

Evaluación de tiempos de residencia en la homogenización - neutralización de aguas residuales de un beneficio húmedo de café

Nayeli Gutiérrez-Casiano ¹, Uriel Carmona-Rosas ², Solmaría Mandi Pérez-Guzmán ², Juan Manuel Mendez-Contreras ², Karla Díaz-Castellanos ¹ y 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 Instituto Tecnológico de Orizaba, Oriente 9 número 852 Colonia Emiliano Zapata. Orizaba, Veracruz. 94320. México.

* Autor de correspondencia: eduhernandez@uv.mx; (+52) 2727823714

Artículo de divulgación científica

Recibido: 27 de septiembre de 2024

Aceptado: 30 de octubre de 2024

Publicado: 23 de noviembre de 2024

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.213>

Resumen: Las aguas residuales provenientes del proceso de beneficio húmedo de café son potencialmente dañinas debido a su pH ácido y su carga orgánica presente debido al excesivo uso que se le en las fases de despulpado y lavado. Se analizó el tanque de neutralización que se encuentra dentro de la planta de tratamiento de aguas residuales del beneficio húmedo del centro del estado de Veracruz, para ello se obtuvieron los perfiles de velocidad y la distribución de tiempos de residencia empleando CFD, se propusieron y diseñaron 3 geometrías empleando 3 motobombas NABOHI a 3450 rpm con el fin de identificar problemas hidrodinámicos. Los datos de perfiles de velocidad comprobaron que las geometrías empleando 3 motobombas fueron las que mejores y más rápidas trayectorias generaron, además todas las geometrías los flujos fueron superiores a 1×10^{-3} m/s suficientes para favorecer el mezclado. La distribución de tiempos de residencia mostró, un comportamiento sin sistema de mezclado presentó picos de concentración indicando cortocircuitos y una tendencia dual a flujo pistón, comportamiento que cambia desde 1 motobomba. Las geometrías 1 empleando 3 motobombas es la que presento menos problemas hidrodinámicos de cortocircuitos, sin la presencia de zonas muertas y un comportamiento de mezcla completa.

Palabras clave: CFD; DTR; Reología.

Introducción

El proceso de beneficio húmedo de café es popular en México, Colombia y Centroamérica por producir un café de excelente aroma, sabor y cuerpo sin embargo generan grandes volúmenes de aguas residuales (Rattan *et al.*, 2015), estos presentan un pH ácido y elevada carga orgánica (Torres *et al.*, 2016) en sus aguas residuales, con una demanda química de oxígeno (DQO) en intervalos de 7000 y 12 000 mg/L por arriba de los máximos permisibles.

La implementación de sistemas de neutralización de pH ha sido una tendencia en el tratamiento de estas aguas residuales, sin embargo, los altos costos de sistemas de mezclado mecánico complican la inversión en este proceso. Una alternativa es la generación de recirculaciones internas con motobombas en el interior del tanque de homogenización (Arnau *et al.*, 2022). Esta estrategia se ha implementado en reactores y en tratamientos fisicoquímicos aplicados para aguas residuales. Trabajos previos han demostrado que las estrategias de mezclado con recirculaciones internas logran economizar costos de energía y de construcción, y pueden ser evaluadas con dinámica de fluidos computacional y la distribución de tiempos de residencia (Hernández-Aguilar *et al.*, 2016).

El presente trabajo se enfocó en los problemas de ineficiencia de agitación presentados en un tanque de acondicionamiento de pH de un beneficio de café, lo que provoca zonas con pH ácido afectando la eficiencia del proceso. Para ello, se caracterizó el agua residual para conocer las condiciones iniciales y se propusieron 3 geometrías de tanque y sistema de agitación usando motobombas con diferentes configuraciones de tubo de salida buscando mejorar el flujo y la recirculación a fin de obtener un pH uniforme y mejorar la eficiencia del sistema.

Desarrollo

Obtención de la muestra y monitoreo reológico

Las muestras de agua residual fueron proporcionadas por parte del sistema de tratamiento de aguas residuales de un beneficio húmedo ubicado en Veracruz, mismas que se tomaron del flujo de entrada del tanque de neutralización. En

la Tabla 1 se muestran los análisis evaluados en el residuo, así como las metodologías y normas oficiales mexicanas empleadas.

Para el análisis reológico se utilizó un viscosímetro rotacional Brookfield DV2T con adaptador de baja viscosidad (ULA) y chaqueta de control de temperatura. Se hicieron determinaciones a 10, 20, 30 y 40 °C con velocidades de 0 a 200 RPM variando la velocidad en intervalos de 10 RPM con 2 réplicas obteniendo la velocidad angular, rango de corte, fuerza de cizalla y viscosidad. Se graficó la fuerza de cizalla en función del rango de corte con el software GraphPad Prism® 8.0 y posteriormente los resultados se ajustaron a los modelos de Newton, Ostwald, Herschel y Bingham.

Tabla 1. Técnicas para la caracterización del agua residual.

Parámetro	Método	Norma
pH	Potenciométrico	NMX-AA-008-SCFI-2016
Densidad	Volumetría	NMX-F-282-SCFI-2011
Viscosidad	Brookfield	NMX-U-038-SCFI-2012
Demanda química de oxígeno (DQO)	Colorimetría	NMX-AA-030/01-SCFI-2012
Sólidos totales	Gravimetría	NMX-AA-034-SCFI-2015
Sólidos totales volátiles	Gravimetría	NMX-AA-034-SCFI-2015
Turbidez	Nefelométrico	NMX-AA-038-SCFI-2001

Simulación CFD

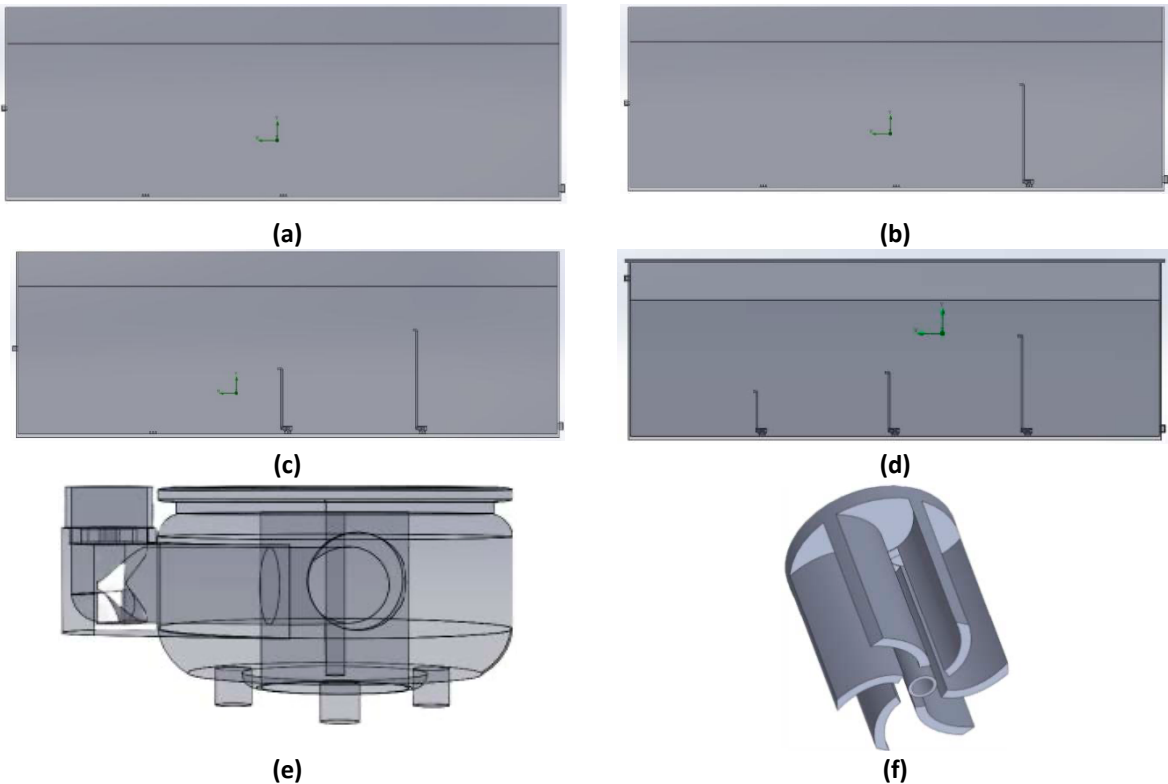


Figura 1. Geometría del tanque con: a) 3 motobombas b) 2 motobombas c) 1 motobomba d) sin motobomba, e) carcasa de la bomba y f) impulsor de la bomba

La estructura tridimensional del tanque neutralizador se hizo con las siguientes medidas: 14 m de largo, 2.1 m de ancho y 4.7 m de altura con volumen operable estimado de 112 m³. En la Figura 1a muestra la geometría del tanque de homogenización y también muestra la implementación de motobombas: b) 1 motobomba c) 2 motobombas d) 3 motobombas. La estrategia de mezclado vario las alturas del tubo de descarga en 1, 1.5 y 2 m. El diámetro interno del

tubo es de 50.8 mm. Figura 1e muestra la carcasa la geometría de la motobomba modelo BC-02-22-23/43 marca NABOHI® y la Figura 1f muestra el impulsor que opera a 3450 rpm de acuerdo con el fabricante. Se estableció el subdominio del fluido y las zonas de rotación con una velocidad angular de 3450 RPM, dato obtenido del manual del fabricante. Se establecieron condiciones de frontera del tipo pared real (Real Wall) a las paredes de la motobomba. Así como las condiciones de frontera de entrada y salida del volumen de control en $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$, y la entrada del trazador de $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$ pero solo durante 2 segundos con lo cual se simula el experimento estímulo respuesta.

Se utilizó el modelo modificado de turbulencia k- ϵ con funciones de amortiguación. Los parámetros de malla fueron: tamaño mínimo (minimum gap size) de 0.0867 m y se estableció en 3 el nivel de malla inicial (level of Initial mesh). Se utilizó el complemento FlowSimulation® de SolidWorks® con un análisis interno y se seleccionó la zona de rotación, para esta simulación se utilizó agua a 25°C y 1 atm en estado estacionario y posteriormente se cambiaron las propiedades de densidad y viscosidad dinámica obtenidas para el agua residual proveniente de los beneficios húmedos de café (Jaulis-Cancho et al., 2022). El equipo utilizado para el análisis computacional fue una Thinkstation Lenovo P920, Intel(R) Xeon(R) Silver 4116 CPU a 2.10GHz con doble procesador y 250 GB de RAM.

La Figura 2 muestra el diagrama de flujo y el proceso usado para las simulaciones de este caso, incluyendo todas las variables que se modificaron en el software en las fases de preprocesamiento, solucionador y posprocesamiento para obtener y dar seguimiento a las variables de control con la finalidad de generar la distribución de tiempos de residencia, en la fase de solucionador se muestra el modelo de DTR usado, en el post procesamiento se muestra los criterios de los tiempos de residencia para su análisis cualitativo.

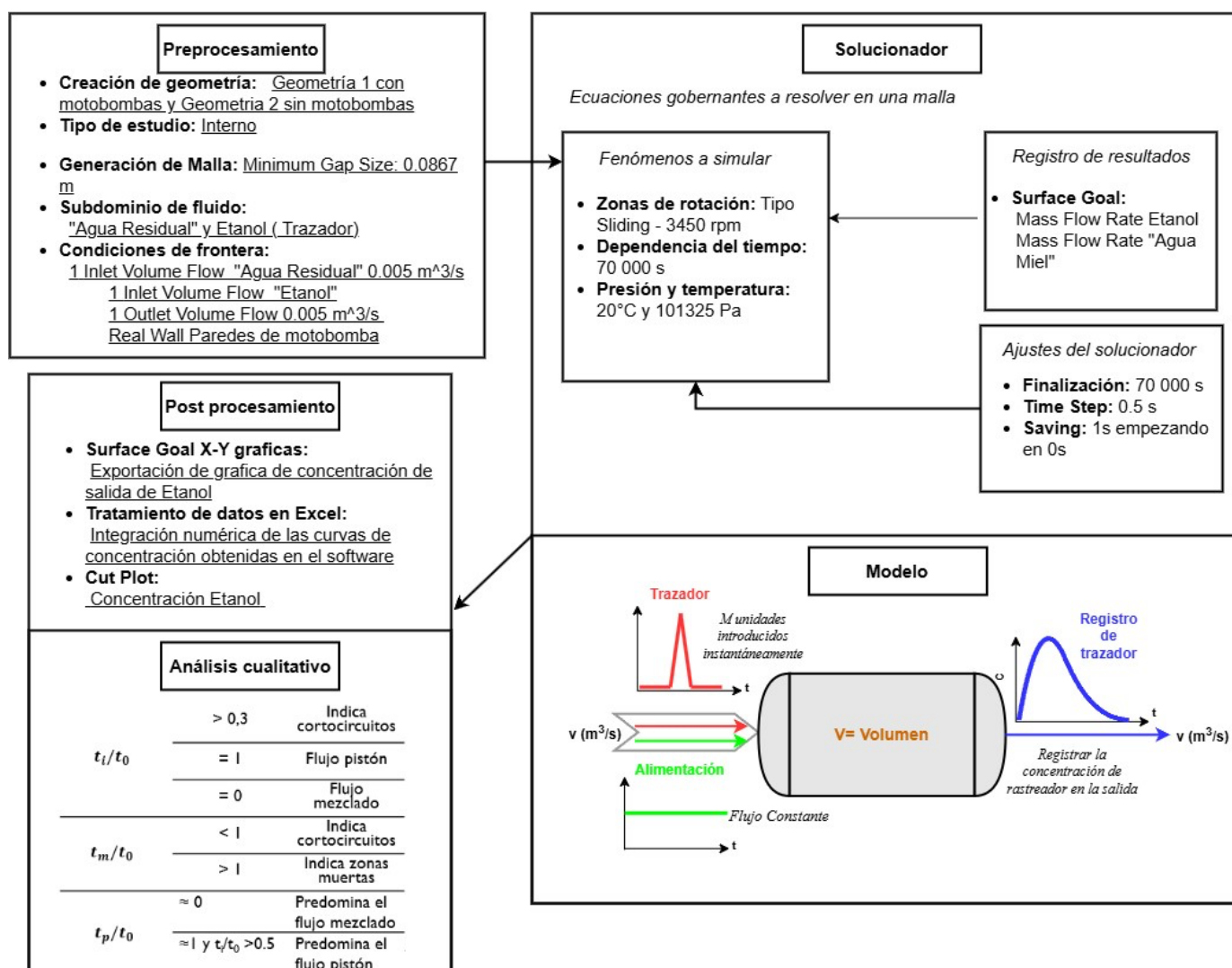


Figura 2. Diagrama de flujo para una simulación CFD para un análisis de DTR.

Resultados

Caracterización de agua residual.

La Tabla 2 muestra la caracterización de agua residual, las muestras se tomaron específicamente de la alimentación del tanque de neutralización. Esta agua residual tiene un pretratamiento primario de separación mecánica el cual redujo la carga orgánica e inorgánica. Los resultados de DQO, ST, SD y SS son bajos al compararlos con la literatura incluso en condiciones similares dentro del país como los resultados reportados por Lugo-Suarez en 2014 para un beneficio húmedo de café en Chiapas teniendo rangos de DQO de 48963.35 ± 639.47 mg/L, 5620.24 mg/L para ST (Lugo-Suarez, 2014). También Tacías (2012) reporta niveles de DQO de 16684.33, 15,000 y 20,000 mg/L y los cataloga como normales debido a que el agua en su mayoría es reutilizada en distintas fases del proceso. Se confirmó el pH ácido característico con un valor de 3.65, similar al valor reportado por Escobar (2012) para las aguas analizadas del beneficio húmedo de café (ARBHC) en Jicotol, Chiapas (Escobar, 2012). El contenido de materia orgánica relacionada con pulpa de fruta está relacionado con comportamientos no Newtonianos que impactan en el comportamiento hidrodinámico de sistemas de homogenización.

Tabla 2. Características fisicoquímicas de la muestra de agua residual.

Parámetro	Resultado	Unidades	Escobar (2014)	Selvamurungan (2010)
pH	3.65	---	3.8 ± 0.12	3.88-4.21
Densidad	995.661	kg / m ³	---	---
Viscosidad	8.9192×10^{-5}	Pa*s	---	---
DQO	254.6	mg/L	48963 ± 639.47	6420-8480
Sólidos totales	2770	mg/L	5620.24 ± 894.32	3520-4200
Sólidos suspendidos	290	mg/L	1518.73 ± 914.06	2390-2820
Sólidos disueltos	2480	mg/L	4562.65 ± 792.57	1130-1380
Turbidez	176	NTU	---	---

Caracterización reológica

En la Figura 3 se muestra el ajuste de las curvas obtenidas mediante los modelos reológicos, se puede observar que los mejores ajustes se obtuvieron con el modelo de Ostwald-De Waele y el de Herschel-Bulkley. En la Tabla 3 se resumen todos los datos de viscosidad para cada temperatura analizada con sus datos de correlación con la ecuación de ajuste de Ostwald-de Waele, teniendo coeficientes de correlación ligeramente superiores si se comparan con los resultados mostrados en la Tabla 3 que corresponden al ajuste con el modelo de Herschel-Bulkley demostrando que el agua residual tiene un comportamiento pseudoplástico.

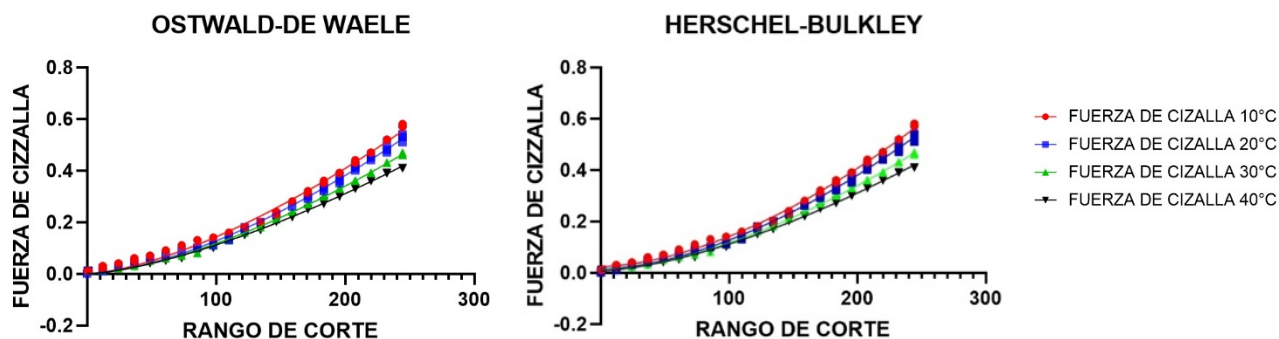


Figura 3. Grafica de monitoreo reológico ajustados con los modelos de Herschel-Bulkley y Ostwald-De Waele.

El comportamiento pseudoplástico del agua residual difiere del flujo newtoniano reportado por Alcívar-Reyna (2014) en su análisis de biodigestión anaerobia para el mismo tipo de agua, donde consideró la reología del agua residual como newtoniana, ya que no se observaron cambios en la viscosidad bajo esfuerzos cortantes transversales ni

longitudinales. Sin embargo, se concluyó que el contenido de materia orgánica en suspensión altera la viscosidad del fluido (Alcivar-Reyna, 2014). Reategui-Isla (2015) obtuvo una reología para el agua proveniente del despulpado, (agua sin pretratamiento previo) con un comportamiento pseudoplástico dependiente de la temperatura (Reategui-Isla, 2014). En ambos casos existe relación con la carga orgánica presentes en el agua presentando esas desviaciones en su reológica, el bajo DQO reportado tuvo influencia en el comportamiento pseudoplástico. Por lo tanto se tomaron los datos de 20 °C del modelo de Ostwald de-Waele para la simulación CFD además que estos datos sirven como parámetros de diseño para la operación de este proceso en distintas temperaturas que asimilan a las características en distintas estaciones del año.

Tabla 3. Modelos de Ostwald de-Waele y Herschel-Burkley para diferentes temperaturas.

Modelo de Ostwald de-Waele			
Temperatura	Ecuación	Coefficiente de correlación	K [Pa*s]
10 °C	$\tau = 0.000131689\dot{\gamma}^{1.5174}$	0.998902	0.000131689
20 °C	$\tau = 8.91952 \times 10^{-5} \dot{\gamma}^{1.5778}$	0.998968	8.91952×10^{-5}
30 °C	$\tau = 9.53958 \times 10^{-5} \dot{\gamma}^{1.5174}$	0.998931	9.53958×10^{-5}
40 °C	$\tau = 0.00012478 \dot{\gamma}^{1.47571}$	0.998853	0.00012478
Modelo de Herschel-Burkley			
Temperatura	Ecuación	Coefficiente de correlación	K [Pa*s]
10°C	$\tau = 0.0239 + 4.504 \times 10^{-5} \dot{\gamma}^{1.70}$	0.9961	4.504×10^{-5}
20°C	$\tau = 0.0144 + 4.454 \times 10^{-5} \dot{\gamma}^{1.70}$	0.9973	4.454×10^{-5}
30°C	$\tau = 0.0105 + 5.781 \times 10^{-5} \dot{\gamma}^{1.63}$	0.9989	5.781×10^{-5}
40°C	$\tau = 0.0072 + 4.504 \times 10^{-5} \dot{\gamma}^{1.54}$	0.9987	4.504×10^{-5}

Perfiles de velocidad

La Figura 4a y b presenta las trayectorias de flujo de tanque de neutralización sin bombeo de recirculación interna con agua y agua residual, las características reológicas del agua residual generan vórtices en la alimentación y descarga del volumen de control, utilizando flechas para indicar la dirección y los colores para representar la escala de velocidad, en los sistemas sin recirculación interna se presenta un flujo laminar con regiones amplias de baja velocidad (1.8 m/s o menos en coloración azul marino). Y no se detectan zonas estancadas o muertas. estudios de perfiles de velocidad por CFD consideran rangos inferiores a 1×10^{-3} m/s como zonas muertas como el análisis de Lain (2011) en el cual se realizó un análisis de monitoreo de trayectorias de flujo para un tanque de almacenamiento de agua potable de dimensiones comparables al de este trabajo, inclusive para sistemas más pequeños el rango de velocidad se considera menor como el analizado por Martínez et al. (2011) para la evaluación de un sistema de agitación de un tanque de digestión anaerobia.

La implementación de una motobomba presentó un cambio radical en los patrones de flujo del tanque homogeneizador generando una zona de alta velocidad en la succión de la bomba (Figura 4c), las características reológicas del agua residual aumentaron la resistencia al movimiento, mostrando un campo de velocidad de menor magnitud respecto del sistema con agua (Figura 4d), sin embargo en ambos sistemas se pueden ver múltiples recirculaciones internas que promueven la homogenización del fluido en el tanque.

Por otro lado, la implementación de 2 bombas aumentó las zonas de alta velocidad, en específico en la succión de ambas bombas. Este sistema logra una corriente desde la alimentación hasta la succión de una de las bombas la cual genera una recirculación interna que favorecerá la homogenización del sistema, sin embargo, también se puede apreciar una posible zona muerta debajo de la alimentación del tanque (Figura 4e).

Las partículas suspendidas presentes en el agua residual modifican sus características reológicas, provocando que la agitación sea menos eficiente que en el experimento realizado únicamente con agua (Figura 4f). Finalmente, el uso de tres motobombas genera mayor homogeneización del sistema, presentando zonas muertas únicamente en la salida del tanque (Figura 4g), mientras que para el experimento con agua residual, su densidad dificulta el mezclado completo del sistema produciendo zonas sin agitación en la parte de la salida de flujo del tanque (Figura 4h).

Esto es consistente con estrategias de mezclado y homogenización de otros estudios en los cuales implementaron recirculaciones internas con sistemas de bombeo, estas estrategias han demostrado la minimización del consumo de energía y mejora de la eficiencia de conversión en sistemas de reacción de acuerdo con Saini *et al.* (2021). De igual manera en sistemas que aprovechan la geometría para la generación de vórtices que promuevan el mezclado como el caso planteado por Hernandez-Aguilar *et al.* (2016) donde esta estrategia se utilizó para la eliminación de costo de agitadores mecánicos en reactores ovoides.

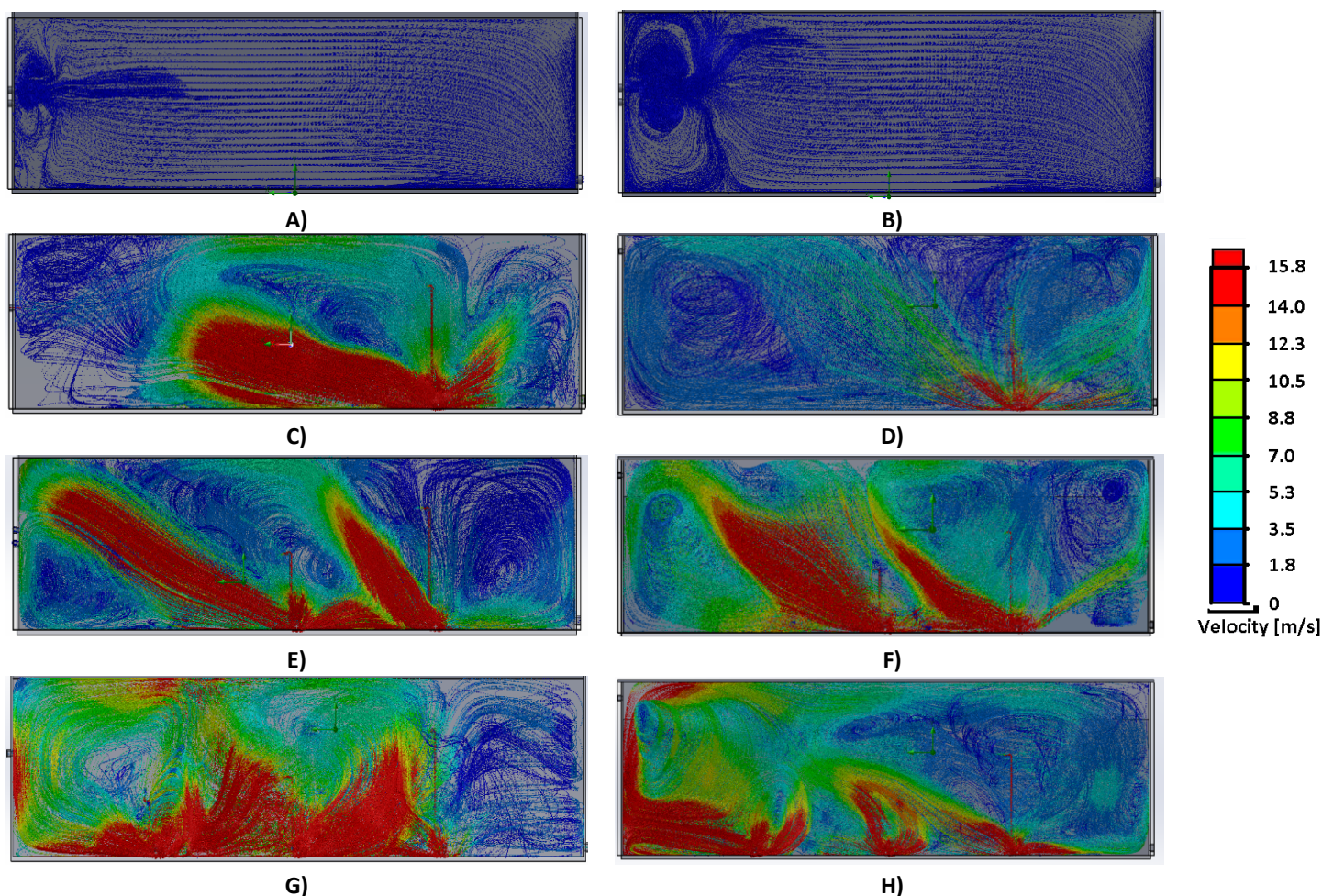


Figura 4. Simulación CFD de perfiles de velocidad para A) Sistema sin motobombas con agua, B) Sistema sin motobombas con agua residual C) 1 motobomba con agua D) 1 motobomba con agua residual E) 2 motobombas con agua F) 2 motobombas con agua residual G) 3 motobombas con agua , H) 3 motobombas con agua residual

Distribución de tiempos de residencia.

En Figura 5 se muestra la gráfica C(t) en la que se relacionó la concentración de salida del trazador con el tiempo para todas las geometrías propuestas, la información de dicha gráfica fue utilizada para obtener los datos que indican el comportamiento hidrodinámico del sistema. La morfología de la curva del sistema sin motobombas presenta claramente un sistema de flujo combinado pistón y mezclado. Con la presencia de un pico indicativo de un corto circuito y una disipación posterior. Las otras 3 curvas mostraron la morfología típica de un sistema completamente mezclado con una disipación progresiva del trazador.

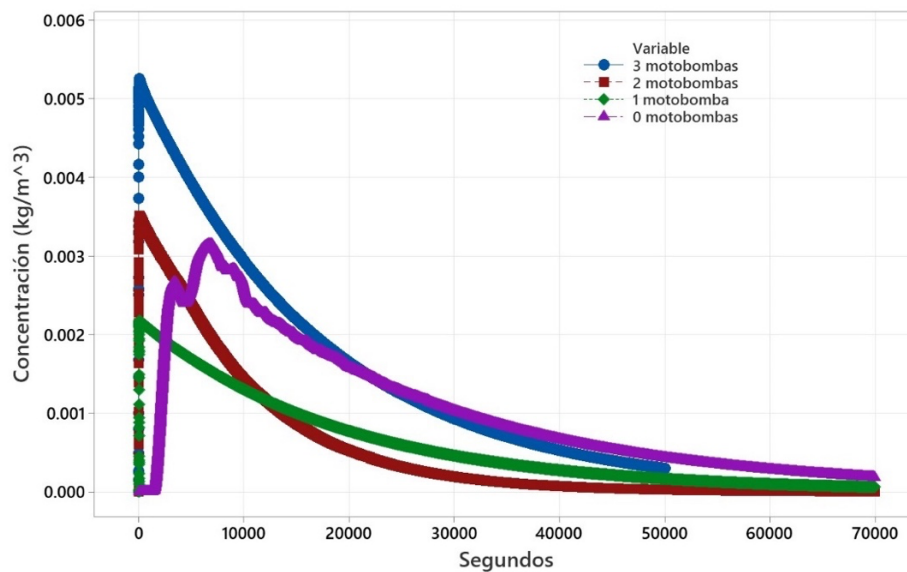


Figura 5. Distribución de tiempos de residencia

En la Tabla 4 se encuentran los resultados de los coeficientes del tiempo experimental con el tiempo de retención teórico y se resumieron las interpretaciones de los resultados del análisis cualitativo de los tiempos de distribución de tiempos de residencia usando las relaciones utilizadas por Unigarro et al. (2014). Este es el análisis numérico de las curvas de distribución de tiempo de residencia, en el sistema sin motobombas el trazador aparece en el efluente en un mayor tiempo, respecto a la demás geometría, ya que al no tener homogenización su trayecto es más lento respecto de los sistemas con bombeo interno. Sin embargo, este tiempo inicial (t_i) también muestra el funcionamiento tipo flujo pistón de esta geometría donde la concentración del trazador fue aumentando de forma progresiva en el efluente a partir del segundo 1660 lo cual dio un indicio de una mezcla ineficiente dependiente del flujo de alimentación. Por el contrario, las geometrías con motobombas se presentaron concentraciones de trazador en el efluente entre los segundos 3 y 12. Indicadores del comportamiento totalmente mezclado.

Tabla 4. Relaciones entre el tiempo teórico y tiempo experimental.

Parámetro	Geometría 0	Geometría 1	Geometría 2	Geometría 3
t_i/t_o	0.074107143	0.000379464	0.000424107	0.000535714
t_m/t_o	0.835424107	0.443325893	2.678571429	2.500290179
t_p/t_o	0.301674107	0.002053571	0.002053571	0.001808036
t_c/t_o	0.792209821	0.529821429	0.3578125	0.595424107
t_b/t_o	2.469146429	1.783772321	1.069441964	1.969241071
Interpretación				
t_i/t_o	Flujo Mezclado	Flujo Mezclado	Flujo Mezclado	Flujo Mezclado
t_m/t_o	Indica corto circuitos	Indica presencia débil de corto circuitos	Indica zonas muertas	Indica zonas muertas
t_p/t_o	Flujo Mezclado/Flujo Piston	Predomina el flujo mezclado	Predomina el Flujo mezclado	Predomina el flujo mezclado
t_c/t_o	N/A	N/A	N/A	N/A
t_b/t_o	N/A	N/A	N/A	N/A

Se identificó un pico de máxima concentración de $1.325 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ a los 3500 s y otro pico de $1.574 \times 10^{-5} \text{ kg/m}^3$ a los 6757.5 s que fue considerado como el dato t_p para dicha geometría, además se encontraron otros picos los segundos

9000 y 9763 antes que la tendencia se volviera en una curva decreciente indicativa de la salida del trazador. Estos picos indicaron la presencia de zonas estancadas. En contraste las geometrías con motobombas no presentaron picos atípicos con una tendencia decreciente a partir de una concentración máxima temprana lo cual es característico de una mezcla completa.

La relación t_m/t_0 para las geometrías 0 y 1 presentaron valores menores a la unidad indicando la presencia de cortocircuitos. Sin embargo, en el caso particular de la geometría 1 se registraron valores inferiores a los de la geometría 0 en el cociente t_m/t_0 , por lo tanto, en la interpretación para ese parámetro se definió como presencia débil de cortocircuitos. Las geometrías 2 y 3 respecto a los cocientes de t_m/t_0 indicaron la ausencia de problemas hidrodinámicos que desvíen su comportamiento del mezclado completo tales como cortocircuitos y zonas muertas.

Conclusiones

Los valores obtenidos de demanda química de oxígeno, sólidos suspendidos, sólidos totales y sólidos volátiles fueron inferiores con los encontrados en otras investigaciones debido al pretratamiento de cribado y sedimentado que se le aplicó al agua residual antes de tomar la muestra en el proceso de tratamiento lo cual redujo de forma considerable la presencia de carga orgánica y confirma de igual manera el potencial contaminante de esta agua residual. La reología del agua mostró un comportamiento pseudoplástico con un coeficiente de ajuste superior a 0.99 con el modelo de Ostwald-de Waele.

Las características del agua residual afectan el comportamiento reológico y de los patrones de flujo para todas las geometrías. Los sistemas con motobomba presentaron velocidades superiores a 1×10^{-3} m/s lo cual descartó la presencia de zonas muertas. El análisis de DTR mostró un comportamiento de mezcla completa para todas las geometrías, sin embargo, todas mostraron la presencia de un corto circuito y por tanto un comportamiento no ideal. Se concluye que el emplear motobombas cambia significativamente el comportamiento del tanque de homogenización ya que se pasa de un comportamiento de mezcla dual de flujo pistón con mezcla completa, a un comportamiento totalmente mezclado desde que utiliza una sola motobomba y un comportamiento eficiente a partir de 2 motobombas.

Bibliografía

- Alcívar-Reyna, T. F. (2014). *Determinación de las condiciones óptimas para la biodegradación*. Tesis de Licenciatura. Escuela superior politécnica del litoral., Guayaquil – Ecuador.
- Arnau, R., Climent, J., Martínez-Cuenca, R., Rodríguez, J., & Chiva, S. (2022). Evaluation of hydraulic mixing performance in a full-scale anaerobic digester with an external liquid recirculation system using CFD and experimental validation. *Chemical Engineering Science*, 251, 117392. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.117392>.
- Escobar, E. Z. (2014). *Mejoramiento del diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales provenientes del beneficio húmedo del café*. Tesis Licenciatura. Instituto Tecnológico De Tuxtla Gutiérrez.
- Hernandez-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, Part A*, 51(7), 536-543. <https://doi.org/10.1080/10934529.2016.1141619>.
- Jaulis Cancho, J. C., Juscamaíta-Morales, J. G., Villanueva-Santos, E., Gutiérrez-Collao, J. E., & Dilas-Jiménez J. O.. (2022). Limpieza del agua miel proveniente del beneficiado húmedo del café mediante polímeros naturales orgánicos. *Alpha Centauri*, 3(3), 02-10. <https://doi.org/10.47422/ac.v3i3.84>.
- Joja-Unigarro, G.D.; Rodríguez-Zambrano, H.L.; Cardona-Gallo. S. (2014). Caracterización y modelación del comportamiento hidráulico de un reactor UASB. *Revista EIA*, 11(22), pp. 67-75. <http://dx.doi.org/10.14508/reia.2014.11.22.67-75>.
- Laín, S., Hernán Cruz, C., Valencia, Y., Torres, P., & Montoya, C. (2011). Determinación del tiempo de mezcla en un tanque de almacenamiento para agua potable mediante dinámica de fluidos computacional-CFD. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 10(19), 55-65.
- Lugo-Suarez, C. A. (2014). *Cinética de la remoción de carga orgánica de aguas residuales del beneficio*. Reporte Técnico. Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutierrez, Tuxtla Gutierrez.
- Martínez-Mendoza, A., Montoya-Martínez, T., Fajardo-Montañana, V., & López-Jiménez, P. A. (2011). Modeling flow inside an anaerobic digester by CFD techniques. *International Journal of Energy and Environment*, 2(6), 963-974.
- Rattan, S., Parande, A. K., Nagaraju, V. D., & Ghiwari, G. K. (2015). A comprehensive review on utilization of wastewater from coffee processing. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 6461-6472. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4079-5>.
- Reategui-Isla, V. A. (2015). *Caracterización reológica del mucílago del café*. Tesis. Universidad nacional agraria de la selva.
- Saini, A. K., Paritosh, K., Singh, A. K., & Vivekanand, V. (2021). CFD approach for pumped-recirculation mixing strategy in wastewater treatment: Minimizing power consumption, enhancing resource recovery in commercial anaerobic digester. *Journal of Water Process Engineering*, 40, 101777. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101777>.
- Torres, J. A., Chagas, P. M. B., Silva, M. C., Santos, C. D. D., & Corrêa, A. D. (2015). Enzymatic oxidation of phenolic compounds in coffee processing wastewater. *Water Science & Technology*, 73(1), 39-50. <https://doi.org/10.2166/wst.2015.332>.