

Diseño y automatización de un fotoreactor UV-C para tratamiento de aguas residuales industriales

Daniela Sanchez Dominguez¹, Martínez García Iván¹, Padilla Ochoa Héctor Emilio¹, Adriana Benítez Rico², Hipólito Aguilar Sierra²

¹Universidad La Salle, Facultad de Ingeniería. Ciudad de México, México.

²Universidad La Salle, Vicerrectoría de Investigación. Ciudad de México, México.

d.sd@lasallistas.org.mx, ivan-martinez@lasallistas.org.mx, hector-padilla@lasallistas.org.mx, adriana.benitez@lasallistas.org.mx, hipolito.aguilar@lasallistas.org.mx

Resumen. La contaminación por aguas residuales genera un problema ambiental de gran relevancia, ya que afecta a los ecosistemas acuáticos y limita la disponibilidad de agua potable. Como alternativa a esta problemática, los procesos de oxidación avanzada, en particular la fotocatálisis con radiación UV-C, se han consolidado como técnicas viables y eficientes, capaces de eliminar contaminantes químicos solubles y microorganismos patógenos presentes en aguas residuales industriales, en etapa de tratamiento secundario. En este trabajo se presenta el diseño y automatización de un fotoreactor UV-C que permite realizar procesos de descontaminación de forma segura, eficiente y escalable. El prototipo desarrollado incluye la automatización del encendido y control de la intensidad de la lámpara UV-C, un sistema de agitación magnética y una bomba peristáltica para la toma de muestras sin exponer al usuario a la radiación. Este trabajo contribuye a la formación académica en áreas de diseño, manufactura, electrónica y programación, y plantea una alternativa de bajo costo para entornos educativos e industriales, con potencial de evolucionar hacia sistemas más robustos mediante tecnologías emergentes.

Palabras Clave: Fotoreactor, aguas residuales industriales, automatización.

1 Descripción de la problemática prioritaria abordada

La contaminación en el agua muchas veces dificulta e incluso imposibilita su reciclado cuando en su mayoría los químicos que son arrojados a los desagües son nocivos para la salud. Esta problemática suele ser común en ríos y presas de agua dulce, por lo que el análisis e investigación por parte de los colaboradores fue esencial para determinar que agentes neutralizan los contaminantes que pueden existir en el agua, para así descontaminarla. Facilitando el reciclaje reduciendo la demanda de agua dulce y mejorando la potabilidad.

La palabra fotoreactor es una conjunción de dos diferentes, “foto” del griego significa luz y “reactor” del latín se utiliza en la ciencia para designar un dispositivo donde ocurren reacciones químicas. Por lo que la palabra “Fotoreactor” significa: “Dispositivo donde ocurren reacciones químicas inducidas por la luz”. En esencia, el proyecto se describe por sí solo con solo la definición de la palabra, sin embargo, es importante señalar el esfuerzo, las aplicaciones y los conocimientos de ingeniería que fueron aplicados para el desarrollo.

El fotoreactor permite experimentar con muestras diferentes de una solución para su descontaminación, monitoreándolas y observando su cambio con el tiempo. Durante el proceso de experimentación del primer modelo solo hay 3 variables a considerar la agitación, el encendido de la luz UV y la toma de muestras de forma manual. Por lo que, observando el proceso, se identificaron las principales mejoras del nuevo fotoreactor. Dado que esta investigación se desarrolla en un entorno académico, no se cuenta con equipos de alta gama. Los recursos disponibles consisten

en instrumentos rústicos que, en algunos casos, ponían en riesgo tanto la integridad del experimento como la seguridad del personal. Por esta razón, surge la necesidad de diseñar un equipo eficiente que permita tomar muestras de manera segura mientras la luz UV está activa, se mantiene una agitación controlada y se automatiza el proceso de recolección de datos.

La investigación se centra en procesos de oxidación avanzada, que incluyen tanto la fotólisis (uso directo de radiación UV-C) como la fotocatálisis (UV-C/TiO₂/SiO₂ u otros catalizadores), procesos capaces de degradar contaminantes orgánicos y desinfectar el agua al eliminar microorganismos.

2 Objetivo

Mejorar el diseño del fotoreactor actual para tratamiento de aguas residuales industriales, controlando la intensidad de luz e implementando una agitación con un motor eléctrico, así como la implementación de una bomba peristáltica para la toma de muestras de forma manual-controlada siendo eficiente para hacer pruebas a mayor escala.

3 Propuesta teórico-metodológica

Esta propuesta tiene como objetivo mejorar progresivamente el diseño del fotoreactor, haciéndolo más funcional, accesible y fácil de fabricar. Se busca resolver los principales problemas del equipo actual mediante soluciones prácticas, creativas, sencillas y de bajo costo.

La carcasa tiene un volumen de 55x30x30 siendo compacto, incluye un ventilador de 9cm de diámetro en la parte posterior para proteger de la luz uv. Al usar una lámpara UV-C maneja una longitud de onda de 200-280 nm, para poder ser controlada se debe asegurar que sea incandescente y para fines de la reacción que sea sumergible.

La primera característica resolver fue el control de la luz UV, ya que se buscaba automatizar su encendido y regular su intensidad. Para lograrlo, fue necesario investigar a fondo el funcionamiento de este tipo de luz, ya que, a diferencia de la luz incandescente o LED que se mide en watts, la luz UV se mide en nanómetros (nm). Existen distintos circuitos para modular la intensidad lumínica, pero muchos están enfocados en tecnologías LED o incandescentes, lo cual no era aplicable directamente en este caso. Como punto de partida, se realizaron pruebas utilizando luz incandescente.

Una vez solucionado el control de la luz UV, se procedió a buscar circuitos específicos para regular la velocidad de un motor de corriente directa (DC), incluyendo la bomba peristáltica, que también opera bajo este principio. Con el fin de programar y coordinar los tres reguladores (luz UV, motor y bomba), se utilizaron módulos de relevadores que permiten enviar las señales al microcontrolador Arduino, centralizando así el control automatizado del sistema.

Entre las mejoras propuestas se encuentran el uso de válvulas automáticas, sensores digitales, una nueva distribución interna del equipo y la incorporación de espejos para optimizar la reflexión de la luz. Todo el sistema será gestionado mediante programación en lenguaje Arduino, lo que permite automatizar funciones clave del proceso. Este enfoque facilita la implementación de mejoras continuas, adaptables y escalables, lo que contribuye a que el prototipo evolucione de manera constante y se convierta en una herramienta más eficaz y versátil.

Complementando la propuesta de mejora se realizó un diseño en 3D de la carcasa para ordenar los componentes del fotoreactor de la manera óptima, reduciendo el tamaño del fotoreactor actual y aumentando la capacidad para experimentar con muestras de manera más eficaz. También al trabajar con mezclas que hace usos materiales ferromagnéticos se realizó el diseño de impresión 3D para el agitador esto evitando que haya alguna perdida o afecte de manera directa a la reacción.

Componentes principales del sistema:

- Lámpara UV-C (200–280 nm).
- Muestra de agua residual industrial (1 L máx.).
- Agitador magnético diseñado en impresión 3D.

- Bomba peristáltica para la toma de muestras sin exposición directa.
- Sensores digitales (ej. MAX6675 para temperatura).
- Sistema electrónico controlado mediante Arduino Mega y módulos de relevadores.
- Carcasa compacta (55×30×30 cm) con ventilación posterior y recubrimiento.

4 Discusión de resultados

Durante la validación del sistema, se logró una lectura estable de temperatura usando el sensor MAX6675, con una resolución de 0.25°C. El control de intensidad de la lámpara UVC, a través de un dimmer activado por relevador, demostró un funcionamiento estable sin interferencia electromagnética. El sistema fue capaz de mostrar el estado de todos los elementos en una LCD 20x4 de manera simultánea, con refresco no invasivo, eliminando parpadeos mediante lógica condicional.

Uno de los cambios más importantes fue agregar un sistema que ayude a la toma de muestras de forma manual-controlada, sin tener la necesidad de abrir el reactor. Esto ayuda a que se pueda evitar que el usuario esté en contacto directo con la luz UV, lo cual puede ser muy peligroso. Gracias a esto, se protege mejor la salud de quien usa el equipo, lo que apoya al cumplimiento del ODS 3: Salud y bienestar.

Para la programación se hace uso de Arduino mega que permite un gran control de varias variables, sin embargo, puede verse corto a largo plazo para un manejo industrial perdiendo eficiencia de lectura de datos al hacer uso constante y prolongado; a pesar de eso para uso académico presenta buenos resultados y útiles.

Se lograron varias mejoras importantes en el equipo, como la incorporación de ventilación, un sensor digital para medir la temperatura, una mejor organización del cableado, que ahora está oculto y protegido, con lo que ayuda a mejorar la apariencia y la seguridad, ya que también facilita el mantenimiento del sistema. Estas soluciones muestran que es posible un avance en la automatización de forma sencilla y con pocos recursos, apoyando el ODS 9: Industria, innovación e infraestructura.

Haciendo pruebas el volumen máximo que puede tratar el sistema es de 1L. La cantidad dependerá de la reacción que se esté llevando con base a su concentración de Ph que se ese analizando. Se maneja agua residual de tipo industrial y es un tratamiento secundario para eliminar contaminantes químicos solubles y estables en agua.

A lo largo de las pruebas se puede decir que se maneja de un presupuesto de 1000-2000 \$ por el manejo de circuito complejo y la parte de manufactura.

Estas mejoras demuestran que es posible avanzar en la automatización de procesos de descontaminación de manera sencilla, con recursos limitados, apoyando el ODS 9: Industria, innovación e infraestructura.

5 Conclusiones y perspectivas futuras

El sistema desarrollado permitió el diseño y automatización de un fotoreactor UV-C funcional para el tratamiento de aguas residuales industriales, asegurando la toma segura de muestras y el control de parámetros críticos.

El prototipo demostró ser estable, replicable y accesible en costo, lo que lo convierte en una herramienta útil para entornos académicos y con potencial de aplicación en laboratorios de investigación aplicada.

Como perspectivas futuras se propone:

- Incorporar una interfaz web o Bluetooth para monitoreo remoto.
- Integrar sensores adicionales (pH, turbidez, conductividad).
- Mejorar el encapsulamiento para ensayos prolongados.
- Analizar la viabilidad de escalar el sistema para aplicaciones industriales.
- Explorar el impacto del proyecto en empleo, comunidades sustentables y cadenas de suministro, generando un ecosistema funcional alrededor de la tecnología.

- Considerar la evolución de plataformas tecnológicas más allá de Arduino, que permitan mayor capacidad de procesamiento y escalabilidad.

6 Agradecimientos

Con especial agradecimiento al Ingeniero Carlos Rodrigo Aguilar Sánchez por su apoyo en el diseño del circuito principal. A los responsables de talleres de ingeniería por su guía en manufactura y electrónica. A la Universidad La Salle México, a la Facultad de Ingeniería y la Vicerrectoría de Investigación, por el respaldo institucional para la realización de este proyecto.

7 Referencias

1. Carbajal-Morán, H., Márquez-Camarena, J. F., & Galván-Maldonado, C. A. (2022). Influence of gold nanoparticles on the photocatalytic action of titanium dioxide in physical-chemical parameters of greywater. *Journal of Ecological Engineering*, 23(1), 182–192. <https://doi.org/10.12911/22998993/143942>
2. Ruiz-Flores, A., García, A., Pineda, A., Brox, M., Gersnoviez, A., & Cañete-Carmona, E. (2023). Low-cost photoreactor to monitor wastewater pollutant decomposition. *Sensors*, 23(2), 775. <https://doi.org/10.3390/s23020775>
3. Collivignarelli, M. C., Abbà, A., Carnevale Miino, M., Caccamo, F. M., Torretta, V., Rada, E. C., & Sorlini, S. (2021). Disinfection of wastewater by UV-based treatment for reuse in a circular economy perspective: Where are we at? *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(1), 77. <https://doi.org/10.3390/ijerph18010077>
4. World Health Organization. (2018). Guidelines on sanitation and health. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/item/9789241514705>
5. Pooi, C. K., & Ng, H. Y. (2018). Review of low-cost point-of-use water treatment systems for developing communities. *NPJ Clean Water*, 1(1), 11. <https://doi.org/10.1038/s41545-018-0011-0>

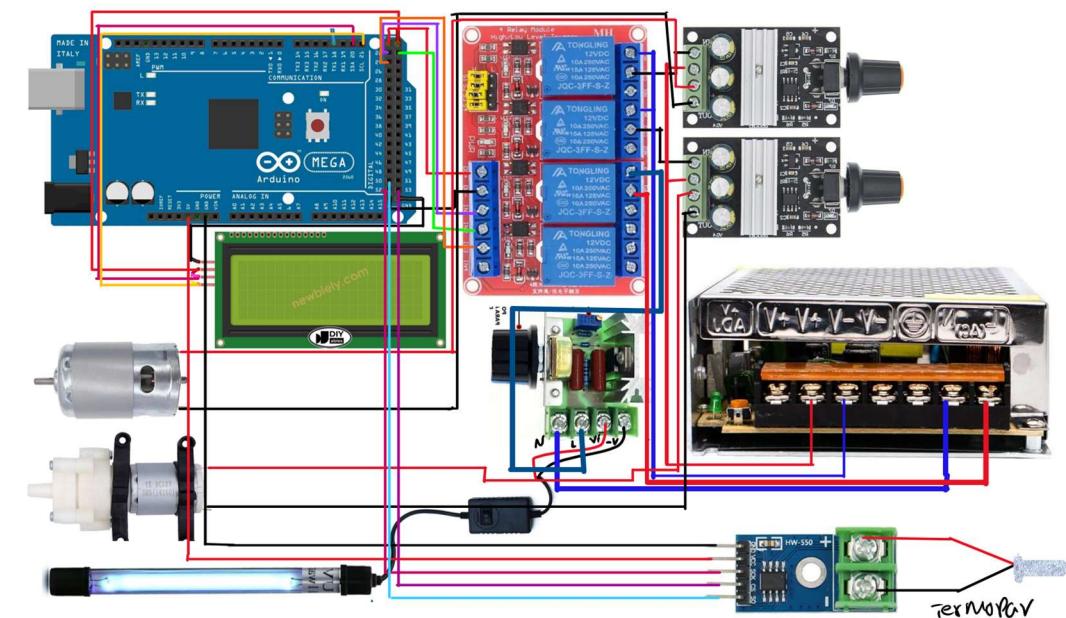


Figura 1. Diagrama de conexiones

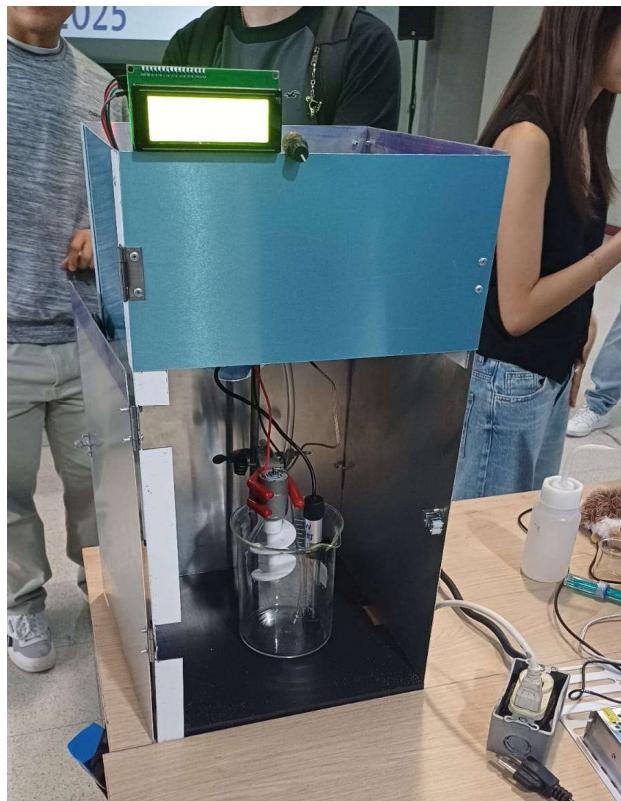


Figura 2. Ensamble final del fotoreactor automatizado, con integración de componentes electrónicos, carcasa optimizada en impresión 3D y sistema de muestreo seguro para tratamiento de aguas residuales mediante radiación UV.