

Diseño y construcción de un reactor fotocatalítico de tanque aireado y agitado

Camacho González Mónica Araceli¹, Hernández Reyes Alberto¹, Reyes Miranda Joan², Ramírez Quirós Yara³, Garrido Hernández Aristeo^{1*}

¹Universidad Tecnológica de Tecámac. Carretera Federal México-Pachuca Km. 37.5 Predio Sierra Hermosa, Tecámac, Estado de México. C.P. 55740. México

²Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Materiales. Av. San Pablo No. 180, Azcapotzalco, Ciudad de México, C.P. 02200. México.

³Universidad Autónoma Metropolitana, Departamento de Ciencias Básicas. Av. San Pablo No. 180, Azcapotzalco, Ciudad de México, C.P. 02200. México.

*Autor para correspondencia: ari_teogh@hotmail.com

Recibido:

11/agosto/2021

Aceptado:

27/septiembre/2021

Palabras clave:

Diseño,
construcción,
fotocatalizador

Keywords:

Design,
construction,
photocatalyst

RESUMEN

En la actualidad, la contaminación por compuestos orgánicos es una problemática a nivel mundial por ello se requiere soluciones efectivas que reduzcan esta problemática. Una gran alternativa es el uso de recubrimientos cerámicos usados como fotocatalizadores. Un correcto uso de estos recubrimientos requiere que se diseñen y construyan reactores fotocatalíticos eficientes. En este trabajo se presenta el diseño y construcción de un reactor fotocatalítico de tanque aireado y agitado de muy bajo costo. Durante el diseño de éste, se consideró, la geometría e iluminación del reactor, así como la integración de componentes como agitación y burbujeo para generar mayor área de contacto y transferencia de oxígeno con los recubrimientos fotocatalíticos. Se estudió el efecto de la temperatura debido a la iluminación, se reporta la distribución de tamaño de burbuja y el tiempo de mezclado.

ABSTRACT

Nowadays, environmental pollution by organic wastes represents a worldwide task that requires effective solutions to reduce this issue. A great alternative is the use of ceramic coatings used as photocatalysts. Correct use of these coatings requires the design and construction of efficient photocatalytic reactors. This work presents the design and construction of a very low-cost aerated and stirred photocatalytic tank reactor. During the design, the geometry and illumination of the reactor were considered, as well as the integration of components such as agitation and bubbling to generate greater contact area and oxygen transfer with the photocatalytic coatings. The effect of temperature due to illumination was studied, the bubble size distribution and the mixing time were reported.

Introducción

El diseño y análisis de fotorreactores es significativamente más desafiante que los reactores convencionales debido al uso de radiación electromagnética en las reacciones químicas. El mayor desafío en la operatividad de un fotorreactor es la presencia de partículas fotocatalíticas, las cuales producen efectos complejos de dispersión de la luz, específicamente si se trata de partículas en suspensión; cuando el fotocatalizador se inmoviliza sobre un sustrato este efecto se reduce, en ambos casos, el material de construcción del fotorreactor, debe ser transparente al rango de longitudes que activen el fotocatalizador (Boyjoo et al., 2013).

La otra característica distintiva de este tipo de tecnología es el empleo de radiación en un intervalo de la energía ultravioleta y visible, la selección correcta de la radiación depende completamente del fotocatalizador empleado; cuando éste es irradiado con energía luminosa igual o mayor a la energía de su banda prohibida, un electrón (e^-) es excitado desde la banda de valencia (BV) a la banda de conducción (BC) del catalizador, dejando un hueco fotogenerado (h^+). Los e^- y h^+ producidos permiten que se produzcan procesos sucesivos de óxido-reducción y catalizar así, la reacción deseada (Passalía, 2010).

Gran parte del funcionamiento de los reactores fotocatalíticos se basan en que las reacciones en solución acuosa, el agua y los iones de hidróxido reaccionan con el h^+ fotogenerado para formar radicales hidroxilo ($\bullet OH$), que es el principal oxidante en la oxidación fotocatalítica de compuestos orgánicos con un potencial de oxidación de 2,80 V; mayor que el de otros oxidantes comunes como el ozono, O_3 ; ($E_0=2,07$ V) y el peróxido de hidrógeno, H_2O_2 ; ($E_0 = 1,77$ V) y se ha demostrado que el ataque repetido de los contaminantes orgánicos por el $\bullet OH$ conduce finalmente a la oxidación completa (Casbeer et al., 2012).

El proceso de generación de $\bullet OH$ puede ocurrir por dos vías, primero el O_2 presente en el agua se reduce para formar $\bullet O_2^-$ que luego reacciona con H^+ para formar $\bullet OOH$, seguido de una rápida descomposición a $\bullet OH$. La segunda vía implica la oxidación del OH^- , (Moctezuma et al., 2012).

Para aumentar la presencia de radicales (O_2^{-2}) en un fotorreactor, es necesario incorporar O_2 mediante aireación en el proceso y asegurar su permanencia por mayor tiempo en el medio implementando agitación mecánica. La exposición eficiente del catalizador a la luz (distribución óptima de luz dentro del reactor) estará determinada ahora, por la variación en el comportamiento hidrodinámico del fluido alrededor del impulsor (Doran, 1995).

Por otro lado, usar agitadores con geometrías específicas puede generar intensidades de turbulencia elevadas, propiciando buenos coeficientes de transferencia de masa: gas-líquido, líquido-sólido, que es de gran ventaja al trabajar con catalizadores en solución (Ortiz, 2009).

El uso del fotocatalizador en polvo tiene algunas desventajas, entre ellas, mantener la agitación de las soluciones para su dispersión homogénea durante la reacción, la separación del catalizador de la solución por filtración y/o centrifugación y lavado para ser reutilizado, (Sonawane et al., 2004). Se ha demostrado que la eficiencia fotocatalítica de los polvos y las películas es comparable, pero derivado de la pérdida de área superficial efectiva durante la inmovilización, la reacción toma más tiempo (Behpour & Atouf, 2012; Falk et al., 2017). La aplicación del catalizador en una película delgada, superará los inconvenientes de emplear polvos, es por ello que desde inicio de los estudios de fotocatalisis, surge la idea de un fotocatalizador inmovilizado en un sustrato inerte (Shang et al., 2002), con lo cual se han obtenido excelentes resultados (Maldonado et al., 2015).

Los volúmenes de solución empleados para evaluar la eficiencia de un fotocatalizador ya sea en polvo o inmovilizado sobre un sustrato, se reportan frecuentemente por debajo de 0.10 L. Así mismo se emplea una sola fuente luminosa para la fotoactivación del catalizador en el espectro visible, generalmente son lámparas de filamentos de Tungsteno, Tungsteno-Iodo y de Xenón con un consumo de potencia de 200 hasta 1000 W y longitudes de onda que oscilan entre 400 a 760 nm (Abbas et al., 2016; Ganesh et al., 2012; Komaraiah et al., 2016; Reda et al., 2020; Zhao et al., 2008). Por lo que trabajar con volúmenes mayores, implica un reto de la Ingeniería de fotorreactores, además de iluminar un mayor volumen, haciendo necesario implementar lámparas de menor consumo y elevada intensidad de iluminación en el rango visible.

La geometría y disposición de los reactores fotocatalíticos depende principalmente de la óptima penetración de la luz al interior del volumen, por ello la elección de los materiales para este fin también es primordial. Uno de los materiales más adecuados para reactores fotocatalíticos son distintos tipos de vidrio. Los cuales deben contar con un bajo contenido en hierro, ya que este absorbe parte de la radiación UV.

El vidrio es una excelente alternativa ya que es el material más económico. Uno de los parámetros considerables en la elección de este material es el espesor, en la industria eléctrica se usa vidrio transparente de 4 mm para aplicaciones fotovoltaicas, ya que absorbe la menor cantidad del espectro UV. (Miyawaki et al., 2016)

En el presente trabajo se diseña y construye un reactor fotocatalítico de tanque aireado y agitado de muy bajo costo. Durante el proceso se contemplan variables de diseño, como: materiales de construcción, geometría e iluminación del reactor. Del mismo modo, variables dependientes de la hidrodinámica del reactor como: volumen y transporte de masa. El reactor tiene como propósito evaluar la actividad fotocatalítica de recubrimientos cerámicos (TiO_2 , SiO_2 , ZnO , entre otros). Se realizan estudios diámetro de burbuja en ascenso, su tiempo de residencia y el tiempo de mezclado, para evaluar la eficacia de difusión de oxígeno dentro del volumen del reactor, también se examina la influencia de la temperatura en el sistema.

Metodología

Diseño y construcción

En el diseño se utilizó el software Inventor 2020 para elaborar un modelo en 3D.

Construcción y montaje del reactor en tres etapas básicas:

1. Construcción de la estructura de aislamiento del Reactor. Se construyó con madera comprimida de 9 mm de espesor. La caja está completamente sellada y se le incorpora una puerta con un broche sencillo de 3 cm x 6 cm.

2. Construcción del reactor. El reactor consiste en un recipiente cilíndrico de vidrio de 1.8 litros de 4 mm de espesor. Se instaló un difusor de aire en el fondo del recipiente cilíndrico impulsado por una bomba marca Elite modelo 799 HA799 de 2W con caudal máximo de 1 L/h y un agitador marca JTSYYQ modelo JJ-1A de 100w.

3. Montaje del reactor. El montaje consistió en introducir el reactor en la caja y el mezclador en el reactor. También en esta etapa configuró el arreglo de las lámparas, se usó una estructura de varillas para lograr que las lámparas puedan cambiar su posición.

Medición de la temperatura bajo irradiación de luz visible

Para la medición de la temperatura, se colocó el reactor dentro de la caja de aislamiento de luz externa, donde se situaron lámparas MR16 de 4 W, 400 lúmenes, con una emisión en la región 410–760 nm con un máximo en 600 nm. La distancia entre la lámpara y la superficie del contenedor de vidrio fue de 7 cm. Se colocaron dos lámparas laterales y una frontal, la configuración se muestra en la figura 1. Se midió el cambio de temperatura desde que se encienden las lámparas hasta después de pasada 1 hora. Se tomaron las medidas en los tres puntos de contacto de la luz con el vaso, así como del centro del

volumen de líquido. Las “x” en la Figura 1 representan los puntos donde se llevó a cabo la toma de las temperaturas. Se midió la temperatura de las lámparas.

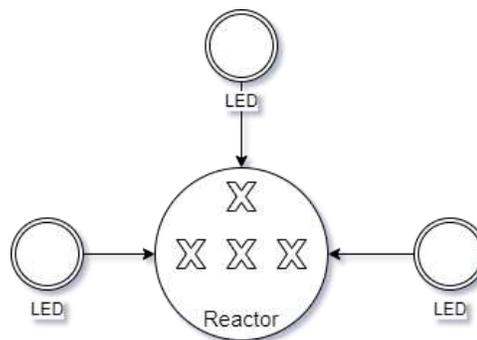


Figura 1. Disposición de las lámparas alrededor del reactor.

Caracterización hidrodinámica del reactor

Para la medición del diámetro de burbuja, se dividió el vaso de reacción en tres secciones. El volumen de operación fue de 1.5 litros (83% del volumen máximo de 1.8 litros), por lo tanto, para secciones equidistantes se dividió el reactor en volúmenes de 0.5 litros, con una altura por sección de aproximadamente 5 cm de distancia. Se tomaron fotografías de cada una de las secciones con el uso de un smartphone Huawei Y9 con resolución de 12 Mp. Se determinó el diámetro de las burbujas analizando las imágenes obtenidas por medio del software ImageJ, tomando en cuenta que el ancho del vaso es de 12 cm. Se requirió la medición de 100 burbujas por sección para poder obtener un promedio del tamaño de la burbuja. El experimento se repitió con dos condiciones diferentes, reactor con burbujeo, reactor con burbujeo y mezclado. En la figura 2 se detalla el diagrama de la experimentación.

Medición del tiempo de residencia y tiempo de mezclado

Para medir el tiempo de mezclado y de residencia se puso el reactor en operación en dos modalidades: Burbujeo y Burbujeo con Mezclado. El mezclador se mantuvo a una velocidad de 480 rpm.

Usando un smartphone Xiaomi Redmi 9c con cámara de 13 Mp, se tomó video del intervalo que tardan en diluirse 2ml de azul de metileno en un volumen de 1.5 L. Se realizaron las mediciones por triplicado para ambas modalidades.

Del mismo modo, para medir el tiempo de residencia se grabó en video el burbujeo del reactor, para determinar el tiempo que le toma a un cumulo de burbujas ascender a la superficie. Se tomaron los datos de 10 repeticiones para realizar un promedio en cada modalidad.

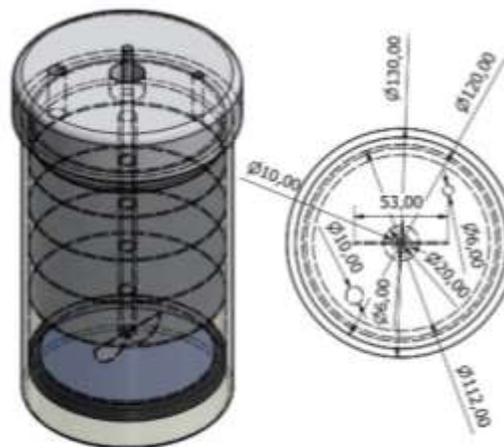
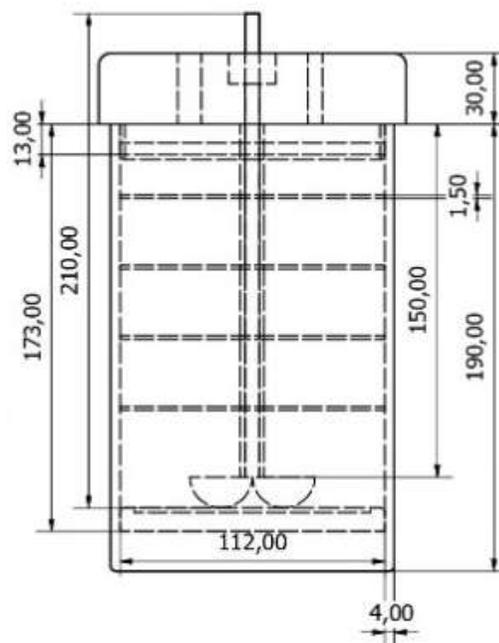
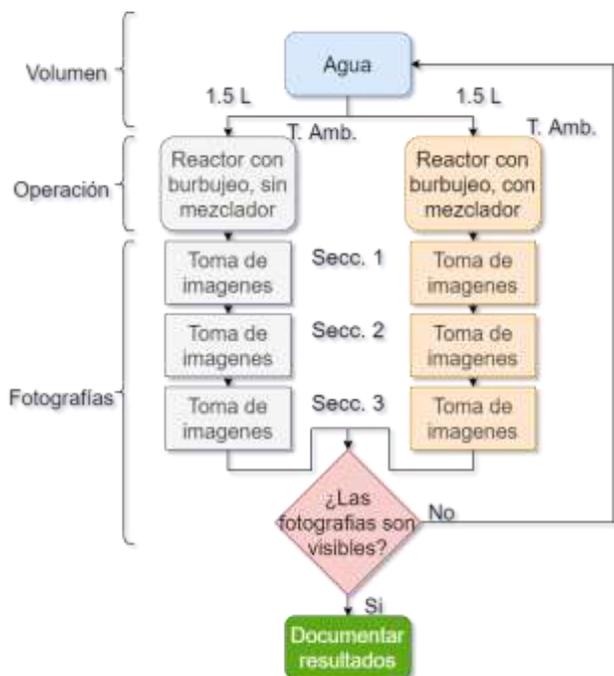


Figura 2. Diagrama de flujo para la determinación del diámetro de burbuja promedio.

Resultados y discusión

Diseño y construcción

La relación H/D de este reactor fue 1.6 lo cual permitió una fácil a instalación de piezas al interior del vaso (ver figura 3). En la figura 4 se observa la disposición propuesta de las lámparas Philips MR16, este acomodo permite tener una mayor iluminación en el volumen de reacción; el arreglo de las lámparas proporciona una iluminación gradual desde las paredes del reactor hacia el centro del contenedor de vidrio.

En el centro del reactor la intensidad lumínica es mucho menor, sin embargo, esto no sería un inconveniente para que el reactor alcance eficiencia altas de fotodegradación, ya que en el centro se encuentra el eje, que tiene doble funcionalidad; insertar los ejes del mezclador y del soporte de los discos.

Mondon en el 2017 diseñó un reactor fotocatalítico con iluminación interna, obtuvo una buena iluminación en el volumen del recipiente, pero su diseño solo permite el uso de una sola lámpara, por el limitado espacio que al incrementarse representa una pérdida importante del volumen.

Figura 3. Diseño y dimensiones de la sección destinada a las reacciones fotocatalíticas (mm).

El diseño que se presenta en este trabajo permite variar el número de lámparas con la posibilidad de controlar la distribución de iluminación en el reactor. Esto tiene aplicaciones prácticas porque se pueden realizar estudios a profundidad sobre la influencia de la intensidad luminiscente, ya que esto proporciona más fotones para activar un fotocatalizador (ver figura 4). Por otro lado, se conoce que en un catalizador o fotocatalizador un parámetro a considerar es el área superficial, el reactor que se presenta, está diseñado para tener una cantidad de sustratos variables y con esto poder determinar las eficiencias de los sitios activos de los catalizadores mediante la manipulación del área de contacto de los recubrimientos a estudiar (Figura 3).

Es necesario que un catalizador tenga una superficie específica alta para tener un mayor número de sitios activos donde los contaminantes pueden ser adsorbidos. Por ejemplo, Estrada-Flores et al., 2020 investigó la relación entre la morfología, la porosidad y la actividad fotocatalítica de la fase anatasa del TiO_2 y encontró que el área de superficie específica de las muestras de anatasa aumentaba a medida que aumentaba el tamaño de los poros. También Castro et al., 2015 obtuvo películas mesoporosas de TiO_2 dopadas con Ca^{2+} , W^{6+} y nitrógeno mediante el método sol-gel, usando un procedimiento de recubrimiento por inmersión sobre portaobjetos de vidrio para estudiar la influencia de los dopantes en sus propiedades texturales y actividad fotocatalítica. Encontró que los mejores resultados de degradación fotocatalítica se obtuvieron para las películas dopadas con Ca^{2+} , esto se correlaciona con el tamaño de los poros y la superficie específica de las películas, además del efecto dopante sobre los mecanismos fotocatalíticos.

Los materiales utilizados para la construcción fueron en su mayoría reciclados, por lo que este trabajo permite la fabricación de reactores fotocatalíticos de muy bajo costo que puedan ser empleados para actividades de enseñanza; si los parámetros de construcción son validados y controlados, el diseño en comento puede ser aplicado como una herramienta de investigación. Este diseño también incorpora equipo de laboratorio lo cual le permite tener mayor robustez tecnológica. (Figura 5).

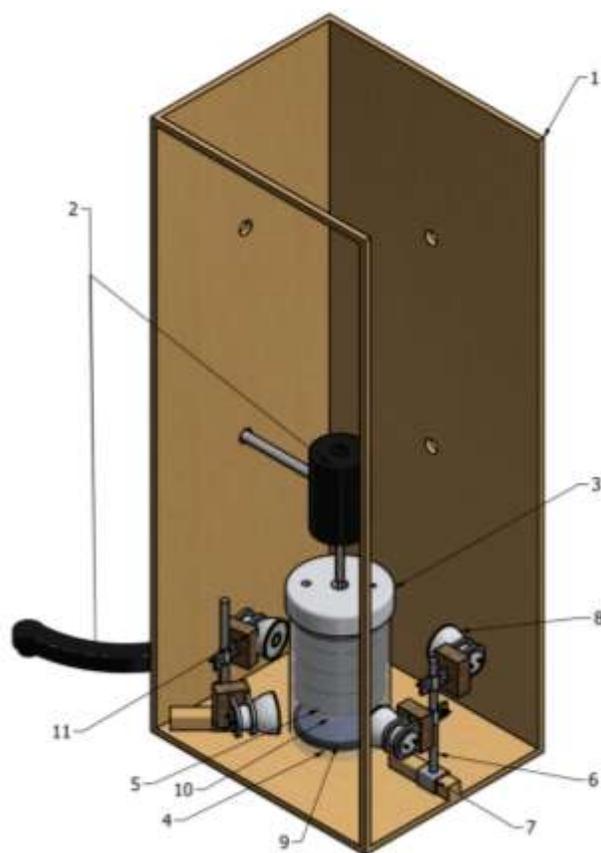


Figura 4. Elementos del reactor fotocatalítico. 1) Caja aislante de luz exterior 2) Base y motor del mezclador. 3) Tapa superior del reactor 4) Recipiente cilíndrico 5) Discos de acero inoxidable (sustratos de los recubrimientos fotocatalíticos) 6) Varillas de soporte 7) Uniones móviles 8) Lámparas LED 9) Difusor circular 10) Eje y mariposa del mezclador 11) Soportes de las lámparas LED.



Figura 5. Construcción y montaje del reactor fotocatalítico.

Caracterización hidrodinámica (Diámetro de gota en ascenso)

La figura 6 y la figura 7 muestran la distribución del tamaño de burbuja con dos condiciones de operación; burbujeo (B) y burbujeo con mezclado (BM). Con la finalidad realizar una mejor caracterización del reactor, el volumen se dividió en tres secciones. La sección 1 representa los primeros 5 cm de la altura del volumen. La sección 2 y 3 representan los rangos de 5 a 10 cm, respectivamente. La primera sección en la condición B, el diámetro promedio de burbuja fue de 0.98 ± 0.42 mm, esta es la zona donde las burbujas brotan del difusor. A medida que la burbuja asciende los diámetros de las burbujas aumentan a 1.92 ± 0.83 mm y 2.6 ± 0.82 mm para sección 2 y 3 respectivamente (Figura 6b y 6c).

Según (Reyes-Cruz et al., 2016) la característica principal que manifiesta la evolución de las burbujas es el tamaño alcanzado por las mismas en el flujo y el tiempo de vida de estas, las cuales pueden presentar cambios experimentales en la presión a nivel local y en las fluctuaciones de las variables termodinámicas.

Los diámetros de las burbujas en la condición BM son muy similares, 1.42 ± 0.97 mm, 1.44 ± 0.79 mm y 2.12 ± 0.99 mm para sección 1, 2 y 3, respectivamente (Figura 7a y 7b) por lo que la agitación sólo aumenta el tiempo de la burbuja en el fluido ya que el recorrido de ascenso es de forma de espiral, por lo que puede resultar conveniente para aumentar la transferencia de oxígeno.

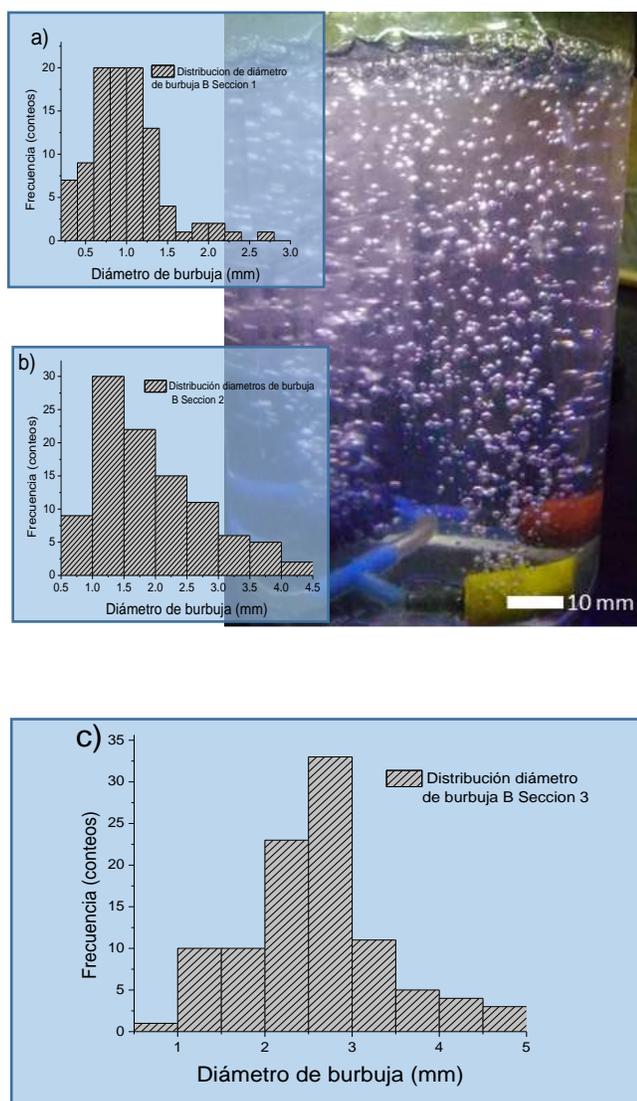


Figura 6. Distribución de tamaños de las burbujas en ascenso para la modalidad Burbujeo (B). a) Sección 1, b) Sección 2, c) Sección 3.

Páez Lara en el 2011 caracterizó un biorreactor de lecho fluidizado, encontró que las burbujas con tamaños mayores a 3 mm desarrollan una circulación interna y superficies móviles que les permiten moverse en espirales durante el ascenso libre a través del medio líquido, y así dar lugar a la formación de remolinos que provocan un aumento del coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno.

El tener tamaños de burbuja mayores en los niveles más bajos del reactor proporciona de manera significativa un aumento en el suministro de oxígeno al volumen, ya que según Gelves et al. (2013) las fuerzas centrífugas se incrementan, y el aire es capturado detrás de las aspas del agitador.

Este fenómeno disminuye el escape de las burbujas del reactor, lo que genera una mejor dispersión de las burbujas de aire y un ambiente hidrodinámico gobernado por fenómenos de ruptura de burbujas, que trae como consecuencia una mejor transferencia de oxígeno. Esto se evidencia en la reducción de los diámetros de burbuja en la sección 3 de la condición BM (Figura 7c) con respecto a la sección 3 de la condición B.

El acomodo del agitador y de los difusores mejoran la transferencia de oxígeno en el reactor, ya que según (Nienow et al., 1994) en los reactores de tipo tanque agitado se puede alcanzar hasta un 50% más de eficiencia de transferencia de oxígeno disuelto desde la burbuja al líquido.

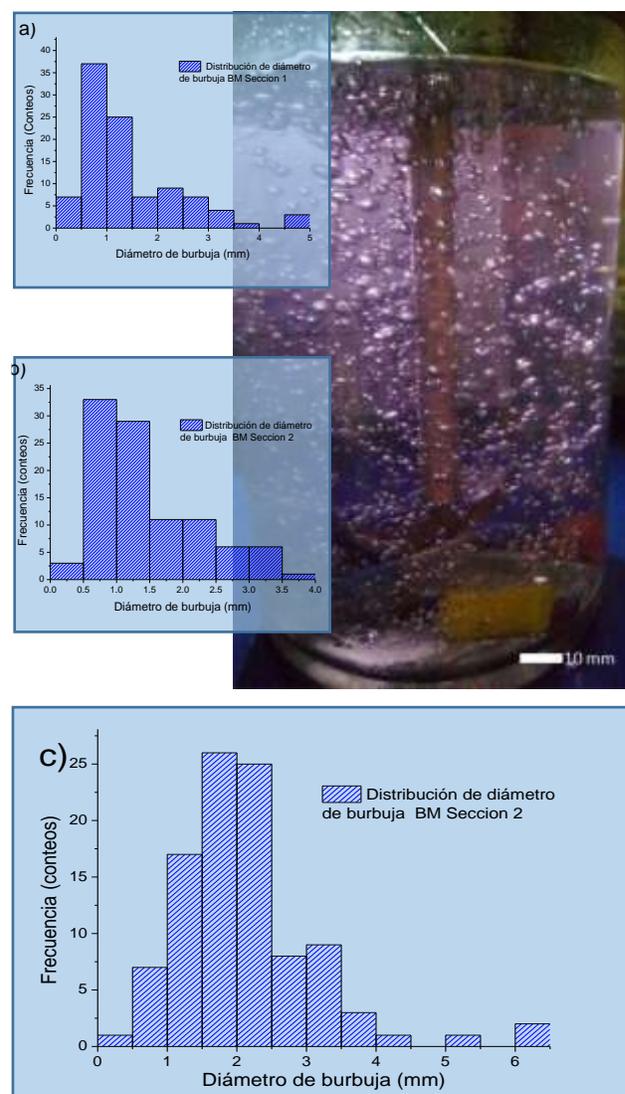


Figura 7. Distribución de tamaños de las burbujas en ascenso para la modalidad Burbujeo con Mezclador (BM). a) Sección 1, b) Sección 2, c) Sección 3.

Influencia de la temperatura de la fuente de iluminación al reactor

En la prueba se utilizó un termómetro convencional para medir la temperatura. La tabla 1 muestra el aumento de temperatura a través del tiempo de las distintas zonas muestreadas.

Tabla 1. Temperatura del reactor expuesto a la fuente de iluminación.

Tiempo (min)	Superficie Reactor	Reactor	Foco
0	20	20	20
10	20	20	40
20	20	20	40
30	22	21	40
40	22	21	40
50	22	22	40
60	22	22	40

La temperatura después 50 minutos de funcionamiento de las lámparas se mantuvo constante. La temperatura se encuentra dentro del intervalo de 20 - 80 °C, la cual se considera como ideal para una reacción fotocatalítica (Mathews et. al., 2008). Debido a la activación fotónica, los sistemas de fotocatalisis no requieren demasiado calor y operan a temperatura ambiente.

Otro efecto tiene que ver con la reducción en la tasa de difusión de oxígeno en el volumen derivado del aumento de la temperatura, según (Montoya y Bermúdez, 2003) el efecto neto de la temperatura sobre la transferencia de oxígeno depende del intervalo de temperatura considerado.

El aumento de temperatura en 2 °C puede representar una pérdida en la concentración de oxígeno disuelto de ~ 0.2 mg/L (Rojas, 2010). La distancia entre las lámparas y el reactor es un factor determinante en la influencia de la temperatura en la difusividad de oxígeno dentro del reactor.

Tiempo de residencia y de mezclado

De acuerdo con las mediciones el tiempo de mezclado disminuye a la mitad (10 s) cuando se usa agitación y burbujeo en comparación usando agitación (20.33 s), con una agitación de 480 rpm. Las figuras 8 y 9 muestran el experimento para la determinación del tiempo de mezclado. Se ha demostrado que la relación agitación-aireación tiene un efecto significativo sobre el coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno (Bedoya Pérez & Hoyos Sánchez, 2008).

Además, la agitación axial presenta ventajas significativas frente a la agitación radial, ya que se consigue una mejor distribución del burbujeo sin dejar zonas con corrientes débiles donde se reduce la transferencia de oxígeno. Una de las desventajas de esta agitación es la generación de un vórtice que provocan el fenómeno llamado inundación del agitador, esto obliga a trabajar a velocidades de agitación relativamente bajas (Rosseburg et al., 2018).

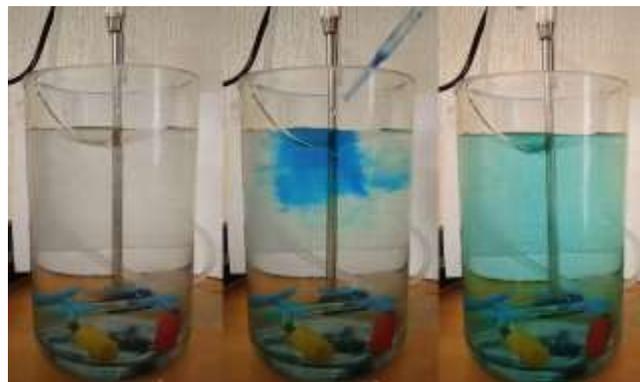


Figura 8. Tiempo de mezclado usando solo agitación.



Figura 9. Tiempo de mezclado, Agitación y burbujeo.

El tiempo de residencia es el tiempo que tarda un elemento en salir del volumen del reactor (Solís, 2015). En este caso se determinó el tiempo de residencia de la burbuja de ascenso dentro del reactor, como el tiempo que tardan las burbujas en salir del difusor a la superficie. Se observó que el tiempo de residencia aumentó 121% cuando se utiliza agitación y burbujeo, el tiempo de residencia observado en esta condición fue de 0.6. Esto derivado de las corrientes de circulación generadas por el asa del mezclador. Se ha demostrado que el aumento en el tiempo de residencia de las burbujas mejora la transferencia de oxígeno, esto debido a que el tiempo de interacción de las fases gas-líquido es mayor y se incrementa la difusión entre ellas (Páez Lara, 2011).

Conclusiones

Se diseñó y construyó un reactor con aireación y agitación mecánica de bajo costo empleando materiales reciclados y equipo de laboratorio que lo hace un equipo robusto para realizar investigaciones académicas de la degradación de contaminantes orgánicos empleando recubrimientos fotocatalíticos. Se evaluó el tiempo de mezclado y tiempo de residencia de la burbuja que asegure una adecuada transferencia de oxígeno, los cuales fueron mejorados mediante la agitación mecánica. La cantidad y potencia de las lámparas y la distancia con respecto al reactor resultan adecuadas, ya que sólo aumenta 2 °C en la primera hora de operación del reactor, evitando así la pérdida de la solubilidad del oxígeno.

Referencias

- Abbas N., Shao G. N., Haider M. S., Imran S. M., Park S. S., Kim H. T. (2016). Sol-gel synthesis of TiO₂-Fe₂O₃ systems: Effects of Fe₂O₃ content and their photocatalytic properties. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 39, 112–120. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jiec.2016.05.015>
- Bedoya Pérez J. C., Hoyos Sánchez R. A. (2008). Efecto de la Relación Agitación-Aireación sobre el Crecimiento Celular y la Producción de Azadiractina en Cultivos Celulares de Azadirachta indica A. Juss. Universidad Nacional de Colombia. <http://www.scielo.org.co/pdf/rfnam/v63n1/a08v63n01.pdf>
- Behpour M., Atouf V. (2012). Study of the photocatalytic activity of nanocrystalline S, N-codoped TiO₂ thin films and powders under visible and sun light irradiation. *Applied Surface Science*, 258(17), 6595–6601. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.03.085>
- Boyjoo Y., Pareek V., Ang H. (2013). Some aspects of photocatalytic reactor modeling using computational fluid dynamics. *Chemical Engineering Science*, 101, 764–784. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.06.035>
- Casbeer E., Sharma V. K., Li X.-Z. (2012). Synthesis and photocatalytic activity of ferrites under visible light: A review. *Separation and Purification Technology*, 87, 1–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.11.034>
- Castro Y., Arconada N., Durán A. (2015). Synthesis and photocatalytic characterisation of mesoporous TiO₂ films doped with Ca, W and N. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 54(1), 11–20. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2015.02.003>
- Doran M. P. (1995). *Bioprocess Engineering Principles*, (Primera). Academic Press.
- Estrada-Flores S., Martínez-Luévanos A., Perez-Berumen C. M., García-Cerda L. A., Flores-Guía T. E. (2020). Relationship between morphology, porosity, and the photocatalytic activity of TiO₂ obtained by sol-gel method assisted with ionic and nonionic surfactants. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 59(5), 209–218. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2019.10.003>
- Falk G., Borlaf M., López-Muñoz M. J., Fariñas J. C., Neto J. B. R., Moreno, R. (2017). Microwave-assisted synthesis of Nb₂O₅ for photocatalytic application of nanopowders and thin films. *Journal of Materials Research*, 32(17), 3271–3278. <https://doi.org/10.1557/jmr.2017.93>
- Ganesh I., Gupta A. K., Kumar P. P., Sekhar P. S. C., Radha K., Padmanabham G., Sundararajan G. (2012). Preparation and Characterization of Ni-Doped Materials for Photocurrent and Photocatalytic Applications. *The Scientific World Journal*, 2012, 127326. <https://doi.org/10.1100/2012/127326>
- Gelves R., Benavides A., Quintero J. C. (2013). Predicción del comportamiento hidrodinámico en el escalado de un reactor de tanque agitado para procesos aerobios, mediante CFD. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 21, 347–361. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-3305201300030005&nrm=iso
- Komaraiah D., Madhukar Vijayakumar Y., Ramana Reddy M.V., Sayanna R. (2016). Photocatalytic degradation study of methylene blue by brookite TiO₂ thin film under visible light irradiation. *Materials Today: Proceedings*, 3(10, Part B), 3770–3778. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2016.11.026>
- Maldonado Rubio M. I., Suárez Gil S., Miranda García N. (2015). Degradación de contaminantes emergentes mediante TiO₂ inmovilizado e irradiación solar. Libro CIEMAT. https://www.psa.es/en/areas/tsa/docs/Tesis_Noelia_Miranda.pdf
- Mathews N.R., Morales E.R., Cortés M., T. J. (2008). TiO₂ thin films-Influence of annealing temperature on structural, optical and photocatalytic properties. *Solar Energy*. 1499 – 1508.
- Miyawaki A., Taira S., Shiraishi F. (2016). Performance of continuous stirred-tank reactors connected in series as a photocatalytic reactor system. *Chemical Engineering Journal*, 286, 594–601. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.11.007>

- Moctezuma E., Leyva E., Aguilar C. A., Luna R. A., Montalvo C. (2012). Photocatalytic degradation of paracetamol: Intermediates and total reaction mechanism. *Journal of Hazardous Materials*, 243, 130–138. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.10.010>
- Mondon A. (2017). *Mecánica de los fluidos* (mc (ed.); Primera). Facultad de ingeniería.
- Montoya Guzmán D. A., Bermúdez Segura M. Y. (2003). Modelamiento de la transferencia de oxígeno para el cultivo de microorganismos en un biorreactor de columna de burbujeo [Universidad Nacional de Colombia]. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/2787/didierabdresmontoyaguzman.monicayamilebermudezsegura.2003.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Nienow, A. W., Hunt G., Buckland B. C. (1994). A fluid dynamic study of the retrofitting of large agitated bioreactors: Turbulent flow. *Biotechnology and Bioengineering*, 44(10), 1177–1185. <https://doi.org/10.1002/bit.260441004>
- Ortiz Portillo Iris Marisol R. C. A. C. (2009). “Diseño y construcción de un reactor a escala de planta piloto para el tratamiento de azul de metileno y como VI en aguas.” PRIMERO, 15.
- Páez Lara M. A. (2011). Escalado de la producción industrial de levadura de panificación usando dos reactores modelo y un bio-reactor prototipo. Escuela Politécnica Nacional.
- Passalía C. (2010). Modelado de un reactor fotocatalítico para la eliminación de contaminantes del aire [Universidad Nacional del Litoral]. <file:///C:/Users/alber/Desktop/Reactor/articulos,tesisdescargados/tesis reactor fotocatalitico.pdf>
- Reda S. M., Khairy, M., Mousa, M. A. (2020). Photocatalytic activity of nitrogen and copper doped TiO₂ nanoparticles prepared by microwave-assisted sol-gel process. *Arabian Journal of Chemistry*, 13(1), 86–95. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2017.02.002>
- Reyes-Cruz J. L., Ruiz-Chavarría G., Lambert-Sánchez R., Turro-Breff A. (2016). Dinámica de las burbujas de cavitación en fluidos amoniacales trasegados con bombas centrífugas. Redalyc.Org. http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/art9_No3_2016/719
- Rojas H. A. (2010). Aplicación de un modelo de correlación entre las variables temperatura, densidad y oxígeno disuelto para la identificación de termoclina en la estratificación térmica. *Reportes Científicos de La FACEN*, 1, 2–14. http://scielo.iics.una.py/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2222-145X2010000200002&nrm=iso
- Rosseburg A., Fitschen J., Wutz, J., Wucherpennig T., Schlüter M. (2018). Hydrodynamic inhomogeneities in large scale stirred tanks – Influence on mixing time. *Chemical Engineering Science*, 188, 208–220. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.05.008>
- Shang J., Zhu Y. F., Du Y. G., Xu Z. L. (2002). Comparative studies on the deactivation and regeneration of TiO₂ nanoparticles in three photocatalytic oxidation systems: C₇H₁₆, SO₂, and C₇H₁₆-SO₂. *Journal of Solid State Chemistry*, 166(2), 395–399. <https://doi.org/10.1006/jssc.2002.9613>
- Solís Herrera J. Á. (2015). Modelado y simulación de un reactor airlift para su aplicación en la separación de sílice del agua. [Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco]. <https://core.ac.uk/download/pdf/250601719.pdf>
- Sonawane R. S., Kale B. B., Dongare M. K. (2004). Preparation and photo-catalytic activity of Fe-TiO₂ thin films prepared by sol-gel dip coating. *Materials Chemistry and Physics*, 85(1), 52–57. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2003.12.007>
- Zhao D., Chen C., Wang Y., Ma W., Zhao J., Rajh T., Zang L. (2008). Enhanced Photocatalytic Degradation of Dye Pollutants under Visible Irradiation on Al(III)-Modified TiO₂: Structure, Interaction, and Interfacial Electron Transfer. *Environmental Science & Technology*, 42(1), 308–314. <https://doi.org/10.1021/es071770e>