

Sistema Embebido para el seguimiento y control en línea de un fermentador aplicado a la conversión de azúcares en etanol

1st Danilo Figueroa Paredes
INGAR/CONICET-UTN, Instituto de
Desarrollo y Diseño
Santa Fe, Argentina
dfigueroa@santafe-conicet.gov.ar

2nd Gonzalo Alvarez
INGAR/CONICET-UTN, Instituto de
Desarrollo y Diseño
Santa Fe, Argentina
galvarez@santafe-conicet.gov.ar

3rd Mauren Fuentes Mora
INGAR/CONICET-UTN, Instituto de
Desarrollo y Diseño
Santa Fe, Argentina
mfuentes@santafe-conicet.gov.ar

4th Ramiro Sanchez
INGAR/CONICET-UTN, Instituto de
Desarrollo y Diseño
Santa Fe, Argentina
rsanchez@santafe-conicet.gov.ar

Abstract— El enfoque de este proyecto se centra en el desarrollo y la implementación de un sistema embebido destinado a mejorar el control y la eficiencia de un biorreactor. Se examinan las ventajas de este sistema, resaltando su capacidad para supervisar en tiempo real, garantizar precisión y estabilidad, ofrecer flexibilidad, posibilitar la monitorización remota y la telemetría, así como su potencial escalabilidad y rentabilidad. El estudio se concentra en la integración de este sistema en un biorreactor para la fermentación de azúcares utilizando levaduras, con el propósito de optimizar la precisión, productividad y calidad del proceso. Se proporciona un análisis detallado de los aspectos técnicos, incluyendo el uso de placas Arduino como elemento central del control, la programación de estas placas y su conexión con sensores y actuadores para el monitoreo y ajuste de variables críticas como temperatura y pH. Asimismo, se destaca la capacidad de control remoto del sistema, lo que permite a los usuarios supervisar y administrar los procesos desde cualquier ubicación con acceso a Internet. Este enfoque se plantea con el objetivo de mejorar la eficiencia y la reproducibilidad de los procesos biotecnológicos, así como proporcionar una mayor flexibilidad y control en su operación.

Keywords— *Lactosa, Etanol, Industria 4.0, Biorreactor*

I. INTRODUCCIÓN

La introducción de tecnologías de digitalización, comunicación en tiempo real por Internet y el procesamiento masivo de datos digitalizados está dando forma a la Cuarta Revolución Industrial, con un impacto profundo en los procesos productivos a nivel global. En este contexto, los sistemas embebidos, que comprenden tanto componentes de hardware como de software diseñados para funciones específicas dentro de sistemas más amplios, juegan un papel fundamental [1]. Estos sistemas, que funcionan bajo restricciones de tiempo real, están presentes en una amplia gama de dispositivos, desde electrodomésticos hasta sistemas médicos. Esencialmente, los sistemas embebidos son unidades que integran procesadores de computadora, memoria y dispositivos de entrada/salida, operando dentro de sistemas más grandes y cumpliendo con parámetros de tiempo específicos. Su versatilidad se refleja en su aplicación en industrias como automoción, aeroespacial, medicina, electrónica de consumo, entre otras [2]. Su contribución es crucial para impulsar la automatización, mejorar la eficiencia y facilitar la conectividad en los diferentes sectores

industriales, impulsando así el avance de la Cuarta Revolución Industrial.

Los biorreactores sirven como ambientes cerrados para el tratamiento de células o microorganismos en condiciones óptimas de temperatura y humedad. En el pasado, los biorreactores operaban manual o físicamente, con limitaciones en el control y la manipulación. En la era actual de los sistemas integrados, el paradigma de control ha experimentado una transformación radical: la flexibilidad y la velocidad de las máquinas han alcanzado niveles anteriormente inalcanzables.

En este contexto, este estudio se enfoca en la implementación y evaluación de un sistema integrado compuesto por módulos de control y supervisión de un reactor biológico, con el objetivo de demostrar su eficacia. Se busca implantar un sistema embebido que optimice el proceso, permitiendo mejorar la precisión y la productividad, al mismo tiempo que se asegura la confiabilidad del equipo, lo que en conjunto potenciará la producción y garantizará una calidad constante. Uno de los principales aportes del estudio es la integración de las tecnologías utilizadas en el sistema embebido. Estos sensores facilitan la medición instantánea de indicadores biológicos vitales, como la temperatura, el pH, la concentración de oxígeno disuelto y la velocidad de agitación en un reactor biológico. El registro regular y puntual de estos parámetros permite ajustar con precisión el proceso en tiempo real, asegurando que el entorno se mantenga en condiciones óptimas. Cabe destacar que la simplicidad de estos componentes facilita la implementación y programación del sistema, reduciendo el tiempo y los recursos necesarios para la configuración y el ajuste del controlador, lo cual resulta relevante en contextos de austeridad económica.

II. USO DE SISTEMAS DE BIORREACCIÓN

Los biorreactores nacen con el objetivo de impulsar y regular la reproducción de microorganismos o células en cultivo, así como la elaboración de biomoléculas o compuestos relevantes en biotecnología. Estos dispositivos son insustituibles en la ingeniería biológica y han transformado diversos sectores, desde la creación de medicamentos hasta la obtención de biocombustibles. Un recipiente hermético dentro del biorrecipiente alberga

microorganismos o células en un medio de cultivo específico, manteniendo un control preciso de la temperatura, el pH, la oxigenación y la agitación. Según su uso, los biorreactores pueden presentar diversos tamaños y diseños, desde pequeñas unidades de laboratorio hasta grandes instalaciones industriales.

La importancia de los biorreactores radica en su capacidad para crear un entorno controlado que maximiza la producción de biomoléculas de interés. Por ejemplo, en la industria farmacéutica, se emplean para producir proteínas terapéuticas, vacunas y medicamentos. En la producción de biocombustibles, se facilita la fermentación de biomasa para obtener etanol y otros combustibles renovables. A su vez, en la biotecnología ambiental, se utilizan para el tratamiento de aguas residuales y la recuperación de suelos contaminados. Además, son herramientas fundamentales para la investigación y el desarrollo en numerosas áreas de la biotecnología debido a su versatilidad. Al optimizar las condiciones de cultivo, se puede aumentar la productividad y calidad de los productos biotecnológicos, a la vez que se minimizan los costos e impactos ambientales asociados [3].

III. SISTEMAS EMBEBIDOS PARA CONTROL

En este punto, el uso de sistemas embebidos en el control de biorreactores trae aparejado una serie de ventajas: i) Supervisión y control en tiempo real: Los dispositivos permiten esencialmente la observación directa y en tiempo real de factores críticos como la temperatura, el nivel de pH, el oxígeno disuelto y la velocidad de agitación en el interior de los biorreactores. Gracias a la supervisión y medición constantes de estos factores, los responsables son capaces de identificar anomalías y contrarrestarlas de inmediato, garantizando así las condiciones de producción y aumentando el rendimiento [4]. ii) Mayor precisión y estabilidad: Los sistemas embebidos han mejorado sus capacidades informáticas, lo que les permite controlar los sistemas con una aceptable precisión gracias a sus bajas fluctuaciones en las señales de entrada y salida, así como en su rendimiento computacional. La aplicación de un control preciso de la entrada mediante un algoritmo de control avanzado, por ejemplo, un controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo), minimiza en gran medida el riesgo asociado a la variación del proceso y del producto. El controlador PID utiliza tres parámetros fundamentales: P (Banda proporcional), que ajusta la respuesta en proporción al error presente; I (Integral), que suma los errores pasados para eliminar el error residual y asegurar una corrección continua; y D (Derivativo), que predice los errores futuros basándose en la tasa de cambio del error, ayudando a minimizar oscilaciones y mejorando la estabilidad del sistema. iii) Flexibilidad y adaptabilidad: Los sistemas implantados proporcionan una robustez insuperable en la gestión de biorreactores, interconectándose sin ninguna dificultad con diferentes sensores, actuadores y aplicaciones de periféricos, desarrollando un entorno de intercambio de información. Esta característica allana el camino para el cambio rápido de las estrategias de control que podrían utilizarse ante cambios en el proceso. iv) Monitorización remota y telemetría: Estas características de conectividad de los sistemas embebidos hacen posible supervisar las operaciones del biorreactor de forma remota, así como medir los datos recogidos sin necesidad de acercarse físicamente al biorreactor. Estos operadores pueden controlar equipos muy dispersos desde

cualquier lugar con sólo una conexión a Internet. Esto les permite tomar decisiones operativas cruciales de forma proactiva, así como solucionar problemas y programar el mantenimiento. v) Escalabilidad y rentabilidad: Los sistemas individuales pueden conectarse a menudo a una red existente, y su escalabilidad abarca desde instalaciones de investigación del tamaño de un laboratorio hasta plantas de fabricación a gran escala. De ahí que los sistemas integrados mejoren a menudo la arquitectura del hardware mediante el uso integral y competitivo de los costosos sistemas de control, al tiempo que reducen el extenso tamaño del hardware y permiten ahorrar costes y aumentar el nivel de las operaciones. Arduino es una de las herramientas estrella para sistemas embebidos. Por lo tanto, la combinación de la potencia del lenguaje de programación C++ con la facilidad de uso de Arduino IDE ha democratizado el desarrollo de proyectos electrónicos [5].

Respecto al control de los procesos de biorreactores a través de placas Arduino utilizando PCs, Node-RED, una plataforma de programación visual, se ha destacado en la automatización y la integración de dispositivos IoT. En su relación con placas Arduino conectadas a PCs, actúa como un puente entre hardware y software. Node-RED facilita la integración de dispositivos IoT mediante nodos específicos de Arduino y protocolos como MQTT, permitiendo una conexión bidireccional entre Arduino y la PC. Su interfaz intuitiva simplifica el desarrollo de aplicaciones complejas de IoT, incluso para no programadores. Además, su versatilidad se extiende a la integración de servicios en la nube y API de terceros, lo que facilita el procesamiento y almacenamiento de datos recopilados por Arduino en plataformas en la nube como AWS o Google Cloud [6].

IV. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

La biotecnología ofrece una variedad de alternativas para la producción de energías renovables. Entre ellas se destaca la elaboración de bioetanol, obtenido a través del proceso de fermentación. Particularmente, en la actualidad, la conversión de lactosuero en etanol se considera una opción sostenible con beneficios ambientales y económicos a largo plazo. Este proceso implica la fermentación de los azúcares presentes en el suero utilizando microorganismos, lo que resulta particularmente interesante para aprovechar los subproductos de grandes procesos industriales. Un estudio realizado por Owais y Zafar [7] concluyó que la levadura *Kluyveromyces marxianus* MTCC 1288 es óptima para la producción de etanol a partir de suero crudo, mostrando una curva cinética favorable en la producción de etanol y biomasa. Además, investigaciones realizadas por Diosma et al. [8] han identificado y aislado cepas de *Kluyveromyces marxianus* a partir de granos de kéfir, un alimento tradicional en Europa del este. Estos hallazgos resaltan la importancia de explorar la fermentación del suero de quesería en un biorreactor utilizando levaduras y bacterias de granos de kéfir para la producción de etanol y biomasa. Para llevar a cabo este proceso de manera efectiva, es esencial disponer de un equipo funcional que permita aplicar métodos de ingeniería de procesos para controlar y optimizar la fermentación, incluyendo la regulación de variables como la temperatura y el pH.

En el sistema de control del biorreactor, la placa Arduino desempeña un papel central al permitir la medición y regulación de parámetros cruciales como la temperatura y el

pH. Se ha seleccionado la placa Arduino UNO R3 para esta función, la cual utiliza el microcontrolador ATmega328P de 8 bits con una velocidad de reloj de 16 MHz y 32 kB de memoria flash. Esta placa cuenta con 14 pines digitales, 6 de ellos PWM, así como 6 pines analógicos. Además, dispone de un conector USB para la comunicación con la computadora, una entrada de alimentación de CC y un regulador de voltaje para garantizar una alimentación segura. Se programa a través del entorno de desarrollo Arduino IDE y es ampliamente utilizada en proyectos electrónicos debido a su versatilidad y facilidad de uso. Equipada con un sensor de temperatura DS18B20, la placa Arduino monitorea en intervalos menores a 800 ms los niveles de temperatura con un error de 0.5 °C. Adicionalmente la placa lee instantáneamente la señal analógica de un instrumento de medición de pH “Aqcutron”. En la Figura 1 se observa el diagrama de comunicación en donde la placa Arduino transmite los datos de temperatura y pH a una PC a través de una conexión USB, permitiendo que la computadora procese los datos en tiempo real, realice análisis posteriores y tome medidas de control según sea necesario. La Fig. 2 muestra la placa Arduino encargada de gestionar los sensores y, a la derecha, muestra una aplicación móvil que facilita el control y ajuste del proceso desde cualquier lugar. Esta conectividad móvil proporciona una flexibilidad y control sin precedentes en diferentes entornos. La misma también se puede ver en link de Lab 4.0 de la página de proyectos de la institución donde se realizó el trabajo [9].

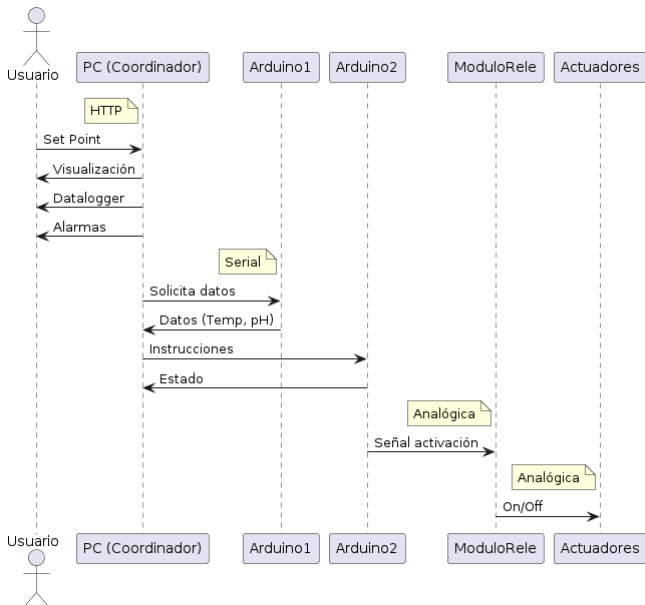


Fig. 1. Diagrama de comunicación.

Una vez que el Arduino recolecta datos de los sensores y los transfiere a un ordenador, el programa de control en el software Node-RED además permite visualizar y analizar los datos por distintos usuarios dentro de la red local o externa. Esta plataforma simplifica la visualización en tiempo real y la aplicación de análisis para comprender mejor el comportamiento del biorreactor en términos de temperatura y pH. Se destaca la facilidad de Node-RED para la creación de flujos visuales que procesan datos y generan visualizaciones útiles. Una vez que se toman decisiones sobre el control de la temperatura y el pH, Node-RED envía instrucciones a una segunda placa Arduino conectada a un módulo de relés para manejar los actuadores conectados al biorreactor, siendo dispositivos de calefacción, refrigeración o dosificación de

productos químicos según sea necesario. Esta integración entre Arduino, Node-RED y los dispositivos de control permite un sistema automatizado de monitoreo y control del biorreactor, optimizando las condiciones de operación y garantizando un rendimiento óptimo en la producción de biomoléculas. La flexibilidad de Node-RED facilita la adaptación a diferentes configuraciones y requisitos de control. El software del biorreactor permite un control activo, y los operadores pueden ajustar las configuraciones en respuesta a cambios experimentales. La Fig. 3 muestra los sensores, la resistencia, y bombas de dosificación del biorreactor.



Fig. 2. (a) Arduino UNO R3 que maneja los sensores de temperatura y pH. (b). Aplicación de celular para control y seguimiento del proceso.

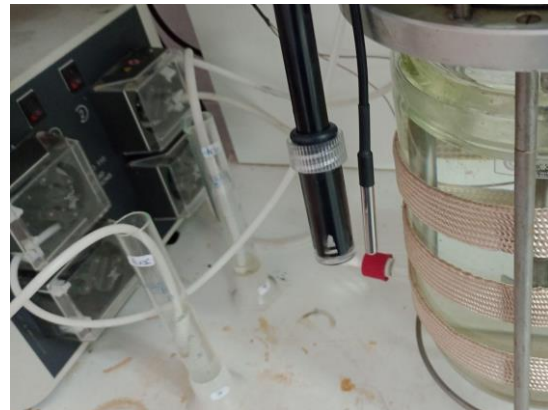


Fig. 3. Sensores y Actuadores del Biorreactor.

El sistema implementado emplea relés activados por el Arduino para regular tanto la temperatura como el pH del biorreactor. La combinación de las capacidades del Arduino y el PC permite un control preciso y sensible de los parámetros del biorreactor, mejorando su eficiencia, fiabilidad y reproducibilidad. Además, la capacidad de conexión remota permite a los usuarios operar el sistema desde sus dispositivos móviles, facilitando la supervisión y el control en tiempo real desde cualquier ubicación con conexión a Internet. Esta movilidad mejora la usabilidad y accesibilidad del sistema, permitiendo la gestión de bioprocesos incluso fuera de las instalaciones. Los gestores pueden realizar ajustes y optimizaciones en planta de forma remota, lo que aumenta la eficiencia.

V. ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el objetivo de evaluar el funcionamiento del sistema desarrollado, se realizaron dos tipos de fermentaciones: La primera consistió en la fermentación de lactosa en leche a

partir de granos de kéfir. En una fase experimental inicial, se realizaron pruebas utilizando 10 g de kéfir y 400 mL de leche pasteurizada como medio de fermentación durante 18 horas. La fermentación se llevó a cabo a lazo abierto, registrando la variación de pH y temperatura. En la Fig. 4 se observa el control del proceso con temperatura a 35°C durante 18 horas para evaluar su efecto en el proceso, que corresponde a una segunda fase del experimento. La segunda fermentación se llevó a cabo utilizando la levadura *Saccharomyces cerevisiae* sobre agua (1 L) con sacarosa (100-g), esto se puede observar en la gráfica de la Fig. 5.

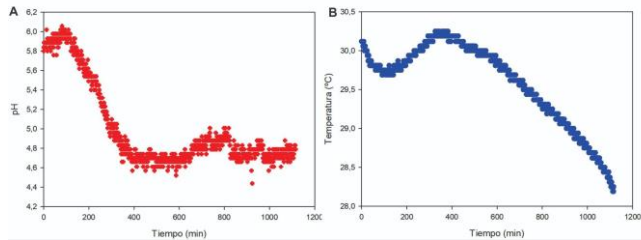


Fig. 4. Evolución de pH y temperatura para la fermentación de lactosa. A. Evolución de pH a lazo abierto. B. Control de Temperatura utilizando un control PID.

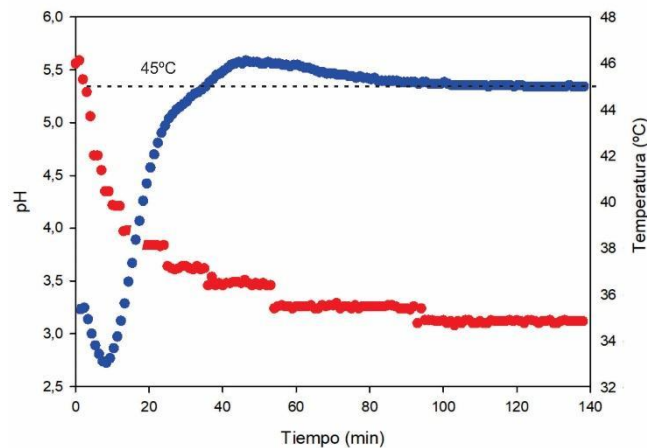


Fig. 5. Evolución de pH (en color azul) y temperatura (en color rojo) para la fermentación de sacarosa con *Saccharomyces cerevisiae*. Control de temperatura activado.

Para ambos casos los parámetros utilizados para el PID se ajustaron en función del nivel de líquido, banda proporcional 6 integral 1200 s derivativo 300 s para este sistema. Este enfoque permitió verificar la capacidad del sistema de control para mantener la temperatura del proceso para los casos analizados dentro de los límites deseados, lo que es esencial para garantizar condiciones óptimas de fermentación y calidad del producto final. Resulta necesario a futuro realizar un análisis de sensibilidad sobre la base de sistemas más complejos.

Los resultados muestran un éxito claro en el seguimiento y registro de variables, con una evolución constante y suave de la temperatura y el pH durante el período observado. Estos hallazgos brindan una valiosa oportunidad para un monitoreo detallado del proceso, permitiendo la obtención de modelos más precisos para describir el fenómeno con exactitud.

VI. CONCLUSIÓN

El trabajo presenta el diseño y la aplicación de un sistema embebido para mejorar el control de un biorreactor usado en la fermentación de lactosa con granos de kéfir. La integración de placas Arduino y Node-RED ofrece ventajas destacables en términos de precisión y eficiencia del proceso, con un sistema simple y accesible. Las placas Arduino permiten una supervisión en tiempo real y ajuste preciso de parámetros clave como la temperatura y el pH, mejorando así la reproducibilidad de los bioprocesos. Además, la capacidad de control remoto brinda flexibilidad a los usuarios para supervisar y gestionar los procesos desde cualquier lugar con conexión a Internet, lo que reduce el tiempo de inactividad y aumenta la productividad. Los resultados muestran un seguimiento exitoso de las variables del proceso, con una evolución estable de la temperatura y el pH. La validación del sistema incluyó la implementación de un controlador PID que mantuvo la temperatura dentro de los límites deseados con mínima variación.

Como trabajo futuro, se planea aprovechar la interfaz construida con Node-RED para facilitar la comunicación con agentes inteligentes, con el fin de calibrar parámetros PID y mejorar el control del biorreactor y el seguimiento en tiempo real de variables inferidas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento de la ANPCyT (PICT-2021-I-INVI-00498) y la Provincia de Santa Fe (proyecto PEIC-2022-019).

REFERENCIAS

- [1] D. C. Cascini Peixoto and D. C. da Silva Júnior, "A Framework for Architectural Description of Embedded System," 2004, pp. 2–16. doi: 10.1007/978-3-540-30113-4_2.
- [2] G. Alvarez and J. Sarli, "Optimization of Electricity Distribution in Latin America by Using Embedded Systems," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 18, no. 02, pp. 351–359, Feb. 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9085290.
- [3] R. Eibl and D. Eibl, "Design of bioreactors suitable for plant cell and tissue cultures," *Phytochem. Rev.*, vol. 7, no. 3, pp. 593–598, Oct. 2008, doi: 10.1007/s11101-007-9083-z.
- [4] C. E. Pereira and L. Carro, "Distributed real-time embedded systems: Recent advances, future trends and their impact on manufacturing plant control," *Annu. Rev. Control.*, vol. 31, no. 1, pp. 81–92, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.arcontrol.2007.02.005.
- [5] S. S. Chinnasami Sivaji, M. Ramachandran, Vidhya Prasanth, Soniya Sriram, "Application of Arduino Devices in various IOT Application," *Renew. Nonrenewable Energy*, pp. 39–45, Jun. 2022, doi: 10.46632/rne/1/1/7.
- [6] A. S. Thuluva, D. Anicic, S. Rudolph, and M. Adikari, "Semantic Node-RED for rapid development of interoperable industrial IoT applications," *Semant. Web*, vol. 11, no. 6, pp. 949–975, Oct. 2020, doi: 10.3233/SW-200405.
- [7] S. Zafar and M. Owais, "Ethanol production from crude whey by *Kluyveromyces marxianus*," *Biochem. Eng. J.*, vol. 27, no. 3, pp. 295–298, Jan. 2006, doi: 10.1016/j.bej.2005.05.009.
- [8] G. Diosma, D. E. Rومانin, M. F. Rey-Burusco, A. Londero, and G. L. Garrote, "Yeasts from kefir grains: isolation, identification, and probiotic characterization," *World J. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 30, no. 1, pp. 43–53, Jan. 2014, doi: 10.1007/s11274-013-1419-9.
- [9] INGAR, "Proyectos desarrollados en el Instituto INGAR," *Proyectos INGAR*, 2024. <https://ingarue.santafe-conicet.gov.ar/>