

Monitoring system design applied to growth of photo synthetics microorganisms in bioreactors

Alejandro Daniel Hernández Ramírez., Yolocuauhtli Salazar Muñoz, Martínez-Roldán A. J, Paul A. Valle Trujillo.

^a Felipe Pescador 1830 Ote. Col. Nueva Vizcaya Durango, Dgo. México C.P. 34080., 17041685@itdurango.edu.mx, Durango, Durango, México.

^b Felipe Pescador 1830 Ote. Col. Nueva Vizcaya Durango, Dgo. México C.P. 34080., yosalazar@itdurango.edu.mx, Durango, Durango, México.

^c Felipe Pescador 1830 Ote. Col. Nueva Vizcaya Durango, Dgo. México C.P. 34080., alfredo.martinez@itdurango.edu.mx, Durango, Durango, México.

^d Calzada Tecnológico S/N Fracc. Tomás Aquino C.P. 22414, paul.valle@tectijuana.edu.mx, Tijuana, Baja California, México.

Resumen

Los fotobioreactores son dispositivos utilizados para el crecimiento de microorganismos fotosintéticos, con aplicaciones en biotecnología. El objetivo del presente trabajo es diseñar un sistema de monitoreo para fotobioreactores, el cual integra sensores que miden variables como pH, conductividad eléctrica, turbidez, radiación fotosintéticamente activa y absorbancias en un rango de 410 a 940 nm. El sistema utiliza comunicación RS485, almacena los datos en formato CSV. La integración del prototipo incluye un PCB compacto que optimiza la integración de componentes, junto con un sistema de alimentación y enfriamiento para asegurar la estabilidad operativa. Las pruebas preliminares han validado la funcionalidad del sistema y demuestran su capacidad para monitorear y registrar datos en tiempo real. Este desarrollo ofrece una solución modular y escalable para la optimización de cultivos de microorganismos en fotobioreactores, con aplicaciones en biotecnología.

Palabras clave—Fotobioreactor, Sistema de Monitoreo, PCB, Sensores.

Abstract

Photobioreactors are devices used for the growth of photosynthetic microorganisms, with applications in biotechnology. The objective of this work is to design a monitoring system for photobioreactors, which integrates sensors that measure variables such as pH, electrical conductivity, turbidity, photosynthetically active radiation, and absorbances in a range from 410 to 940 nm. The system uses RS485 communication and stores data in CSV format. The prototype integration includes a compact PCB that optimizes component integration, along with a power supply and cooling system to ensure operational stability. Preliminary tests have validated the system's functionality and demonstrated its ability to monitor and record data in real-time. This development offers a modular and scalable solution for optimizing microorganism cultures in photobioreactors, with applications in biotechnology.

Keywords— Photobioreactor, Monitoring System, PCB, Sensors.

1. INTRODUCCIÓN.

Los fotobioreactores son herramientas esenciales para la producción de biomasa, microalgas y otros organismos fotosintéticos, con aplicaciones en bioenergía, tratamiento de aguas y biotecnología [1]. Estos sistemas controlados destacan por su capacidad de proporcionar condiciones óptimas para el crecimiento de organismos fotosintéticos [2], lo que los hace indispensables en investigaciones relacionadas con la sostenibilidad y la mitigación del cambio climático. Para optimizar su rendimiento, es crucial un monitoreo continuo y preciso de variables críticas como la radiación fotosintéticamente activa (PAR), temperatura, pH y turbidez, las cuales impactan directamente en el crecimiento, productividad y calidad de los cultivos [3].

No obstante, las soluciones comerciales existentes presentan diversos inconvenientes, como su alto costo y la falta de flexibilidad para proyectos experimentales con requerimientos específicos [4]. Además, la integración de sensores con sistemas de adquisición de datos puede generar problemas de compatibilidad, aumentando la complejidad en el diseño y operación de estos sistemas [5].

La medición de PAR es esencial para evaluar la eficiencia fotosintética, mientras que el pH y la conductividad permiten monitorear la estabilidad química del medio [6]. La turbidez y la absorbancia facilitan la estimación de biomasa y composición celular, y la temperatura influye en la actividad metabólica [8].

Los sistemas de instrumentación electrónica en fotobioreactores están compuestos por sensores, interfaces de comunicación y unidades de procesamiento que permiten la adquisición, transmisión y almacenamiento de datos en tiempo real [9]. Además, el uso de microcontroladores y plataformas embebidas no solo facilita el procesamiento de datos, sino que también permite automatizar procesos y realizar ajustes en las condiciones del cultivo, mejorando así su eficiencia y rendimiento [10].

Por lo que, el objetivo del presente trabajo es diseñar e implementar un sistema de monitoreo accesible y modular que combina sensores avanzados en un diseño compacto. El sistema integra mediciones de variables clave como PAR, pH, turbidez, temperatura, absorbancias y conductividad del medio. Su arquitectura basada en un PCB diseñado para facilitar la comunicación entre sensores y un controlador principal, junto con un módulo de almacenamiento eficiente, que permita generar la trazabilidad y confiabilidad de la información recolectada durante la producción de biomasa en un fotobioreactor.

2. CONTENIDO

2.1 Elementos del sistema de instrumentación

Un sistema de instrumentación diseñado para monitorear variables críticas en un cultivo de microalgas utiliza tecnología avanzada y garantiza la precisión en la adquisición de datos [7]. Por lo que se seleccionaron sensores con protocolo RS485 debido a su inmunidad al ruido electromagnético, su capacidad multipunto y su fiabilidad en la transmisión de información en entornos industriales.

Estos sensores permiten medir variables esenciales como la radiación fotosintéticamente activa (PAR), turbidez, pH y conductividad eléctrica, las cuales influyen directamente en el crecimiento y la eficiencia fotosintética del cultivo (ver Tabla 1). La integración de estos dispositivos facilita un monitoreo continuo y en tiempo real, optimizando el control de las condiciones del fotobioreactor.

Tabla 1. Selección de Componentes.

Categoría	Componente	Acción/medición
Sensores con protocolo RS485	300AL-GH-N01	RFA
	VMS-3001-ZD-N01	Turbidez y temperatura
	OSSZ-211109-V1.0	pH
	OSSZ-211109-V1.0	Electroconductividad
Espectrofotómetro	AS7265x	Absorbancias de 410 a 940 nm
Controlador principal	Arduino Mega Po Mini	Control
Sistema de almacenamiento	Tarjeta SD	Memoria

Fuente: Elaboración propia.

Además, se integró el sensor espectrofotómetro AS7265x para medir absorbancias en un rango de longitudes de onda, de 410 a 940 nm, y se genera un archivo detallado con las absorbancias registradas (ver Tabla 1).

El controlador principal del sistema es un Arduino Mega, seleccionado por su capacidad para manejar múltiples puertos seriales, su amplia memoria y su capacidad de procesamiento, lo cual permite gestionar de manera eficiente todos los sensores y el almacenamiento de datos (ver Tabla 1). Los datos recolectados se almacenan en una tarjeta SD en formato CSV, organizados en un archivo principal con datos ambientales y otro archivo específico para las absorbancias medidas. Estos datos van con un registro horario, estableciendo el periodo de muestreo según se requiera en el experimento (ver Figura 1).

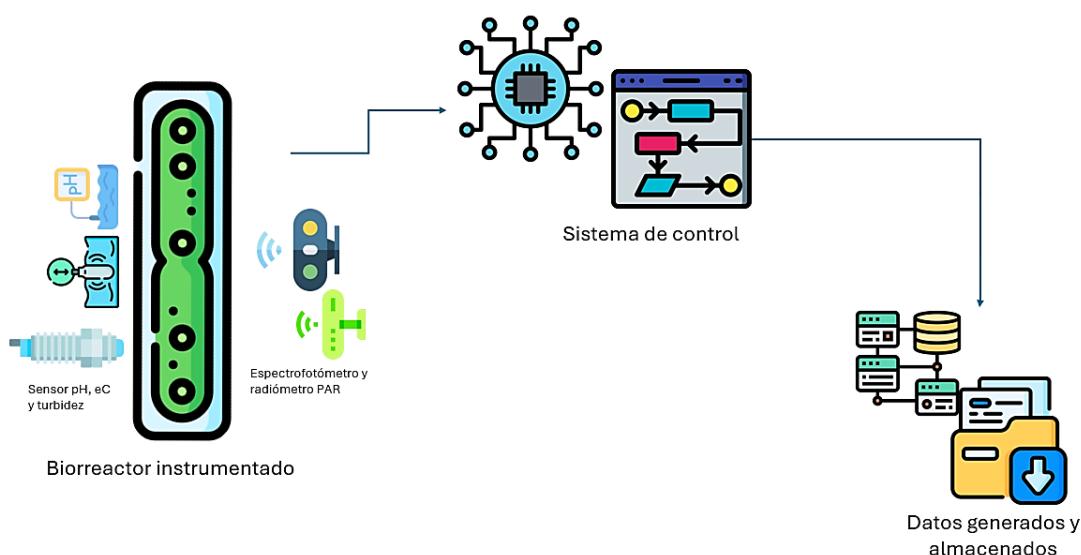
El sistema de alimentación garantizara un suministro estable mediante el uso de reguladores de voltaje para cada nivel requerido por los componentes del sistema. Se añadieron elementos de protección y filtrado, tales como filtros RC, condensadores de desacoplo para evitar fluctuaciones que puedan afectar el rendimiento de los sensores (ver Tabla 2).

Tabla 2. Componentes del sistema de alimentación.

Componente	Voltaje de Salida	Energizan a:
MPM3024	24V	Sensores RS485
LM7812	12V	Módulos periféricos
LM7805	5V	Arduino Mega Pro mini

Fuente: Elaboración propia.

Figura 1. Analogía de funcionamiento del sistema.



Fuente: Elaboración propia

Finalmente, se implementó un sistema de enfriamiento modular para disipar el calor generado por los componentes. Este sistema incluye un relé de estado sólido, un sensor de temperatura DS18B20 y un ventilador. Éste último integrado al PCB con el objetivo de mitigar las interferencias que se puedan generar por los períodos de tiempo que requiere estar encendido el equipo de manera continua (ver Tabla 3).

Tabla 3. Componentes y función del sistema de enfriamiento.

Componente	Función
SSR (G3MB-202P)	Activa el ventilador según la necesidad.
Sensor de temperatura (DS18B20)	Detecta temperaturas.
Ventilador	Disipa el calor.

Fuente: Elaboración propia.

2.1 Diseño del PCB

El diseño del PCB incorpora los principales elementos del sistema en una distribución compacta y eficiente. Se integraron los reguladores de voltaje, las conexiones RS485, el controlador principal y el módulo de memoria SD, garantizando una correcta disposición para minimizar interferencias y mejorar la disipación de calor.

Para mejorar la estabilidad del sistema y reducir el ruido electromagnético, se implementaron las siguientes estrategias:

- **Planos de tierra separados:** Se asignaron planos de tierra distintos para las señales analógicas y digitales, evitando acoplamientos no deseados.
- **Condensadores de desacople:** Se colocaron condensadores cerámicos de 100 nF y electrolíticos de 10 µF en puntos estratégicos para estabilizar la alimentación.
- **Filtros de ferrita:** Se incorporaron filtros de ferrita en las líneas de alimentación para mitigar el ruido de alta frecuencia.

2.2. Instalación de sensores en el fotobioreactor

Los sensores de pH, conductividad eléctrica (EC) y turbidez se montaron en soportes diseñados específicamente para este sistema y fabricados mediante impresión 3D. Bajo las siguientes especificaciones del soporte:

- **Material:** PLA con tratamiento de resistencia a la humedad y agentes químicos.
- **Diseño:** Geometría optimizada para garantizar una fijación estable y alineación precisa en el fotobioreactor.

2.3 Cálculo de distancias

Para garantizar una correcta captura de datos sin distorsiones ni interferencias, se realizaron los siguientes cálculos de posición para cada sensor (ver Tabla 4).

- **Radiación PAR:** La distancia d a la que se colocó el sensor respecto a la fuente de luz se determinó considerando la inversión cuadrática de la intensidad

lumínica, que establece que la intensidad de la radiación disminuye proporcionalmente al cuadrado de la distancia desde la fuente (ver ecuación 1). Esta relación se basa en principios fundamentales de propagación de ondas electromagnéticas en medios homogéneos [11].

$$I = \frac{I_0}{d^2} \quad [1]$$

Donde:

- I : Intensidad de la radiación a la distancia d .
- I_0 : Intensidad de la radiación en la fuente.
- d : Distancia desde la fuente de luz (en cm).

Esta ecuación es ampliamente utilizada en estudios de fotosíntesis y en la caracterización de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) en sistemas biológicos.

- **Espectrofotómetro:** El espectrofotómetro se ubicó al frente del fotobioreactor con el objetivo de minimizar la dispersión óptica, para asegurar mediciones precisas de la absorción y transmisión de luz por la biomasa. La distancia óptima (Ver Tabla 4) entre el sensor y el medio se calculó utilizando la ecuación que rige la transmisión de la luz en un medio dispersante basada en la teoría de radiación en medios turbidimétricos [12] (ver ecuación 2):

$$D = \frac{k}{\theta} \quad [2]$$

Donde:

- D : Distancia óptima (en cm).
- k : Constante de dispersión del medio.
- θ : Ángulo de dispersión.

Turbidez, pH y EC: Los sensores de turbidez, pH y conductividad eléctrica (EC) se colocaron dentro del fotobioreactor para garantizar mediciones representativas del medio. Un sistema de agitación mantuvo la homogeneidad del cultivo, evitando gradientes locales.

Por lo que el sistema funcionaría analizando mediante los sensores en el fotobioreactor (Figura 1) las variables de interés y almacenando dicha información para su análisis.

Tabla 4. Distancias de los sensores en el fotobioreactor.

Sensor	Distancia (cm)	Justificación
Radiación PAR	20	Evitar saturación
Espectrofotómetro	15	Minimizar dispersión óptica
Turbidez, pH, EC	Variable	Homogeneidad del medio

Fuente: Elaboración propia.

2.4 Integración y pruebas de validación

El sistema de monitoreo fue ensamblado e instalado en el fotobioreactor, buscando una correcta integración y operación de sus componentes. Durante su funcionamiento, se llevaron a cabo mediciones en condiciones controladas para registrar la respuesta de los sensores. Los datos

obtenidos fueron almacenados en la tarjeta SD, permitiendo un análisis posterior del comportamiento de las variables monitoreadas.

2.4.1 Calibración de Sensores

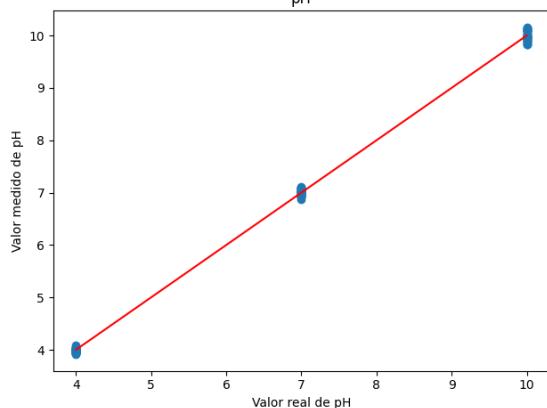
Cada sensor fue calibrado utilizando soluciones de referencia y siguiendo procedimientos estandarizados para asegurar mediciones precisas.

- **Turbidez:** Se utilizaron soluciones de referencia con valores de **50 - 5000 NTU** para generar una curva de calibración.
- **pH:** Se calibró utilizando buffers de **pH 4.0, 7.0 y 10.0**.
- **Conductividad Eléctrica (EC):** Se usaron soluciones de **1413 µS/cm** y **12.88 mS/cm**.

3. RESULTADOS.

En el proceso de calibración de los sensores, se obtuvieron los siguientes resultados. La relación entre los valores medidos de pH y los valores reales mostró un Error Cuadrático Medio (ECM) de 0.0046, lo que confirma la alta precisión del sensor de pH (ver figura 2). Por otro lado, en el caso de la conductividad, la recta de calibración presenta una R^2 de 0.9941, lo que respalda la fiabilidad de las mediciones. Esto implica un porcentaje de error del 0.59%, lo que indica que el sensor mantiene una alta precisión en la detección de la conductividad (ver figura 3). Estos resultados reflejan la efectividad del proceso de calibración para garantizar mediciones confiables en ambos sensores.

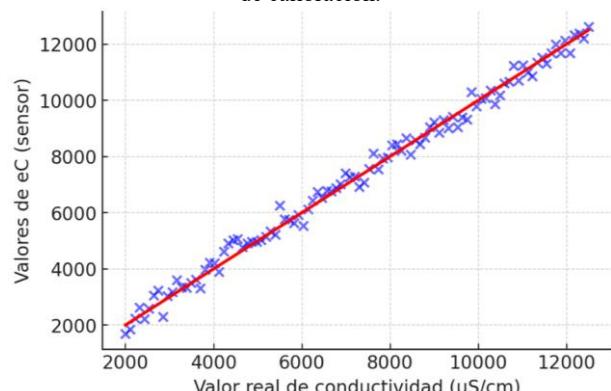
Figura 2. Mediciones de sensor pH vs estándar de calibración.



Fuente: Elaboración propia.

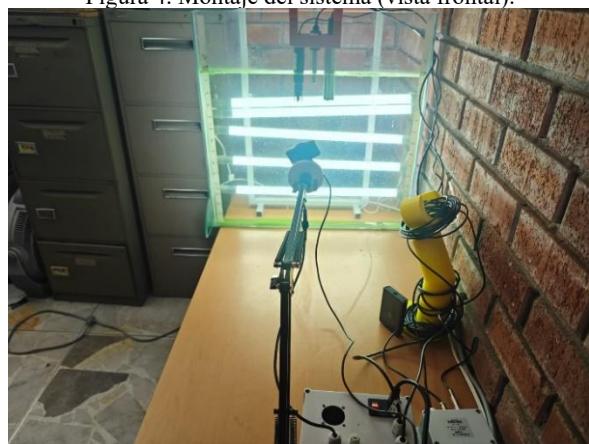
La Figura 4 y 5 muestran el montaje experimental del sistema de monitorización en el fotobiorreactor, donde se disponen los sensores para medir PAR, pH y turbidez en el medio de cultivo. El sistema de iluminación utiliza lámparas de tubo fluorescente (5 piezas) de 17W con un flujo lumínico de 1310 lúmenes.

Figura 3. Mediciones de sensor electroconductividad vs estándar de calibración.



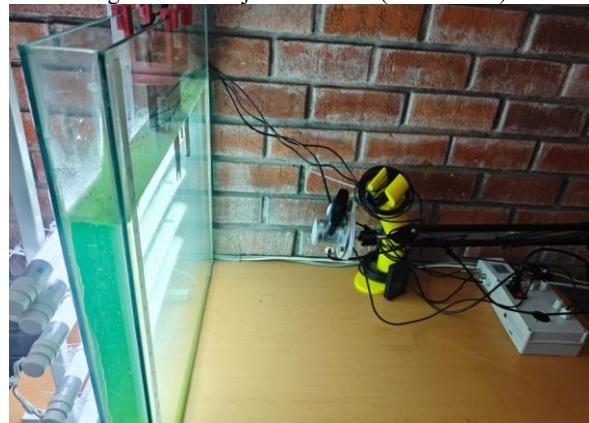
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Montaje del sistema (vista frontal).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 5. Montaje del sistema (vista lateral).



Fuente: Elaboración propia.

Para evaluar el funcionamiento del PAR, del espectrofotómetro y del sensor de turbidez, se utilizó un medio que emule las condiciones tanto para generar un cambio de color en el agua del fotobiorreactor como de turbidez y pH en ese medio.

La Figura 7 muestra la evolución de las variables monitoreadas. El pH fluctuó entre 7.3 y 7.8, con un promedio

de 7.6 ± 0.15 . La conductividad varió entre 1.1 y 1.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con un valor medio de $1.3 \pm 0.2 \mu\text{S}/\text{cm}$. La turbidez presentó un incremento progresivo, oscilando entre 10 y 80 NTU, con un promedio de $45 \pm 20 \text{ NTU}$. Por su parte, la temperatura se mantuvo en un rango de 20.7 a 21.1°C , con un valor medio de $20.9 \pm 0.15^\circ\text{C}$.

La Figura 7 muestra el espectro lumínico con mayor absorbancia en 450-500 nm y 500-570 nm, claves para la fotosíntesis. Durante esta fase, el PAR fue de 1.207 mW/cm^2 .

Figura 6. Resultados obtenidos del muestreo del equipo.

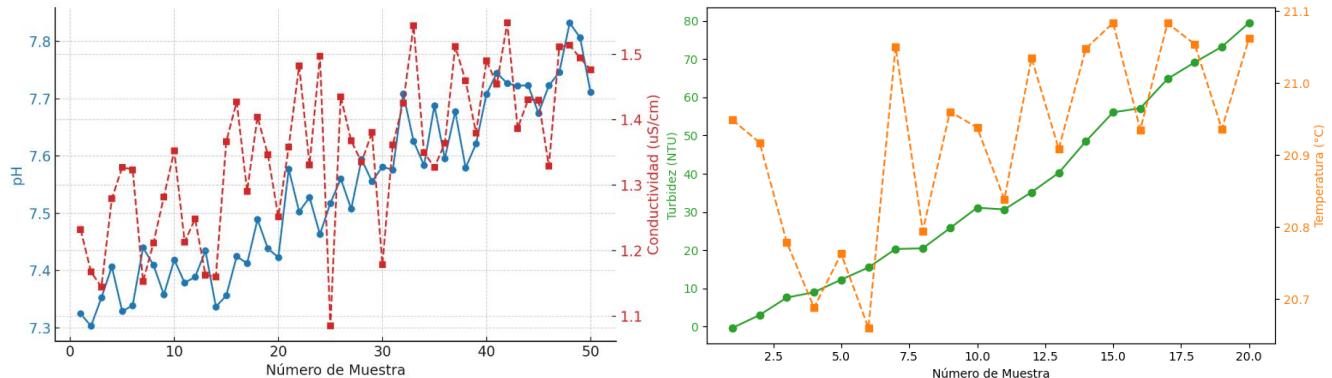
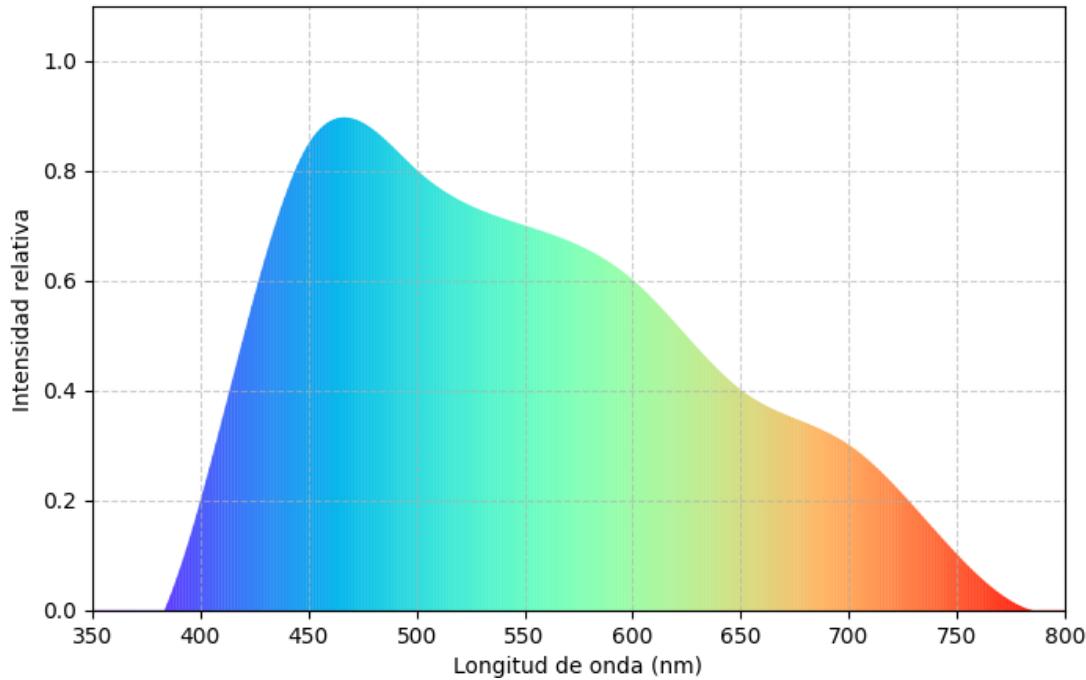


Figura 7. Resultados el espectro lumínico



Fuente: Elaboración propia.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Se desarrolló un sistema de monitoreo para fotobiorreactores que integra sensores de pH, conductividad eléctrica, turbidez, radiación PAR y espectrofotometría, comunicación mediante RS485 y almacenamiento de datos en formato CSV. Este sistema permite configurar intervalos de medición y ofrece una configuración modular, que permitirá incluir otros sensores.

El funcionamiento del sistema ha sido validado en cuanto a su precisión, estabilidad y capacidad de almacenamiento de los datos medidos por los sensores emulando un proceso biotecnológico.

Los trabajos futuros deberán incluir la implementación de algoritmos de filtrado digital y la integración de un sistema de control que permita ajustar las condiciones fisicoquímicas del cultivo en tiempo real. Estas mejoras no solo incrementarán la eficiencia del sistema, sino que también facilitarán su aplicación en proceso de interés biotecnológicos, que permitan relacionar la interacción entre las diferentes variables de interés.

5. REFERENCIAS

- [1] Martínez-Roldán, A. J., Goméz-Lozano, B. P., Díaz Ramírez M. A., Ruíz-García M. A. (2020). Diseño, construcción y puesta en marcha de un fotobiorreactor flat panel para el cultivo de microalgas. Revista de la Alta Tecnología y Sociedad 46(12): 46-53
- [2] Jamilis, M., Castañeda, M.T., and Sebastián, N. (2021). Desarrollo e integración de biorreactor para laboratorio biotecnológico. Electrotenia, 324–329.
- [3] Beltrán-Cediel Y.K., Quiñones-García A.M., and Vargas J. (2017). Sistema de automatización para el control de las condiciones ambientales en cultivo de microalga Chlorella. Revista Ciencia, Ingeniería y Desarrollo Tec Lerdo 3, 31–36.
- [4] Bolzi, C.G., Tamasi, M.J.L., and Cadena, C.A. (2016). Construcción del primer prototipo de radiómetro fotovoltaico sumergible de bajo costo. ASADES - Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 20, 43–50.
- [5] García-Romeral J, Pavía-Gómez M, García-Sanz T, Chirivella-Martorell J, and Serrano-Aroca Á (2017). Principios de biotecnología y bioingeniería en el cultivo de microalgas: importancia, problemas tecnológicos, tipos y sistemas de cultivos, crecimiento, factores limitantes, selección, aislamiento, escalado y caracterización bioquímica. Revista Iberoamericana interdisciplinar de métodos, modelización y simulación 9, 115–129.
- [6] Ramírez-Flores, S., Guerrero-Barrantes, M., Murillo-Vega, F., and Villalta-Romero, F. (2024). Efectos de la longitud de onda de luz, el fotoperiodo y la salinidad en los parámetros de producción de *Isochrysis galbana*. Revista Tecnología en Marcha 37, 88–101. 10.18845/tm.v37i1.6693.
- [7] Hernández Martínez Jhojan Stiven (2019). Desarrollo de un sistema de control y monitoreo de un fotobiorreactor airlift para el cultivo de microalgas por lotes. (Pamplona).
- [8] Mendieta Toala, B.A. (2021). Efectos de la absorción de diferentes espectros de luz sobre el crecimiento y síntesis bioquímica en microalgas *Tetraselmis spp.* y *Rhodomonas spp.*, mediante revisión bibliográfica.
- [9] Cornejo, A.D.L., A.K.S.S., A.C.R.S., & E.A.N.G. (2024). Avances y Desafíos en la Instrumentación Quirúrgica: Una Revisión Científica. Polo del Conocimiento 9(12), 3034–3048.
- [10] Escalante, M., Irusta, D., Mercado, G., Taffernaberry, C., Diedrichs, A.L., Tobar, S., Pérez Monte, C., Fisicaro, E., Carmona, A., Lattuca, A., et al. (2024). Sistema de control y monitoreo para Biorreactor con tecnología IoT. CACiC 12, 848–853.
- [11] K. J. Inada, "Action spectra for photosynthesis in higher plants," Plant and Cell Physiology, vol. 17, no. 2, pp. 355-365, 1976.
- [12] R. J. Davies-Colley and D. G. Smith, "Turbidity, suspended sediment, and water clarity: A review," Journal of the American Water Resources Association, vol. 37, no. 5, pp. 1085-1101, 2001.