la prueba nominal, con una concentración de referencia de 0,4 para el producto B, se observa un sobreimpulso del 0,55 %, acompañado de una reducción del tiempo de establecimiento de 30 a 15 minutos. Adicionalmente, el sistema alcanza un error estacionario nulo, lo que demuestra un comportamiento satisfactorio para las condiciones evaluadas. Los resultados indican que la integración de controladores PID y estrategias de control multivariable puede mejorar la regulación de las condiciones operativas de un reactor industrial. El estudio destaca la importancia del modelado matemático, la selección adecuada de variables y la simulación como herramientas para el diseño de sistemas de automatización confiables. Finalmente, se concluye que la estrategia propuesta ofrece resultados favorables en términos de estabilidad y precisión, aunque su implementación en instalaciones reales requeriría procesos adicionales de validación experimental.

Referencias

- Las siguientes referencias incluyen el artículo original y obras complementarias relacionadas con el control de procesos industriales.
- Jiménez-Cabas, J., Cárdenas-Cabrera, J., & Polo-Panza, A. (2020). Sistema de control para procesos de producción. *Revista SEXTANTE*, 23, 1–11. <https://doi.org/10.54606/Sextante2020.v23.01>
- Åström, K. J., & Hägglund, T. (2006). *Advanced PID control*. ISA—The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., & Doyle, F. J., III. (2011). *Process dynamics and control* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Smith, C. A., & Corripio, A. B. (2006). *Principles and practice of automatic process control* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Bequette, B. W. (2003). *Process control: Modeling, design, and simulation*. Prentice Hall.
- Skogestad, S. (2003). Simple analytic rules for model reduction and PID controller tuning. *Journal of Process Control*, 13(4), 291–309. [https://doi.org/10.1016/S0959-1524\(02\)00062-8](https://doi.org/10.1016/S0959-1524(02)00062-8)
- Ziegler, J. G., & Nichols, N. B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *Transactions of the ASME*, 64(8), 759–768.
- Rivera, D. E., Morari, M., & Skogestad, S. (1986). Internal model control: PID controller design. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 25(1), 252–265. <https://doi.org/10.1021/i200032a041>
- Luyben, W. L. (1990). *Process modeling, simulation, and control for chemical engineers* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Marlin, T. E. (2000). *Process control: Designing processes and control systems for dynamic performance* (2nd ed.). McGraw-Hill.