

Optimización del consumo energético en sistema piscícola con tecnología Biofloc mediante un controlador lógico programable (PLC)

Optimization of energy consumption in a pisciculture system with Biofloc technology using a programmable logic controller (PLC)

MSc. Ingris Yohana Hernández Martínez ^{1,2}, Esp. Luis Francisco Pereira Flórez ^{2,3},
MSc. Wilfer Escalante Coronel ³, PhD. Margarita del Rosario Salazar Sánchez ⁴,
PhD. José Fernando Solanilla Duque ⁴

¹ Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Programa de Zootecnia, Aguachica, Cesar, Colombia

² Universidad Popular del Cesar, Programa de Ingeniería de Agropecuaria, Aguachica, Cesar, Colombia

³ Universidad Popular del Cesar, Programa de Ingeniería de sistemas, Aguachica, Cesar, Colombia.

⁴ Universidad del Cauca, Facultad de Ciencias Agrarias, Popayán, Cauca, Colombia.

Correspondencia: ingris.hernandez@unad.edu.co

Recibido: 13 febrero 2025. Aceptado: 30 junio 2025. Publicado: 05 julio 2025.

Cómo citar: I. Y. Hernández Martínez, L. F. Pereira Flórez, W. Escalante Coronel, M. R. Salazar Sanchez, y J. F. Solanilla Duque, «Optimización del consumo energético en sistema piscícola con tecnología Biofloc mediante un controlador lógico programable (PLC)», RCTA, vol. 2, n.º 46, pp. 102–109, jul. 2025.

Recuperado de <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcta/article/view/3561>

Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.



Resumen: Los controladores lógicos programables (PLC) están diseñados para supervisar y regular los procesos industriales, estos sistemas electrónicos con memoria programable almacenan instrucciones de control, permitiendo ejecutar funciones específicas según la información que reciben los controladores. En la piscicultura, se requieren el uso intensivo de energía para procesos como la oxigenación y la recirculación de agua. Sin embargo, estos procesos son posible de automatizarlos mediante PLC, ajustando los tiempos de operación y la intensidad de los equipos, permitiendo reducir el consumo energético, bajo las condiciones óptimas para la producción acuícola. El objetivo del estudio fue implementar un sistema de automatizado basado en PLC para monitorear y controlar los Blowers con el fin de optimizar el consumo energético y mejorar la eficiencia operativa del sistema. La metodología se centró en la automatización de la aireación del sistema piscícola con tecnología biofloc. Los resultados mostraron una reducción significativa en el consumo energético, conllevando a una disminución en los costos de producción.

Palabras clave: Automatización, Biofloc, PLC, Piscicultura, Programación.

Abstract: Programmable logic controllers (PLC) are designed to monitor and regulate industrial processes. These electronic systems with programmable memory store control instructions, allowing specific functions to be executed based on the information received by the controllers. In fish farming, energy-intensive processes such as oxygenation and water recirculation are required. However, these processes can be automated using PLCs, adjusting the operating times and intensity of the equipment, allowing energy consumption

to be reduced under optimal conditions for aquaculture production. The objective of the study was to implement a PLC-based automation system to monitor and control the Blowers in order to optimize energy consumption and improve the operational efficiency of the system. The methodology focused on the automation of the aeration of the fish farming system with biofloc technology. The results showed a significant reduction in energy consumption, leading to a decrease in production costs.

Keywords: Automation, Biofloc, PLC, Fish farming, Programming.

1. INTRODUCCIÓN

La producción acuícola a nivel mundial ha crecido aproximadamente un 3,2 % anual, superando la tasa de crecimiento demográfico (1,6%) [1]. En Colombia, la piscicultura se ha implementado desde hace varios años; sin embargo, enfrenta dificultades relacionadas con la adecuación, sostenibilidad e implementación de los sistemas productivos. Uno de los principales desafíos es el alto consumo de energía necesario para mantener las condiciones óptimas del sistema [2], [3], [4].

El sistema Biofloc (BFT), también conocido como simbiótico, es una tecnología innovadora dentro de la piscicultura. Este tipo de sistema se basa en crear un ambiente microbiológico en el cual se desarrollan agregados de microorganismos como bacterias, protozoos y otros organismos. También, se crean flóculos que juegan un papel fundamental al reducir la necesidad de alimentos externos, debido a que convierten el exceso de alimento y las excretas generadas por los peces en fuente adicional de proteína. Este proceso se lleva a cabo gracias a las bacterias heterótrofas, que metabolizan los residuos orgánicos generados por los peces convirtiéndolos en alimento proteico [5], [6], [7]. Sin embargo, una de las limitaciones del sistema es los costos de su implementación como el alto consumo energético.

Por tal motivo, en la piscicultura se evidencian la necesidad de mejorar los rendimientos relacionados con el oxígeno disuelto (OD), principalmente en el sistema BFT donde coexisten microorganismos heterótrofos y nitrificantes, siendo la función primordial de estos es la transformación de compuestos nitrogenados en alimentos o biomasa. Sin embargo, uno de los desafíos asociados a estas altas concentraciones microbianas es el elevado consumo de oxígeno, dado que no solo los peces o camarones requieren oxígeno, sino que el balance microbiano depende de una aireación constante y eficiente [8], [9].

Ante la problemática actual, la automatización adquiere gran relevancia debido a los avances tecnológicos. En este contexto, la implementación de sistemas capaces de monitorear, registrar y controlar variables como OD, surge como una alternativa viable para mejorar las operaciones, mediante sistemas inteligentes que únicamente cuando las condiciones lo requieren [10]. Por tal motivo, uno de los componentes clave en este tipo de sistema son los controladores lógicos programables (PLC) los cuales están diseñados para diseñar, supervisar y regular los procesos industriales. Estos dispositivos electrónicos de memoria programable almacenan instrucciones de control, lo que les permite ejecutar funciones específicas según la información que reciben desde los sensores u otros elementos del sistema [11], [12]. Esto ayuda a realizar un monitoreo más adecuado ayudando no solo a la salud de los peces, sino garantizando la estabilidad de la comunidad microbiana y calidad del agua [13].

En la piscicultura con BFT, el uso intensivo de energía es esencial para procesos como la oxigenación y la recirculación del agua. Sin embargo, estos procesos pueden ser automatizados mediante PLC, ajustando los tiempos de operación y la intensidad de los equipos. Esto permite reducir el consumo energético y, al mismo tiempo, mantener condiciones óptimas para la producción acuícola. Por tal motivo, el objetivo del estudio fue implementar un sistema automatizado basado en PLC para monitorear y controlar los blowers, con el fin de optimizar el consumo energético y mejorar la eficiencia operativa del sistema.

2. METODOLOGÍA

El estudio se realizó en un sistema piscícola ubicado en las cercanías del municipio de Aguachica, Cesar, a 160 m s. n. m., con una temperatura promedio anual de 28 °C. El sistema cuenta con dos estanques de 74.000 litros de agua cada uno.

Para iniciar el proceso BFT, se llevó a cabo la maduración del agua, con aireación continua

durante 40 días. Durante este periodo, se suministró concentrado al 45 % y melaza con el propósito de estimular el desarrollo de bacterias benéficas en el cultivo. Cuando los parámetros fisicoquímicos del agua alcanzaron las condiciones requeridas como se menciona en la (Tabla 1), se procedió con la siembra de los peces, estableciendo una densidad de 4.500 alevinos de tilapia por estanque, con un peso promedio de 0,61 g por individuo.

Tabla 1: Condiciones físico químicas recomendadas para el cultivo de *Oreochromis sp* en estanque

Condiciones físico y químicas de sistema Biofloc			
Parámetro	Mínimo	Óptimo	Máximo
pH	5.0	6.0 – 8.5	11
Temperatura (°C)	20	28 – 32	42
Amoníaco (ppm)	0.0	0.0	2.0
Nitritos (mg/L)	0.0	0.0	5.0
Nitratos (mg/L)	0.0	0.0	300 – 400
Oxígeno Disuelto (mg/L)	1.6	4 – 8	≥9

Fuente: Adaptado de Saldaña [14]

Diseño de experimental: Los grupos se organizaron siguiendo un diseño factorial 2×4, considerando dos condiciones del sistema BFT (con y sin automatización) y dos variables de respuesta: oxigenación y consumo energético (Figura 1).

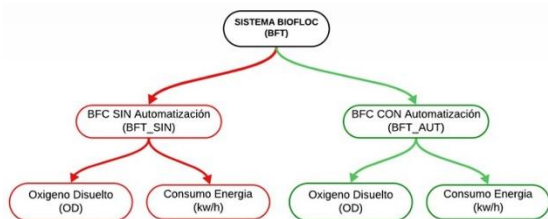


Fig. 1. Diagrama diseño experimental

Fuente: Elaboración propia.

En la acuicultura, el agua estancada genera varios problemas, ya que la falta de circulación crea un ambiente propicio para la acumulación de bacterias nocivas y la formación de gases tóxicos [15]. Con la finalidad de prevenir estas condiciones adversas y evitar la concentración de sustancias nocivas, se utilizan sopladores de aire (Blowers) que ayudan a la distribución homogénea del OD en los estanques de cultivo. Estos equipos tienen como función aplicar OD a través de mangueras poli-difusoras, permitiendo no solo la oxigenación eficiente del medio, sino también el movimiento constante de los sólidos suspendidos, con el fin de mantener los microorganismos del sistema en ambiente propicio.

Implementación del sistema de aireación: Para el grupo I: BFT sin automatización (BFT_SIN), el sistema de aireación estaba compuesto por un blower de 1.2 HP, el cual permanecía encendido y funcionando a velocidad constante. En contraste, en el grupo II: BFT con automatización (BFT_AUT), el sistema de aireación incluía dos blowers de 1.2 HP y dos variadores de velocidad de 1.5 HP, controlados por un PLC. Este sistema permitía mantener al menos un blower operando a revoluciones mínimas para garantizar niveles óptimos de oxígeno, mientras que el segundo permanecía en reserva, listo para activarse en caso de falla del primero o en situaciones críticas (Figura 2).

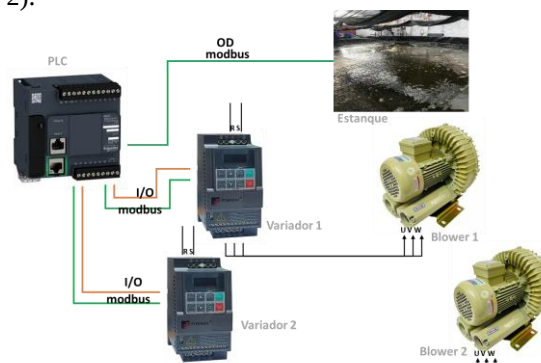


Fig. 2. Diagrama de flujo funcionamiento de los Blowers grupo II BFT_AUT. Fuente: Elaboración propia.

Monitoreo de la energía activa (EA) y el oxígeno disuelto (OD): Se recopilaban diariamente datos de energía activa y OD en ambos sistemas a lo largo del ciclo de cultivo, que tuvo una duración de 182 días. La recolección del consumo energético se realizó mediante la conexión directa de los Blowers, los cuales transmiten, a través de un sistema de comunicaciones, el estado y valores de energía consumida. De esta forma, los PLC almacenaban la información cada cierto periodo, y posteriormente los datos se exportan a archivos CSV para su análisis. Así mismo, la medición de OD se llevó a cabo mediante un oxímetro que no cuenta con capacidad de conexión al PLC, lo que conlleva que la recolección de los datos se realizara manualmente en planillas, para luego ser digitalizados.

Análisis estadístico. Se aplicó un ANOVA para evaluar los efectos principales de la automatización y las condiciones del sistema sobre las variables de respuesta, así como su interacción.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El consumo de energía en los sistemas Biofloc es esencial para mantener la calidad del agua, ya que estos sistemas requieren aireación continua para

asegurar niveles adecuados de oxígeno disuelto, garantizando así que los parámetros fisicoquímicos permanezcan en condiciones óptimas. En relación con lo anterior, los resultados del consumo energético (Figura 3) muestran que el sistema BFT_SIN, representado por la línea roja, mantiene un consumo constante de energía en el rango de 16 a 18 kW/h durante todo el ciclo de cultivo. En contraste, el sistema BFT_AUT, ilustrado por la línea azul presenta un comportamiento ascendente: inicia con valores entre 10 y 13 kW/h, pero incrementa progresivamente a lo largo del ciclo, alcanzando niveles similares a los del sistema BFT_SIN hacia el final del período.

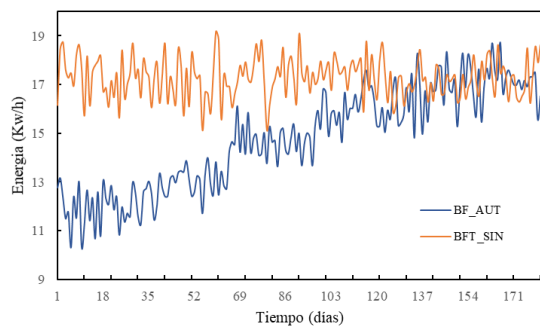


Fig. 3. Consumo energético de los sistemas BFT_AUT y BFT_SIN. **Fuente:** Elaboración propia.

Mogallón et al. (2020) realizaron un estudio en el que analizaron las imágenes de microburbujas y espuma (ME) utilizando un programa de análisis de datos (MATLAB) y un algoritmo de filtrado de imágenes. Su objetivo fue determinar la relación entre la columna de agua en el estanque, la cantidad de espuma generada y el consumo eléctrico. Los resultados mostraron que, entre las mediciones mencionadas, se puede optimizar la eficiencia del sistema de producción, concluyendo que, a mayor producción de ME en las columnas de agua entre 0,40 y 0,85 m, se logra un ahorro energético del 5 al 8% en el sistema ($F=231.64$, $gl=1$, 180 y $p<0,05$, $p=8.77 \times 10^{-41}$) [16].

En el presente estudio, se observó un ahorro energético durante los primeros meses de producción, el cual aumentó progresivamente en la etapa final. Esto puede estar relacionado con el incremento en el tamaño de los peces, lo que conlleva una mayor demanda energética para mantener condiciones óptimas en el cultivo (Figura 4). Con respecto a esto, Hughes (2023) señala que los peces juveniles tienen un metabolismo menos exigente en comparación con los adultos, lo que reduce su consumo de oxígeno debido a una menor demanda metabólica [17].

En este sentido, la implementación de sistemas BFT no solo ha demostrado ser una alternativa viable para mejorar la eficiencia operativa, como se evidenció en los resultados del presente estudio, sino que también representa una estrategia altamente eficaz para incrementar la sostenibilidad de la piscicultura en Colombia. Hernández et al., (2023) destaca que esta actividad ha sido la de mayor crecimiento dentro del sector pecuario nacional en la última década, y que los sistemas BFT contribuyen de forma significativa al control natural de la calidad del agua, la bioseguridad, y la reutilización de nutrientes mediante procesos de nitrificación y formación de proteína bacteriana de alto valor [18]. Además, se reconocen efectos positivos en la inmunostimulación de los peces y mejoras en la conversión alimenticia, crecimiento y rendimiento reproductivo. Estos beneficios, sumados a la automatización de procesos clave como la aireación, refuerzan el potencial del sistema BFT automatizado para transformar la acuicultura hacia prácticas más eficientes y resilientes.

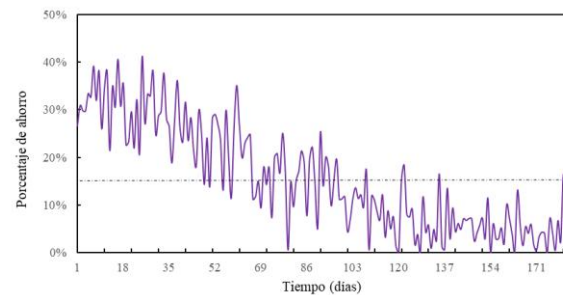


Fig. 4. Comportamiento en % de ahorro energético del sistema BFT_AUT. **Fuente:** Elaboración propia.

Se encontraron diferencias significativas en el comportamiento del oxígeno disuelto entre los sistemas BFT_SIN y BFT_AUT ($F = 144.31$, $gl=1$, 180 y $p < 0.05$, $p = 3.30 \times 10^{-28}$), como se muestra en la (Figura 5), donde estos sistemas están representados por las líneas roja y verde, respectivamente. En el sistema BFT_SIN, los niveles iniciales de oxígeno disuelto oscilaron entre 7 y 8 mg/L; sin embargo, presentan una disminución progresiva a lo largo del ciclo productivo, alcanzando valores cercanos a 5 mg/L hacia el final. En contraste, el sistema BFT_AUT mantiene niveles constantes de oxígeno disuelto, alrededor de 5 mg/L, durante todo el ciclo, evidenciando que el sistema BFT con automatización (BFT_AUT) presenta ventajas significativas en términos de eficiencia energética, especialmente en los primeros meses del ciclo productivo. Esto es especialmente relevante, ya que el consumo de energía asociado a la aireación representa uno de los costos más significativos en la producción acuícola.

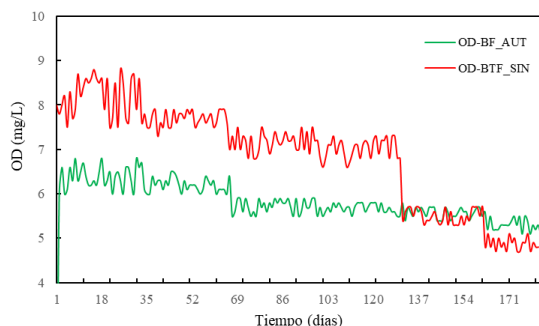


Fig. 5. Comportamiento del Oxígeno de los sistemas BFT_AUT y BFT_SIN. **Fuente:** Elaboración propia.

En cuanto al comportamiento del ahorro energético se evidencian diferencias significativas entre los dos sistemas (Prueba T = 15.21, gl = 1, 362 y $p < 0,05$, $p = 3,30 \times 10^{-41}$), observándose que la mayor parte del ahorro logrado con el sistema BFT_AUT se concentra durante los tres primeros meses del ciclo productivo, en comparación con el sistema BFT_SIN. Este hallazgo sugiere que la automatización tiene un impacto inmediato en la reducción del consumo energético, lo que podría explicarse por el uso más eficiente de los equipos de aireación en función de las necesidades reales del sistema. Además, la mayor demanda de oxígeno a medida que los peces crecen probablemente haya influido en el aumento progresivo del consumo energético al final del ciclo.

Además de los beneficios observados en la presente investigación con el BFT_AUT o basado en PLC, es importante destacar otras soluciones tecnológicas más integradas, como el sistema AcAS descrito por Sasikumar et al. (2024a), con un sistema de automatización acuícola de ventana única que permite a los usuarios monitorear y controlar fácilmente las condiciones del cultivo a través de una interfaz gráfica personalizable, incorporando sensores industriales de alta precisión (pH, conductividad, potencial redox y oxígeno disuelto), conectividad con tecnologías modernas (Wi-Fi, LoRa/ZigBee, 4G/5G) y capacidad de almacenamiento de datos, lo que facilita la toma de decisiones en tiempo real [19].

Con respecto a los parámetros fisicoquímicos relacionados con el consumo energético, en especial el ciclo del nitrógeno es altamente influyente en el crecimiento y salud de los peces y, en consecuencia, en la calidad de la carne [20]. Por tanto, es importante mantener los parámetros dentro de lo recomendado (Ver tabla 1).

Con relación a la (Figura 6), se presentan los resultados correspondientes a los sistemas

evaluados. En el sistema BFT_AUT, los valores registrados se mantuvieron dentro de los rangos recomendados para la especie cultivada observándose un pico máximo de amoníaco de 1 mg/L, nitrito de hasta 2 mg/L y el nitrato con un valor máximo de 70 mg/L. Este resultado es semejante con lo reportado por Avnimelech, (2009), quien señala que el sistema BFT puede mantener concentraciones de amoníaco por debajo de 1.5 mg/L, gracias a la actividad de las bacterias heterotróficas, las cuales asimilan eficientemente los compuestos nitrogenados [21]. De igual forma, Tasleem et al., (2024) destaca que concentraciones de nitrito inferiores a 5mg/L, y nitrato de ≤ 60 mg/L no generan efectos adversos en los peces. Estos hallazgos confirman que el sistema BFT tiene la capacidad de controlar de forma eficiente los compuestos nitrogenados, contribuyendo a un ambiente acuático estable y saludable para los microorganismos del cultivo [22].

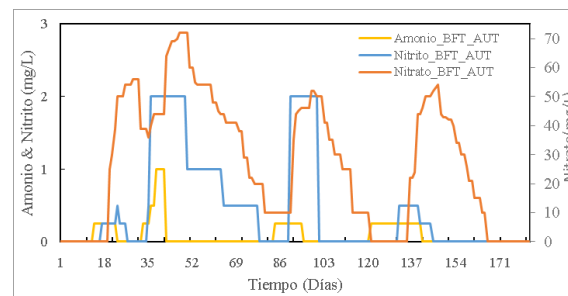


Fig. 6. Comportamiento del Amonio, Nitrito y Nitrato en el sistema BFT_AUT. **Fuente:** Elaboración propia

Por su parte, en el (figura 7) sistema BFT_SIN, donde se observaron valores máximos de amonio, nitrito y nitrato de 0.5 mg/L, 1 mg/L y 5 mg/L, respectivamente. Estos valores se encuentran dentro de los límites aceptables para el cultivo. Cabe resaltar que, en comparación con el sistema BFT_AUT, el BFT_SIN presenta una menor fluctuación en los compuestos nitrogenados, indicando una estabilidad en la calidad del agua. Estos resultados coinciden con Putra et al., (2020) quienes evidenciaron que concentraciones de amoníaco, nitrito y nitrato de 0.02mg/L, 0,43 mg/L y 3,20 mg/L respectivamente. Dichos valores son similares con los evidenciados en el presente estudio, lo que refuerza la efectividad del sistema BFT en el control de compuestos nitrogenados mediante el uso de fuentes de carbono como melaza son adecuadas para promover la actividad microbiana heterotrófica [23].

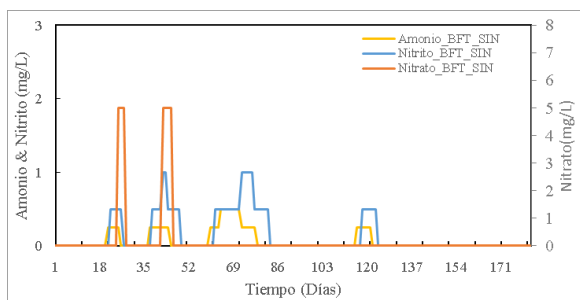


Fig. 7. Comportamiento del Amonio, Nitrito y Nitrato en el sistema BFT_SIN. **Fuente:** Elaboración propia.

Base en los expuesto, los resultados obtenidos en esta investigación con el sistema BFT_AUT reflejan una tendencia positiva hacia la automatización en acuicultura, mostrando una mejora significativa en la eficiencia energética y el control de OD. De manera similar, un estudio en cultivo de camarón BFT demostró que un sistema de automatización basado en sensores mejoró notablemente los parámetros productivos, como la tasa de crecimiento específica (28,66 %), la eficiencia proteica ($0,49 \pm 0,01$), y la tasa de supervivencia ($65 \pm 2,6$ %) en comparación con prácticas manuales (Sasikumar et al., 2024b), quienes reportan una disminución sustancial de compuestos nitrogenados (amonio, nitrito y nitrato), lo que sugiere una mejor gestión de la calidad del agua [24]. Estos hallazgos coinciden con los beneficios observados en el presente estudio, donde el uso de controladores lógicos programables (PLC) permitió mantener niveles más estables de OD y optimizar el consumo energético. Aunque nuestro sistema fue más simple en comparación con la solución descrita, los resultados confirman que incluso niveles básicos de automatización pueden generar impactos positivos en los sistemas BFT.

Por tanto, los resultados obtenidos en esta investigación reafirman el potencial de la automatización mediante PLC en sistemas piscícolas tipo BFT para mejorar la eficiencia energética y el control operativo. No obstante, se reconoce que esta experiencia corresponde a una fase inicial de validación en condiciones controladas y con un número limitado de unidades experimentales. Aunque algunas variables clave, como el pH y la temperatura, fueron monitoreadas de forma manual, su integración en futuras versiones del sistema automatizado representa una valiosa oportunidad para fortalecer el alcance del control en tiempo real y avanzar hacia esquemas de producción acuícola más inteligentes e interconectados. Este trabajo sienta así una base aplicable y escalable, desde la cual pueden derivarse

nuevas líneas de investigación e implementación tecnológica.

Como se puede inferir, la automatización mediante PLC, demostró en este estudio, que representa una estrategia viable para optimizar el consumo energético en sistemas BFT, especialmente en regiones donde el costo de la electricidad impacta significativamente los márgenes productivos. Esta solución puede ser adaptada a diferentes contextos geográficos, incluyendo zonas con climas cálidos y condiciones de baja disponibilidad hídrica. Su implementación no requiere infraestructura altamente especializada, lo que permite su escalabilidad en sistemas acuícolas pequeños y medianos. Desde una perspectiva costo-beneficio, aunque la inversión inicial en sensores, variadores de velocidad y el controlador lógico programable puede representar un aumento moderado en los costos de instalación, los beneficios operativos derivados del ahorro energético, la reducción de fallas técnicas y la optimización del uso de oxígeno justifican ampliamente su adopción en el mediano plazo. Además, al mejorar la eficiencia del cultivo y estabilizar las condiciones de producción, se contribuye indirectamente a la sostenibilidad ambiental y económica del sistema.

4. CONCLUSIONES

En este estudio se evaluó la implementación de un sistema de automatización basado en PLC para optimizar el consumo energético y mantener los niveles adecuados de oxígeno disuelto en sistemas piscícolas tipo Biofloc (BFT). La implementación del sistema de control automático permitió una gestión más precisa de la aireación, reduciendo el consumo energético sin comprometer los parámetros fisicoquímicos esenciales para el crecimiento de los organismos acuáticos.

El análisis de la relación entre oxígeno disuelto y consumo energético sugiere que la automatización no solo optimiza el uso de recursos energéticos, sino que también permite mantener la calidad del agua de manera más eficiente. A medida que los peces crecen, la demanda energética aumenta, lo que refleja la necesidad de ajustar la capacidad de aireación de manera dinámica, tal como lo facilita el sistema automatizado.

La automatización mediante PLC en sistemas acuícolas tipo BFT representa una estrategia efectiva para mejorar la eficiencia operativa, reducir costos energéticos y asegurar condiciones ambientales óptimas para el cultivo. Se recomienda

la implementación de tecnologías similares en otros sistemas acuícolas para contribuir a la sostenibilidad de la producción acuícola y la eficiencia en el uso de recursos.

REFERENCIAS

- [1] FAO, *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024*. FAO, 2024. doi: 10.4060/cd0683en.
- [2] S. C. Carrera-Quintana, P. Gentile, and J. Girón-Hernández, "An overview on the aquaculture development in Colombia: Current status, opportunities and challenges," *Aquaculture*, vol. 561, p. 738583, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.aquaculture.2022.738583.
- [3] M. Mugwanya, M. A. O. Dawood, F. Kimera, and H. Sewilam, "Biofloc Systems for Sustainable Production of Economically Important Aquatic Species: A Review," *Sustainability*, vol. 13, no. 13, p. 7255, Jun. 2021, doi: 10.3390/su13137255.
- [4] Y. A. Sarabia Parrado, "Historia de la Acuicultura en Colombia," *Revista AquaTIC*, vol. 37, pp. 60–76, 2016.
- [5] M. H. Khanjani, A. Mohammadi, and M. G. C. Emerenciano, "Microorganisms in biofloc aquaculture system," *Aquac Rep*, vol. 26, p. 101300, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.aqrep.2022.101300.
- [6] E. G. Estante-Superio *et al.*, "The impact of indoor biofloc-based system on water quality, growth, and disease resistance of black tiger shrimp," *Aquac Eng*, vol. 111, p. 102564, Oct. 2025, doi: 10.1016/j.aquaeng.2025.102564.
- [7] N. B. Tarigan, M. Verdegem, J. Ekasari, and K. J. Keesman, "Nutrient flows in biofloc-Nile tilapia culture: A semi-physical modelling approach," *Biosyst Eng*, vol. 248, pp. 108–129, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.biosystemseng.2024.09.021.
- [8] G. Luo, J. Xu, and H. Meng, "Nitrate accumulation in biofloc aquaculture systems," *Aquaculture*, vol. 520, p. 734675, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.aquaculture.2019.734675.
- [9] Md. R. Al Mamun, M. Ashik-E-Rabbani, Md. M. Haque, and S. M. Upoma, "IoT-based real-time biofloc monitoring and controlling system," *Smart Agricultural Technology*, vol. 9, p. 100598, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.atech.2024.100598.
- [10] R. Sasikumar *et al.*, "Field trial evaluation of sensor-based aquaculture automation for improved biofloc shrimp culture," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 64, p. 105661, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.jwpe.2024.105661.
- [11] Md. R. Al Mamun, M. Ashik-E-Rabbani, Md. M. Haque, and S. M. Upoma, "IoT-based real-time biofloc monitoring and controlling system," *Smart Agricultural Technology*, vol. 9, p. 100598, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.atech.2024.100598.
- [12] R. Sasikumar *et al.*, "Field trial evaluation of sensor-based aquaculture automation for improved biofloc shrimp culture," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 64, p. 105661, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.jwpe.2024.105661.
- [13] "Issue Information," *J World Aquac Soc*, vol. 52, no. 3, pp. 497–499, Jun. 2021, doi: 10.1111/jwas.12710.
- [14] R. Saldaña Escorcía, M. Salazar Sánchez, L. Rodríguez Barbosa, I. Hernández Martínez, and N. Sánchez Álvarez, "Avances en investigación científica. Tomo III: Ciencias multidisciplinarias. Calidad del agua para el cultivo de tilapia roja (*Oreochromis sp.*) en etapa de alevinaje con tecnología biofloc," 1st ed., vol. 3, Nariño: Sello editorial AUNAR Cali, 2022, pp. 289–301. doi: 10.47666/avances.inv.3.
- [15] S. Pangvuthivanich, W. Roynarin, P. Boonraksa, and T. Boonraksa, "Deep Learning-Driven Forecasting for Compressed Air Oxygenation Integrating With Floating PV Power Generation System," *IET Energy Systems Integration*, vol. 7, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.1049/esi2.70000.
- [16] J. A. Magallon-Servin, R. A. Bórquez-López, W. Quadros-Seiffert, F. J. Magallón-Barajas, and R. Casillas-Hernandez, "Influencia de la columna de agua y eficiencia energética de dos tipos de generadores de microburbujas en un cultivo hiper-intensivo de camarón," *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, vol. 16, no. 2, pp. 79–87, 2020.
- [17] G. M. Hughes, "General anatomy of the gills," 2023, pp. 9–78. doi: 10.1016/bs.fp.2023.09.001.
- [18] L. E. Hernández Mancipe, J. I. Londoño Velez, K. A. Hernández García, and L. C. Torres Hernández, "Los sistemas biofloc: una estrategia eficiente en la producción acuícola," *CES Medicina Veterinaria y Zootecnia*, vol. 14, no. 1, pp. 70–99, Apr. 2019, doi: 10.21615/cesmvz.14.1.6.

- [19] R. Sasikumar *et al.*, “Field trial evaluation of sensor-based aquaculture automation for improved biofloc shrimp culture,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 64, p. 105661, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.jwpe.2024.105661.
- [20] J.-M. Zhang *et al.*, “The effect of nitrite and nitrate treatment on growth performance, nutritional composition and flavor-associated metabolites of grass carp (*Ctenopharyngodon idella*),” *Aquaculture*, vol. 562, p. 738784, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.aquaculture.2022.738784.
- [21] Y. Avnimelech, *Biofloc technology: a practical guide book*, Avnimelech, Y. 2009.
- [22] S. Tasleem *et al.*, “Biofloc System with Different Carbon Sources Improved Growth, Haematology, Nonspecific Immunity, and Resistivity against the *Aeromonas hydrophila* in Common Carp, *Cyprinus carpio*,” *Aquac Res*, vol. 2024, no. 1, Jan. 2024, doi: 10.1155/2024/7652354.
- [23] I. Putra *et al.*, “Effect of different biofloc starters on ammonia, nitrate, and nitrite concentrations in the cultured tilapia *Oreochromis niloticus* system,” *F1000Res*, vol. 9, p. 293, Jun. 2020, doi: 10.12688/f1000research.22977.3.
- [24] R. Sasikumar, L. Lourdu Lincy, A. Sathyan, and P. Chellapandi, “Design, development, and deployment of a sensor-based aquaculture automation system,” *Aquaculture International*, vol. 32, no. 5, pp. 6431–6447, Oct. 2024, doi: 10.1007/s10499-024-01472-w.