

DOI: <https://doi.org/10.47300/actasidi-unicyt-2025-65>

EFECTO DE LA POSICIÓN DEL SENSOR DE TEMPERATURA, EN LA RESPUESTA TRANSITORIA PARA UN REACTOR TUBULAR, EN EL PROCESO DE OXIDACIÓN DE BENCENO PARA PRODUCIR ANHIDRIDO MALEICO

Manica Jauregui, Magdalena

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba
Orizaba, Veracruz, México
maggiemanicajauregui@hotmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-6921-6237>

Garcia Rojas, Isai

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba
Orizaba, Veracruz, México
isairojasjauregui@icloud.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0193-103X>

Urrea García, Galo Rafael

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba
Orizaba, Veracruz, México
grug@xanum.uam.mx
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5994-9382>

Luna Solano, Guadalupe

Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Orizaba
Orizaba, Veracruz, México
lupitals@hotmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2470-6273>

RESUMEN

El presente estudio examina cómo la ubicación del sensor de temperatura, influye en el rendimiento de la estructura de control en cascada diseñada para regular la concentración de anhídrido maleico. Se evalúan once posiciones de sensor de temperatura a lo largo del reactor, aplicando un salto escalón en la temperatura de la chaqueta y evaluando, según el valor de la Integral Absoluta del Error (IAE), la posición con el mejor desempeño y la de menor eficacia del sistema. La dinámica del proceso se modeló utilizando modelos de primer orden más tiempo muerto (FOPDT), implementando una estrategia de control en cascada Proporcional/Proporcional-Integral (P/PI) utilizando el método de Control por Modelado Interno (IMC). Los resultados de la simulación bajo diferentes escenarios de perturbación muestran que, la ubicación del sensor tiene un impacto significativo en la respuesta transitoria del sistema. Colocar el sensor al final del reactor (95% de la longitud) resultó en una respuesta de asentamiento más suave y rápida en comparación con su ubicación al inicio (5%), cuya respuesta mostró oscilaciones más marcadas y prolongadas. Aunque el sistema de control diseñado

mantuvo eficazmente la concentración deseada de anhídrido maleico en ambos casos, la mejora en el comportamiento transitorio con el sensor ubicado al final del proceso sugiere que, esta elección es crucial para optimizar el rendimiento del sistema.

Palabras clave: control en cascada, Proporcional, Proporcional-Integral, reactores tubulares, sistema de control.

ABSTRACT

This study examines how temperature sensor location influences the performance of a cascade control structure designed to regulate maleic anhydride concentration. Eleven temperature sensor positions along the reactor are evaluated, applying a step change in the jacket temperature and evaluating, based on the Absolute Integral of Error (AIE) value, the position with the best and lowest performance in the system. Process dynamics were modeled using First Order Plus Dead Time (FOPDT) models, implementing a Proportional/Proportional-Integral (P/PI) cascade control strategy using the Internal Model Control (IMC) method. Simulation results under different disturbance scenarios show that sensor location has a significant impact on the system's transient response. Placing the sensor at the end of the reactor (95% of the length) resulted in a smoother and faster settling response compared to its initial location (5%), which showed more pronounced and prolonged oscillations. Although the designed control system effectively maintained the desired maleic anhydride concentration in both cases, the improvement in transient behavior with the sensor located at the end of the process suggests that this choice is crucial to optimize system performance.

Keywords: cascade control, control system, Proportional, Proportional-Integral, tubular reactors.

1. INTRODUCCIÓN

Mantener la productividad en una industria es fundamental para estar en competencia con el mercado industrial, para ello es necesario tener procesos sustentables, que no comprometan la seguridad laboral y la seguridad de los equipos o instalaciones, ya que las paradas no planificadas debido a fallas en los equipos pueden causar pérdidas significativas a la empresa (Mewada et al., 2025).

La automatización de los procesos permite desarrollar tareas de forma efectiva minimizando la necesidad de intervención de operadores, con el fin de optimizar los procesos, reduciendo costos, mitigando posibles errores (Ifechukwude Egbunokei et al., 2024).

Los procesos de oxidación como la reacción de transformación de benceno a anhídrido maleico son particularmente inestables debido a su exotermicidad, un ligero cambio de condiciones de operación puede tener consecuencias irreversibles tanto a nivel operacional como en la calidad del producto y el aprovechamiento de los recursos. La aplicación de estructuras de control permiten evitar los riesgos a los que está expuesto el proceso, manteniendo el equipo trabajando en las condiciones permisibles frente a las perturbaciones a las que este expuesto.

A lo largo de los años ha existido un gran interés en desarrollar investigaciones enfocadas en generar avances significativos en el control de procesos. Optimizar las estructuras de control haciéndolas más adaptables a los procesos permite tener compensadores más robustos. Un análisis de la disposición de los sensores de temperatura asegurara la obtención de información sobre el estado en el que se encuentra el proceso proporcionando datos precisos y relevantes al mismo tiempo permitirá la implementación de estrategias de control más robustas, ya que habrá un claro monitoreo de las desviaciones activando la implementación de acciones que sean correctivas y oportunas, optimizando el proceso y generando una operación segura. Esto es útil particularmente en procesos donde no es posible o practico tener sensores en todas partes y la detención temprana de desviaciones es imprescindible para no comprometer el objetivo de producción.

2. MARCO CONCEPTUAL

El estudio de la posición de los sensores de medición sigue siendo de interés para el buen desempeño de los procesos industriales, múltiples investigaciones han sido desarrolladas con el propósito de identificar las posiciones óptimas de medición, Waldraff et al. (1998) discutieron la posición óptima del sensor para un reactor tubular, demostrando que el método de colocación ortogonal puede ofrecer una buena aproximación para identificar las ubicaciones, proporcionando una herramienta útil para la selección estratégica de posición de los sensores cuando el análisis directo del modelo distribuido es complejo. Otros autores (Alonso et al., 2004) han representado el sistema de manera simplificada usando una descomposición ortogonal propia que permite reducir las dimensiones del problema sin perder aspectos esenciales del comportamiento del proceso, determinando el tipo y la cantidad de mediciones apropiadas mediante un método de optimización que buscaba maximizar la información obtenida de las mediciones minimizando la pérdida de precisión. Por otro lado, Hernández Espinosa et al. (2017) apreciaron que un esquema de control variable en cascada presenta un mejor desempeño en el proceso de oxidación de etileno llevado a cabo en un reactor tubular, comparando la estructura contra el desempeño de varios esquemas de control convencional frente a perturbaciones en la alimentación combinadas con una variación en la entalpía de reacción. Mas recientemente García-Rojas et al. (2024) trabajaron con el caso de estudio de este artículo y estudiaron la posición del sensor de temperatura para el diseño de la estructura de control, además analizaron el efecto que tiene la estructura de control seleccionada sobre los valores de selectividad y rendimiento de la reacción.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

La presente investigación es un estudio experimental basado en la simulación de la reacción múltiple de oxidación de benceno a anhídrido maleico, llevada a cabo en un reactor tubular de 3.2 m (Urrea-García et al., 2015), mediante solución numérica del modelo matemático en lenguaje Fortran utilizando como compilador Force 2.0, utilizando un diseño del tipo cuantitativo y explicativo cuyo objetivo es comprender el efecto que tiene la elección de la posición del sensor de temperatura en el desempeño del sistema de control en cascada temperatura-composición.

Modelado y simulación

La reacción es modelada matemáticamente mediante los balances de materia y energía tomados del trabajo de (Urrea-García et al., 2015), así como los parámetros correspondientes para su solución de los modelos. Las ecuaciones son solucionadas haciendo uso de método de diferencias finitas y el método de Runge-Kutta de cuarto orden obteniendo de esta forma el comportamiento del sistema (los perfiles que muestran el comportamiento de la temperatura y la composición a lo largo del reactor).

Caracterización de proceso

Se seleccionan 11 puntos a evaluar para la posición del sensor de temperatura los cuales serán al 5%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80%, 90%, 95% de la longitud del reactor tubular (3.2 m).

Se aplica un salto escalón del 5% en la variable manipulada (temperatura de chaqueta), posteriormente se evalúa la respuesta obtenida en la composición de salida del anhídrido maleico y la temperatura para los once puntos de control seleccionados a lo largo del reactor.

Se realiza una aproximación de las respuestas de composición y temperatura a un Modelo de Primer Orden más Tiempo muerto (POMTM), donde se precisan de tres parámetros: ganancia (K), tiempo muerto (θ) y la constante de tiempo (τ). Para obtener los valores de estos parámetros

se selecciona la respuesta que coincida en la región de alta tasa de cambio de la respuesta al cambio escalón aplicado siguiendo lo descrito por (Smith, 2014).

De esta forma se construyen la función de transferencia con los datos obtenidos de la composición y la función de transferencia de los datos obtenidos por la temperatura.

Sintonizado de control

Para el diseño de la estructura de control en cascada temperatura-composición, se propone un arreglo Proporcional/Proporcional Integral (P/PI) cuyo propósito principal es mantener a la concentración de anhídrido maleico en los valores deseados (0.00216 mol/s), el lazo primario es el control PI encargado de ajustar directamente la concentración y el lazo esclavo (P) el encargado de ajustar la variable manipulada.

El diseño del lazo primario se calcula mediante una relación entre la función de transferencia de composición de salida y de la función de la temperatura a lo largo de cada punto del reactor seleccionado, el diseño se puede expresar como el cociente de las funciones de transferencia de composición sobre temperatura. La aproximación del numerador del cociente generado es realizado siguiendo las reglas de (Skogestad & Grimholt, 2012). Por último, se procede a calcular la Ganancia Proporcional, Ganancia Proporcional y el Tiempo integral.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

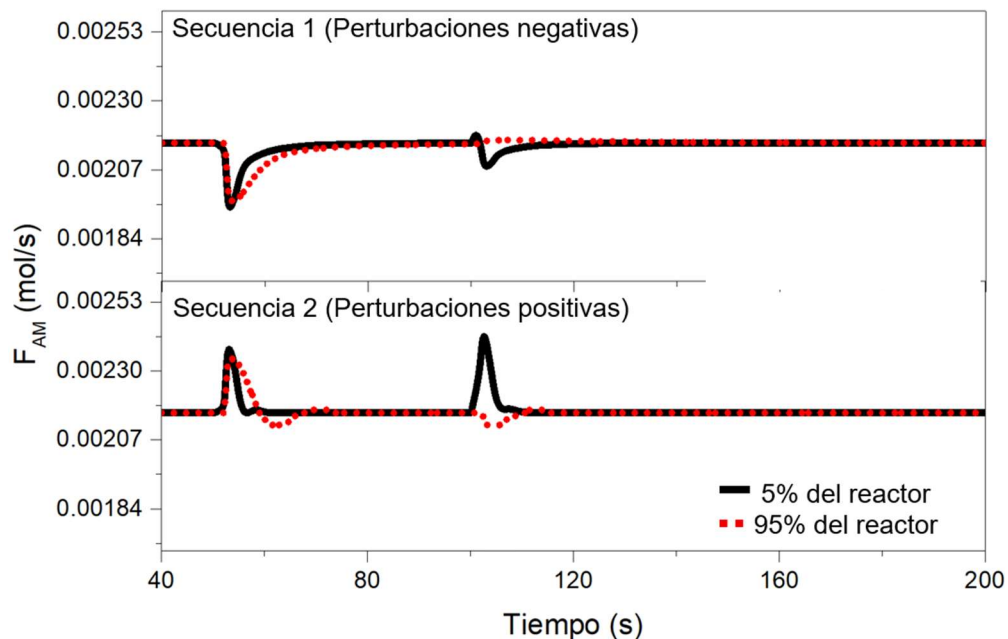
Para evaluar la estructura de control se proponen realizar las siguientes secuencias de perturbaciones:

Secuencia 1: -10% composición de alimentación del benceno a $t=50$ segundos, -10% temperatura del reactor en $t=100$ segundos.

Secuencia 2: 10% composición de alimentación del benceno a $t=50$ segundos, 10% temperatura del reactor en $t=100$ segundos.

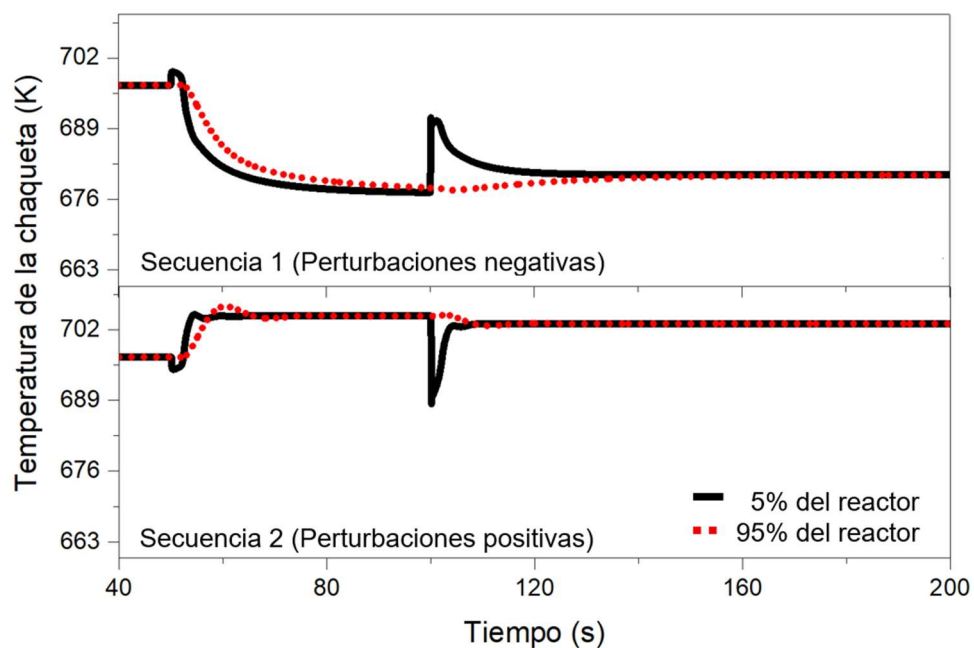
Se exponen las respuestas de dos puntos en los extremos del reactor (de los 11 puntos de medición propuestos) para identificar si existe una diferencia en el comportamiento del sistema. Cabe señalar que estos puntos fueron seleccionados considerando el valor más alto y más bajo de la Integral Absoluta de Error (IAE), 0.05112 de IAE (valor más alto) para la posición del sensor al 5% y de 0.04686 de IAE (valor más bajo) para la posición del 95%. En la Figura 1, se muestra la respuesta del anhídrido maleico con el control secundario diseñado en los puntos anteriormente mencionadas y con la implementación de los dos tipos de secuencias de perturbaciones .

Figura 1
Comportamiento dinámico del anhídrido maleico



En la Figura 2, se muestra el comportamiento de la temperatura de la chaqueta con el control secundario en ambas posiciones seleccionadas e implementando las secuencias de perturbaciones propuestas.

Figura 2
Comportamiento dinámico de la temperatura de la chaqueta



Se puede observar que, cuando se escoge el punto de medición al inicio del reactor para sintonizar el sistema de control, existe una respuesta más oscilatoria y pronunciada. En ambas secuencias implementadas, el sistema de control tarda más tiempo en alcanzar el estado estacionario, ya que las oscilaciones son sostenidas durante más tiempo, generando picos y valles mayores.

Analizando la estructura sintonizada con el sensor ubicado al final del reactor (95 %), se observa que se inducen oscilaciones de menor amplitud y duración comparadas con las del control secundario diseñado al 5 % del reactor. El sistema muestra un comportamiento más amortiguado y se estabiliza rápidamente, lo cual se traduce en un control más eficaz y menos agresivo. La IAE también nos indicó un mejor comportamiento para este caso, ya que mostró el valor más bajo de error en todos los puntos analizados, lo que significa que el sistema mantuvo la variable controlada más cerca del punto de ajuste, minimizando el error acumulado y mejorando el desempeño general del control.

Aunque en ambos casos el sistema de control actúa de manera satisfactoria, manteniendo la composición de salida en el punto de ajuste establecido (0.00216 mol/s), la respuesta transitoria es diferente en cada caso. Es importante considerar el comportamiento transitorio del sistema, debido a que una respuesta oscilante contribuye al desgaste mecánico del equipo: las válvulas de control, bombas, actuadores o compresores no están diseñados para abrir y cerrar, acelerar o desacelerar constantemente para mitigar las variaciones, lo que conlleva a un desgaste mecánico, reduciendo la vida del equipo e incrementando costes de mantenimiento.

5. CONCLUSIONES

Se concluye que el sistema de control diseñado logra con éxito manejar las secuencias de perturbaciones inducidas y mantener la composición del anhídrido maleico en el punto de ajuste adecuado. Se demostró que la posición del sensor sí tiene un efecto significativo en la respuesta del sistema. En el análisis, la ubicación del sensor al final del reactor mejora considerablemente la respuesta del sistema al minimizar las oscilaciones y favorecer una estabilización más rápida en el comportamiento del anhídrido maleico, comparado con la posición al inicio del reactor. En procesos donde se llevan a cabo reacciones múltiples en reactores tubulares, la posición óptima y eficaz del sensor juega un papel importante en el desarrollo objetivo del proceso.

REFERENCIAS

- Alonso, A. A., Kevrekidis, I. G., Banga, J. R., & Frouzakis, C. E. (2004). Optimal sensor location and reduced order observer design for distributed process systems. *Computers & Chemical Engineering*, 28(1-2), 27-35. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(03\)00175-3](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(03)00175-3)
- Egbunokei, P. I., Dienagha, I. N., Digitenie, W. N., Onukwulu, E. C., & Oladiipo, O. T. (2024). Automation and worker safety: Balancing risks and benefits in oil, gas, and renewable energy industries. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, 5(4), 1273-1283. <https://doi.org/10.54660/IJMRGE.2024.5.4.1273-1283>
- Garcia-Rojas, I., Urrea-Garcia, G. R., Luna-Solano, G., & Cantu-Lozano, D. (2024). Evaluation of selectivity and yield in the design of control systems for the production of maleic anhydride carried out in a tubular reactor. In A. K. Nagar, D. S. Jat, D. Mishra, & A. Joshi (Eds.), *Intelligent Sustainable Systems. WorldS4 2023* (Vol. 803, pp. 151-161). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7569-3_13

- Hernández Espinosa, J., Urrea García, G. R., & Luna Solano, G. (2017). *Estructura de Control Variable en Cascada para Compensar Variaciones en Parámetros en Reactor Tubular*. Congreso Nacional de Control Automático, Monterrey, Nuevo León, México.
- Mewada, H. K., Bhatt, N., & Bhatt, N. (2025). Enhancing industrial equipment reliability through an optimized ANN-powered predictive maintenance system. In L. Syam Sundar, D. Balakrishnan, & A. C. M. Sousa (Eds.), *Expert Artificial Neural Network Applications for Science and Engineering* (pp. 383-404). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-7250-0.ch013>
- Skogestad, S., & Grimholt, C. (2012). The SIMC Method for Smooth PID Controller Tuning. In R. Vilanova & A. Visioli (Eds.), *PID Control in the Third Millennium* (pp. 103-123). Springer, London. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2425-2_5.
- Smith, C. A. (2014). Control automático de procesos: teoría y práctica (2a ed.). LIMUSA / WILEY.
- Urrea-García, G.R., Reséndiz-Camacho, S., Álvarez-Ramírez, J., & Luna-Solano, G. (2015). Variable cascade control structure for tubular reactors. *Chemical Engineering & Technology*, 38(3), 521-529. <https://doi.org/10.1002/ceat.201300518>
- Waldraff, W., Dochain, D., Bourrel, S., & Magnus, A. (1998). On the use of observability measures for sensor location in tubular reactor. *Journal of Process Control*, 8(5-6), 497-505. [https://doi.org/10.1016/S0959-1524\(98\)00017-1](https://doi.org/10.1016/S0959-1524(98)00017-1)

Los autores del trabajo autorizan a la Universidad Internacional de Ciencia y Tecnología (UNICYT) a publicar este resumen en extenso en las Actas del Congreso IDI-UNICYT 2025 en Acceso Abierto (Open Access) en formato digital (PDF) e integrarlos en diversas plataformas online bajo la licencia CC: Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (CC BY-NC-SA 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>.

La Universidad Internacional de Ciencia y Tecnología y los miembros del Comité Organizador del Congreso IDI-UNICYT 2025 no son responsables del contenido ni de las implicaciones de lo expresado en este artículo.