

Sistema Embebido para un biorreactor: aplicación a la fermentación de azúcares

Embedded system for a bioreactor: application to sugar fermentation

Danilo Figueroa Paredes ^{#1}, Gonzalo Alvarez ^{#2}, Mauren Fuentes Mora ^{#3}, Ramiro Sanchez ^{#4}

*#INGAR/CONICET-UTN, Instituto de Desarrollo y Diseño
 Avellaneda 3657, Santa Fe, Argentina*

¹ dfigueroa@santafe-conicet.gov.ar

² galvarez@santafe-conicet.gov.ar

³ mfuentes@santafe-conicet.gov.ar

⁴ rsanchez@santafe-conicet.gov.ar

Recibido: 24/09/24; Aceptado: 11/11/24

Abstract— The focus of this project is on the development and implementation of an embedded system to improve the control and efficiency of a bioreactor. The advantages of this system are examined, highlighting its ability to monitor in real time, ensure accuracy and stability, provide flexibility, enable remote monitoring and telemetry, as well as its potential scalability and cost-effectiveness. The study focuses on the integration of this system in a bioreactor for the fermentation of sugars using microorganisms in order to optimize the accuracy, productivity and quality of the process. A detailed analysis of the technical aspects is provided, including the use of Arduino boards, the programming of these boards and their connection with sensors and actuators for the monitoring and adjustment of critical variables such as temperature and pH. It also highlights the remote connection capability of the system, which allows users to monitor and manage the processes from any location with Internet access. This approach is intended to improve the efficiency and reproducibility of biotechnological processes, as well as to provide greater flexibility and control in their operation.

Keywords: Fermentation; Industry 4.0; Bioreactor; Simulation.

Resumen— 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 microorganismos 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, 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 conexión remota 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.

Palabras clave: Fermentación; Industria 4.0; Biorreactor; Simulación

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.

Un sistema embebido típicamente engloba un microprocesador o microcontrolador, y comprende tanto componentes de hardware como de software diseñados para respaldar funciones u operaciones específicas dentro de una máquina o sistema más grande [1]. Estas herramientas de comunicación suelen integrarse como parte de un objeto listo para su uso, como un dispositivo eléctrico o electrónico,

por lo tanto, además están acompañadas de componentes mecánicos. Cumpliendo su propósito específico, muchas veces los sistemas embebidos trabajan bajo restricciones en tiempo real. Están presentes en casi todos los campos, trabajando en conjunto con diferentes dispositivos, desde pequeños dispositivos como relojes y reproductores de música para portabilidad hasta máquinas más grandes como electrodomésticos, líneas de producción y sistemas de imágenes médicas [3]

Esencialmente, es un sistema que contiene un procesador de computadora, una memoria de computadora y dispositivos periféricos de entrada/salida por sí solo, y funciona para estos sistemas en sí mismo y no es más que eso [3] Es una parte central de todo el sistema de recolección, transmisión y procesamiento de datos en general y también a menudo está acompañado de componentes eléctricos o electrónicos. Como un sistema que está incrustado, típicamente, gestiona funciones físicas de una máquina en la que está incrustado, y su funcionamiento debe cumplir con ciertos parámetros de tiempo [4].

Los sistemas embebidos se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones. El uso de estos sistemas embebidos, en general, trae aparejado las siguientes características:

i) **Fiabilidad:** Los sistemas embebidos están diseñados para representar máxima fiabilidad y procesar sin fallas todo el tiempo [5].

ii) **Rendimiento:** Debido a los principios de diseño de sistemas en un chip y la posibilidad de particionamiento del sistema, el rendimiento puede adaptarse a la aplicación objetivo [6].

iii) **Costo:** Los sistemas embebidos son fáciles de comprar porque no requieren capacidades de fabricación sofisticadas [7].

iv) **Tamaño:** Las PC incorporadas pueden reducirse a un tamaño muy pequeño, lo que implica su uso adecuado en dispositivos celulares [8]. El sistema embebido esencialmente representa un tipo de componente incrustado que puede usarse para abordar un número cada vez mayor de desafíos [9].

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.

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 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 [10].

III. SISTEMAS EMBEBIDOS PARA CONTROL

Las placas Arduino hoy en día son una de las principales herramientas de los sistemas embebidos, con ellas se pueden desarrollar sus proyectos en esta plataforma de hardware, que se utiliza para una amplia gama de tareas específicas. De hecho, las placas Arduino son controladores en miniatura utilizados como plataformas que suelen tener pines de entrada/salida, convertidores analógico-digitales y una variedad de interfaces de red para fines de comunicación, y cuentan con una placa fácil de usar que acomoda todas estas características en una sola placa compacta [11]. Estas placas son el punto de partida para construir las bases de funcionamiento de dispositivos electrónicos que luego pueden implementarse en simples LED parpadeantes, así como en el ámbito de la robótica y la automatización.

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 [12].

ii) **Mayor precisión y estabilidad:** Los sistemas embebidos han mejorado sus capacidades informáticas, lo que les

permite controlar los sistemas con una precisión eficaz gracias a sus bajas fluctuaciones. 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.

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 si un proceso de repente exige algunos otros parámetros de salida o especificaciones del producto, proporcionando la optimización de procesos muy eficiente que aumenta la posibilidad de transferencia de tecnologías.

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. Con estas placas miniatura, puedes dar vida a tus ideas en una amplia gama de proyectos específicos. Funcionan como controladores, con pines de entrada/salida, convertidores analógico-digitales e interfaces de red para la comunicación. Todo en una placa fácil de usar y compacta. Con Arduino, se puede crear desde simples LEDs parpadeantes hasta proyectos de robótica y automatización. Son la base para construir dispositivos electrónicos que funcionen de forma autónoma.

La interfaz de usuario de Arduino IDE es intuitiva y fácil de usar, lo que la hace accesible incluso para aquellos que se están iniciando en la programación y la electrónica. Además, Arduino IDE es compatible con una amplia variedad de placas Arduino, desde las más básicas hasta las más avanzadas, lo que permite a los usuarios desarrollar proyectos para diferentes aplicaciones y con distintas capacidades de hardware [13]. 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.

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 [13].

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 [14] 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. [15] 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. Esto facilitará el desarrollo de modelos adecuados para optimizar el proceso y su posterior escalado. Para llevar a cabo este proceso de manera efectiva, es fundamental contar con 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. Esto permitirá el desarrollo de modelos adecuados que faciliten la optimización del proceso y su posterior escalado.

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 sensores, la placa Arduino monitorea de forma continua los niveles de temperatura y pH dentro del biorreactor para garantizar condiciones óptimas para el cultivo de células y microorganismos. El sensor de temperatura digital DS18B20, con una resolución de 0.06°C y un tiempo de respuesta inferior a 800 ms, junto

con las librerías open-source OneWire y Dallas, se presenta como una alternativa de bajo costo y precisión adecuadas para el monitoreo de temperatura. La integración de estas librerías facilita la comunicación y manejo eficiente del sensor, maximizando su rendimiento en aplicaciones donde la exactitud y rapidez en la medición son cruciales. Por otro lado, la elección del sensor de pH se fundamentó en la necesidad de adoptar instrumentos de alta impedancia para minimizar el ruido y las interferencias en las mediciones. El módulo pH-C Aquatron, permite comunicar el valor de pH mediante una señal de 0-20 mA, que, al ser acoplada a una resistencia, puede conectarse a un puerto analógico de la placa Arduino, facilitando así su integración en sistemas de monitoreo automatizado. Posteriormente, la placa Arduino transmite los datos de temperatura y pH a una PC a través de una conexión USB-serie, permitiendo que la computadora procese los datos en tiempo real, realice análisis posteriores y tome medidas de control según sea necesario. La Figura 1 muestra un diagrama de flujo donde se explicita el proceso, mientras que la Figura 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 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 [16].



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

Una vez que el Arduino recolecta datos de los sensores y los transfiere a la computadora, Node-RED toma el control para visualizar y analizar los datos. 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. Node-RED permite la creación de flujos visuales que procesan datos y generan visualizaciones útiles. Con una interfaz intuitiva, los usuarios pueden diseñar flujos personalizados que se ajusten a las necesidades del sistema de control. Una vez que se toman decisiones sobre el control de la temperatura y el pH, Node-RED envía instrucciones al Arduino para manejar los relés conectados al biorreactor, regulando 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 regulación de la temperatura se realiza mediante relés activados por el Arduino, lo que permite un control preciso basado en la temperatura deseada. La Figura 3 muestra, respectivamente, una porción del código Node-RED empleado, una vista generalizada de dicho código y la resistencia del biorreactor. Esta figura se incluye de carácter ilustrativo para dar una idea al lector de la interfaz del lenguaje, por este motivo solo se incluyen porciones del código. La Figura 4 muestra el biorreactor utilizado para el experimento, donde se observan algunas conexiones y la resistencia conectada. En la Figura 5 se observa la PC que corre la lógica y se aprecia el programa de control y seteo de las variables del biorreactor.

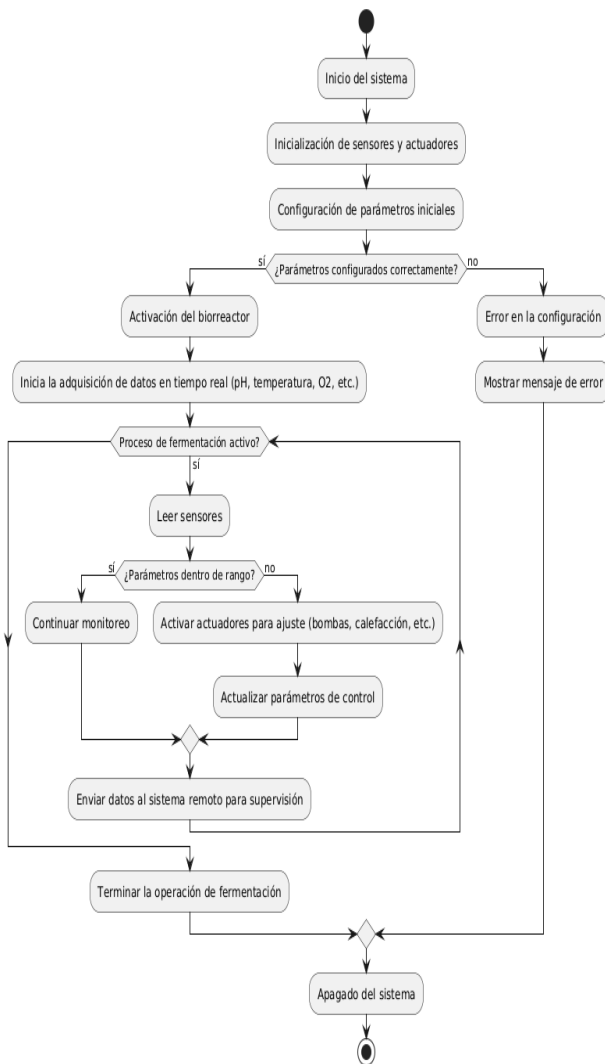


Fig. 1. Diagrama de flujo del sistema de biorreactor.

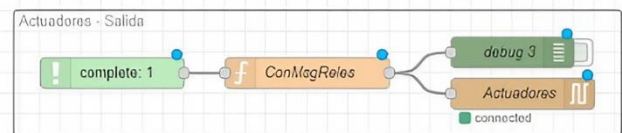


Fig. 3. Porción del código Node-RED para programar la lógica de control. En la imagen se observa la lógica para la salida de actuadores.



Fig. 4. Biorreactor controlado por la placa Arduino mediante la resistencia que se observa en la imagen

El sistema implementado emplea relés activados por el Arduino para regular tanto la temperatura como el pH del biorreactor. Para mantener un pH óptimo, el Arduino controla una bomba que introduce soluciones ácidas o básicas, logrando un equilibrio adecuado. La Figura 6 muestra la bomba de pH.



Fig. 6. Bomba de pH.

V. ESTUDIO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

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

A. Fermentación 1: Lactosa a etanol (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 y a los fines de evaluar el funcionamiento y la continuidad de los sensores. Los resultados se pueden observar en las Figuras 7 y 8. Luego, en una segunda fase, se controló la temperatura a 35°C durante 18 horas para evaluar su efecto en el proceso (Figura 9).

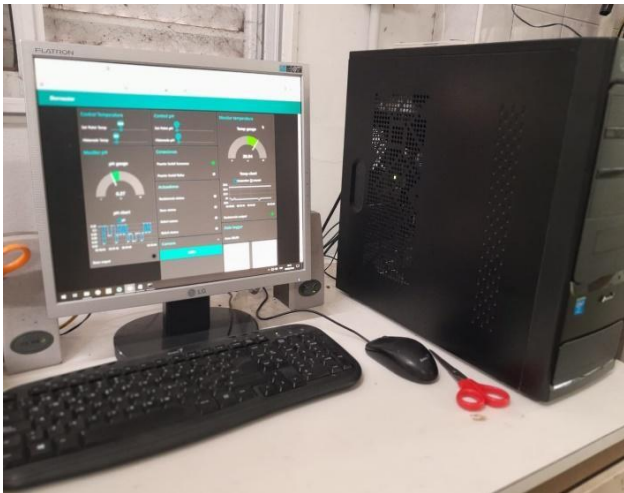


Fig. 5. PC que procesa la lógica para el control y seteo de las variables del biorreactor.

La combinación de las capacidades del Arduino y la 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 y reduce el tiempo de inactividad.

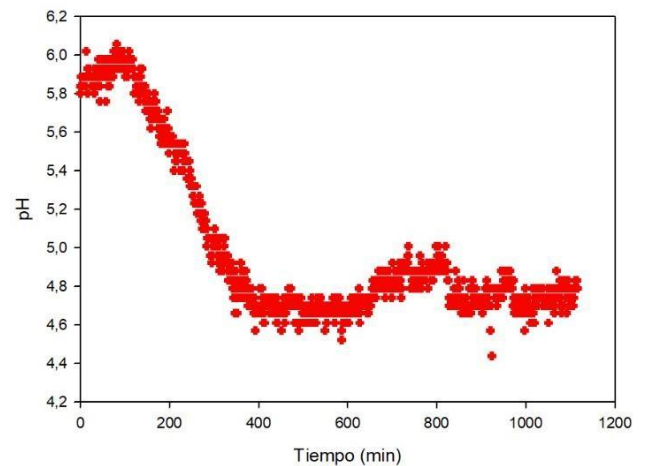


Fig. 7. Evolución del pH sin controlar a lo largo del proceso fermentativo.

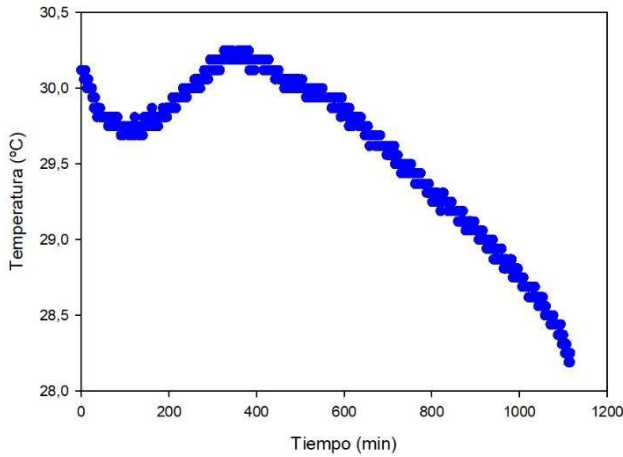


Fig. 8. Evolución de la temperatura sin controlar a lo largo del proceso fermentativo.

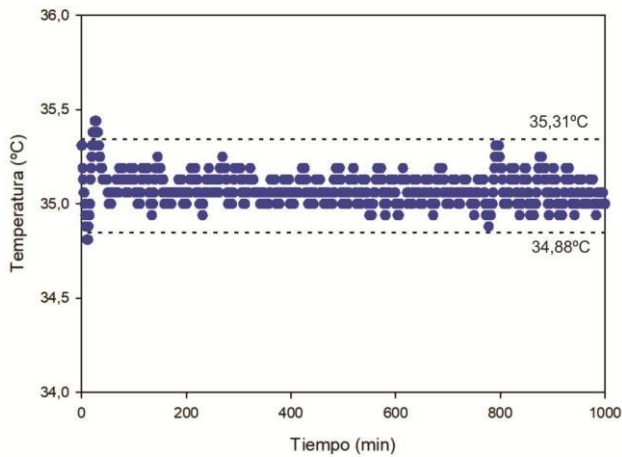


Fig. 9. Control de temperatura utilizando un control PID.

Se puede observar que el sistema resultó exitoso para el monitoreo y registro de las variables, mostrando una evolución suave y continua de ambas variables. Estos resultados presentan una oportunidad para el monitoreo detallado del proceso permitiendo obtener modelos con mayor precisión en la descripción del fenómeno. Con respecto al proceso de fermentación, la disminución del pH muestra una exitosa fermentación de la matriz láctea por parte de los microorganismos utilizados.

Con respecto al control de temperatura, los resultados mostraron un rango de control adecuado con una variación máxima del 3,4% con excepción de una histéresis inicial hasta la llegada del valor del set. Similar a lo que hallaron en [19] quienes lograron mantener la estabilidad del biorreactor utilizando un control de PID a partir de Arduino logrando precisión de ± 0.1 °C; de esta forma se logra que el sistema alcance las características de rendimiento deseadas, como un tiempo de subida y de estabilización rápido, un bajo rebasamiento y un bajo error de estado estacionario.

En [14] intentaron modelar la fermentación del suero de quesería, sin embargo, no dispusieron de un sistema que les permita seguir el comportamiento del pH, intentando mantener el control mediante adiciones periódicas de buffer. Los resultados obtenidos para el seguimiento y

control de variables son de vital importancia para lograr un modelo preciso y adecuado en futuros trabajos.

B. Fermentación 2: Lactosa a ácido láctico (microorganismos de yogurt)

La segunda fermentación se realizó a partir de leche y bacterias propias del yogurt (*Lactobacillus bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus*). En este proceso la lactosa es convertida en ácido láctico produciéndose una coagulación del sistema, siendo esencial el control de temperatura para la normal evolución del sistema biológico, por lo cual resulta un excelente sistema de testeo del biorreactor. El proceso de producción de yogurt necesita una etapa de temperatura constante a 45° durante 10 horas (temperatura óptima para la producción de ácido láctico) y luego un enfriamiento paulatino para detener la reacción. Para esto se utilizó como inóculo un yogurt comercial (120 g) en 1000 g de leche fresca; manteniendo el control de temperatura durante las primeras 10 horas y luego desactivando el control dejando que la temperatura baje hasta la temperatura ambiente. El pH inicial fue de 5.55 y al finalizar el proceso alcanzó el valor de 4.14, mostrando la efectividad del proceso. La evolución de la temperatura se muestra en la Figura 10.

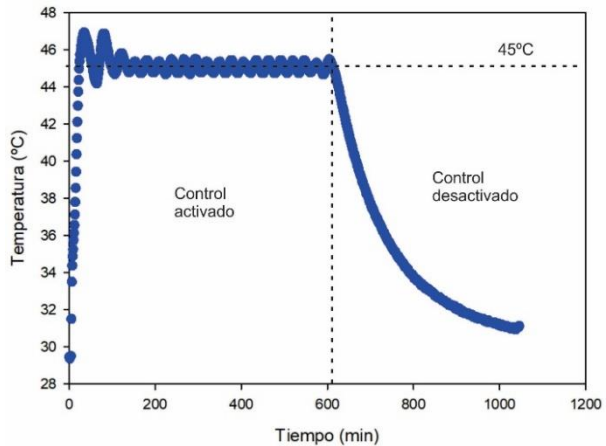


Fig. 10. Evolución de la temperatura

C. Fermentación 3: Sacarosa a Etanol (*Saccharomyces cerevisiae*)

Por otro lado, la tercera fermentación se llevó a cabo utilizando la levadura *Saccharomyces cerevisiae* sobre agua (1L) con sacarosa (100 g), esto se puede observar en la gráfica de la Fig. 11.

Para todos los 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 efectividad del sistema de control en mantener la temperatura del proceso dentro de los límites deseados, lo que es esencial para garantizar condiciones óptimas de fermentación y calidad del producto final.

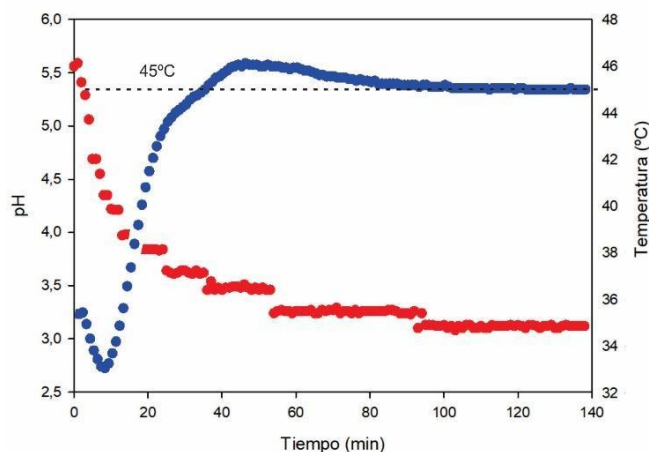


Fig. 11. Evolución de pH y temperatura para la fermentación de sacarosa con *Saccharomyces cerevisiae*. Control de temperatura activado.

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, aun para matrices y microorganismos distintos, operando en diversos rangos de las variables estudiadas. En sistemas de biorreacción similares se reportó que el control de variables como pH mejoraron el rendimiento de fermentación; Wang et al. en [17] aumentaron la concentración de ácido láctico y el rendimiento de fermentación mediante el ajuste del pH de la fermentación a 8,5 con NaOH cada 12 horas en la fermentación de residuos de *Shophora flavescens* para obtener etanol. Por otro lado, en [20] reportaron un aumento en el crecimiento bacteriano en un biorreactor anaeróbico por efecto del control de pH, pasando de una reducción del 61% en el tiempo necesario hasta alcanzar el máximo crecimiento. Por otro lado, [18] observaron un aumento en el rendimiento de formación de ácido láctico en un fermentador a partir de desechos de la industria de alimento por efecto del control de pH y temperatura; obteniendo aumentos en el rendimiento de 192% cuando se controló el pH y de hasta 556% cuando se controló el pH y la temperatura. En este sentido. 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. A su vez, dada la naturaleza de este sistema de reacción donde tanto los sustratos como los productos no son fácilmente medibles, se abre la puerta para trabajar en la estimación de los mismos a partir del seguimiento preciso de la variable medible pH, como lograron en [21], quienes lograron estimar el crecimiento de los microorganismos en un sistema de fermentación a partir del pH.

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 azúcares como lactosa y sacarosa. La integración de placas Arduino y un ordenador ejecutando Node-RED ofrece ventajas destacables en términos de precisión y eficiencia del proceso. 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 conexión remota 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. El sistema de control en lazo cerrado diseñado para el biorreactor mostró características de rendimiento clave, como un tiempo de subida rápido, tiempo de estabilización breve, bajo sobre impulso y un error de estado estable mínimo. Estas cualidades son fundamentales para mantener un ambiente estable dentro del biorreactor, garantizando que la temperatura se mantenga constante y dentro de los límites especificados.

Como trabajo futuro, se propone la creación de un gemelo digital que recree este biorreactor utilizando las bases de simulación establecidas en el presente estudio. Este gemelo digital permitirá una simulación detallada y en tiempo real del comportamiento del biorreactor, facilitando la optimización de los parámetros de control, la detección temprana de fallos y la mejora continua del sistema, integrando los avances en control embebido y monitoreo remoto con un enfoque virtual para aumentar la eficiencia y seguridad del bioproceso.

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 Latin America Transactions*, vol. 18, no. 02, pp. 351–359, Feb. 2020, doi: 10.1109/TLA.2020.9085290.
- [3] A. M. Ibrahim, "Embedded systems," in *Fuzzy Logic for Embedded Systems Applications*, Elsevier, 2004, pp. 1–21. doi: 10.1016/B978-075067605-2/50003-X.
- [4] P. Axer et al., "Building timing predictable embedded systems," *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, vol. 13, no. 4, pp. 1–37, Dec. 2014, doi: 10.1145/2560033.
- [5] Kuang-Hua Huang and J. A. Abraham, "Algorithm-Based Fault Tolerance for Matrix Operations," *IEEE Transactions on Computers*, vol. C-33, no. 6, pp. 518–528, Jun. 1984, doi: 10.1109/TC.1984.1676475.
- [6] A. Munir, S. Ranka, and A. Gordon-Ross, "High-Performance Energy-Efficient Multicore Embedded Computing," *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, vol. 23, no. 4, pp. 684–700, Apr. 2012, doi: 10.1109/TPDS.2011.214. M. Müllerburg, "Software intensive embedded systems," *Inf Softw Technol*, vol. 41, no. 14, pp. 979–984, Nov. 1999, doi: 10.1016/S0950-5849(99)00072-5.
- [7] S. Segars, K. Clarke, and L. Goudge, "Embedded control problems, Thumb, and the ARM7TDMI," *IEEE Micro*, vol. 15, no. 5, pp. 22–30, 1995, doi: 10.1109/40.464580.
- [8] D. N. Serpanos and A. G. Voyiatzis, "Security challenges in embedded systems," *ACM Transactions on Embedded Computing Systems*, vol. 12, no. 1s, pp. 1–10, Mar. 2013, doi: 10.1145/2435227.2435262.
- [9] R. Eibl and D. Eibl, "Design of bioreactors suitable for plant cell and tissue cultures," *Phytochemistry Reviews*, vol. 7, no. 3, pp. 593–598, Oct. 2008, doi: 10.1007/s11101-007-9083-z.
- [10] Y. A. Badamasi, "The working principle of an Arduino," in *2014 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO)*, IEEE, Sep. 2014, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICECCO.2014.6997578.

- [11] 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.A. Karnik, "Performance of TCP congestion control with rate feedback: TCP/ABR and rate adaptive TCP/IP," M. Eng. thesis, Indian Institute of Science, Bangalore, India, Jan. 1999.
- [12] S. S. Chinnasami Sivaji, M. Ramachandran, Vidhya Prasanth, Soniya Sriram, "Application of Arduino Devices in various IOT Application," *Renewable and Nonrenewable Energy*, pp. 39–45, Jun. 2022, doi: 10.46632/rne/1/1/7.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] Diosma, G., Romanin, D.E., Rey-Burusco, M.F., Londero, A., Garrote, G.L., 2014. Yeasts from kefir grains: isolation, identification, and probiotic characterization. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 30, 43–53. <https://doi.org/10.1007/s11274-013-1419-9>
- [16] INGAR, "Proyectos desarrollados en el Instituto INGAR," Proyectos INGAR. [Online]. Available: <https://ingarue.santafe-conicet.gov.ar/>
- [17] Ma, X., Wang, J., Gao, M., Wang, N., Li, C., & Wang, Q. (2021). Effect of pH regulation mode on byproduct ethanol generated from the lactic acid fermentation of *Sophora flavescens* residues. *Journal of Cleaner Production*, 279, 123536. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123536>
- [18] Tang, J., Wang, X., Hu, Y., Zhang, Y., & Li, Y. (2016). Lactic acid fermentation from food waste with indigenous microbiota: Effects of pH, temperature and high OLR.. *Waste management*, 52, 278-85. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.034>.
- [19] Alimberti, R., Chauhan, V., & Jaiswal, D. (2021). Bioreactor Temperature Control System Using PID Controller. Volume 7A: Dynamics, Vibration, and Control. <https://doi.org/10.1115/imece2021-71715>.
- [20] Fernández-Naveira, Á., Veiga, M. C., & Kennes, C. (2017). Effect of pH control on the anaerobic H-B-E fermentation of syngas in bioreactors. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 92(6), 1178-1185.
- [21] Liu, Y. C., Wang, F. S., & Lee, W. C. (2001). On-line monitoring and controlling system for fermentation processes. *Biochemical engineering journal*, 7(1), 17-25.