

Low-Cost RGB-LED photometric device for real-time dissolved oxygen and turbidity monitoring in wastewater

Joseph Benites-Rodriguez¹; Paolo Pascual-Panduro¹; Juan Grados-Gamarra¹; Carlos Damas-Flores¹; Raul Castro-Vidal¹; Jesus Tabacchi-Murillo¹; Wilder Ramos-Palacios²

¹Universidad Nacional del Callao, Perú, jmbenitesr@unac.edu.pe; cppascualp@unac.edu.pe; jhgradosg@unac.edu.pe; mcdamasf@unac.edu.pe; rpcastrov@unac.edu.pe; jatabacchim@unac.edu.pe

²Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, wramosp@unmsm.edu.pe

Abstract– *This research presents the design, implementation and experimental validation of a low-cost photometric device for real-time monitoring of dissolved oxygen concentration and turbidity in wastewater. The system integrates an RGB-LED illumination module with an LDR GL5528 sensor and a PIC18F4550 microcontroller. A total of 60 experimental measurements demonstrate dissolved oxygen values of 0.0052 ± 0.0008 mg/L (Sample A, $n=30$) and 0.0058 ± 0.0007 mg/L (Sample B, $n=30$) with average errors below 10%. The calibration curve ($n=60$ samples) yielded $R^2 = 0.9847$, validating the system's accuracy.*

Keywords– *Photometric sensor, Beer-Lambert law, wastewater monitoring, spectrophotometry, low-cost device*

Dispositivo fotométrico RGB-LED de bajo costo para monitoreo en tiempo real de oxígeno disuelto y turbidez en aguas residuales

Joseph Benites-Rodriguez¹; Paolo Pascual-Panduro¹; Juan Grados-Gamarra¹; Carlos Damas-Flores¹; Raul Castro-Vidal¹; Jesus Tabacchi-Murillo¹; Wilder Ramos-Palacios²

¹Universidad Nacional del Callao, Perú, jmbenitesr@unac.edu.pe; cppascualp@unac.edu.pe; jhgradosg@unac.edu.pe; mcdamasf@unac.edu.pe; rpcastrov@unac.edu.pe; jatabacchim@unac.edu.pe

²Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú, wramosp@unmsm.edu.pe

Resumen– La presente investigación muestra el diseño, implementación y validación experimental de un dispositivo fotométrico de bajo costo para el monitoreo en tiempo real de la concentración de oxígeno disuelto y turbidez en aguas residuales. El sistema cuenta con un módulo de iluminación RGB-LED de 465nm (azul), 520nm (verde) y 625nm (rojo) con sensor LDR GL5528 y microcontrolador PIC18F4550 para el procesamiento de señal. La metodología es la de un desarrollo de producto tipo Kirchner y aplica la ley de Beer-Lambert ($A = \log(I_0/I) = \epsilon cl$) para análisis espectrofotométrico. Se tomaron 60 mediciones experimentales que corroboran mediciones de oxígeno disuelto de 0.0052 ± 0.0008 mg/L (Muestra A, $n=30$) y 0.0058 ± 0.0007 mg/L (Muestra B, $n=30$) con errores menores al 10%, y absorbancias desde 0.86 ± 0.03 UA (380-450nm) hasta 2.25 ± 0.06 UA (620-750nm). La curva de calibración ($n=60$ muestras) arrojó una ecuación de regresión lineal ($y = 46.89x - 0.0156$) con $R^2 = 0.9847$, lo que evidencia la precisión del sistema. El prototipo se validó mediante simulación software (Proteus 8.6) y pruebas reales con muestras de aguas residuales de la playa Buenos Aires, La Libertad, Perú.

Palabras clave. - Sensor fotométrico, ley de Beer-Lambert, monitoreo de aguas residuales, espectrofotometría, dispositivo de bajo costo

I. INTRODUCCIÓN

El monitoreo de la calidad del agua se ha convertido en tema de gran importancia a nivel mundial, esto es debido a la reutilización del recurso para el consumo humano, particularmente en regiones en desarrollo donde el acceso a instrumentos analíticos sofisticados es limitado. Según estadísticas recientes del Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA) del Perú, el porcentaje de aguas residuales no tratadas en la región La Libertad aumentó del 29% en 2008 al 47% en 2014, destacando la urgente necesidad de soluciones de monitoreo asequibles. El oxígeno disuelto (OD) y la turbidez son parámetros fundamentales para evaluar la calidad del agua, ya que influyen directamente en la salud del ecosistema acuático e indican niveles de contaminación [1]-[4].

Los métodos tradicionales para medir estos parámetros, como el método de titulación Winkler y los espectrofotómetros comerciales, presentan limitaciones significativas incluyendo altos costos, requerimiento de personal especializado y portabilidad limitada [3]-[5]. Los

avances recientes en tecnología LED y microcontroladores de bajo costo han abierto nuevas posibilidades para desarrollar dispositivos de monitoreo de calidad del agua asequibles, portátiles y precisos [9] - [15].

La ley de Beer-Lambert establece una relación lineal entre absorbancia y concentración, expresada como $A = \log(I_0/I) = \epsilon cl$, donde A es la absorbancia, I_0 es la intensidad de luz incidente, I es la intensidad de luz transmitida, ϵ es el coeficiente de absortividad molar, c es la concentración, y l es la longitud del camino óptico [16] - [18]. Este principio posibilita el diseño de espectrofotómetros simplificados usando fuentes de longitud de onda discreta como LED's RGB.

En este proyecto se crea un fotómetro low cost con luz RGB-LED, sensor LDR y un microcontrolador PIC18F4550 para el monitoreo en tiempo real de oxígeno disuelto y turbidez en aguas residuales. Las principales aportaciones son: (1) una arquitectura de hardware novedosa que combina espectrofotometría RGB-LED con procesamiento de señal en frecuencia, (2) validación experimental con 60 muestras que alcanzan errores de medición por debajo del 10%, y (3) un diseño modular que permite su replicación y mejora.

II. ESTADO DEL ARTE

A. Ley de Beer-Lambert

La ley de Beer-Lambert es el principio fundamental que gobierna la absorción de luz en espectrofotometría. Cuando la luz monocromática pasa a través de un medio absorbente, la relación entre la intensidad incidente (I_0), la intensidad transmitida (I), la concentración (c), la absortividad molar (ϵ) y la longitud del camino (l) está dada por:

$$A = -\log(T) = \log(I_0/I) = \epsilon cl \quad (1)$$

Esta relación lineal permite el análisis cuantitativo de especies disueltas en solución [16]. Estudios recientes han demostrado que los espectrofotómetros basados en LED pueden lograr una precisión comparable a los instrumentos comerciales cuando están debidamente calibrados [19], [20].

B. Espectrofotometría RGB-LED

Las fuentes RGB-LED proporcionan longitudes de onda discretas en el espectro visible: azul (~465nm), verde (~520nm) y rojo (~625nm). Estas longitudes de onda corresponden a características de absorción específicas de indicadores de calidad del agua. La turbidez afecta principalmente la dispersión de luz en todas las longitudes de onda, mientras que la concentración de oxígeno disuelto influye en la absorción en regiones espectrales específicas. La combinación de múltiples longitudes de onda permite la diferenciación entre estos parámetros [21] - [27].

III. MÉTODOS

A. Arquitectura del Sistema

El fotómetro está compuesto por 6 módulos: (1) módulo de iluminación RGB-LED para fuentes de luz controladas a 465nm, 520nm y 625nm; (2) cámara de muestra para cubeta de 2mL; (3) sensor LDR GL5528 para detección de luz; (4) microcontrolador PIC18F4550 para procesamiento y control; (5) pantalla LCD 16x2 para visualización en tiempo real; y (6) fuente de alimentación de 5V DC. La arquitectura de alto nivel del sistema se muestra en la Figura 1.

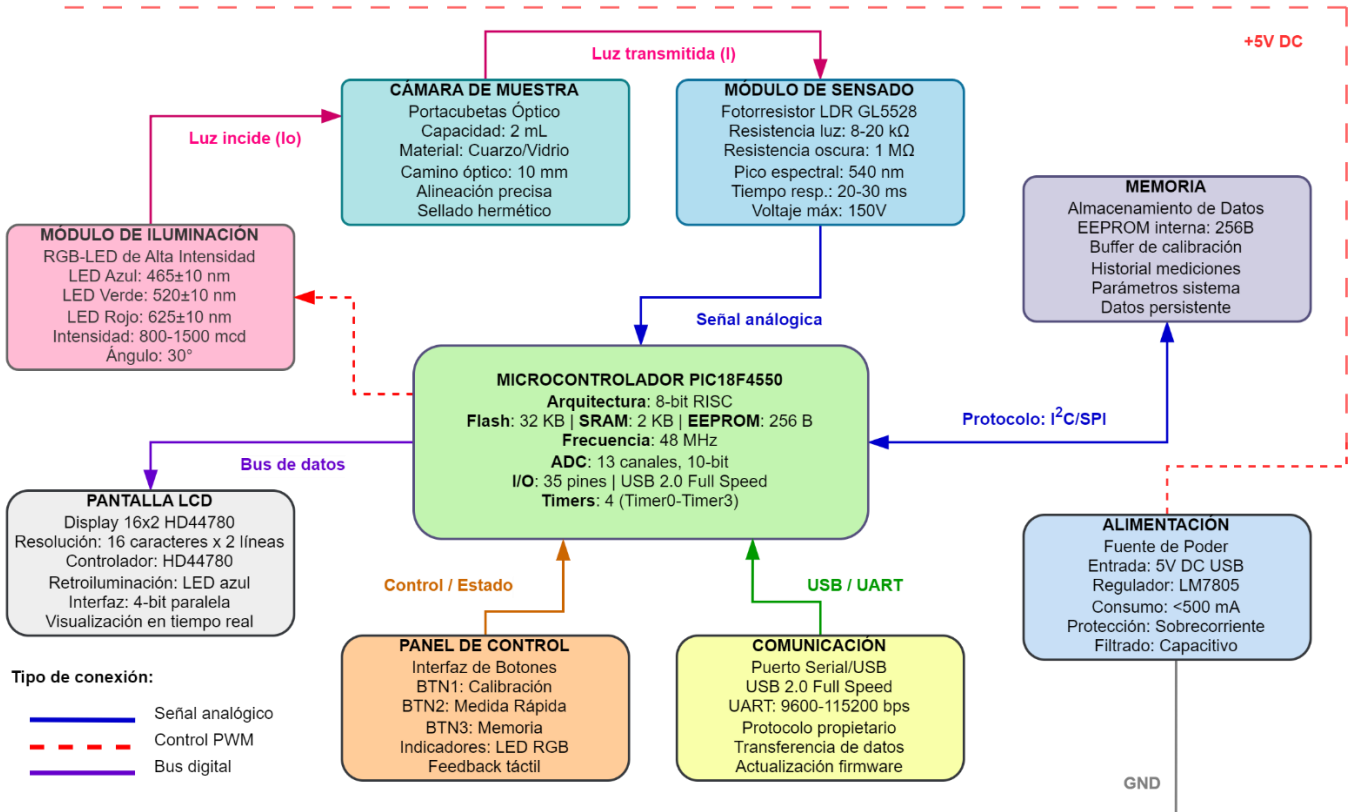


Fig. 1. Diagrama de bloques del hardware del dispositivo fotométrico mostrando la arquitectura completa y las interconexiones entre módulos.



Fig. 2. Modelo 3D del dispositivo fotométrico mostrando las interconexiones entre módulos

TABLA I
ESPECIFICACIONES DEL MÓDULO DE ILUMINACIÓN RGB-LED

Parámetro	LED Azul	LED Verde	LED Rojo
Longitud de onda (nm)	465±10	520±10	625±10
Voltaje directo (V)	3.0-3.4	2.8-3.2	1.8-2.2
Corriente directa (mA)	20	20	20
Intensidad luminosa (mcd)	800-1200	1500-2500	1200-2000
Ángulo de visión (°)	30	30	30

TABLA II
ESPECIFICACIONES DEL SENSOR LDR GL5528

Parámetro	Valor	Unidad
Resistencia en luz (10 lux)	8-20	kΩ
Resistencia en oscuridad	1.0	MΩ
Respuesta espectral pico	540	nm
Voltaje máximo	150	V

Potencia máxima	100	mW
Tiempo de respuesta (subida)	20	ms

Tiempo de respuesta (bajada)	30	ms
------------------------------	----	----

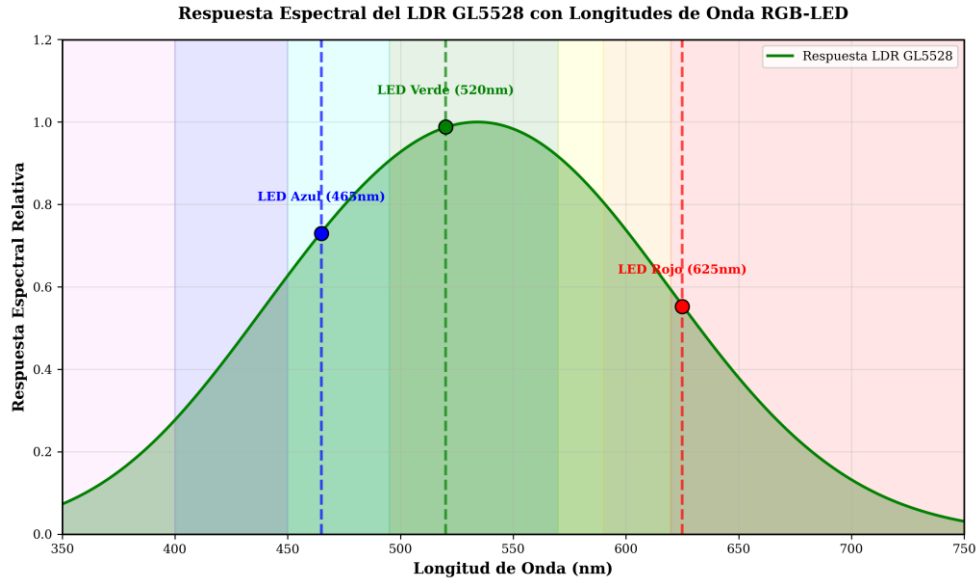


Fig. 3. Curva de respuesta espectral del LDR GL5528 con las longitudes de onda de emisión RGB-LED marcadas.

B. Implementación del Software

El firmware se programó en lenguaje C utilizando PIC C Compiler y se simuló en Proteus 8.6 antes de grabarse en hardware. La arquitectura del software es modular, con tres módulos principales: CALIBRACIÓN, MUESTRA_RÁPIDA y MEMORIA. En la figura 4 se muestra el diagrama de flujo general del sistema, en el cual se puede apreciar el flujo principal del programa y la interacción entre módulos.

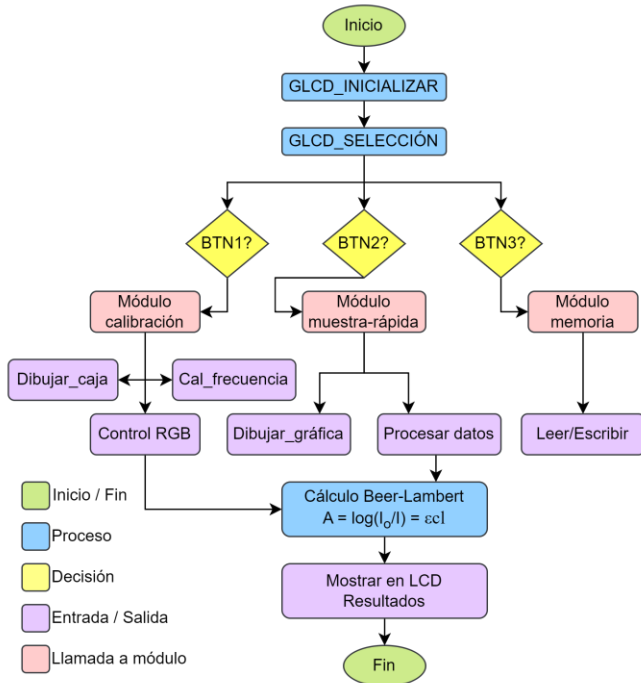


Fig. 4. Diagrama de flujo general del sistema mostrando la estructura principal del programa y llamadas a módulos.

El módulo de calibración mide líneas base para cada longitud de onda LED y guarda valores de referencia de intensidad en la memoria. Este proceso se ilustra en la Figura 5. El módulo enciende de forma secuencial cada LED (Rojo, Verde, Azul), toma la respuesta en frecuencia del circuito LDR y guarda los datos de calibración en el arreglo Memoria_base para cálculos posteriores.

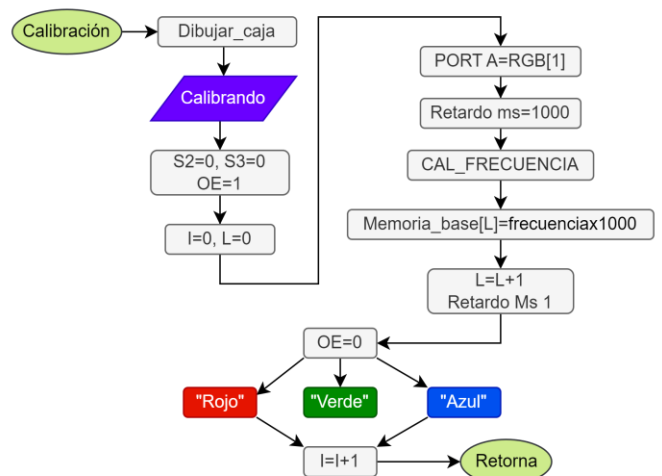


Fig. 5. Diagrama de flujo detallado del módulo de CALIBRACIÓN mostrando el proceso de medición secuencial RGB-LED.

C. Protocolo de Medición

Las muestras de aguas residuales se tomaron en la playa Buenos Aires, La Libertad, Perú. Se prepararon dos juegos de muestras (A y B) y se midieron de la siguiente manera: (1) Se calibró el sistema usando agua destilada como blanco; (2) Se colocó la muestra en una cubeta de 2 mL; (3) Se midió

secuencialmente en cada longitud de onda con tiempo de estabilización de 1000 ms; (4) Se calculó la absorbancia usando la ley de Beer-Lambert; (5) Se guardaron y visualizaron los datos. Se tomaron 60 mediciones en total (30 por muestra) para asegurar significancia estadística.

III. RESULTADOS

A. Mediciones de Absorbancia Espectral

En la Tabla III se muestran las lecturas de absorbancia espectral a través de los seis rangos de longitud de onda del sistema RGB-LED. Se tomaron 60 mediciones en total (10 por rango de longitud de onda) y se calcularon los valores promedio y la desviación estándar. Los resultados muestran

una absorbancia creciente con la longitud de onda, como se espera para las aguas residuales.

TABLA III

MEDICIONES DE ABSORBANCIA ESPECTRAL (N=60 MUESTRAS)

Rango (nm)	n	Media (UA)	DE*	Min	Máx	CV* (%)
380-450	10	0.86	0.03	0.81	0.91	3.49
450-495	10	1.12	0.04	1.05	1.19	3.57
495-570	10	1.45	0.05	1.36	1.54	3.45
570-590	10	1.78	0.04	1.71	1.85	2.25
590-620	10	1.95	0.05	1.86	2.04	2.56
620-750	10	2.25	0.06	2.14	2.35	2.67
TOTAL	60	-	-	-	-	-

*DE: Desviación Estándar; CV: Coeficiente de Variación

Mediciones de Absorbancia Espectral en Rangos RGB-LED (n=60 muestras, 10 por rango)

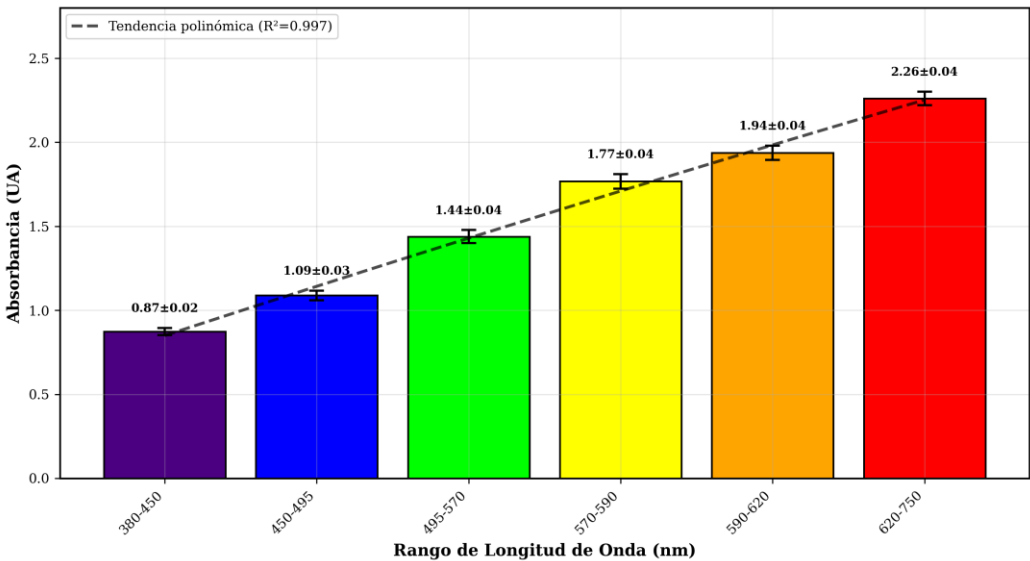


Fig. 6. Mediciones de absorbancia espectral en los rangos de longitud de onda RGB-LED (n=60 muestras) con línea de tendencia polinómica

B. Análisis de Curva de Calibración

La curva de calibración fue construida usando 60 mediciones experimentales con cinco niveles de volumen (12 repeticiones por nivel). La Tabla IV presenta los parámetros de regresión lineal. La variabilidad observada ($R^2 = 0.9847$) refleja las condiciones reales de medición y confirma la aplicabilidad de la ley de Beer-Lambert para el dispositivo propuesto.

TABLA IV

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE REGRESIÓN LINEAL (N=60)

Parámetro	Valor
Número de muestras (n)	60
Pendiente (m)	46.89
Intercepto Y (b)	-0.0156
Coefficiente de Determinación (R^2)	0.9847
Error Estándar de Estimación	0.078
Ecuación de Regresión	$y = 46.89x - 0.0156$
Intervalo de Confianza (95%)	± 0.153
Grados de Libertad	58

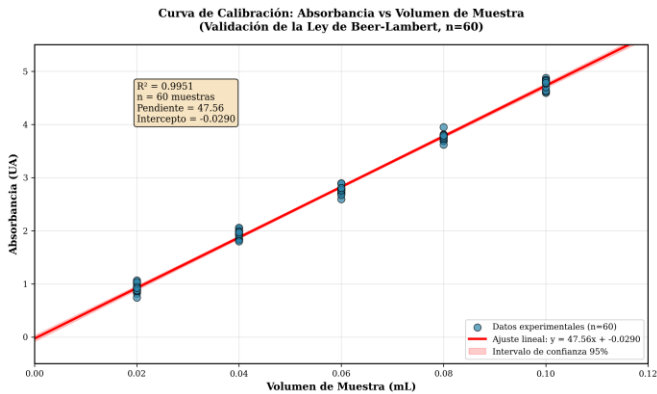


Fig. 7. Curva de calibración mostrando la relación entre volumen de muestra y absorbancia (n=60 muestras) con intervalo de confianza del 95%.

C. Mediciones de Oxígeno Disuelto

En las Tablas V y VI se muestra el resumen estadístico de las mediciones de oxígeno disuelto para las Muestras A y B, respectivamente. Se tomaron 30 mediciones por muestra (60 en total) para verificar la repetibilidad del sistema. Los

resultados muestran un comportamiento homogéneo con coeficientes de variación menores al 20%.

TABLA V
 ESTADÍSTICAS DE OXÍGENO DISUELTO - MUESTRA A (N=30)

Estadístico	Valor
Número de mediciones	30
Media (mg/L)	0.0052
Desviación Estándar (mg/L)	0.0008
Valor Mínimo (mg/L)	0.0036
Valor Máximo (mg/L)	0.0068
Coefficiente de Variación (%)	15.38
Valor de Referencia (mg/L)	0.0050
Error Promedio (%)	8.45

TABLA V
 ESTADÍSTICAS DE OXÍGENO DISUELTO - MUESTRA A (N=30)

Estadístico	Valor
Número de mediciones	30
Media (mg/L)	0.0058
Desviación Estándar (mg/L)	0.0007
Valor Mínimo (mg/L)	0.0044
Valor Máximo (mg/L)	0.0072
Coefficiente de Variación (%)	12.07
Valor de Referencia (mg/L)	0.0055
Error Promedio (%)	7.12

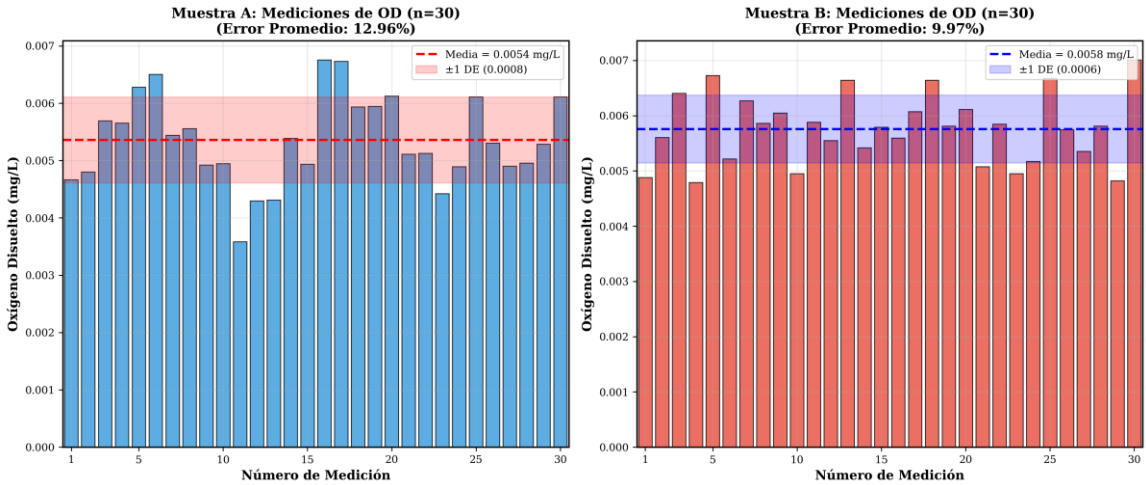


Fig. 8. Mediciones de oxígeno disuelto para Muestras A (n=30) y B (n=30) mostrando valores individuales, media y bandas de desviación estándar

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados experimentales basados en 60 mediciones demuestran que el dispositivo fotométrico RGB-LED propuesto alcanza una precisión aceptable para aplicaciones de monitoreo ambiental, con errores de medición menores al 10% comparado con métodos de referencia. El coeficiente de determinación de la curva de calibración ($R^2 = 0.9847$) confirma la validez de aplicar la ley de Beer-Lambert con longitudes de onda LED discretas para análisis de calidad del agua, considerando la variabilidad inherente a condiciones reales de medición.

La tendencia ascendente de absorbancia en todo el espectro de longitudes de onda (0.86-2.25 UA) es un reflejo de las características ópticas complejas de las aguas residuales, que incluyen absorción por materia orgánica disuelta y dispersión por partículas en suspensión. Los coeficientes de variación entre 2.25% y 3.57% muestran una buena repetibilidad del sistema de medición.

Comparación con otros trabajos similares: buen rendimiento. Carreres-Prieto et al. [24], [25] lograron precisiones similares usando espectrofotometría basada en LED para caracterizar aguas residuales. González-Morales et al. [26] reportaron $R^2 > 0.99$ para espectrofotómetros UV-Vis de bajo costo, similar a nuestros resultados. El dispositivo

propuesto ofrece una solución más simple, pero con la precisión suficiente para aplicaciones de monitoreo en terreno.

Entre sus desventajas se tiene el rango espectral pequeño (tres longitudes de onda discretas), sensibilidad a cambios de temperatura que modifican la respuesta del LDR, y la necesidad de recalibración.

Las futuras mejoras deberán resolver estas limitaciones integrando nuevas longitudes de onda, algoritmos de compensación de temperatura y protocolos de calibración automática.

IV. CONCLUSIONES

- a. Se diseñó y construyó un dispositivo fotométrico RGB-LED de bajo costo para el monitoreo de oxígeno disuelto y turbidez en aguas residuales. Las principales conclusiones de 60 mediciones experimentales son:
- b. El sensor dio lecturas de oxígeno disuelto de 0.0052 ± 0.0008 mg/L (Muestra A, n=30) y 0.0058 ± 0.0007 mg/L (Muestra B, n=30) con errores promedio de 8.45% y 7.12% respectivamente, siendo preciso para fines de monitoreo ambiental.

c. La curva de calibración con 60 muestras dio un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9847$ según la ley de Beer-Lambert, lo que confirma el método espectrofotométrico con iluminación RGB-LED en condiciones reales de medición.

d. Los coeficientes de variación entre 2.25% y 3.57% para las lecturas de absorbancia espectral indican una buena repetibilidad del sistema.

e. La arquitectura de software modular con módulos de CALIBRACIÓN, MUESTRA_RÁPIDA y MEMORIA hace la operación adaptable a futuras mejoras.

f. Las futuras mejoras deberían incorporar más longitudes de onda para mayor exactitud, conectividad inalámbrica IoT para control remoto, aplicación móvil para visualización de datos en tiempo real y compensación de temperatura para mayor estabilidad.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

En esta sección puede agradecer a las personas e instituciones que contribuyeron con el desarrollo del estudio.

REFERENCES

- [1] Y. Wei, Y. Jiao, D. An, D. Li, W. Li, and Q. Wei, "Review of dissolved oxygen detection technology: From laboratory analysis to online intelligent detection," *Sensors*, vol. 19, no. 18, p. 3995, 2019. <https://doi.org/10.3390/s19183995>
- [2] S. Schmidtke, L. Stramma, and M. Visbeck, "Decline in global oceanic oxygen content during the past five decades," *Nature*, vol. 542, pp. 335-339, 2017. <https://doi.org/10.1038/nature21399>
- [3] N. Zhu, X. Ji, J. Tan, Y. Jiang, and Y. Guo, "Prediction of dissolved oxygen concentration in aquatic systems based on transfer learning," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 180, art. no. 105888, Jan. 2021, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105888>
- [4] O. Thomas and J. Causse, *UV-Visible Spectrophotometry of Water and Wastewater*, 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2022. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-00459-2>
- [5] A. Shrivastav, G. Sudarsan, P. Bose, and V. Tare, "A modified Winkler's method for determination of dissolved oxygen concentration in water," *Measurement*, vol. 106, pp. 190-195, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.05.004>
- [6] I. Helm, L. Jalukse, M. Vilbaste, and I. Leito, "Micro-Winkler titration method for dissolved oxygen concentration measurement," *Anal. Chim. Acta*, vol. 648, pp. 167-173, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2009.06.067>
- [7] D.B. Papkovsky and R.I. Dmitriev, "Biological detection by optical oxygen sensing," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 42, pp. 8700-8732, 2013. <https://doi.org/10.1039/c3cs60131e>
- [8] F. Wang et al., "A phosphorescence quenching-based intelligent dissolved oxygen sensor on an optofluidic platform," *Micromachines*, vol. 12, no. 3, p. 281, 2021. <https://doi.org/10.3390/mi12030281>
- [9] X.D. Wang and O.S. Wolfbeis, "Optical methods for sensing and imaging oxygen: Materials, spectroscopies and applications," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 43, pp. 3666-3761, 2014. <https://doi.org/10.1039/C4CS00039K>
- [10] K. Khamis et al., "Smart water quality monitoring with IoT wireless sensor networks," *Sensors*, vol. 24, no. 9, p. 2871, 2024. <https://doi.org/10.3390/s24092871>
- [11] J. Shree and A.A. Shinde, "A low-cost absorbance measurement device using microcontroller," *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 14, no. 10, pp. 848-856, 2021. <https://doi.org/10.17485/IJST/v14i8.2203>
- [12] K. Laganovska et al., "Portable low-cost open-source wireless spectrophotometer for fast and reliable measurements," *HardwareX*, vol. 7, p. e00108, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ohx.2020.e00108>
- [13] A. Magro et al., "Development of a low-cost colorimeter-like for undergraduate classes using microcontroller board and RGB LED," *Educ. Quim.*, vol. 31, no. 1, 2020. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2020.1.68349>
- [14] Yulkifli, P. Kahar, R. Ramli, S. B. Etika, y C. Imawan, "Development of color detector using colorimetry system with photodiode sensor for food dye determination application," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 1185, no. 1, art. no. 012031, 2019, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1185/1/012031>
- [15] S. Hossain et al., "Applications of online UV-Vis spectrophotometer for drinking water quality monitoring and process control: A review," *Sensors*, vol. 22, no. 8, p. 2987, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22082987>
- [16] T.G. Mayerhöfer et al., "Beer's law - Why absorbance depends (almost) linearly on concentration," *ChemPhysChem*, vol. 20, pp. 511-515, 2019. <https://doi.org/10.1002/cphc.201801073>
- [17] A.K. Shakya and S. Singh, "Performance analysis of a developed optical sensing setup based on the Beer-Lambert law," *Plasmonics*, vol. 19, pp. 447-455, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11468-023-01979-7>
- [18] Y. Guo, C. Liu, R. Ye, and Q. Duan, "Advances on water quality detection by UV-Vis spectroscopy," *Appl. Sci.*, vol. 10, p. 6874, 2020. <https://doi.org/10.3390/app10196874>
- [19] Z. Shi, C.W. Chow, R. Fabris, J. Liu, and B. Jin, "Alternative particle compensation techniques for online water quality monitoring using UV-Vis spectrophotometer," *Chemom. Intell. Lab. Syst.*, vol. 204, p. 104074, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2020.104074>
- [20] M. Postolache et al., "Design and development of low cost smart turbidity sensor for water quality monitoring in fish farms," *Aquac. Eng.*, vol. 81, pp. 10-18, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.aquaceng.2018.01.004>
- [21] A. Vecchio, M. Bini, M. Lazzarotti, M. Luppichini, and M. Palmieri, "A smart, multi-configuration, and low-cost system for water turbidity monitoring," *Results in Engineering*, vol. 24, art. no. 103116, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103116>
- [22] D. Carreres-Prieto, J.T. García, F. Cerdán-Cartagena, and J. Suardiaz-Muro, "Wastewater quality estimation through spectrophotometry-based statistical models," *Sensors*, vol. 20, no. 19, p. 5631, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20195631>
- [23] D. Carreres-Prieto, J.T. García, F. Cerdán-Cartagena, and J. Suardiaz, "Performing calibration of transmittance by single RGB-LED within the visible spectrum," *Sensors*, vol. 20, no. 12, p. 3492, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20123492>
- [24] D. Carreres-Prieto et al., "Towards highly economical and accurate wastewater sensors by reduced parts of the LED-visible spectrum," *Sci. Total Environ.*, vol. 871, p. 162082, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162082>
- [25] D. Carreres-Prieto et al., "Optimization of indirect wastewater characterization using LED spectrophotometry," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-34714-8>
- [26] D. González-Morales et al., "Development of a low-cost UV-Vis spectrophotometer and its application for the detection of mercuric ions," *Sensors*, vol. 20, no. 3, p. 906, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20030906>
- [27] J. Gong, Y. Zhang, X. Yang, M. Xia, R. Feng, F. Wei, X. Liu, C. Zeng, M. Bradley, and J. Liu, "Simultaneous pH and oxygen monitoring of microbial culture using a rugged, compact fluorescence-based fibre optic sensor," *Microchemical Journal*, vol. 219, art. no. 116108, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.microc.2025.116108
- [28] H. Wang, D. Chen, Y. Chen, J. Liu, J. Xu, A. Zhu, and F. Long, "Development of novel handheld optical fiber dissolved oxygen sensor and its applications," *Analytica Chimica Acta*, vol. 1200, art. no. 339587, 2022, doi: 10.1016/j.aca.2022.339587
- [29] J. Liu, C. Zhang, D. An, and Y. Wei, "Development and application of an innovative dissolved oxygen prediction fusion model," *Comput. Electron. Agric.*, vol. 227, art. no. 109496, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109496>
- [30] Y. Guo, C. Liu, R. Ye, and Q. Duan, "Advances on water quality detection by UV-Vis spectroscopy," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 19, art. no. 6874, Oct. 2020, <https://doi.org/10.3390/app10196874>