

Efecto del flujo de aire en la distribución de tiempos de residencia en un fotobiorreactor Applikon

Gerardo E. González-Landero ¹, José Vicente Martínez ¹, Nayeli Gutiérrez-Casiano ¹, Luis Antonio Velázquez Herrera ¹, Adolfo Castillo Morán ²
Eduardo Hernández-Aguilar ^{1,*}

¹ Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, Prol. De Ote. 6 número 1009, colonia Rafael Alvarado. Orizaba, Veracruz. 94340. México.

² Facultad de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Veracruzana, Calle Josefa Ortiz de Domínguez, camino peñuela-Amatlán, s/n. Peñuela, Municipio de Amatlán de los reyes, Ver. C.P. 94945

* Autor de correspondencia: eduhernandez@uv.mx; Tel.: (+52)272 782 3714

Artículo de divulgación científica

Recibido: 21 de abril de 2025 Aceptado: 5 de junio de 2025 Publicado: 12 de julio de 2025

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v4i1.446>

Resumen: En la ingeniería Química se encuentra la rama de diseño de reactores, la cual se encarga de modelar simular y optimizar. Sin embargo, en la realidad se observan comportamientos muy diferentes a los modelos ideales, esto debido a una deficiente agitación generando zonas muertas o estancadas por lo que es importante estudiar y evaluar estos comportamientos y una de las formas es mediante la distribución de tiempos de residencia y CFD. El objetivo de este trabajo es evaluar tres diferentes aireaciones (1.6, 3.2 y 4.8 L/min) las cuales por medio de burbujeo generan la agitación en un biorreactor Applikon. Para ello se utilizó un trazador (NaCl) con una concentración de 1 molar, del cual se inyectan 5 ml con el método de pulso e inmediatamente es monitoreado con un medidor digital. La distribución de tiempos de residencia mostró en la aireación de 1.6 y 3.2 L/min gran cantidad de picos indicando cortos circuitos a comparación a la de 4.8 L/min, obteniendo un mezclado más homogéneo con respecto al tiempo. Esto igual se observó en los porcentajes de zonas muertas obtenidas en la simulación CFD, las cuales fueron 27 % en 1.6 L/min, 21 % en 3.2 L/min y 12 % para 4.8 L/min.

Palabras clave: DTR; Biorreactor; CFD.

Introducción

Existen diferentes tipos de biorreactores que de acuerdo con las necesidades pueden ser abiertos o cerrados, por lo que la implementación y optimización de sistemas de mezclado óptimos se ven reflejados en costos y resultados. Hoy en día los biorreactores juegan un papel importante para el tratamiento de aguas residuales debido a que en la vida real el comportamiento dentro de ellos no es el ideal, esto debido a una mala circulación del fluido o por la formación de zonas muertas, por lo que el conocimiento de una hidrodinámica y una distribución de tiempo de residencia (RTD por sus siglas en inglés), nos permite ajustar el modelo de manera óptima y poder así predecir el tiempo específico de una especie química (Ramírez *et al.*, 2020).

La presente investigación está enfocada en la mezcla por medio de aireación en un biorreactor Applikon a escala laboratorio el cual es empleado en la biorremediación de agua residuales mediante microalgas. Para ello se propusieron tres diferentes tipos de velocidad de aireación 1.6, 3.2 y 4.8 L/min y con ayuda de la RTD podemos evaluar los tiempos de mezclado no idealidades de acuerdo con las velocidades propuestas y con ayuda de la dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) que es una herramienta ampliamente utilizada para investigar las zonas muertas o estancadas que se generan dentro del biorreactor por operaciones o diseños geométricos (Hernández *et al.*, 2016).

Con esta información, se puede estudiar cómo optimizar el biorreactor para mejorar el movimiento del agua, lo que favorece el crecimiento de la microalga, la eliminación de contaminantes en aguas residuales y la captura de dióxido de carbono. Esto trata dos problemas ambientales importantes que forman parte de la agenda 2030 para el desarrollo sostenible: el objetivo 6 sobre agua limpia y saneamiento, y el objetivo 13 sobre acción por el clima.

Desarrollo

El análisis del tiempo de permanencia se llevó a cabo empleando tres niveles de aireación: 1.6, 3.2 y 4.8 L/min. Se empleó el volumen máximo del biorreactor (4 L) y se instaló un medidor digital con dos electrodos, uno de entrada y otro de salida, tal como se muestra en la Figura 1. Se llevó a cabo una prueba de pulso utilizando una bomba

dosificadora. Para mantener el volumen, se ajustó el flujo de entrada y salida a 20 ml por minuto. Luego, se inyectó 5 ml de trazador de cloruro de sodio, con una concentración de 1 molar, y se monitoreó cada 15 segundos hasta completar un minuto, y luego cada minuto hasta que la concentración se diluyera por completo.

Para la realización de la simulación fue necesario efectuar una determinación del tamaño de burbuja, para ello se tomaron diez imágenes digitales de las tres diferentes aireaciones las cuales fueron procesadas y analizadas en el software *imagi* el cual es de uso libre. Con ellos se determinó el diámetro de burbuja, la Tabla 1 muestra los diferentes valores obtenidos con respecto a cada aireación.

Finalmente, con los datos recopilados se hizo un promedio con el método de Sauter, este método sirve para calcular el diámetro de una burbuja en un sistema empleando la Ecuación 1. Donde D_{32} es el diámetro ponderado de la burbuja n_i es el número de burbujas y d_i es el diámetro de estas. Es importante conocer el diámetro de burbuja ya que es un parámetro necesario para llevar a cabo la simulación.

Tabla 1. Diámetro de burbujas obtenidos en las diferentes aireaciones

Aireación		
1.6 L/min	3.2 L/min	4.8 L/min
Tamaño de burbuja		
1.5 mm	3 mm	4 mm
2 mm	3 mm	4 mm
1.5 mm	2.5 mm	4 mm
1.5 mm	2.5 mm	3.5 mm
1.5 mm	3 mm	4 mm
1 mm	3 mm	5 mm
2 mm	2.5 mm	4.5 mm
2 mm	3 mm	4 mm
2 mm	2.5 mm	5 mm
1.5 mm	2.5 mm	4 mm

$$\bar{d}_{32} = \frac{\sum_i^n n_i d_i^3}{\sum_i^n n_i d_i^2} \quad (1)$$

Este estudio se usó para imitar el movimiento de fluidos en el mundo digital. Se usó el programa de diseño SolidWorks para crear la geometría. El biorreactor mide 52 centímetros de alto y tiene un muro de 0.35 centímetros. Se divide en tres partes: la parte de arriba, que tiene un diámetro de 14 centímetros y una altura de 7.5 centímetros; tiene forma cilíndrica de 65 centímetros y una altura de 75 centímetros. Ver Figura 1. Se usó el software de simulación COMSOL multiphysics 6.2 para realizar la simulación. En esta ocasión, el biorreactor Applikon basa su sistema de homogenización o mezclado en el movimiento ascendente de las burbujas inyectadas, este movimiento se simuló usando el modelo RANS (ecuaciones de Reynolds, Average Navier-Stokes) y la ecuación de turbulencia k-ε. La burbuja llegó a medir 3.48 milímetros, un flujo de 1.6 litros por minuto a una temperatura de 25°C.

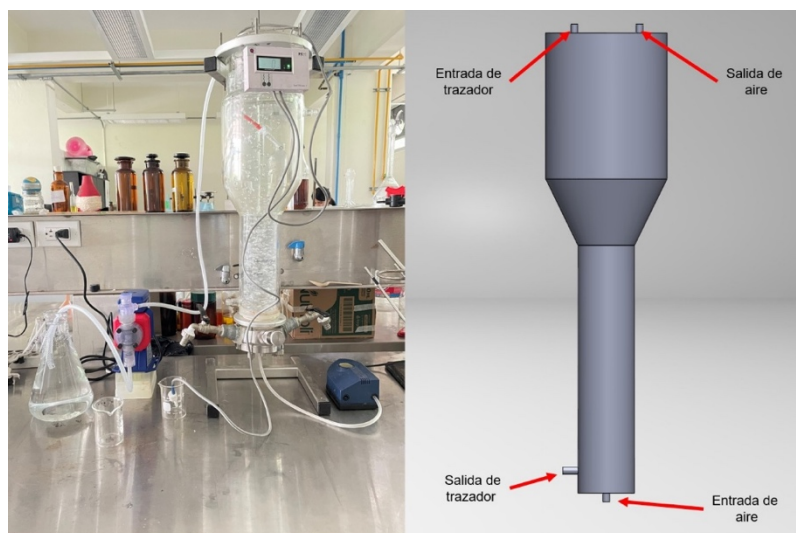


Figura 1. a) biorreactor montado y puesto en marcha b) geometría de biorreactor en 3D.

Las variables para utilizar fueron el diámetro de burbuja, la velocidad de entrada, temperatura y viscosidad. Para posteriormente especificar cada punto de estas variables en la geometría, e indicar las condiciones de cada una de las paredes según sea el caso, Figura 1.

El tipo de mallado utilizado fue tetraédrico y cuadrática, ambas mallas se calibraron a dinámica de fluidos y el tamaño de elemento fue fino esto con la finalidad de optimizar los recursos computacionales ya que esto es crucial en cuestión de tiempo al correr la simulación Tabla 2. El equipo utilizado para el análisis de la simulación fue una Workstation Lenovo Intel Xeon a 2.10GHz y una RAM de 250 GB.

Tabla 2. Detalles geométricos del mallado utilizado.

Applikon			
Geometría	Elementos	Domino	Tamaño de elemento
Cuerpo principal	4440	cuadro	fino
Entrada y salida	2542	tetraédrico	fino

Resultados

La Figura 2 muestra la cinética de concentración de trazador ($C(t)$) en la que se comparó la concentración de salida del trazador con respecto al tiempo para las tres aireaciones propuesta. En la cual se observa como la aireación de 4.8 L/min tiene un mezclado rápido y homogéneo, con respecto a los otros niveles de aireación, sin embargo, el consumo de potencia de aireación es mayor.

La forma de la curva mostro el comportamiento característico de un reactor de mezcla completa, al ir disminuyendo su concentración gradualmente. A diferencia de un flujo pistón que desaparece repentinamente como el reportado por Díaz Marrero *et al.* (2014) en un Reactor Empacado de Flujo Ascendente (REFA). Sin embargo tambien se puede deducir que el comportamiento tiende a la idealidad. A diferencia del flujo no ideal presentado en reactores Ovoides estudiados por Hernández-Aguilar *et al.* (2016).

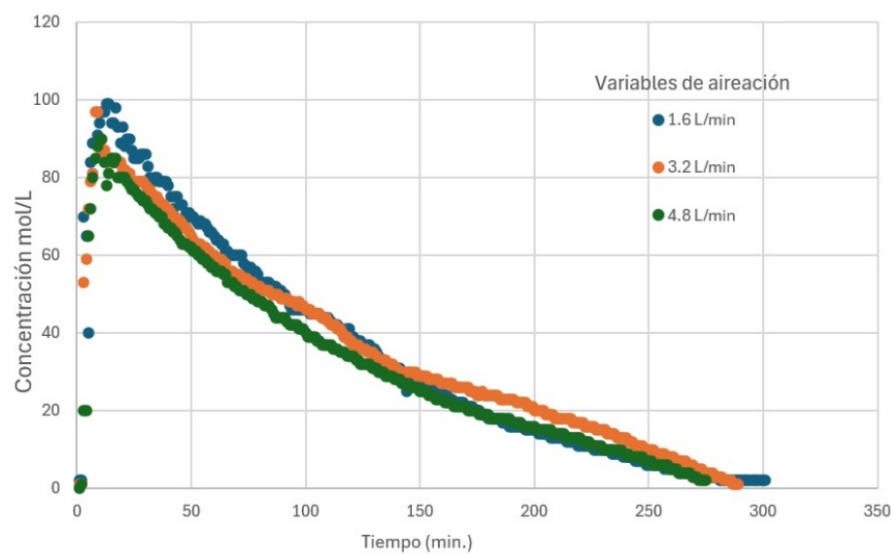


Figura 2. Distribución de tiempos de residencia

De igual manera se observa el funcionamiento de tipo mezcla completa donde la concentración del trazador fue aumentando de manera progresiva para los 3 niveles de aireación a partir del segundo 45. en la cual la aireación de 1.6 L/min presento la mayor concentración máxima esto ocurre por la presencia de zonas muertas como lo presento Bahl *et al.* (2012) en su reactor de reflujo.

La tabla 3 se muestran los datos experimentales los cuales interpretan los resultados de los tiempos de residencia de la curva en donde t_p es el tiempo transcurrido, t_i es el tiempo desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente, t_c es el tiempo en que la concentración es mayor que $C_p/2$, t_b es el tiempo en que la concentración es mayor que $C_p/10$ y t_m es el tiempo correspondiente a la salida del 50% de la cantidad de trazador inyectado estas relaciones son planteadas por Unigarro *et al.* (2014) t_p/t_o , t_i/t_o , t_c/t_o , t_b/t_o y t_m/t_o . Las cuales nos indica un regimen de flujo de mezcla completa con presencia de zonas muertas y cortos circuitos.

Tabla 3. Análisis de tiempos de residencia

Caudal de alimentación			
Tiempo	1.6 L/min	3.2 L/min	4.8 L/min
t_o	800	800	800
t_p	99	97	90
t_i	3	2	2
t_c	5	4	4
t_b	175	167	156
t_m	84.28	91.30	85.63
t_p/t_o	0.123	0.121	0.112
t_i/t_o	0.003	0.002	0.002
t_c/t_o	0.006	0.005	0.005
t_b/t_o	0.218	0.208	0.195
t_m/t_o	0.105	0.114	0.107
t_p/t_o	Predomina flujo mezclado	Predomina flujo mezclado	Predomina flujo mezclado
t_i/t_o	Predomina flujo mezclado con cortos circuitos	Predomina flujo mezclado con cortos circuitos	Predomina flujo mezclado con cortos circuitos
t_c/t_o	Flujo mezcla completa	Flujo mezcla completa	Flujo mezcla completa
t_b/t_o	No aplica	No aplica	No aplica
t_m/t_o	Cortos circuitos y/o zonas muertas	Cortos circuitos y/o zonas muertas	Cortos circuitos y/o zonas muertas

Perfiles hidrodinámicos

La Figura 3a muestra cómo se mueve el flujo en el biorreactor con una aireación de 1.6 L/min. Las líneas blancas indican el camino de la aireación y se pueden ver áreas muertas, especialmente donde se forman más vórtices, esto se debe a la baja velocidad del flujo. Al aumentar la velocidad de aireación a 3.2 L/min (Figura 3b), se pueden ver cambios en el flujo y una reducción de las áreas muertas, lo que indica que hay un mejor mezclado por la menor resistencia del líquido.

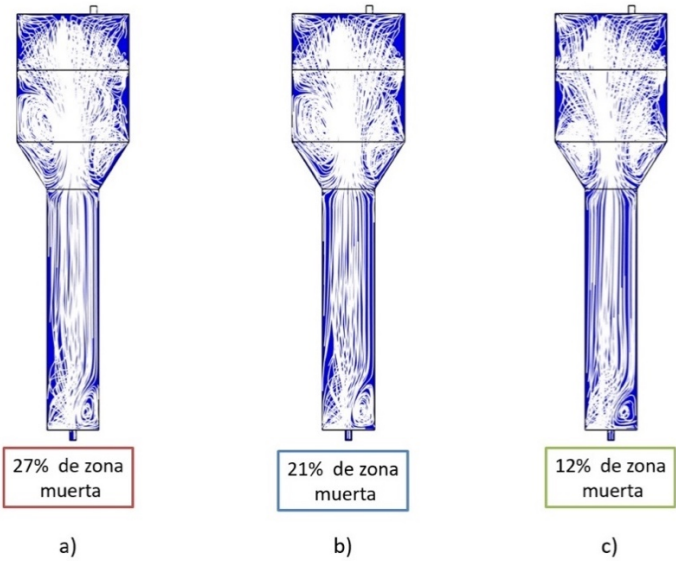


Figura 3. Simulación CFD de perfiles de velocidad a) Sistema con aireación de 1.6 L/min, b) Sistema con aireación de 3.2 L/min, c) Sistema con aireación de 4.8 L/min.

Finalmente, se observa que la aireación de 4.8 L/min (Figura 3c) produjo menos zonas muertas o estancadas al aumentar el flujo de aire. Esto sucede porque rompe más rápidamente la resistencia creada por el líquido, tal como lo muestra Salehpour *et al.* (2019) en su estudio sobre el comportamiento hidrodinámico de un reactor airlift con tubo de circulación tipo en varias configuraciones. Cabe mencionar que las zonas muertas fueron calculadas por medio de volumetría tomando como referencias las partes de color azul donde no se muestra ningún movimiento de fluido o es muy bajo.

Conclusiones

Según los resultados de los RTD, se observó un sistema de mezcla completa con tres diferentes caudales de aireación. Sin embargo, se encontraron picos que indicaron cortocircuitos, lo que muestra un comportamiento no ideal. Además, los resultados hidrodinámicos indican que hay una mejor mezcla y menos zonas muertas con la aireación a una velocidad de 4.8 L/min. Esto indica que, a mayor velocidad de alimentación, el sistema de mezclado funciona mejor, y esto también se muestra en los resultados de los RTD. Por esto, es importante la CFD y la determinación experimental de RTD en el diseño y mejora de reactores.

Bibliografía

- A. Ramírez, L., L. Pérez, E., García Díaz, C., Camacho Luengas, D., Ratkovich, N., & H. Reyes, L. (2020). CFD and Experimental Characterization of a Bioreactor: Analysis via Power Curve, Flow Patterns and $k_L a$. *MDPI*, 1-28. <https://www.mdpi.com/2227-9717/8/7/878>
- Bahl C. D., Gely, M. C. , & Pagano, A. M. (2012). Patrones de Flujo en Reactores Químicos: Desarrollo de Modelos Matemáticos y Numéricos Basados en CFD. *Asociación Argentina de Mecánica Computacional*, 49-68. <https://amcaonline.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/4051>
- Díaz Marrero, M., Dueñas Moreno, J., & Cabrera Díaz, A. (2014). Estudio hidrodinámico de reactores empacados de flujo ascendente (REFA). *Ingeniería Hidráulica Ambiental*, 101-108.
- Hernández Aguilar, E., Alvarado Lassman, A., Osorio Mirón, A., & Méndez Contreras, J. M. (2016). Development of energy efficient mixing strategies in egg-shaped anaerobic reactors through 3D CFD simulation. *Journal of Environmental Science and Health*, 536-543. <https://doi.org/10.1080/10934529.2016.1141619>
- Salehpour, R., Jalilnejad, E., Nalband, M., & Ghasemzadeh, K. (2019). Hydrodynamic behavior of an airlift reactor with net draft tube with different configurations: Numerical evaluation using CFD technique. *Particuology Science and Technology of Particles*, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2019.09.005>
- Unigarro, O., Dimitriv, G., Zambrano, R., Lizeth, H., & Gallo, C. (2014). Caracterización y Modelación del Comportamiento Hidrodinámico de un Reactor UASB. *revista EIA*, 67-75. <https://revistas.eia.edu.co/index.php/Reveiaenglish/article/view/940>