

# Diseño, construcción y puesta a prueba de un reactor fotocatalítico de radiación solar simulada

Ana Yáñez<sup>1</sup>, María F. Quiñónez<sup>1</sup>, Alfonso E. Ramírez<sup>2</sup> & Sonia Gaona<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo CYTEMAC, Departamento de Física, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación, Universidad del Cauca, Popayán, Cauca, Colombia.

<sup>2</sup> Grupo de Catálisis, Departamento de Química, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y de la Educación, Universidad del Cauca, Popayán, Cauca, Colombia.



**Para citaciones:** A.I. Yáñez, M.F. Quiñónez, A.E. Ramírez y S. Gaona, "Diseño, construcción y puesta a prueba de un reactor fotocatalítico de radiación solar simulada," *Ing-NOVA*, vol. 1, no. 2, pp. 180-194. Jul. 2022. <https://doi.org/10.32997/rin-2022-4003>

**Recibido:** 06 de mayo de 2022

**Revisado:** 11 de junio de 2022

**Aprobado:** 15 de julio de 2022

**Autor de correspondencia:**

Ana Yáñez

[anayanez@unicauca.edu.co](mailto:anayanez@unicauca.edu.co)

**Editor:** Miguel Ángel Mueses. Universidad de Cartagena-Colombia.

**Copyright:** © 2022. Yáñez, A., Quiñónez, M., Ramírez, A., & Gaona, S. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/> la cual permite el uso sin restricciones, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre y cuando que el original, el autor y la fuente sean acreditados.



## RESUMEN

La fotocatalisis es un proceso que se da gracias a la absorción de la luz por parte de un catalizador (con propiedades de semiconductor), originando un aumento en la velocidad de una reacción química. Los espacios donde se llevan a cabo los procesos fotocatalíticos se conocen como reactores fotocatalíticos; su tamaño y forma depende del tipo de fuente de iluminación y su disposición. En este documento se reporta el diseño y la construcción de un reactor fotocatalítico de luz solar simulada, a escala de laboratorio, que brinda la posibilidad de estudiar la actividad fotocatalítica de algunos materiales semiconductores (dióxido de titanio ( $TiO_2$ ), óxido de zinc ( $ZnO$ ) y la manganita  $La_{0.7}Ca_{0.2}Ba_{0.1}MnO_3$ ), impulsados por radiación solar simulada. El reactor permite hacer un análisis cualitativo y cuantitativo de la cantidad de oxígeno liberado en la descomposición de peróxido de hidrógeno ( $H_2O_2$ ), en solución acuosa, la cual es medida de manera indirecta, a través de un método adaptado de un sistema de medición de volumen por desplazamiento de líquido, con una probeta invertida. En los experimentos se usó la misma cantidad de semiconductor, pero el  $H_2O_2$  se usó con dos concentraciones iniciales diferentes (**41, 78 y 24, 78 %**). Los resultados obtenidos mostraron que el reactor fotocatalítico construido propicia reacciones de tipo fotocatalíticas por medio de la radiación solar simulada, ya que existió reproducibilidad en todas las mediciones entregadas durante las pruebas realizadas, en las cuales la cantidad de moles de  $O_2$  liberado aumenta cuando la reacción se expone a iluminación. De igual forma, el mejor resultado se obtiene usando al  $TiO_2$  debido a que posee mejor actividad fotocatalítica frente al  $ZnO$  por tener una banda prohibida menor (3,03 – 3,20 eV y 3,35 eV respectivamente).

**Palabras clave:** Fotocatálisis; Reactor fotocatalítico; Peróxido de hidrógeno; Descomposición; Oxígeno liberado.

## Design, construction and testing of a simulated solar radiation photocatalytic reactor

### ABSTRACT

Photocatalysis is a process that involves the absorption of light by a catalyst (with semiconductor properties), causing an increase in the chemical reaction rate. Spaces where the photocatalytic processes are carried out are known as photocatalytic

reactors; their size and shape depends on the type of lighting source and its arrangement. This paper reports the design and construction of a simulated sunlight photocatalytic reactor, laboratory scale, which offers the possibility of studying the photocatalytic activity of some semiconductor materials (titanium dioxide ( $TiO_2$ ), zinc oxide ( $ZnO$ ) and manganite  $La_{0.7}Ca_{0.2}Ba_{0.1}MnO_3$ ) powered by simulated solar radiation. The reactor allows a qualitative and quantitative analysis of the amount of oxygen released in the decomposition of hydrogen peroxide ( $H_2O_2$ ), in aqueous solution, which is measured indirectly, through an adapted method of a liquid displacement volume measurement system, with an inverted test piece. The same amount of semiconductor was used in the experiments, but  $H_2O_2$  was used with two different initial concentrations (41,78 and 24,78 %). The results showed that the built photocatalytic reactor improves photocatalytic reactions through simulated solar radiation, as there was reproducibility in all the measurements delivered during the tests carried out, in which the amount of  $O_2$  moles released increases when the reaction is exposed to illumination. Similarly, the best result is obtained using  $TiO_2$  because compared to  $ZnO$  it has better photocatalytic activity by having a lower GAP (3,03 – 3,20 eV y 3,35 eV respectively).

**Keywords:** Photocatalysis; Photocatalytic reactor; Hydrogen peroxide; Decomposition; Oxygen released.

## 1. Introducción

La fotocatalisis es la reacción catalítica propiciada por la absorción de luz por parte de un catalizador de naturaleza semiconductor; este proceso posibilita el estudio de la actividad fotocatalítica, propiedad inducida por la incidencia de fotones con energía igual o superior a la energía de la banda prohibida del semiconductor en su superficie, lo que provoca que los electrones de la banda de valencia se exciten y pasen hacia la banda de conducción, dejando huecos en la banda de valencia y generando pares electrón-hueco que posteriormente pueden aprovecharse para llevar a cabo reacciones de óxido-reducción; teniendo así la posibilidad de aplicaciones en la oxidación y reducción de compuestos orgánicos, y la reducción de iones inorgánicos [1–3].

La evaluación de la actividad fotocatalítica de un semiconductor puede hacerse mediante la medición de oxígeno liberado en la reacción, análogo a lo que ocurre en la química verde con el proceso de fotosíntesis. La luz del sol es capturada para propiciar la oxidación del agua y producir oxígeno atmosférico, catalogándose el uso de la luz solar como fuente para procesos fotosintéticos y de foto-degradación [1], [3]. La descomposición de  $H_2O_2$  (peróxido de hidrógeno), es una prueba reportada para evaluar y estudiar diferentes semiconductores catalíticos, como  $ZnO$  (óxido de zinc) y  $TiO_2$  (dióxido de titanio) mediante su actividad catalítica [4]. Varios autores han estudiado la descomposición de  $H_2O_2$  mediante fotocatalisis (Ec. (1)), haciendo posible además evaluar diferentes semiconductores como  $TiO_2$  y  $ZnO$  [5–6] por métodos como la medición del volumen de oxígeno liberado [1–2], [4], [7–9].



Un reactor fotocatalítico se define como un espacio que se adapta para llevar a cabo un proceso fotocatalítico. Se diseña con el fin de impulsar dicha reacción química; su tamaño y forma depende del tipo de fuente de iluminación y su disposición [7]. Los descritos en la literatura se pueden clasificar en dos grandes grupos: 1) reactores con el fotocatalizador suspendido en el medio de reacción y 2) reactores con el fotocatalizador fijo sobre un material de soporte [10]. Fue hasta el planteamiento de los primeros diseños de plantas piloto que aparecen diseños optimizados para procesos de fotocatalisis con  $TiO_2$  y posteriormente

los reactores que funcionan con luz solar. Desde entonces diferentes conceptos con una amplia variedad de diseños han sido propuestos y desarrollados, en un continuo esfuerzo por aumentar la eficiencia y reducir los costos de los sistemas fotocatalíticos para la descontaminación y el tratamiento de aguas y gases [8]. Diferentes conceptos con una variedad de diseños han sido propuestos y desarrollados en un continuo esfuerzo por aumentar la eficiencia y reducir los costos, entre los que se destacan reactores con recirculación, reactores de mezcla completa o reactores que utilizan luz solar [9].

Los reactores con fotocatalizador fijado permiten lograr contacto entre el catalizador y la sustancia a degradar, ya que, las partículas están dispuestas de tal manera que el fluido circula logrando un íntimo contacto entre ellas [11], además poseen un sistema de agitación continua, que permite una interacción más amplia entre partículas y material a degradar; estos reactores comúnmente son denominados de tipo batch. Los reactores con fotocatalizador suspendido utilizan un sistema fotocatalítico en recirculación iluminado mediante lámparas [7], donde mediante tuberías se hace circular la muestra cuantas veces sea necesario para lograr por completo la degradación. Este tipo de configuraciones se usan especialmente en laboratorios, por lo que nace la necesidad de ampliar el diseño de reactores a plantas piloto, en donde se llegan a considerar incluso reactores que utilizan luz solar [7–11]; en este caso, los reactores trabajan por tiempos amplios, grandes volúmenes de muestra a degradar y con un menor gasto de energía.

La aplicación práctica de todo proceso fotocatalítico va a requerir el diseño de un reactor que sea eficiente; las investigaciones realizadas a nivel de laboratorio se han basado en dispositivos experimentales cuya importancia radica en la obtención de unas condiciones experimentales que permitan una adecuada reproducibilidad de resultados para conocer la influencia de los diferentes parámetros presentes en el proceso:

A. Disposición del catalizador: en el caso de procesos de fotocatálisis heterogénea, los principales factores que se deben optimizar son el aprovechamiento energético de la radiación y la disposición del catalizador. En cuanto a este último, entre las distintas formas que puede tener el foto-reactor que albergará al catalizador, la tubular es la más común porque garantiza una mayor recepción de luz en todas las direcciones y posibilita una sencilla manipulación del fluido que se quiera tratar. En este caso, el diámetro del foto-reactor es un parámetro importante, puesto que debe existir una adecuada relación entre la distribución de iluminación incidente y la concentración de semiconductor.

De acuerdo con estudios realizados, los diámetros prácticos para foto-reactores tubulares están entre 1,0 cm y 2,5 cm, diámetros menores propician pérdida de presión, mientras que valores mayores dejan un excesivo volumen sin iluminar; a su vez, la distancia entre la fuente de iluminación y el foto-reactor debe ser máximo de 10,0 cm. Como la reacción ocurre por la interacción radiación-semiconductor, la correcta elección de los dos parámetros mencionados (diámetro del tubo y distancia fuente – foto-reactor) aumentará la eficiencia del proceso [7], [12–13].

B. Concentración e iluminación del catalizador: Ya que la reacción fotocatalítica se produce por efecto de la absorción de luz, se requiere que el semiconductor sea iluminado constantemente durante el desarrollo de dicha reacción química dentro del reactor. El material semiconductor, ocasiona un efecto de apantallamiento que dependerá de su concentración, y está directamente ligado a la posición de la fuente

de iluminación en el reactor, convirtiéndose en un parámetro determinante para el buen funcionamiento del reactor fotocatalítico.

Las posibles ubicaciones de la fuente de radiación y su efecto en la iluminación dentro de un reactor:

- Con la fuente centrada en el interior de la muestra.
- Con la fuente en el exterior de la muestra.
- Con la fuente ubicada en un lado de la muestra [12–13].

A pesar de la gran cantidad de tipos de iluminación presentes en el mercado, las fuentes de luz ultravioleta de estado sólido compactas y de alta eficiencia, como los diodos emisores de luz (LED), tienen un interés tecnológico considerable como alternativas a las lámparas de mercurio y de otros gases, tóxicos y de baja eficiencia. Tanto las tecnologías de fabricación microelectrónica como las ciencias ambientales requieren fuentes de luz con longitudes de onda de emisión más cortas: las primeras para mejorar la resolución en fotolitografía y las segundas para sensores que puedan detectar partículas peligrosas diminutas. Además, las fuentes de luz ultravioleta de estado sólido también están atrayendo la atención para aplicaciones potenciales en almacenamiento de datos ópticos de alta densidad, investigación biomédica, purificación de agua y aire y esterilización [14].

Las lámparas UV son las fuentes de luz más utilizadas en estudios recientes. Estas lámparas pueden colocarse externamente o en el interior del reactor. Los rangos de trabajo son el UV-A ( $\lambda_{m\acute{a}x} = 355 - 365 \text{ nm}$ ) o UV-C ( $\lambda_{m\acute{a}x} = 254 \text{ nm}$ ). Estas lámparas aseguran un flujo alto y estable de fotones, en contraposición a la radiación solar. Recientemente los diodos emisores de luz (LEDs) se han empleado como fuentes de radiación, debido a su mayor eficiencia energética y mayor vida útil [10]. Los reactores fotocatalíticos basados en el diodo emisor de luz LED – UV, energéticamente son eficientes por la incidencia lumínica directa y la disminución de la recombinación electrón-hueco que aumenta la eficiencia fotónica [15].

En esta investigación se usó un catalizador que se encuentra en una fase diferente (sólida) a la fase de la muestra a tratar (líquida), es decir, el diseño, construcción y puesta a prueba se realizó de un reactor para fotocatalisis heterogénea tipo batch.

## 2. Materiales y métodos

En el desarrollo de la investigación se estructuraron las siguientes etapas:

A. Determinación del sistema de iluminación: Se escogieron cintas compuestas por bombillos de diodos LED, lo cual les permite adaptarse a cualquier espacio y obtener una iluminación en todas las direcciones, además la radiación emitida por estas lámparas presenta características que corresponden a la emitida por el sol, teniendo un espectro con longitud de onda mayor a 400 nm [16–17]. Dentro de sus especificaciones importantes se tiene: LEDs emisores de luz blanca (puesto que cuentan con dos picos de emisión que corresponden al color azul y verde, cumpliendo con el espectro requerido para el reactor ( $\lambda > 400 \text{ nm}$ )), resistencia a altas temperaturas, arranque instantáneo, baja potencia, baja emisión de calor (debido a que tienen una reactancia y un cebador) [15], [17–19].

B. Elección del foto-reactor: Entre las distintas formas que se evaluaron, la tubular es la más común ya que garantiza una mayor recepción de luz en todas las direcciones y posibilita la manipulación del fluido a tratar [2]. Se optó por un tubo de cuarzo de 2,0 cm de diámetro, debido a que este material es transparente a la radiación de la región espectral de interés [8–9], [12–13], [20–21].

C. Elección y diseño de un modelo para la carcasa del reactor: Con el fin de direccionar la luz hacia la muestra y lograr una mayor eficiencia lumínica, se eligió una carcasa cilíndrica de aluminio [22], de tal manera que en el centro de esta se ubicó el foto-reactor y alrededor se dispusieron las cintas LED.

D. Configuración del modo de operación del foto-reactor: Se determinó que la configuración tipo batch era la adecuada, logrando una degradación en rangos de tiempo elevados y sin afectar el uso del instrumento al detener el proceso en cualquier momento [7].

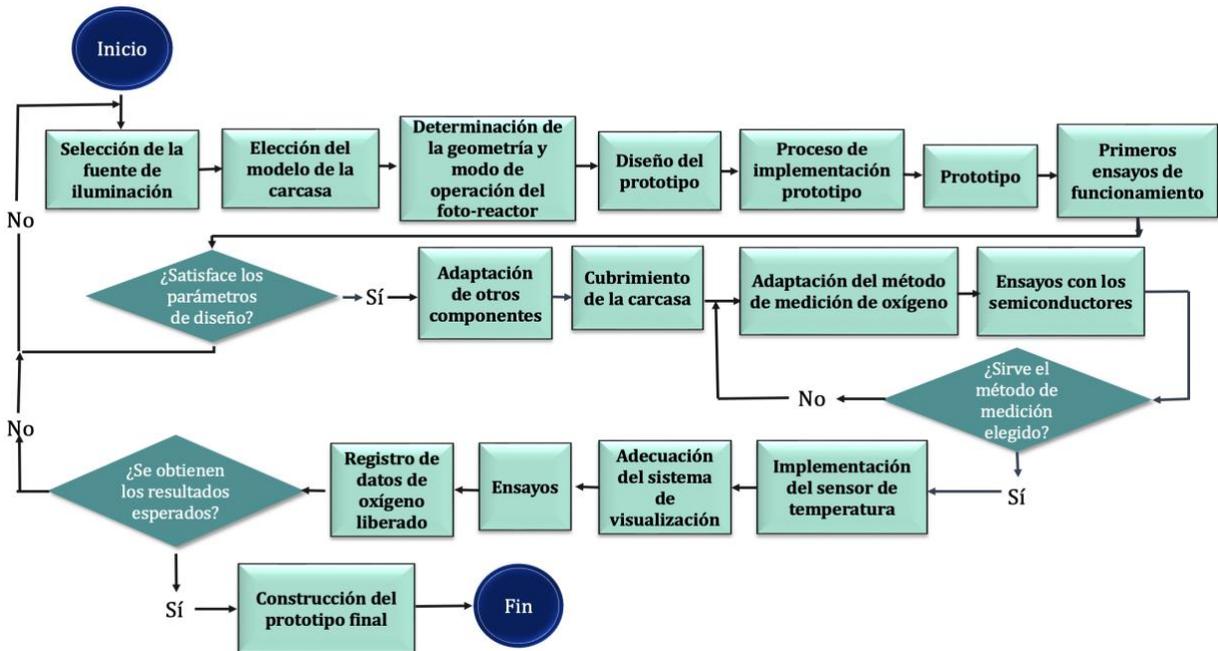
E. Montaje del prototipo: Se decidió implementar un reactor con foto-reactor ubicado de manera vertical, tipo batch, en constante agitación; ubicando las cintas LED en el interior de la carcasa cilíndrica, alrededor y en forma paralela, con una manguera en el extremo superior del foto-reactor para realizar el transporte del oxígeno hacia el sistema de medida.

F. Medición de oxígeno: Se utilizó un proceso de medición indirecta con el sensor ultrasónico HC-SR04, por medio de la adaptación de un sistema de medición de volumen por desplazamiento de líquido, con una probeta invertida. Así, cuando inicia la reacción se libera oxígeno, con lo cual el nivel de agua disminuye, aprovechando esta situación, el sensor por medio de una relación de distancia [23], la cual aumentaba con la disminución de nivel de agua, se determina la cantidad de oxígeno liberado (mL) de la reacción fotocatalítica.

G. Adaptación de otros sensores y proceso de adquisición, registro y visualización de datos: Durante la investigación también se tuvieron en cuenta otros parámetros de estudio para analizar cómo influían en los resultados obtenidos, como la temperatura y la iluminación. Para esto, se utilizó la sonda de temperatura DS18B20 y la ficha técnica de la cinta LED de temperatura de color 5500 K [24–25]. Además, para el registro de los datos se utilizó una placa Arduino Mega 2560. Con la información descrita, se buscó una forma de observar cada uno de los parámetros identificados, por lo tanto, se optó por presentar la información en una pantalla LCD [26].

H. Ensayos de funcionamiento y resultados: En las pruebas del reactor se utilizaron como catalizadores a semiconductores conocidos por su capacidad fotocatalítica: dióxido de titanio  $TiO_2$  (Aeroxide P25, Evonik), óxido de zinc  $ZnO$  (sintetizado de acuerdo a la metodología reportada en [4]) [21] y la manganita  $La_{0,7}Ca_{0,2}Ba_{0,1}MnO_3$  (sintetizada de acuerdo a la metodología reportada en [27]) con el fin de comparar los resultados con los reportados en la literatura [1]. Se usó 0,050 g de cada material y una muestra de 5 mL de peróxido de hidrógeno  $H_2O_2$  (42 % y 25 %, estabilizados en agua y suministrados por la compañía Smartcol); estas concentraciones iniciales del peróxido de hidrógeno se determinaron a través de un procedimiento de titulación con permanganato de potasio [28–29]. La presentación de los resultados se estructuró tomando tres parámetros: la concentración de la muestra, la presencia/ausencia de semiconductor y el encendido/apagado de la fuente de iluminación.

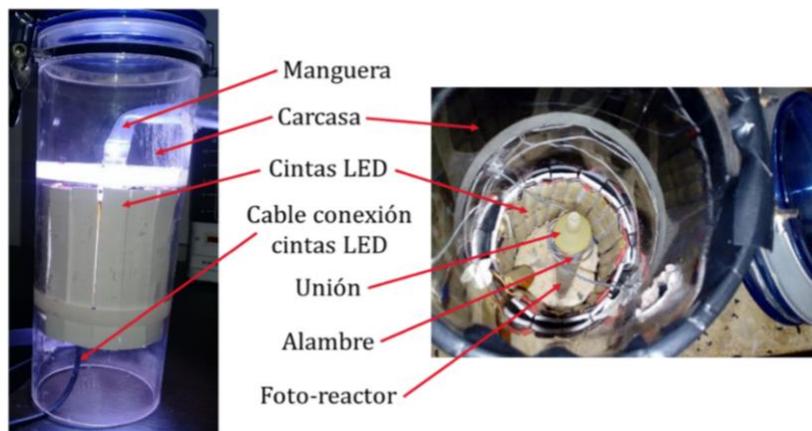
Las etapas anteriores se resumen en el esquema presentado en la Figura 1.



**Figura 1.** Esquema seguido en el diseño, construcción y puesta a prueba del reactor para fotocatalisis heterogénea tipo batch.

### 3. Resultados y discusión

Existen al menos dos factores importantes al momento de diseñar un reactor fotocatalítico: i) conseguir un buen contacto entre los reactivos y el catalizador y ii) lograr una exposición eficiente del catalizador a la luz útil para el proceso (distribución óptima de luz dentro el reactor). Al tratarse de un reactor para fotocatalisis heterogénea, el proceso de diseño se complica al tener que añadir otra fase al sistema, por lo que es indispensable considerar parámetros como la disposición y distribución del catalizador, mezclado e interacción entre los reactivos y catalizador, y aprovechamiento energético de la radiación. En la Figura 2, se presenta el modelo del 1er prototipo del reactor diseñado y construido, con sus diferentes componentes.



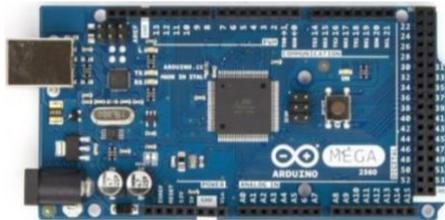
**Figura 2.** Primer prototipo reactor para fotocatalisis heterogénea tipo batch.

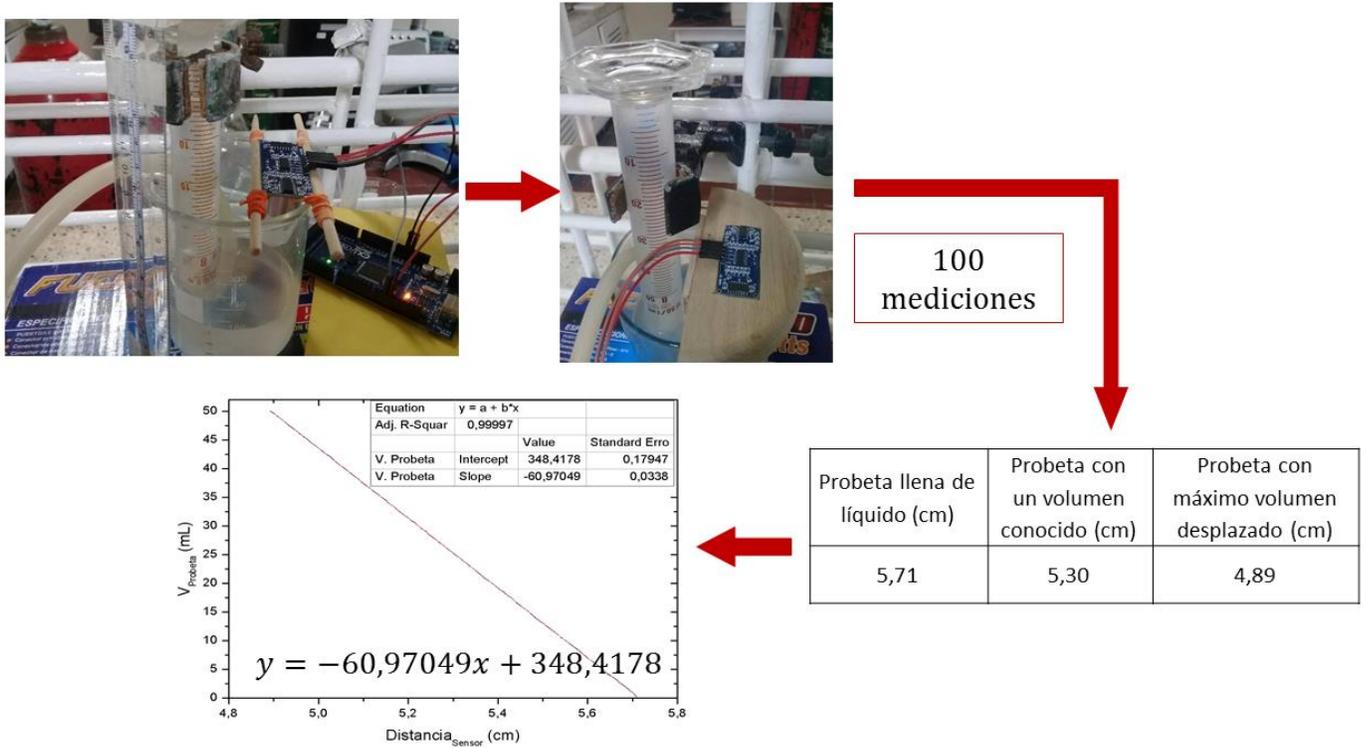
Las investigaciones realizadas a nivel de laboratorio se han basado en dispositivos experimentales cuya importancia radica en la obtención de unas condiciones experimentales que permitan una adecuada reproducibilidad de resultados para conocer la influencia de los diferentes parámetros ya mencionados; sin embargo, en el transcurso de los años se ha buscado que los conocimientos obtenidos a partir de este tipo de dispositivos puedan ser llevados a aplicaciones prácticas, en la Figura 3 se muestra el reactor en funcionamiento.



Figura 3. Primer prototipo en funcionamiento.

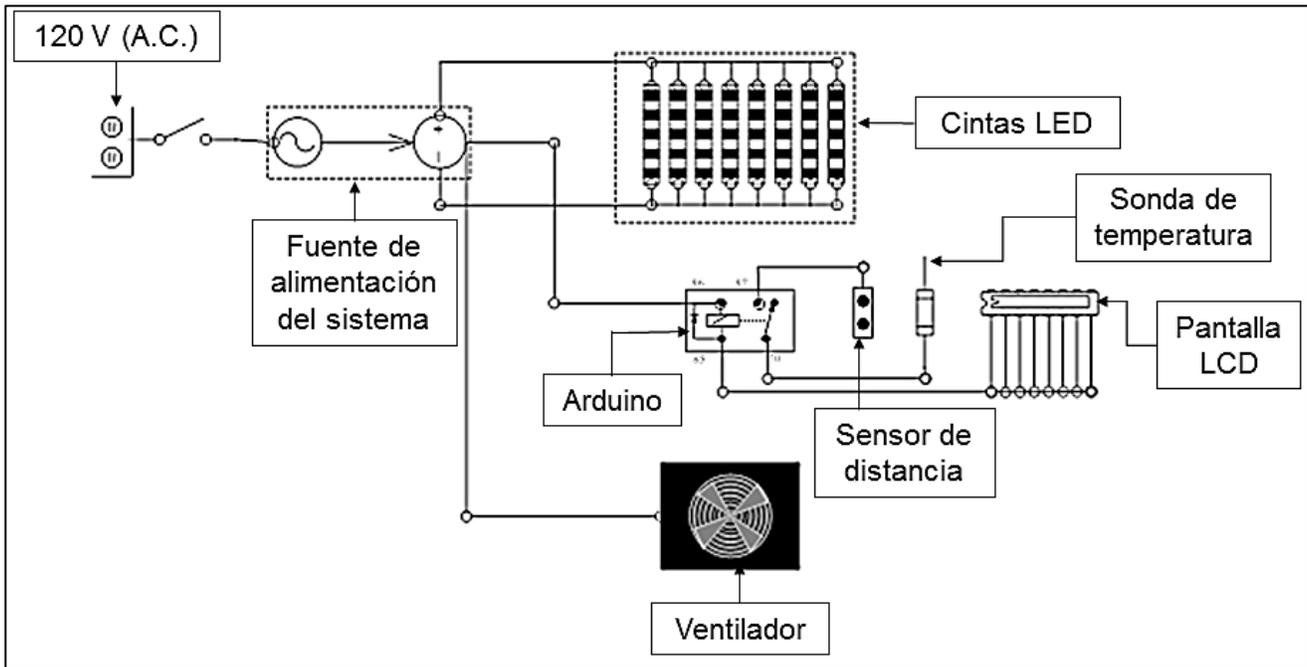
Para la adquisición, adecuación, registro, y visualización de los datos, se utilizó el Arduino; la Figura 4 tiene las imágenes correspondientes al proceso de medición de los volúmenes de desplazamiento de oxígeno y las validaciones de las mismas.





**Figura 4.** Sistema de adquisición, adecuación, registro y visualización de los datos del volumen de agua desplazado con relación directa al volumen de oxígeno producido.

En el Esquema 1, se presenta el modelo del esquema de componentes eléctricos y electrónicos del reactor construido.



**Esquema 1.** Esquema de componentes eléctricos y electrónicos.

Y finalmente, en la Figura 5 está el reactor diseñado y construido.



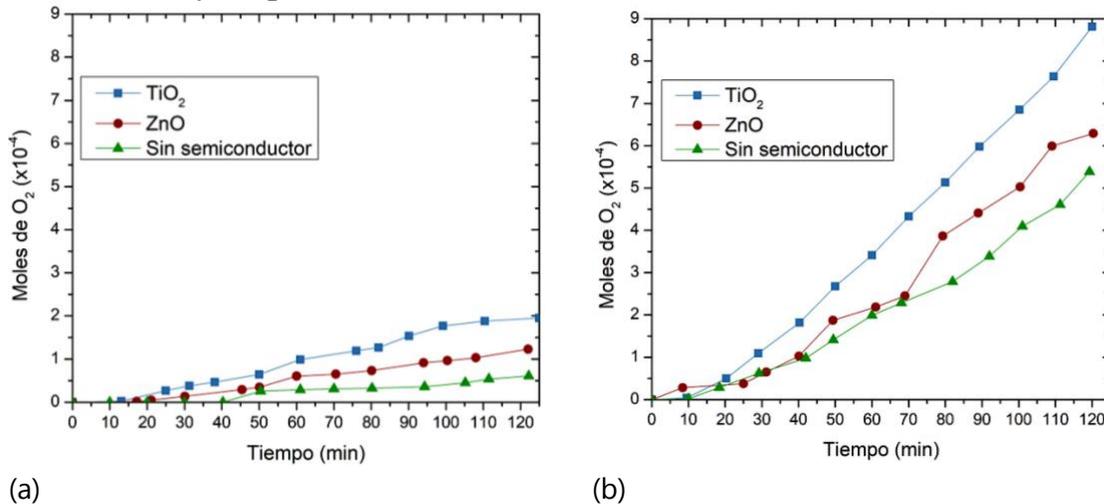
**Figura 5.** Imagen del reactor final AMP1.

La evaluación del funcionamiento y la determinación de las condiciones de operación del reactor fotocatalítico se hizo con una serie de ensayos, en los cuales se estableció la cantidad de moles de  $O_2$  liberado a partir de la descomposición fotocatalítica de muestras de  $H_2O_2$ , con diferente concentración (24,78 % y 41,80 %), en el interior del equipo construido.

El sensor implementado en el sistema de medición reporta datos de volumen de  $O_2$  ( $V$ ), entonces se calculan los equivalentes de dichos valores en cantidad de moles de  $O_2$  ( $n$ ), por medio de la ecuación de estado de los gases ideales (Ec. (2)), donde  $P = 0,7894 \text{ atm}$ ,  $R = 0,08206 \text{ atm} \cdot \text{L/mol} \cdot \text{K}$ ,  $T: 292.15 \text{ K}$ .

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (2)$$

Las Figuras 6 y 7 muestran los resultados obtenidos sin y con iluminación, además, en ausencia y presencia de semiconductor ( $ZnO$  y  $TiO_2$ ) en la reacción fotocatalítica.



**Figura 6.** Cantidad de moles de  $O_2$  desprendido del peróxido de 41,80 % de concentración versus tiempo. (a) Sin iluminación, (b) con iluminación.

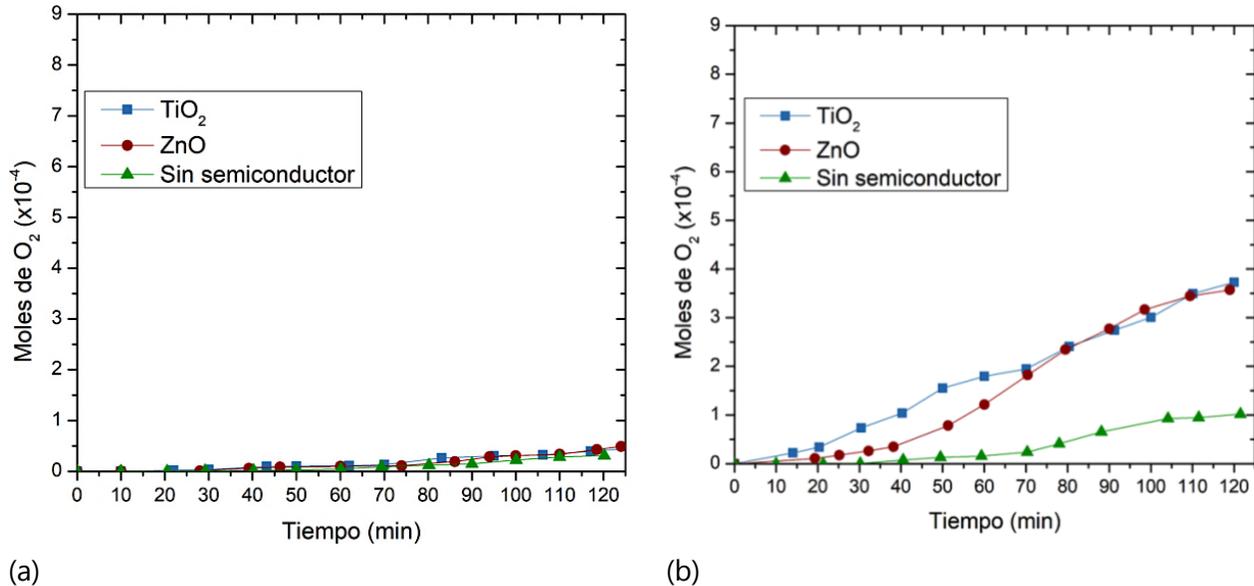
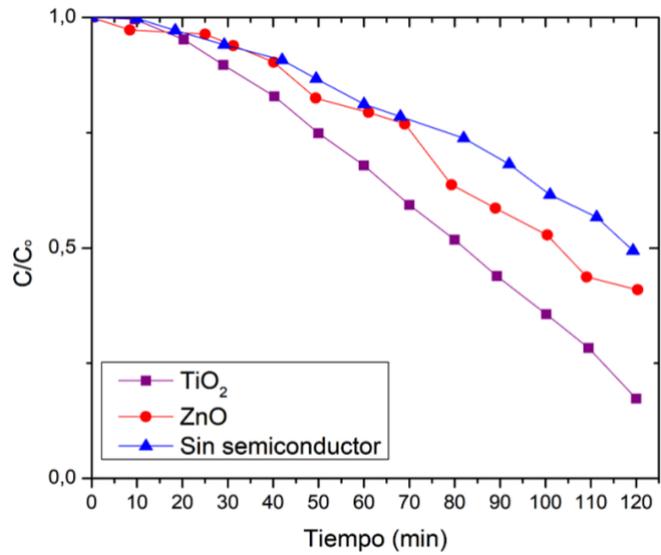
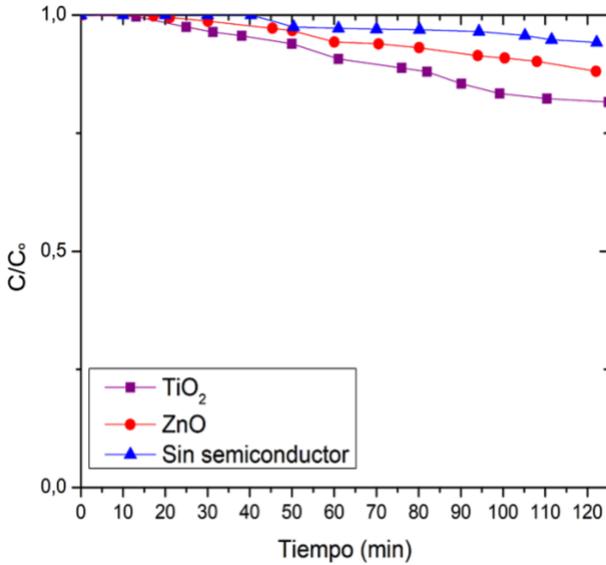


Figura 7. Cantidad de moles de  $O_2$  desprendido del peróxido de 24,78 % de concentración vs tiempo. (a) Sin iluminación, (b) con iluminación.

De acuerdo a los resultados, se aprecia un comportamiento esperado, donde la cantidad de moles de  $O_2$  liberado aumenta cuando la reacción se expone a iluminación; a su vez, el mejor resultado se obtiene usando  $TiO_2$  como semiconductor, ya que tiene mejor actividad fotocatalítica frente al  $ZnO$  por tener una banda prohibida menor, 3,1 eV para  $TiO_2$  Evonik [30] versus 3,2 eV para  $ZnO$  [4]. Además, se observa que hay una mayor cantidad de moles de  $O_2$  producidos cuando se usa el peróxido de hidrógeno con concentración inicial de 41,80 % respecto a los obtenidos con el peróxido de hidrógeno al 24,78 %. Para el análisis de este resultado es necesario agregar que en ambos ensayos (ambas concentraciones de peróxido) se utilizó la misma cantidad de semiconductor, que, es claro, no reacciona igual con diferentes concentraciones de peróxido; es decir, con la metodología utilizada no se puede inferir nada acerca del efecto de la concentración de la muestra a tratar, lo que requeriría pruebas futuras con diferentes concentraciones de semiconductor.

No aparece graficado el resultado obtenido con la manganita ya que la reacción fue tan rápida que no fue posible monitorearla con el sistema construido; este último resultado permitió definir una de las condiciones de funcionamiento para el reactor fotocatalítico construido: no es funcional para reacciones fotocatalíticas que se den en tiempos inferiores a 10 min por sensibilidad del sensor utilizado.

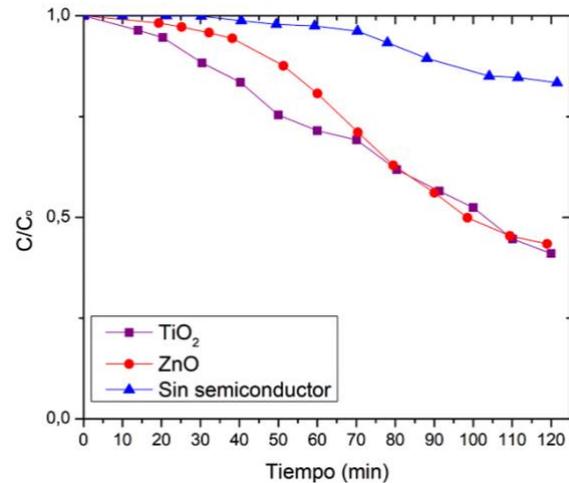
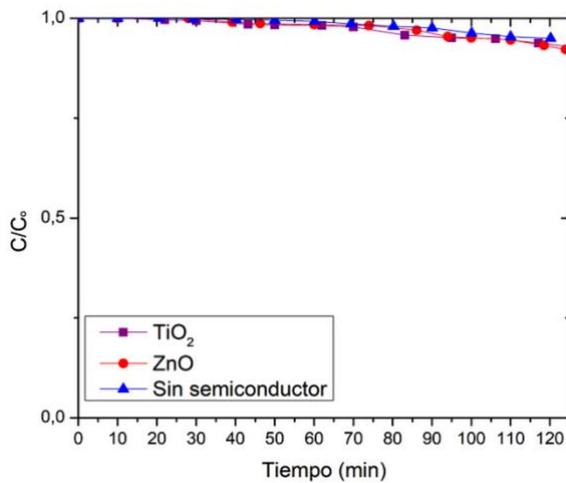
La concentración inicial del  $H_2O_2$  se definió por medio de la titulación [28–29] y se aplicó la Ec. (3) para determinar el cambio de la concentración durante el proceso de descomposición, donde  $C_0$  es la concentración inicial y  $V_g$  el volumen del  $O_2$  liberado así, se graficó la razón  $C/C_0$  en función del tiempo. Los valores de cambio de concentración para la muestra de  $H_2O_2$  ( $C_0 = 41,80\%$ ) sin y con iluminación se aprecian en la Figura 8; para la muestra de  $H_2O_2$  ( $C_0 = 24,78\%$ ) sin y con iluminación se observan en la Figura 9. Se evidencia que la razón de concentración de peróxido de hidrógeno disminuye con el tiempo, corroborando el aumento de oxígeno reportado en las gráficas de moles. Una vez más se evidencia el efecto de la iluminación, de los semiconductores y de la concentración de muestra a descomponer.



(a)

(b)

**Figura 8.** Concentración de peróxido de hidrógeno ( $C_0 = 41,80\%$ ) vs tiempo. (a) Sin iluminación, (b) con iluminación.



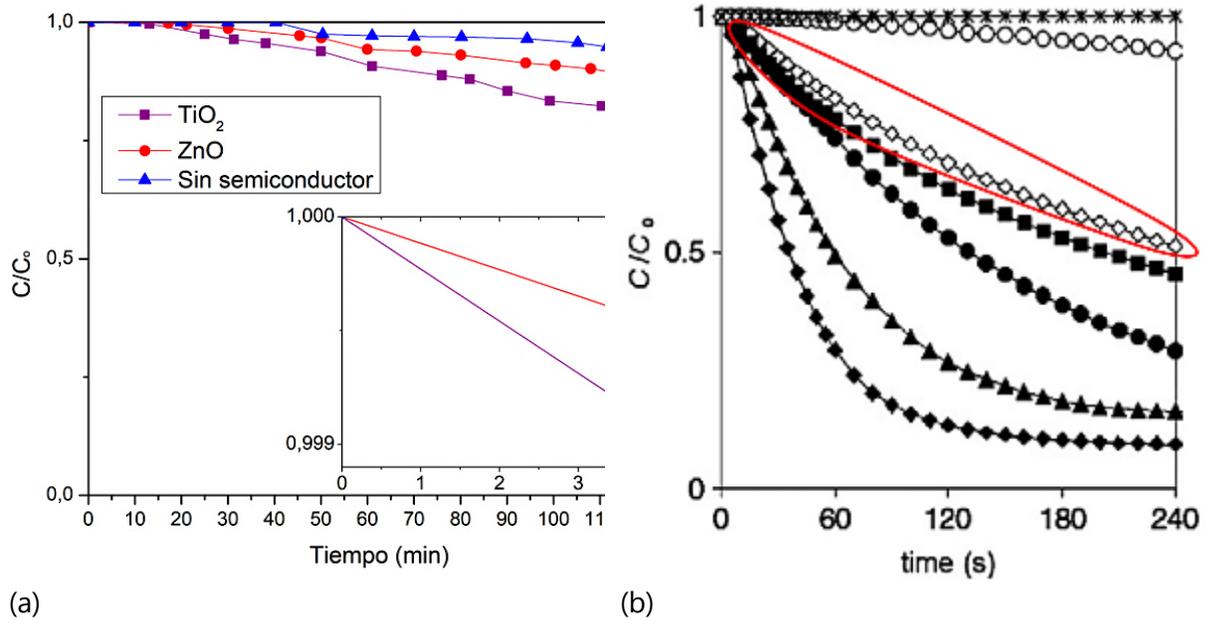
(a)

(b)

**Figura 9.** Concentración de peróxido de hidrógeno ( $C_0 = 24,78\%$ ) vs tiempo. (a) Sin iluminación, (b) con iluminación.

Este tipo de gráficos son comúnmente reportados en la literatura, por lo que en la Figura 10 se hace una comparación del resultado obtenido y el indicado en [1]; los datos presentados están en un intervalo de tiempo de 4,0 min por cuestiones de comparación con los reportados en [1], donde se usó  $R - MnO_2$  como semiconductor, que propicia la descomposición del peróxido sin necesidad de luz, y por tanto, en un reactor fotocatalítico la descomposición se produce en un tiempo corto.

$$C = C_0 - 2 \cdot \frac{P \cdot V_g}{R \cdot T \cdot V_L} \quad (3)$$



**Figura 10.** Comparación entre el comportamiento del reactor fotocatalítico construido AMP1 y el reportado para ensayo sin iluminación, tomado de [1]. En (a) se presenta  $C/C_0$  versus tiempo a partir del AMP1; en (b), el resultado usando  $R - MnO_2$  como semiconductor, tomado de [1].

Adicionalmente, se encontró el porcentaje de descomposición de peróxido de hidrógeno en la mitad del tiempo de desarrollo de la reacción (60 min) y en el tiempo total de duración (120 min), tomando en cuenta los resultados obtenidos y haciendo uso de la Ec. (4) [1]. Los valores resultantes se muestran en la Tabla 1 e indican que para conseguir mejores resultados del proceso de fotocátalisis en el interior del reactor, es decir mayor producción de oxígeno en menor tiempo, se requeriría el uso de semiconductores con valores de energía de banda prohibida ( $E_g$ ) menores o cercanos a 3,0 eV.

$$\% \text{ de degradación} = \frac{C_0 - C}{C_0} \times 100 \% \quad (4)$$

**Tabla 1.** Porcentajes de degradación para las muestras de  $H_2O_2$  a dos concentraciones iniciales diferentes, para condiciones sin iluminación y con iluminación.

Condición	$C_0$ (%)	Porcentaje de descomposición de $H_2O_2$ (%)					
		60 min			120 min		
		Sin SC	$ZnO$	$TiO_2$	Sin SC	$ZnO$	$TiO_2$
Sin iluminación	41,80	0,30	5,60	8,90	5,60	11,50	18,10
	24,78	0,80	1,60	1,80	5,00	7,10	6,50
Con iluminación	41,80	18,90	20,30	32,40	51,10	58,80	82,60
	24,78	2,70	19,60	28,70	16,30	56,60	59,20

#### 4. Conclusiones

Para el proceso de diseño y construcción del reactor fotocatalítico AMP1, se determinaron distintas etapas de funcionamiento tomando como base un método científico secuencial, en el cual se definió el fin de cada parte, por medio de una investigación y recopilación de información que brindara las pautas para llevar a cabo el posterior análisis de cada uno de los componentes a elegir. Con ellos, se logró el diseño y construcción de un reactor funcional.

A partir de las experiencias adquiridas, se establecieron los componentes óptimos del reactor AMP1: cintas LED con longitud de onda correspondiente al rango visible del espectro electromagnético, carcasa de aluminio por su reflectancia y maximización de la radiación, tubo de cuarzo que logró una transmisión completa de la radiación y como espacio para albergar la reacción fotocatalítica, acoples y mangueras para la circulación del gas liberado y fuente de alimentación que brindó la energía necesaria durante todo el proceso para el correcto funcionamiento de los sensores implementados, la pantalla de visualización, el ventilador y la fuente de iluminación.

Con los resultados obtenidos en las pruebas de funcionamiento se demostró que el reactor fotocatalítico construido propicia las reacciones de tipo fotocatalíticas por medio de la radiación solar simulada, además, brinda la posibilidad de evaluar la capacidad fotocatalítica de materiales semiconductores, a través del volumen de oxígeno liberado de la descomposición de una muestra determinada de peróxido de hidrógeno, puesto que se evidenció una reproducibilidad en todas las mediciones entregadas durante las pruebas realizadas.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del Cauca por la financiación de esta investigación.

#### Referencias

- [1] C. A. Páez et al., "Study of photocatalytic decomposition of hydrogen peroxide over ramsdellite-MnO<sub>2</sub> by O<sub>2</sub>-pressure monitoring", *Catal. Commun.*, vol. 15, no. 1, pp. 132–136, 2011.
- [2] E. Pavas, "Fotocatálisis: una alternativa viable para la eliminación de compuestos orgánicos", *Rev. Univ. EAFIT*, vol. 127, pp. 59–64, 2002.
- [3] M. R. Hoffmann, S. T. Martin, W. Choi, and D. W. Bahnemann, "Environmental Applications of Semiconductor Photocatalysis", *Chem. Rev.*, vol. 95, no. 1, pp. 69–96, 1995.
- [4] A. E. Ramírez et al., "Significantly enhancement of sunlight photocatalytic performance of ZnO by doping with transition metal oxides", *Sci. Rep.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–9, 2021.
- [5] B. Rajeev, S. Yesodharan, and E. P. Yesodharan, "Application of solar energy in wastewater treatment: Photocatalytic degradation of  $\alpha$ -methylstyrene in water in presence of ZnO", *J. Water Process Eng.*, vol. 8, pp. 108–118, 2015.
- [6] M. Muruganandham, N. Sobana, and M. Swaminathan, "Solar assisted photocatalytic and photochemical degradation

- of Reactive Black 5", *J. Hazard. Mater.*, vol. 137, no. 3, pp. 1371–1376, 2006.
- [7] J. Blanco Gálvez, S. Malato Rodríguez, J. Peral, B. Sánchez, and A. I. Cardona, "Diseño de reactores para fotocatalisis: Evaluación comparativa de las distintas opciones", in *Eliminación de contaminantes por fotocatalisis heterogénea*, no. 11, 2001, pp. 243–266.
- [8] H. Al-Ekabi, A. Safarzadeh-Amiri, and J. Sifton, WendyStory, "Advanced technology for water purification by heterogeneous photocatalysis", *Int. J. Environ. Pollut.*, vol. 1, no. 1/2, pp. 125–136, 1991.
- [9] Y. L. Ramírez Arias, "Diseño, construcción y puesta en marcha de un reactor tubular fotocatalítico (UV-A) para la degradación de desechos químicos orgánicos", Universidad Tecnológica de Pereira, 2013.
- [10] A. Montalván, L. Desdín, E. Peláez, O. Brígido, and I. Sananastacio, "Estado actual en el desarrollo de reactores fotocatalíticos de membranas, para el tratamiento de contaminantes orgánicos persistentes en el agua y las aguas residuales", *Tecnol. Química*, vol. 39, no. 2, pp. 421–443, 2019.
- [11] A. C. Quintero Agudelo, C. A. Vargas Terranova, and J. P. Sanabria Alcantar, "Evaluación de un sistema de fotocatalisis heterogénea y pasteurización para desinfección de aguas lluvias", *Cienc. e Ing. Neogranadina*, vol. 28, no. 1, pp. 117–134, May 2017.
- [12] K. Demeestere, J. Dewulf, and H. Van Langenhove, "Heterogeneous photocatalysis as an advanced oxidation process for the abatement of chlorinated, monocyclic aromatic and sulfurous volatile organic compounds in air: State of the art", *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol. 37, no. 6, pp. 489–538, 2007.
- [13] J. D. Acevedo Zabaleta, "Proceso fotocatalítico como alternativa para la potabilización de agua", Universidad EAFIT, 2012.
- [14] Y. Taniyasu, M. Kasu, and T. Makimoto, "An aluminium nitride light-emitting diode with a wavelength of 210 nanometres", *Nature*, vol. 441, no. 7091, pp. 325–328, 2006.
- [15] D. Arturo, L. Niño, J. Luis, G. Torres, and M. A. Zambrano, "Design of a photocatalytic reactor (uv-a) for the study of the chemical degradation of 1,2- dihydroxybenzene and inactivation of e. coli in simulated water", *Publicaciones e Investig.*, pp. 1–7, 2021.
- [16] Khan Academy, "Luz y pigmentos fotosintéticos. Propiedades de la luz. Cómo absorben la luz las clorofilas y otros pigmentos", 2022. [Online]. Available: <https://es.khanacademy.org/science/biology/photosynthesis-in-plants/the-light-dependent-reactions-of-photosynthesis/a/light-and-photosynthetic-pigments>
- [17] M. A. Morocho Rengifo and C. Vargas Hernández, "Caracterización óptica de Diodos emisores de Luz mediante su espectros de emisión y patrones de radiación", *Sci. Tech.*, vol. Año XVII, no. 51, pp. 66–70, 2012.
- [18] J. Moreno Gil, C. Fernández García, and D. Tárraga, Lasso, *Instalaciones eléctricas interiores*, 3rd ed. Madrid, 2010.
- [19] V. H. Kohen, "El uso de las tiras de LEDs", 2012. [Online]. Available: <https://www.iluminet.com/tiras-led/>
- [20] J. Carbajo Olleros, "Aplicación de la fotocatalisis solar a la degradación de contaminantes orgánicos en fase acuosa con catalizadores nanoestructurados de TiO<sub>2</sub>", Universidad Autónoma de Madrid, 2013.
- [21] R. J. Candal, S. Aldabe Bilmes, and M. A. Blesa, "Semiconductores con actividad fotocatalítica", in *Eliminación de*

- Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea, 2a ed., Madrid: CYTED, 2004, pp. 79–101.
- [22] F. R. Morral, E. Jimeno, and P. Molera, "Metales ligeros", in *Metalurgia General*, Tomo II., Editorial Reverté, S.A., 2004, pp. 817–866, 1213–1245.
- [23] Micropik, "Ultrasonic Ranging Module HC - SR04", Datasheet, 2013. [Online]. Available: <http://www.micropik.com/PDF/HCSR04.pdf>
- [24] J. Chapa Carreón, *Manual de Instalaciones de Alumbrado y Fotometría*. México, D.F.: Limusa Noriega Editores, 2004.
- [25] Sylvania Toledo, "LED", 2018. [Online]. Available: <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=2ahUKEwiynlWhq7PiAhUEwlkKHcUHC0UQFjABegQIBBAC&url=http%3A%2F%2Fwww.sylvaniacolombia.com%2FLiteratureRetrieve.aspx%3D239286&usq=AOvVaw3g8XqfMwUJScSNfDYrPITa>
- [26] Xiamen amotec display Ltd, "What is LCD", 2018. [Online]. Available: <https://www.amotec-lcd.com/info/what-is-lcd-29183770.html>
- [27] S. Gaona Jurado, A. Guerrero, and V. Nastar, XXVIII Congreso Nacional de Física. Armenia, 2019.
- [28] J. A. Benito de Vega and M. Escribano González, *Análisis químicos*. FP. Edición ampliada. 2021.
- [29] Peróxidos Solvay Brasil, "Peróxido de Hidrógeno, determinación por permanganimetría", 2019. [Online]. Available: <https://www.peroxidos.com.br/es/binaries/TecData-HydrogenPeroxide-Concentracao-Permanganatometria-ES-219948.pdf>
- [30] E. Galata, E. A. Georgakopoulou, M.-E. Kassalia, N. Papadopoulou-Fermeli, and E. A. Pavlatou, "Development of smart composites based on doped-TiO<sub>2</sub> nanoparticles with visible light anticancer properties", *Materials (Basel)*, vol. 12, no. 16, p. 2589, 2019.