ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.**1-14**

Diseño y validación de un reactor fotocatalítico modular para la evaluación experimental de procesos fotocatalíticos bajo irradiación UV–visible

Miguel Angel Guzmán Altamirano[1]; Estrella Abigail Castro García; Javier Gustavo Cabal Velarde[1]; Marcos Jesus Villaseñor Aguilar[1]; María Guadalupe Gómez Espinoza[2]

[1]Departamento de Ingeniería Mecatrónica, Tecnológico Nacional de México/ITS Irapuato, Guanajuato, México. [2]Universidad Politécnica de Pénjamo, Guanajuato, México.

Resumen

El agua es un recurso vital que enfrenta desafíos asociados a la contaminación por colorantes utilizados en las industrias textil y alimentaria, los cuales alteran su calidad y representan riesgos para la salud y el medio ambiente. Una alternativa para su tratamiento es la fotocatálisis, proceso que emplea radiación y materiales fotoactivos para promover la transformación de compuestos orgánicos.

En este trabajo se presenta el diseño, desarrollo y validación de un reactor fotocatalítico de laboratorio orientado al control de parámetros experimentales como la irradiancia, el tiempo de reacción y la temperatura. El sistema permite la operación simultánea de tres reactores independientes, cada uno con agitación y muestreo automatizado, integrados en un gabinete que favorece una distribución homogénea de la irradiancia y la estabilidad térmica. Asimismo, incorpora un sistema de control embebido basado en un microcontrolador ATmega4809, con comunicación mediante protocolo Modbus RTU y supervisión a través de una interfaz HMI industrial.

La validación experimental se realizó empleando negro de eriocromo (Eriochrome Black T, EBT) como compuesto modelo y nanopartículas de plata como fotocatalizador bajo irradiación ultravioleta. La respuesta del sistema se evaluó mediante espectroscopía UV–Vis, analizando la región visible comprendida entre 450 y 700 nm. El análisis cuantitativo, basado en la disminución relativa del área corregida de la banda de absorción respecto al control, mostró reducciones entre **6.5% y 17.9%**, dependiendo de la concentración del fotocatalizador, evidenciando una respuesta espectral consistente

bajo las condiciones de operación evaluadas.

Los resultados obtenidos demuestran que el sistema desarrollado constituye una plataforma experimental adecuada para la evaluación comparativa de procesos fotocatalíticos bajo condiciones controladas de irradiación ultravioleta, facilitando el estudio de materiales fotocatalíticos y su aplicación potencial en el tratamiento de contaminantes en fase acuosa.

Palabras clave: agua, reactor fotocatalítico, irradiación ultravioleta, automatización, espectroscopía UV–Vis, negro de eriocromo.

Abstract

Water is an essential resource facing challenges associated with contamination by dyes used in the textile and food industries, which alter water quality and pose risks to human health and the environment. Photocatalysis is an alternative for water treatment that uses radiation and photoactive materials to promote the transformation of organic compounds.

This work presents the design, development, and validation of a laboratory-scale photocatalytic reactor aimed at controlling experimental parameters such as irradiance, reaction time, and temperature. The system

Recibido: 06 de marzo de 2026. Aceptado: 18 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.**2-14**

allows the simultaneous operation of three independent reactors, each equipped with automated stirring and sampling, integrated into an enclosure that promotes a uniform irradiance distribution and thermal stability. In addition, the system incorporates an embedded control architecture based on an ATmega4809 microcontroller, with Modbus RTU communication and supervision through an industrial Human–Machine Interface (HMI).

Experimental validation was carried out using Eriochrome Black T as a model compound and silver nanoparticles as the photocatalyst under ultraviolet irradiation. The system response was evaluated by UV–Vis spectroscopy through analysis of the visible region between 450 and 700 nm. Quantitative analysis, based on the relative reduction of the baseline-corrected absorption band area with respect to the control sample, showed decreases ranging from **6.5% to 17.9%**, depending on the photocatalyst concentration, demonstrating a consistent spectral response under the evaluated operating conditions.

The obtained results demonstrate that the developed system constitutes an appropriate experimental platform for the comparative evaluation of photocatalytic processes under controlled ultraviolet irradiation, facilitating the study of photocatalytic materials and their potential application in the treatment of contaminants in the aqueous phase.

Keywords: water, photocatalytic reactor, ultraviolet irradiation, automation, UV–Vis spectroscopy, Eriochrome Black T.

Introducción

El acceso y la gestión sostenible del agua constituyen desafíos prioritarios a nivel mundial en un contexto de crecimiento poblacional, urbanización acelerada y cambio climático. De acuerdo con el *UN World Water Development Report 2024*, la agricultura representa aproximadamente el 70 % de las extracciones mundiales de agua dulce, seguida por la industria (20 %) y el uso doméstico (10 %), mientras que la demanda global de agua continúa incrementándose a una tasa cercana al 1 % anual (UNESCO & UN-Water, 2024). En México, el 67.8 % del recurso hídrico se destina al sector agropecuario, seguido del uso urbano (14.7 %) y de otras aplicaciones industriales y energéticas (CONAGUA, 2023). Sin embargo, una proporción importante de este recurso se desperdicia debido a sistemas de riego ineficientes y procesos industriales con bajo aprovechamiento hídrico.

Entre las actividades industriales con mayor demanda hídrica destaca la industria textil, la cual puede requerir hasta 200 toneladas de agua por cada tonelada de tejido producido (Niinimäki et al., 2020). Además de su elevado consumo de agua, este sector genera efluentes con altas concentraciones de colorantes azoicos (CA), compuestos persistentes con efectos mutagénicos y carcinogénicos. Se estima que entre el 20 % y el 50 % de estos colorantes no se fijan a las fibras durante el proceso de teñido, siendo descargados en los efluentes industriales y contribuyendo a la contaminación de cuerpos de agua (Ajaz et al., 2020; Saratale et al., 2011). A pesar de su impacto ambiental, únicamente alrededor del 20 % de las aguas residuales provenientes de la industria textil recibe un tratamiento adecuado antes de su descarga (Feng et al., 2018).

El tratamiento de los efluentes se realiza en tres etapas: (i) una primaria de remoción física de sólidos, (ii) una secundaria con procesos biológicos y fisicoquímicos, y (iii) una terciaria que incorpora tecnologías avanzadas como la fotocatálisis heterogénea (Fujishima et al., 2000; Rubio et al., 2002). En este proceso, las nanopartículas semiconductoras como

Recibido: 06 de marzo de 2026. Aceptado: 18 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.**3-14**

TiO_2, ZnO generan radicales oxidantes altamente reactivos bajo irradiación, capaces de mineralizar contaminantes orgánicos hasta convertirlos en productos inocuos (Jakimińska et al., 2022; Naffeti et al., 2023).

Estas partículas se destacan por su estabilidad, bajo costo y alta eficiencia bajo luz UV (Fujishima et al., 2000; Gaya & Abdullah, 2008). Además, la incorporación de nanopartículas metálicas (Ag, Au, Fe) amplía la actividad fotocatalítica al espectro visible y mejora la separación de cargas, optimizando así la eficiencia global del proceso (Nageswara Rao et al., 2021). Actualmente, se han desarrollado arquitecturas fotocatalíticas híbridas, como ZnO@Ag, Ag@AgCl o sistemas basados en óxidos mixtos (NiO/CuO), las cuales han mostrado una mejora significativa en la eficiencia de degradación de colorantes bajo irradiación visible. En particular, se han reportado conversiones superiores al 90 % bajo condiciones controladas de operación, lo que se atribuye a una mejor separación de pares electrón–hueco y a la extensión de la absorción óptica hacia el espectro visible (Gao et al., 2022).

Asimismo, la síntesis verde de nanopartículas a partir de extractos vegetales ha emergido como una alternativa sostenible para la obtención de materiales fotocatalíticos, al reducir el uso de agentes químicos agresivos y condiciones de síntesis energéticamente demandantes. En este contexto, el desarrollo de arquitecturas híbridas y sistemas soportados —como estructuras tipo núcleo–coraza— ha permitido mejorar la estabilidad, reutilización y eficiencia fotocatalítica de estos materiales. Los catalizadores de tercera generación, en los que las nanopartículas se encuentran soportadas sobre matrices sólidas, representan una evolución de este enfoque al favorecer un mejor desempeño fotocatalítico y facilitar su recuperación y reutilización. Entre ellos, los materiales basados en AgCl han demostrado una alta eficiencia en la degradación de contaminantes, incluyendo tetraciclina y colorantes textiles, bajo irradiación visible, lo que evidencia su potencial para aplicaciones en el tratamiento de aguas residuales (Gao et al., 2022, 2023).

Sin embargo, la transferencia tecnológica de la fotocatálisis desde el laboratorio hacia sistemas experimentales reproducibles y comparables sigue siendo un reto. En numerosos estudios, las pruebas se realizan en configuraciones simples (como matraces expuestos a lámparas UV o radiación solar) con control limitado sobre parámetros como irradiancia incidente, temperatura del medio, agitación y muestreo periódico, lo que limita el control de las condiciones experimentales y dificulta la optimización del proceso (Enesca, 2021; Ran et al., 2023). Frente a ello, el diseño de reactores fotocatalíticos modulares automatizados se ha convertido en una estrategia esencial para generar resultados que faciliten el escalamiento tecnológico (Athanasiou et al., 2016; Wang et al., 2021).

A pesar de los avances alcanzados en el desarrollo de materiales fotocatalíticos, la reproducibilidad experimental continúa siendo uno de los principales desafíos para la comparación objetiva de su desempeño. En numerosos estudios, las configuraciones empleadas presentan limitaciones en el control de variables críticas como la irradiancia, la temperatura, la agitación y el muestreo, lo que conduce a una alta variabilidad en los resultados y dificulta su reproducibilidad. En consecuencia, persiste una brecha en el desarrollo de plataformas experimentales que permitan evaluar procesos fotocatalíticos bajo

Recibido: 06 de marzo de 2026. Aceptado: 18 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.**4-14**

condiciones estandarizadas y reproducibles, limitando la comparación entre estudios y su eventual escalamiento.

En este contexto, el desarrollo de sistemas experimentales capaces de establecer condiciones de operación controladas resulta fundamental para el estudio sistemático de procesos fotocatalíticos. En este trabajo se presenta el diseño, desarrollo y validación de un reactor fotocatalítico modular de laboratorio orientado al control de variables críticas del proceso bajo condiciones reproducibles. El sistema propuesto proporciona una plataforma experimental para la evaluación comparativa de procesos fotocatalíticos mediante el control de la irradiancia, la temperatura, la agitación y el tiempo de reacción, favoreciendo la reproducibilidad de los ensayos y la comparación entre diferentes condiciones experimentales, en concordancia con enfoques reportados en la literatura (Ran et al., 2023; Valadés-Pelayo et al., 2015; Visan et al., 2019).

Fundamentos teóricos

La fotocatálisis heterogénea es un proceso avanzado de oxidación para la degradación de contaminantes orgánicos persistentes en el agua, al aprovechar la energía de la luz para activar materiales semiconductores capaces de generar especies químicas altamente reactivas. Cuando semiconductores como el dióxido de titanio (TiO_2), el óxido de zinc (ZnO) y cloruro de plata (AgCl) son irradiados con fotones cuya energía supera la de su banda prohibida, se generan pares electrón-hueco que reaccionan con moléculas de agua y oxígeno disuelto, produciendo radicales hidroxilo y aniones superóxido. Estas especies oxidantes transforman compuestos complejos en productos de menor impacto ambiental como dióxido de carbono y agua, lo que convierte a la fotocatálisis en una alternativa viable para el tratamiento de aguas residuales industriales (Fujishima et al., 2000; Gaya & Abdullah, 2008). Sin embargo, la eficiencia del proceso no depende únicamente de las propiedades del material catalítico. El diseño geométrico del reactor fotocatalítico desempeña un papel importante en la eficiencia del proceso, ya que condiciona parámetros como la relación superficie–volumen, la profundidad óptica del medio reactivo y la distribución espacial de la irradiancia. Estas variables condicionan el transporte de fotones, la generación de especies reactivas de oxígeno (ERO) y la cinética de las reacciones fotoinducidas (Gao et al., 2023).

Uno de los criterios fundamentales de diseño es la relación superficie–volumen (A/V), la cual influye en el flujo fotónico disponible por unidad de volumen reactivo. Esta relación puede expresarse matemáticamente como:

$$\Phi_v = \frac{IA}{V} \quad (1)$$

donde Φ_v es el flujo fotónico volumétrico (fotones·s^{-1}·m^{-3}), I la irradiancia incidente (W·m^{-2}), A el área iluminada (m^2) y V el volumen efectivo del reactor (m^3). Un valor elevado de A/V favorece una mayor interacción entre la radiación incidente y la fase reactiva, incrementando así la eficiencia del proceso fotocatalítico.

La profundidad óptica controla la penetración de la radiación a través de la solución. Este fenómeno se describe mediante la ley de Beer–Lambert:

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \quad (2)$$

donde $I(x)$ es la intensidad de radiación a una profundidad x, I_0 la intensidad incidente inicial y α el coeficiente de absorción del medio (m^{-1}). La selección adecuada de la profundidad óptica maximiza el aprovechamiento de la radiación, evitando tanto la

Recibido: 06 de marzo de 2026. Aceptado: 18 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.**5-14**

absorción superficial excesiva como la atenuación prematura en el volumen.

La irradiancia incidente constituye uno de los parámetros más influyentes en la formación de ERO. Se define como la potencia radiante por unidad de área:

$$I = \frac{P_{opt}}{A} \qquad (3)$$

donde I es la irradiancia incidente y P_{opt} representa la potencia óptica efectiva emitida por la fuente de radiación. En sistemas fotocatalíticos se emplean comúnmente emisores LED en el rango visible y ultravioleta, cuya potencia efectiva depende de la eficiencia cuántica de conversión y del control de corriente aplicado (Chatterjee & Dasgupta, 2005).

Además, el flujo fotónico total disponible puede relacionarse con la energía de los fotones emitidos mediante:

$$\Phi = \frac{P_{opt}}{h\nu} = \frac{P_{opt}\lambda}{hc} \qquad (4)$$

donde Φ es el flujo fotónico (fotones·s^{-1}), h la constante de Planck, ν la frecuencia de la radiación, λ la longitud de onda y c la velocidad de la luz. Esta relación permite estimar el número de fotones incidentes sobre la superficie catalítica, parámetro asociado con la velocidad de generación de radicales reactivos.

Finalmente, la influencia de la irradiancia en la cinética del proceso puede aproximarse mediante una relación de tipo potencia:

$$r = kI^n \qquad (5)$$

donde r es la velocidad de reacción fotocatalítica, k la constante cinética aparente y n el orden aparente respecto a la irradiancia (generalmente entre 0.5 y 1). Esta expresión muestra que, a bajas intensidades, la velocidad aumenta con I, mientras que a intensidades elevadas puede observarse una tendencia a la saturación.

El diseño hidráulico también desempeña un papel clave en el rendimiento del sistema. Un parámetro fundamental en este aspecto es el tiempo de residencia hidráulica (TRH), entendido como el período promedio que el fluido permanece dentro del reactor antes de salir, el cual se obtiene al dividir el volumen útil del reactor entre el caudal de alimentación. En sistemas con flujo continuo, mantener este valor en el rango de 30 a 60 minutos asegura que la solución permanezca el tiempo suficiente en contacto con el fotocatalizador y la radiación incidente, optimizando así las reacciones fotoquímicas.

En condiciones estáticas —cuando el volumen permanece confinado dentro del reactor sin renovación continua— este concepto se interpreta como tiempo de retención o exposición, es decir, el lapso total durante el cual el medio líquido está sometido a la acción conjunta del catalizador y la irradiación. Bajo este enfoque, un periodo de exposición equivalente al rango mencionado permite alcanzar conversiones superiores al 80 % en la degradación de colorantes modelo, como azul de metileno o rodamina B. Esta relación temporal responde al comportamiento cinético característico de la fotocatálisis, que en la mayoría de los casos sigue un modelo de pseudo-primer orden, descrito por la expresión

$$ln(\frac{C_0}{C}) = k_{app}t \qquad (6)$$

donde C_0 y C representan las concentraciones inicial y final del contaminante, respectivamente.

El control térmico complementa el diseño integral del reactor. Aunque la fotocatálisis es un proceso activado por radiación, la temperatura influye en la movilidad molecular, la adsorción en la superficie del catalizador y la estabilidad estructural del material. Temperaturas inferiores a 20 °C ralentizan las etapas de adsorción, mientras que valores superiores a 50 °C pueden causar

Recibido: 06 de marzo de 2026. Aceptado: 18 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.**6-14**

sinterización o pérdida de actividad. Por ello, el sistema fue diseñado para operar en un rango de 25 a 35 °C, donde se alcanza un equilibrio adecuado entre velocidad de reacción y estabilidad catalítica (Paz, 2010).

Materiales y métodos

Se diseñó y construyó un reactor fotocatalítico que consiste en un gabinete cerrado con dimensiones de 76 cm de ancho, 36 cm de profundidad y 50 cm de altura, con superficies internas de alta reflectividad para maximizar la reutilización del flujo radiante. El sistema fue diseñado para minimizar pérdidas por dispersión, asegurar la uniformidad de iluminación y evitar fugas de radiación al exterior.

El recinto tiene un volumen útil individual (en tres posiciones internas) entre 1.0 y 1.2 L, lo que permite trabajar con volúmenes totales de 3.0 a 3.6 L. La profundidad óptica se estableció entre 3 y 5 cm conforme a la ley de Beer–Lambert, lo que garantiza la penetración efectiva de la luz aun en medios con turbidez moderada, maximizando la interacción entre radiación, contaminante y fotocatalizador.

El sistema de iluminación está conformado por cuatro emisores LED dispuestos simétricamente: dos emisores de luz visible y dos emisores ultravioletas (365 nm), cada uno con una potencia nominal de 50 W. Ambos sistemas de iluminación pueden operar de manera independiente según los requerimientos experimentales. La potencia óptica total instalada es de aproximadamente 22–25 W, lo que permite alcanzar irradiancias en el rango de 15 a 45 $mW \cdot cm^{-2}$.

Para caracterizar la distribución de irradiancia dentro del recinto se implementó una simulación fotométrica basada en un modelo lambertiano de emisión, el balance radiométrico de las fuentes y la atenuación según Beer–Lambert. Se obtuvieron mapas tridimensionales de irradiancia y gradientes de intensidad en función de la posición, los cuales mostraron una distribución no completamente homogénea, lo cual es esperado en sistemas con emisores discretos y geometría compleja. Esta información fue utilizada para el diseño de estrategias de compensación cinética.

Con el campo de irradiancia obtenido, se modeló el comportamiento cinético local de la fotocatálisis asumiendo que la velocidad de reacción sigue una ley de potencia respecto a la irradiancia.

El sistema de control fue diseñado a partir de los resultados de la simulación cinética y de irradiancia, integrando estrategias de compensación temporal directamente en la lógica de operación. La interfaz HMI industrial Coolmay TK6070H funciona como unidad maestra en la comunicación Modbus RTU, coordinando un sistema embebido desarrollado sobre un microcontrolador Atmel (Arduino Nano Every) que ejecuta el firmware del reactor.

El controlador cuenta con cuatro salidas digitales a relé destinadas a la conmutación de la iluminación UV y visible, el encendido general de los agitadores y el sistema de enfriamiento de los LED. Además, dispone de cuatro salidas PWM independientes para regular tres bombas peristálticas y el ventilador principal del recinto. Un sensor de temperatura digital proporciona retroalimentación en tiempo real para mantener la operación térmica entre 25 y 35 °C.

El programa de control permite definir secuencias experimentales mediante la HMI, incluyendo etapas iniciales en oscuridad, periodos de irradiación bajo diferentes condiciones espectrales, intervalos de muestreo y tiempos de exposición ajustados según las necesidades de compensación fotónica. De esta forma, el sistema automatiza la operación y permite mantener

Recibido: 06 de marzo de 2026. Aceptado: 18 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.**7-14**

condiciones experimentales controladas y reproducibles.

Para validar el sistema fotocatalítico, se preparó una solución de reserva (stock) de 5000 ppm de nanopartículas de plata (AgNPs), dispersando el material sintetizado en agua ultrapura y sometiéndolo a sonicación durante 15 min para asegurar su homogeneidad. El efecto de las AgNPs se evaluó sobre una solución modelo de EBT a 50 mg/L.

Las muestras se elaboraron mezclando 50 mL de la solución acuosa del colorante con el volumen correspondiente de AgNPs para alcanzar concentraciones de 768, 1024, 1536 y 2048 ppm, además de un control negativo (0 ppm), mediante el método volumétrico directo.

Tras su preparación, cada muestra se introdujo en las celdas reactivas y se sometió a un periodo de adsorción en oscuridad de 30 min para alcanzar el equilibrio contaminante–fotocatalizador. Posteriormente, se aplicó irradiación bajo condiciones controladas de irradiancia, espectro y tiempo, manteniendo agitación constante y monitoreando la temperatura durante el experimento. El análisis de la respuesta espectral se realizó mediante espectrofotometría UV–Vis utilizando un espectrofotómetro Cary 500 (Varian–Agilent Technologies).

Como criterio cuantitativo para la validación del reactor se definió el parámetro **Área Espectral Integrada (AEI)** (*Spectral Integrated Area, SIA*), correspondiente al área bajo la banda de absorción visible del EBT comprendida entre 450 y 700 nm. Previamente al análisis, los espectros se sometieron a una corrección lineal de la línea base con el propósito de minimizar posibles contribuciones asociadas a la deriva instrumental y facilitar la comparación entre muestras (Rinnan et al., 2009). La AEI se obtuvo mediante integración numérica de la absorbancia en función de la longitud de onda:

$$S = \int_{450}^{700} A(\lambda)\, d\,\lambda \qquad (7)$$

donde:

S= Area espectral integrada

A(l)= absorbancia a la longitud de onda

La selección de la AEI como parámetro de evaluación se fundamenta en que considera el comportamiento de la banda completa de absorción del colorante, disminuyendo la influencia de pequeñas variaciones instrumentales, desplazamientos locales del máximo de absorción y fluctuaciones de la línea base, en comparación con análisis basados en una única longitud de onda.

Para comparar el efecto de las diferentes concentraciones de AgNPs, la respuesta espectral se expresó mediante **la Reducción Relativa del Área Espectral Integrada (R-AEI)** respecto a la muestra control (0 ppm), calculada mediante:

$$R - AEI(\%) = \frac{S_O - S_i}{S_O} x100 \qquad (8)$$

donde:

S0 = área integrada del control.

Si = área integrada de la muestra *i*.

Este procedimiento permitió cuantificar la respuesta espectral del sistema y comparar el desempeño del reactor bajo las diferentes condiciones experimentales.

Resultados

En la Figura 1 se muestra un esquema simplificado del reactor fotocatalítico, el cual resume la disposición general de los componentes funcionales para una mayor comprensión de la configuración experimental.

Recibido: 06 de marzo de 2026. Aceptado: 18 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.**8-14**

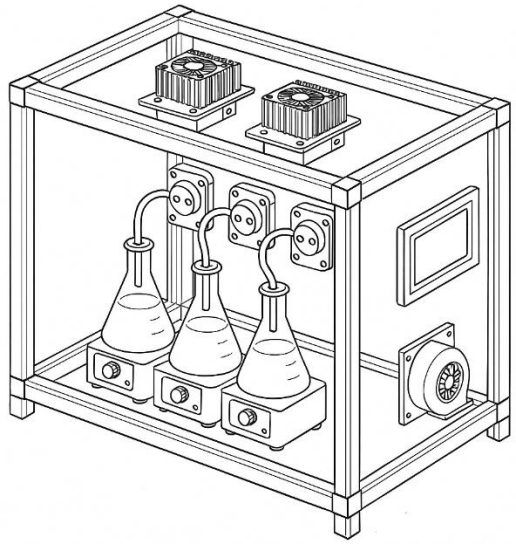
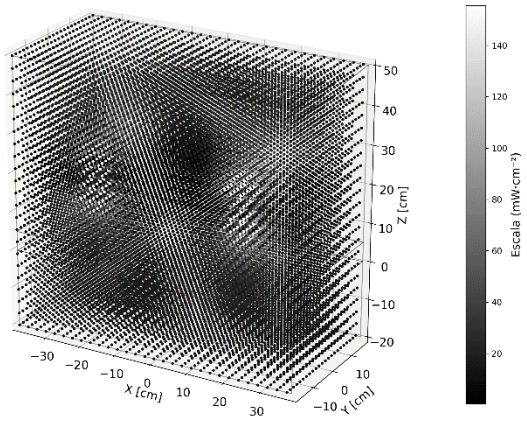


Figura 1. Reactor fotocatalítico.

La simulación tridimensional del campo de irradiancia (Figura 2) permitió analizar la distribución de la densidad de potencia óptica dentro del volumen de reacción del sistema fotocatalítico. En los mapas generados en escala de grises (mW·cm⁻²), correspondientes a luz blanca (Figura 2.a) y luz ultravioleta (Figura 2.b), se observó la formación de gradientes espaciales tanto en el eje vertical como en el plano horizontal.

La irradiancia alcanza valores máximos cercanos a 45 mW·cm⁻² en la zona central del reactor, directamente bajo el eje óptico de los emisores LED. A medida que aumenta la distancia radial y la profundidad del medio, la densidad de potencia disminuye gradualmente hasta valores de 15–20 mW·cm⁻² en regiones periféricas y cercanas al fondo.

(a)



(b)

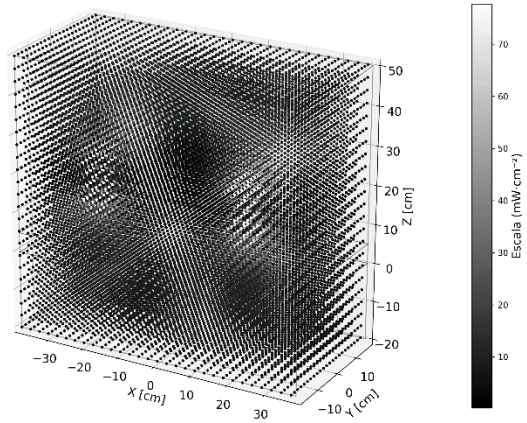


Figura 2. Distribución tridimensional de la irradiancia simulada en el interior del reactor fotocatalítico: (a) iluminación blanca y (b) iluminación UV.

Esta distribución presenta variaciones espaciales asociadas a la geometría del sistema y a la interacción de la radiación con el medio.

Asimismo, la simulación mostró que la orientación de los emisores y la posición de las zonas de reacción influyen en la distribución de irradiancia dentro del volumen del reactor. A pesar del uso de superficies reflectivas, se identifican regiones con menor densidad fotónica en los extremos del sistema.

Recibido: 06 de marzo de 2026. Aceptado: 18 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.**9-14**

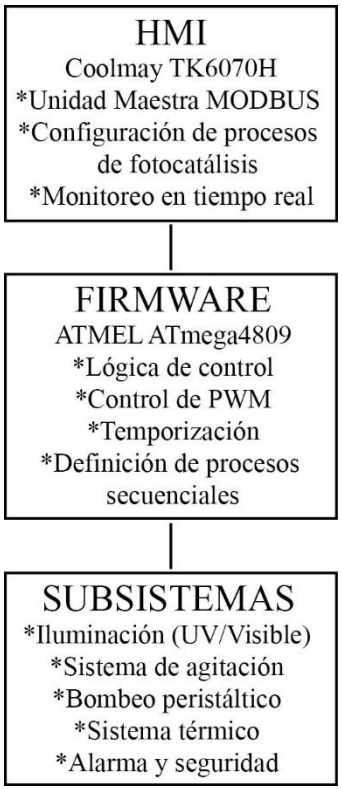


Figura 3. Arquitectura funcional del reactor fotocatalítico.

El sistema de control desarrollado (Figura 3) presentó un funcionamiento estable durante las pruebas de integración, permitiendo la ejecución de secuencias automatizadas bajo condiciones controladas. La arquitectura embebida, basada en un microcontrolador ATmega4809, implementa funciones de operación como RUN, STOP, PAUSE, ALARM y SAFE, así como el control de iluminación, ventilación, agitación y accionamiento de bombas mediante señales PWM.

La comunicación mediante el protocolo Modbus RTU permitió la interacción con la interfaz HMI industrial, desde la cual fue posible configurar parámetros experimentales, monitorear el estado del proceso en tiempo real y gestionar cada etapa de forma secuencial.

La Figura 4 presenta la respuesta espectral del negro de eriocromo en la región visible (450–700 nm), correspondiente a la principal banda de absorción del colorante, donde se registraron las variaciones más representativas entre los tratamientos evaluados. En la Figura 4.a se observa un cambio progresivo en la coloración de las muestras conforme aumenta la concentración de AgNPs, mientras que la Figura 4.b muestra la respuesta espectral obtenida mediante espectrofotometría UV–Vis.

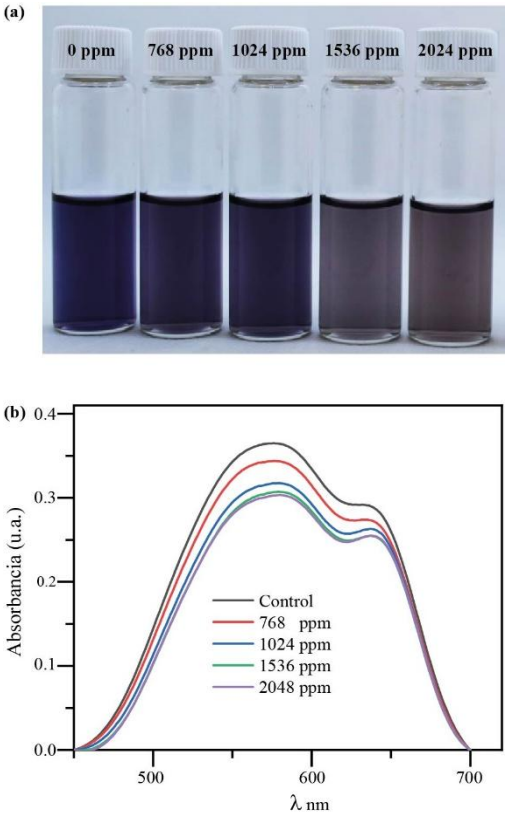


Figura 4. (a) Evidencia visual del efecto fotocatalítico en EBT y (b) su respuesta espectral en el análisis UV-Vis.

Los espectros evidencian una disminución progresiva de la intensidad de la banda de absorción conforme aumenta la concentración del fotocatalizador, mientras que la forma general de la banda permanece prácticamente constante en todo el intervalo analizado.

Los resultados cuantitativos obtenidos mediante el Área Espectral Integrada (AEI) se presentan en la Tabla 1. El área integrada disminuyó de 53.718 para la

Recibido: 06 de marzo de 2026. Aceptado: 18 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.**10-14**

muestra control a 50.207, 46.325, 44.343 y 44.087 para las concentraciones de 768, 1024, 1536 y 2048 ppm, respectivamente.

Tabla 1. AEI y R-AEI obtenidas para las diferentes concentraciones de AgNPs.

Concentración de AgNPs (ppm)	**AEI (450–700 nm)**	**R – AEI (%)**
0 (control)	53.718	0.00
768	50.207	6.54
1024	46.325	13.76
1536	44.343	17.45
2048	44.087	17.93

La tendencia observada se resume en la Figura 5, donde la reducción relativa del AEI con respecto al control fue de 6.54 %, 13.76 %, 17.45 % y 17.93 % para las concentraciones de 768, 1024, 1536 y 2048 ppm, respectivamente.

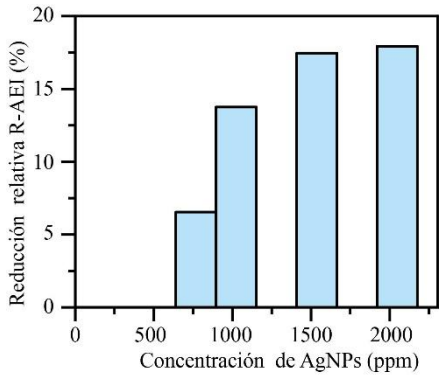


Figura 5. Reducción relativa del Área Espectral Integrada obtenida a partir de la banda de absorción visible (450–700 nm) del EBT.

La disminución gradual de R-AEI evidencia una respuesta espectral consistente conforme aumentó la concentración de AgNPs bajo las condiciones experimentales establecidas.

La concordancia entre la respuesta espectral observada, los valores del Área Espectral Integrada y la reducción relativa obtenida evidencia un comportamiento consistente del sistema experimental durante los ensayos fotocatalíticos.

Estos resultados se analizan a continuación en el contexto del proceso fotocatalítico.

Discusión

La distribución de irradiancia obtenida mediante simulación evidencia la presencia de gradientes espaciales dentro del volumen de reacción, lo cual es característico de sistemas fotocatalíticos que emplean fuentes discretas en geometrías confinadas. Estas no uniformidades en el campo fotónico generan variaciones locales en la velocidad de reacción, afectando la eficiencia global del proceso en regiones con menor densidad de flujo radiante (Valadés-Pelayo et al., 2015; Visan et al., 2019). Este comportamiento es consistente con los perfiles de irradiancia obtenidos en este trabajo, donde se identifican zonas con diferente disponibilidad energética dentro del reactor.

En este sentido, la variación espacial de la irradiancia puede interpretarse a partir de la interacción entre la radiación incidente y el medio reactivo, descrita por la ley de Beer–Lambert, así como por la geometría del sistema y la disposición de las fuentes de iluminación. La atenuación progresiva de la radiación en el volumen del reactor limita la penetración efectiva de fotones, lo que reduce la generación de ERO en zonas alejadas de la fuente y contribuye a la heterogeneidad cinética del proceso.

Respecto a la respuesta espectral, la disminución progresiva de la respuesta espectral del EBT en la región visible fue consistente con el incremento de la concentración de AgNPs. La reducción de la intensidad de la banda de absorción observada en los espectros UV–Vis indica una disminución de la respuesta óptica del colorante durante el tratamiento fotocatalítico, comportamiento que ha sido ampliamente utilizado para evaluar procesos de degradación de colorantes mediante fotocatálisis

Recibido: 06 de marzo de 2026. Aceptado: 18 de junio de 2026. Publicado: 31 de agosto de 2026.

ISSN: 3061-810X
Año 2, Núm. 3, Mayo-Agosto 2026 pp.**11-14**

(Chatterjee & Dasgupta, 2005; Jakimińska et al., 2022).

El análisis mediante AEI permitió cuantificar objetivamente estas variaciones al considerar el comportamiento de toda la banda de absorción visible. A diferencia de los análisis basados únicamente en una longitud de onda, este enfoque integra la respuesta espectral completa del colorante, proporcionando un parámetro más robusto para comparar los tratamientos evaluados. La disminución gradual de la AEI y de su reducción relativa mostró una tendencia consistente conforme aumentó la concentración de AgNPs.

La respuesta espectral observada también evidenció una dependencia con la concentración del fotocatalizador. Conforme aumentó la concentración de AgNPs se registró una disminución progresiva de la R-AEI, lo que indica una mayor modificación de la respuesta espectral del colorante bajo las condiciones experimentales empleadas. Este comportamiento concuerda con estudios que reportan un incremento de la actividad fotocatalítica al aumentar la disponibilidad de sitios activos, hasta alcanzar condiciones en las que otros fenómenos, como la aglomeración de partículas o el sombreado óptico, pueden limitar la eficiencia del proceso (Liu et al., 2019).

La disminución gradual de la AEI observada en este trabajo siguió la misma tendencia que la reducción de la intensidad de la banda visible, indicando que este parámetro constituye un descriptor cuantitativo adecuado para comparar la respuesta espectral entre las diferentes condiciones experimentales evaluadas. La integración de toda la banda de absorción permitió cuantificar la respuesta del sistema de manera más representativa que un análisis basado únicamente en una longitud de onda.

Conclusiones

El reactor fotocatalítico desarrollado permitió establecer condiciones experimentales controladas para la evaluación de procesos fotocatalíticos, integrando el control de la irradiancia, la temperatura y la operación automatizada de los ensayos. La caracterización de la distribución del campo fotónico proporcionó información relevante para interpretar la respuesta del sistema bajo diferentes condiciones de irradiación. La validación experimental mediante el tratamiento del EBT mostró una disminución progresiva de la respuesta espectral en la región visible conforme aumentó la concentración de AgNPs. La incorporación del Área Espectral Integrada (AEI) como parámetro cuantitativo permitió comparar objetivamente la respuesta espectral entre los diferentes tratamientos, proporcionando una metodología de evaluación complementaria para la validación experimental de reactores fotocatalíticos bajo condiciones controladas.

Perspectivas de investigación

Como trabajo futuro, se propone ampliar la validación experimental del reactor mediante la evaluación de diferentes materiales fotocatalíticos y contaminantes modelo, incorporando análisis cinéticos y técnicas complementarias de caracterización que fortalezcan su aplicación en estudios comparativos de procesos fotocatalíticos.

Referencias bibliográficas

1. Ajaz, M., Shakeel, S., & Rehman, A. (2020). Microbial use for azo dye degradation—a strategy for dye bioremediation. *International Microbiology*, *23*(2), 149–159. https://doi.org/10.1007/s10123-019-00103-2
2. Athanasiou, D. A., Romanos, G. E., & Falaras, P. (2016). Design and optimization of

a photocatalytic reactor for water purification combining optical fiber and membrane technologies. *Chemical Engineering Journal*, *305*, 92–103. https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.11.080

3. Chatterjee, D., & Dasgupta, S. (2005). Visible light induced photocatalytic degradation of organic pollutants. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, *6*(2–3), 186–205. https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2005.09.001
4. (CONAGUA), C. N. del A. (2023). *Estadísticas del Agua en México 2023*. Gobierno de México. https://www.gob.mx/conagua
5. Enesca, A. (2021). The Influence of Photocatalytic Reactors Design and Operating Parameters on the Wastewater Organic Pollutants Removal—A Mini-Review. *Catalysts 2021, Vol. 11, Page 556*, *11*(5), 556. https://doi.org/10.3390/catal11050556
6. Feng, M., Wang, Z., Dionysiou, D. D., & Sharma, V. K. (2018). Metal-mediated oxidation of fluoroquinolone antibiotics in water: A review on kinetics, transformation products, and toxicity assessment. *Journal of Hazardous Materials*, *344*, 1136–1154. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.08.067
7. Fujishima, A., Rao, T. N., & Tryk, D. A. (2000). Titanium dioxide photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, *1*(1), 1–21. https://doi.org/10.1016/s1389-5567(00)00002-2
8. Gao, D., Shu, Z., & Huang, X. (2022). Preparation of Ag@AgCl/GO Material with Efficient Visible-Light Photocatalytic Performance. *Mathematical Problems in Engineering*, *2022*(1), 4350784. https://doi.org/10.1155/2022/4350784
9. Gao, D., Yang, H., & Shu, Z. (2023). The preparation of Ag@AgCl photocatalytic material based on the photocatalysis material CA+ and degradation of tetracycline. *Journal of Experimental Nanoscience*, *18*(1). https://doi.org/10.1080/17458080.2022.2162509
10. Gaya, U. I., & Abdullah, A. H. (2008). Heterogeneous photocatalytic degradation of organic contaminants over titanium dioxide: A review of fundamentals, progress and problems. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, *9*(1), 1–12. https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2007.12.003
11. Jakimińska, A., Pawlicki, M., & Macyk, W. (2022). Photocatalytic transformation of Rhodamine B to Rhodamine-110 – The mechanism revisited. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, *433*, 114176. https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2022.114176
12. Liu, Z., Zhou, C., Liu, D., He, T., Guo, L., Xu, D., & Kong, M. G. (2019). Quantifying the concentration and penetration depth of long-lived RONS in plasma-activated water by UV absorption spectroscopy. *AIP*

Advances, *9*(1). https://doi.org/10.1063/1.5037660/1036914

13. Naffeti, M., Zaïbi, M. A., Nefzi, C., García-Arias, A. V., Chtourou, R., & Postigo, P. A. (2023). Highly efficient photodegradation of methylene blue by a composite photocatalyst of bismuth nanoparticles on silicon nanowires. *Environmental Technology & Innovation*, *30*, 103133. https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103133
14. Nageswara Rao, T., Prashanthi, Y., Ahmed, F., Kumar, S., Arshi, N., Rajasekhar Reddy, G., & Manohra Naidu, T. (2021). Photocatalytic Applications of Fe–Ag Co-Doped TiO2 Nanoparticles in Removal of Flumioxazin Pesticide Residues in Water. *Frontiers in Nanotechnology*, *3*, 652364. https://doi.org/10.3389/fnano.2021.652364
15. Niinimäki, K., Peters, G., Dahlbo, H., Perry, P., Rissanen, T., & Gwilt, A. (2020). The environmental price of fast fashion. *Nature Reviews Earth and Environment*, *1*(4), 189–200. https://doi.org/10.1038/s43017-020-0039-9
16. Paz, Y. (2010). Application of TiO2 photocatalysis for air treatment: Patents' overview. *Applied Catalysis B: Environmental*, *99*(3–4), 448–460. https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2010.05.011
17. Ran, J., Wang, X., Liu, Y., Yin, S., Li, S., & Zhang, L. (2023). Microreactor-based micro/nanomaterials: fabrication, advances, and outlook. *Materials Horizons*, *10*(7), 2343–2372. https://doi.org/10.1039/d3mh00329A
18. Rinnan, Å., Berg, F. van den, & Engelsen, S. B. (2009). Review of the most common pre-processing techniques for near-infrared spectra. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, *28*(10), 1201–1222. https://doi.org/10.1016/J.TRAC.2009.07.007
19. Rubio, J., Souza, M. L., & Smith, R. W. (2002). Overview of flotation as a wastewater treatment technique. *Minerals Engineering*, *15*(3), 139–155. https://doi.org/10.1016/s0892-6875(01)00216-3
20. Saratale, R. G., Saratale, G. D., Chang, J. S., & Govindwar, S. P. (2011). Bacterial decolorization and degradation of azo dyes: A review. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, *42*(1), 138–157. https://doi.org/10.1016/j.jtice.2010.06.006
21. UNESCO, & UN-Water. (2024). *United Nations World Water Development Report 2024: Water for Prosperity and Peace*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization. https://www.unesco.org/reports/wwdr/en/2024/
22. Valadés-Pelayo, P. J., Guayaquil Sosa, F., Serrano, B., & de Lasa, H. (2015). Photocatalytic reactor under different external irradiance conditions: Validation of a fully predictive radiation absorption model. *Chemical Engineering Science*, *126*, 42–54. https://doi.org/10.1016/j.ces.2014.12.003
23. Visan, A., Van Ommen, J. R., Kreutzer, M. T., & Lammertink, R. G. H. (2019). Photocatalytic Reactor Design: Guidelines for Kinetic Investigation. *Industrial &*

Engineering Chemistry Research, *58*(14), 5349–5357. https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9B00381

24. Wang, D., Mueses, M. A., Márquez, J. A. C., Machuca-Martínez, F., Grčić, I., Peralta Muniz Moreira, R., & Li Puma, G. (2021). Engineering and modeling perspectives on photocatalytic reactors for water treatment. *Water Research*, *202*, 117421. https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117421