EIEI ACOFI 2025
5º Congreso Latinoamericano de Ingeniería
Más Información: www.acofi.edu.co/eiei
Ingeniería de impacto para cuidar y transformar la vida
ACOFI: 50 años por la excelencia de la educación en ingeniería.

Implementación de una mini-columna de burbujeo con sistemas de monitoreo y control apoyado en IoT para el estudio de cultivos de levaduras

Carlos Andrés Díaz Andrade, Isabella Giraldo Rodríguez, Nelson Hernando Caicedo Ortega

Universidad Icesi
Cali, Colombia

Resumen

El estudio y optimización de bioprocesos requieren sistemas experimentales que garanticen precisión, estabilidad operativa y monitoreo continuo. En este contexto, las columnas de burbujeo se han consolidado como biorreactores eficientes para cultivos aeróbicos, como los de levaduras, debido a su alta capacidad de transferencia de oxígeno y simplicidad operativa. Sin embargo, su implementación a escala de laboratorio presenta limitaciones en el seguimiento en tiempo real de variables críticas, lo que restringe su aplicabilidad en investigaciones avanzadas y bioprocesos emergentes.

La incorporación de tecnologías avanzadas, como el Internet de las Cosas (IoT), permite superar estas barreras mediante la digitalización y automatización de los parámetros operativos. En este trabajo se presenta el diseño e implementación de una mini-columna de burbujeo equipada con un sistema integral de monitoreo y control basado en IoT para el estudio de cultivos de levaduras. El sistema integra sensores de medición continua de pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y temperatura, además de un módulo de regulación térmica que mejora la estabilidad del bioproceso. Esta plataforma ha sido implementada específicamente para la producción de levadura enriquecida en glutatión reducido (GSH), un metabolito de alto valor biotecnológico con aplicaciones en la industria alimentaria, farmacéutica y cosmética.

La solución propuesta permite la transmisión de datos a una plataforma en la nube de las variables críticas del bioproceso, facilitando su almacenamiento, visualización y análisis. La integración del IoT en bioprocesos permite el ajuste de las condiciones de operación, mejorando la reproducibilidad de los experimentos y facilitando la toma de decisiones basada en datos. Esto

DOI: https://doi.org/10.26507/paper.4760

respalda la aplicabilidad de esta estrategia para la optimización de bioprocesos a diferentes escalas, promoviendo la automatización en el campo de los bioprocesos.

Palabras clave: monitoreo; bioproceso; conductividad

Abstract

The study and optimization of bioprocesses require experimental systems that ensure precision, operational stability, and continuous monitoring. In this context, bubble columns have established themselves as efficient bioreactors for aerobic cultures, such as yeast, due to their high oxygen transfer capacity and operational simplicity. However, their implementation at the laboratory scale presents limitations in real-time monitoring of critical variables, restricting their applicability in advanced research and emerging bioprocesses.

The integration of advanced technologies, such as the Internet of Things (IoT), helps overcome these barriers through the digitalization and automation of operational parameters. This study presents the design and implementation of a mini bubble column equipped with a comprehensive IoT-based monitoring and control system for yeast culture studies. The system integrates sensors for continuous measurement of pH, dissolved oxygen, electrical conductivity, and temperature, along with a thermal regulation module that enhances bioprocess stability. This platform has been specifically implemented for the production of yeast enriched with reduced glutathione (GSH), a metabolite of high biotechnological value with applications in the food, pharmaceutical, and cosmetic industries.

The proposed solution enables the transmission of critical bioprocess variables to a cloud-based platform, facilitating data storage, visualization, and analysis. The integration of IoT in bioprocesses allows the adjustment of operating conditions, improving experiment reproducibility and enabling data-driven decision-making. This supports the applicability of this strategy for bioprocess optimization at various scales, promoting automation within the field of bioprocesses.

Keywords*: monitoring; bioprocess; conductivity*

1. Introducción

El estudio, monitoreo y control de bioprocesos requiere de plataformas experimentales que garanticen precisión, estabilidad operativa y trazabilidad de las condiciones durante el cultivo. En este escenario, la posibilidad de integrar sensores y sistemas de adquisición de datos en tiempo real representa una evolución clave frente a los métodos tradicionales basados en mediciones offline, que son limitados en frecuencia, propensos a errores manuales y dificultan la intervención oportuna ante desviaciones del proceso (Srivastav, Das, & Srivastava, 2024).

La miniaturización de biorreactores, particularmente de columnas de burbujeo, ha cobrado relevancia en la investigación aplicada debido a su bajo costo, simplicidad de diseño y alta eficiencia en transferencia de oxígeno para cultivos aeróbicos. No obstante, la reducción de escala

introduce desafíos significativos en el monitoreo y control de parámetros críticos como la temperatura, el oxígeno disuelto y la conductividad, cuya variabilidad puede impactar directamente la cinética de crecimiento celular y la producción de metabolitos (Betts & Baganz, 2006; García-Ochoa & Gómez, 2009).

Frente a estas limitaciones, el Internet de las Cosas (IoT) ofrece un enfoque prometedor al permitir la integración de sensores digitales, plataformas de almacenamiento en la nube y estrategias de control en tiempo real, incluso en sistemas de volumen reducido. Esta digitalización del bioproceso facilita la supervisión continua, la trazabilidad completa de los datos y la implementación de ajustes automáticos o asistidos, mejorando la reproducibilidad experimental y la eficiencia operativa.

Este artículo presenta el diseño e implementación de una mini-columna de burbujeo equipada con un sistema de monitoreo y control basado en IoT, enfocado en dos componentes clave: (1) el monitoreo continuo de variables críticas del medio, incluyendo temperatura, oxígeno disuelto, conductividad y TDS, y (2) un sistema de control térmico activo ex situ mediante celdas Peltier y bomba peristáltica. Se valida su aplicabilidad como plataforma integral para el seguimiento de bioprocesos, específicamente en cultivos de *Saccharomyces cerevisiae* orientados a la producción de glutatión reducido (GSH).

2. Metodología

Diseño general del sistema

La plataforma desarrollada se basó en una mini-columna de burbujeo construida en vidrio, con volumen operativo de 500 mL. La configuración del reactor incluyó un módulo Peltier para el control de la temperatura del medio líquido, utilizando un circuito externo de recirculación-bombeo del medio de cultivo. Asi mismo el sistema dispuso de una entrada de flujo de aire regulada por rotámetro (Cole-Parmer®, EE.UU.), un difusor de ceramica tipo frita para la distribución uniforme del aire (Figura 1). Además, el biorreactor estuvo equipado con un sensor de temperatura (DS18B20), un sensor de pH (BCTPHC02, Bluelab, EE.UU.), conductividad (DFR0300, DFRobot, China), y sensor de oxígeno disuelto (SEN0237-A, DFRobot, China), con transmisión continua de datos a la nube para la monitorización en tiempo real (ThingSpeak™).

Monitoreo de variables críticas mediante IoT

El núcleo del sistema de monitoreo y control consistió en un microcontrolador ESP32 que integra sensores para el seguimiento continuo de variables críticas del bioproceso, incluyendo: oxígeno disuelto, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales (TDS). Se emplearon dos sensores de temperatura DS18B20: el primero, ubicado en el pozo térmico, fue utilizado para el control de la temperatura mediante el sistema PID; el segundo, ubicado en medio líquido cerca de la celda de medición, permitió realizar la compensación térmica en tiempo real de las lecturas de conductividad y TDS, mejorando la precisión de los datos obtenidos. Las lecturas se adquirieron con una frecuencia de cinco minutos y se transmitieron mediante conectividad WiFi a la plataforma en la nube ThingSpeak, donde fueron almacenadas, visualizadas y exportadas para análisis

posterior. Este enfoque elimina la necesidad de muestreos manuales intermitentes, ofreciendo trazabilidad total del proceso y permitiendo la intervención temprana ante posibles desviaciones. Como se ha señalado en estudios recientes, la implementación de arquitecturas de Internet de las Cosas (IoT) en bioprocesos no solo mejora la eficiencia operativa y la reproducibilidad experimental, sino que también habilita capacidades avanzadas de supervisión, análisis y control propias de entornos bioindustriales digitalizados (Borgosz et al., 2024; Kodumuru et al., 2025).

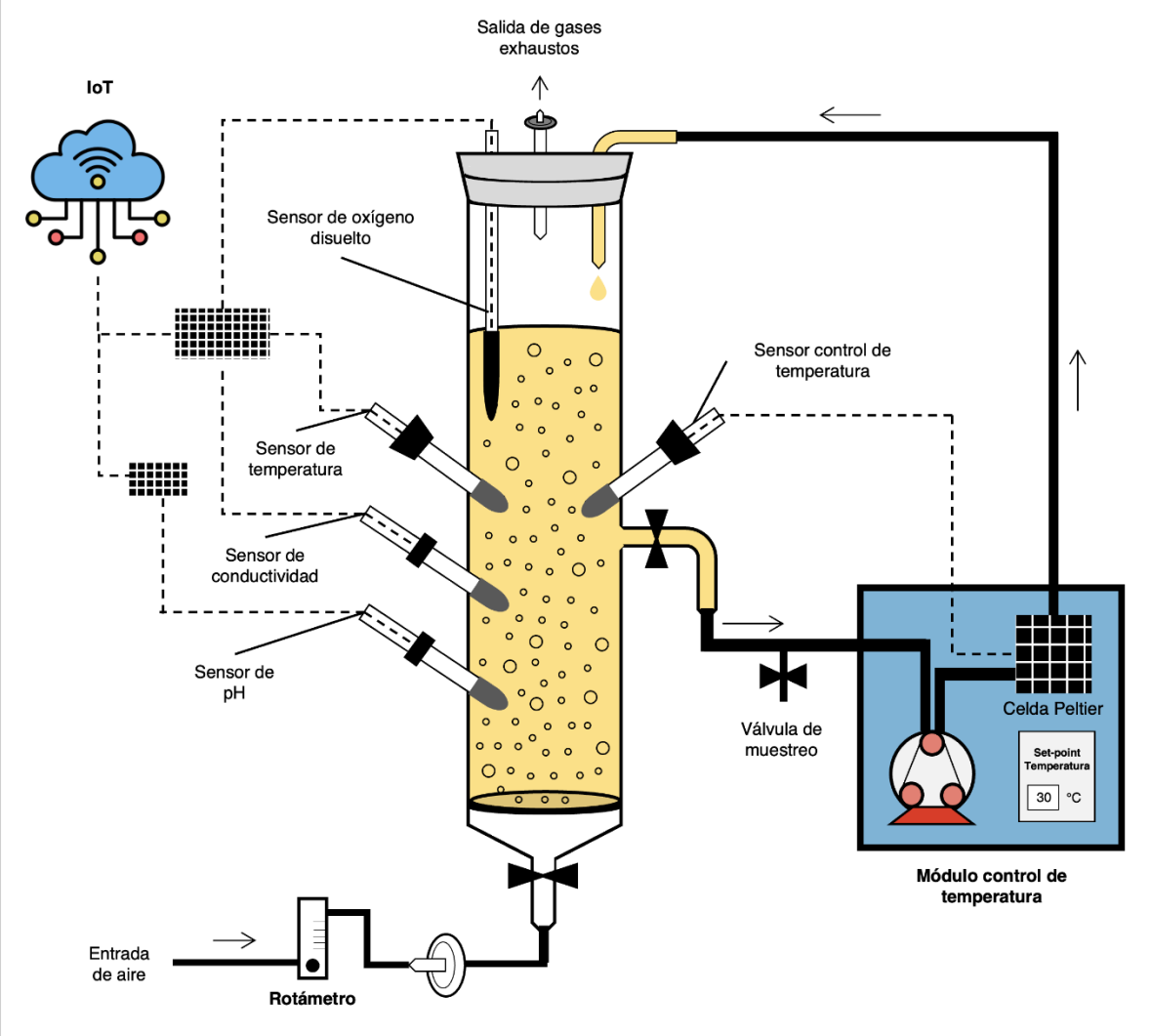

Figura 1: Detalle de la configuración de la mini-columna de burbujeo con su sensorica para monitoreo y control de variables conectadas a la nube.

Control térmico ex situ

El sistema de control de temperatura estuvo compuesto por celdas Peltier acopladas a disipadores de calor, controladas por un microcontrolador que implementó el algoritmo de PID. El mosto de fermentación proveniente de la mini-columna fue recirculado por una bomba peristáltica a un flujo constante, libre de turbulencias y sin contaminación cruzada. El control PID ajustó dinámicamente

la potencia térmica en función de las mediciones de temperatura en el medio, asegurando una respuesta rápida y estable ante perturbaciones.
Este enfoque de regulación térmica ha demostrado ser eficaz en aplicaciones que requieren alta precisión, como en sistemas de bioprinters y dispositivos ópticos, donde el uso de celdas Peltier controladas por algoritmos PID ha permitido estabilizar la temperatura con errores inferiores al 2% y tiempos de respuesta rápidos, garantizando un control térmico eficiente y reproducible (MDPI, 2020).

Cultivo y condiciones experimentales.

Se utilizó la cepa *Saccharomyces cerevisiae* cultivada en medio sintético definido suplementado con precursores de glutatión. El cultivo se mantuvo en condiciones aeróbicas durante sesiones de hasta 24 horas. Se registraron todas las variables del medio y del sistema térmico durante los ensayos, y se validó la estabilidad del proceso bajo condiciones controladas.

3. Resultados

El sistema implementado, permitió una monitorización continua de las variables críticas del bioproceso, aportando una visión integral del comportamiento dinámico del cultivo. A diferencia de los métodos offline, donde las mediciones son puntuales y espaciadas, la plataforma IoT desarrollada posibilitó un análisis detallado en tiempo real, mejorando la capacidad de diagnóstico y respuesta del operador.

Las curvas de temperatura mostraron una estabilidad térmica notable: el control PID mantuvo la temperatura del baño de recirculación en 30 ± 0.3 °C, incluso ante perturbaciones ambientales. La bomba peristáltica aseguró un flujo uniforme del fluido térmico, lo que permitió una transferencia de calor eficiente hacia el medio de cultivo. Las mediciones internas mostraron una alta correlación con la temperatura el termo pozo *($R^2 = 0.96$)*, validando el modelo ex situ de control térmico.

En paralelo, se observaron variaciones coherentes en la conductividad eléctrica, que, conectado directamente con la estimación de sólidos disueltos totales, fue indicativo del consumo de nutrientes por parte de la levadura. El sensor de oxígeno disuelto (**Figura 2**) permitió observar las dinámicas metabólicas en distintas fases del cultivo. En especial la respuesta posterior a la adición de la metionina en la hora 6 de cultivo donde se observó una disminución de la actividad respiratoria de las células. Estos datos, adquiridos y visualizados sin interrupción, ofrecieron una panorámica integral del estado del bioproceso.

Además, el sistema demostró ser energéticamente eficiente: el consumo promedio del módulo térmico fue de 60 W en régimen estable, con picos máximos de 110 W durante los arranques térmicos. Esto confirma la viabilidad del diseño como una solución de bajo consumo, adecuada para aplicaciones de larga duración en laboratorios o plantas piloto.

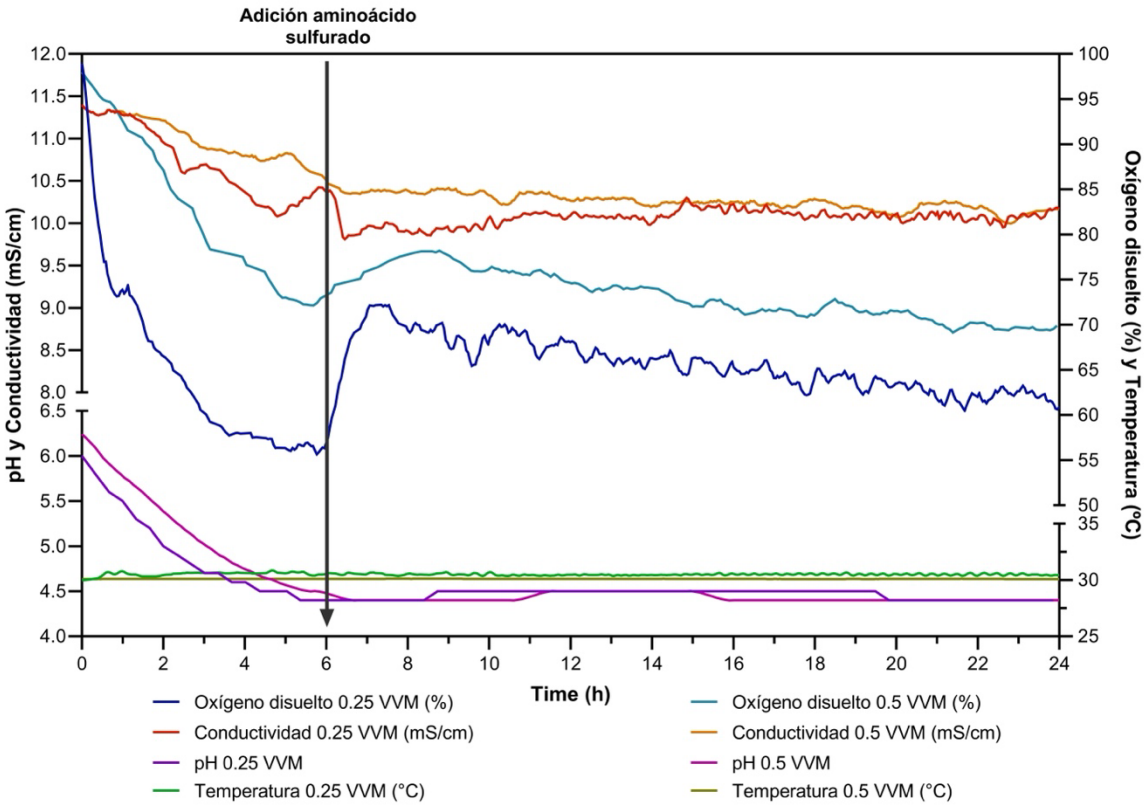

Figura 2: Registro on-line y en la nube de las variables de proceso (oxígeno disuelto, Conductividad, pH y Temperatura) durante la operación de la mini-columna de burbujeo para el cultivo de levaduras en estrategia batch y bajo diferentes condiciones operacionales (a) 0.25 vvm y (b) 0.5 vvm

Junto con el oxígeno disuelto, la conductividad fue la variable que más se vio afectada por el cambio en el flujo del aire a la columna. Esto es un resultado muy atractivo ya que poder contar con un sistema de monitoreo continuo y de alta sensibilidad a los cambios metabólicos de las células de levaduras permite hacer un mejor análisis de datos combinado con otras mediciones más espaciadas y *off-line* como es la medición de concentraciones de biomasa y de sustrato. NO obstante, una opción para la medición de biomasa podría ser la incorporación de sensores de turbidez calibrados para este tipo de células.

4. Conclusiones

La integración de monitoreo continuo e IoT en la mini-columna de burbujeo permitió transformar un biorreactor tradicional en una plataforma inteligente para el seguimiento integral de bioprocesos. Al combinar sensores en línea con visualización remota y almacenamiento automático, se superan las limitaciones de las mediciones offline y se habilita la trazabilidad completa del cultivo, condición fundamental para reproducibilidad y escalado.

El sistema de control térmico ex situ, basado en la recirculación del medio líquido a través de celdas Peltier ubicadas externamente al biorreactor, logró mantener condiciones térmicas estables durante

todo el proceso. Esta configuración evitó la formación de gradientes térmicos apreciables y favoreció la estabilidad del cultivo sin requerir intervención manual.
Estos resultados validan el potencial del enfoque propuesto para aplicaciones académicas e industriales que requieran plataformas de monitoreo y control accesibles, precisas y adaptables. En el futuro, la integración de algoritmos de inteligencia artificial, control multiparámetro y automatización completa podría ampliar aún más el alcance de estos sistemas, promoviendo el desarrollo de biotecnología digital sostenible y conectada.

5. Referencias

Artículos de revistas

- Betts, J. I., & Baganz, F. (2006). Miniature bioreactors: Current practices and future opportunities. Microbial Cell Factories, 5(1), 21. https://doi.org/10.1186/1475-2859-5-21
- García-Ochoa, F., & Gómez, E. (2009). Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: An overview. *Biotechnology Advances*, 27(2), 153–176. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.10.006
- MDPI. (2020). *Bioprinting of complex biological structures using temperature-controlled platforms*. Micromachines, 11(11), 999. https://www.mdpi.com/2072-666X/11/11/999. https://doi.org/10.3390/mi11110999

Libros

- Srivastav, A. K., Das, P., & Srivastava, A. K. (2024). *Introduction to Biotechnology and IoT Integration*. In *Biotech and IoT*. Apress, Berkeley, CA. https://doi.org/10.1007/979-8-8688-0527-1_1

Fuentes electrónicas

- Borgosz, J., Dikicioglu, D., & Eckford, C. (2024). Regulatory revision essential for bioprocess IIoT adoption. *European Pharmaceutical Review*. Recuperado de https://www.europeanpharmaceuticalreview.com/news/190599/regulatory-revision-essential-for-bioprocess-iiot-adoption/ European Pharmaceutical Review+1genengnews.com+1
- Kodumuru, S., et al. (2025). AI, IoT, and the Future of Biopharma Manufacturing. *Genetic Engineering & Biotechnology News*. Recuperado de https://www.genengnews.com/topics/bioprocessing/ai-iot-and-the-future-of-biopharma-manufacturing/

Sobre los autores

- **Carlos A. Díaz**: Ingeniero Electrónico, Máster en Gestión Informática y telecomunicaciones. Profesor titular. cadiaz@icesi.edu.co
- **Isabella Giraldo Rodríguez**: Ingeniera Bioquímica, Estudiante de maestría, Asistente de Investigación. isabella.giraldo.rodriguez1@u.icesi.edu.co

- **Nelson H. Caicedo**: Ingeniero Químico, Máster en Ingeniería, Doctor en Ingeniería de la Universidad de Bremen. Profesor Asociado. nhcaicedo@icesi.edu.co

---

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2025 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)