

Impacto del Inyector en la Eficiencia de Mezcla: Un Análisis CFD en Sistemas Portátiles de Potabilización ¹

Impact of Injector on Mixing Efficiency: A CFD Analysis in a Portable Water Purification Plant

Daniel D. Moreno Góngora²

Felipe Vivas Bermudez³

Adriana K. Niño Vargas⁴

Diego A. Núñez Vallejos⁵

Resumen

Objetivo: Evaluar el impacto del inyector en la eficiencia de mezcla en un sistema de potabilización portátil usando simulaciones de Fluidodinámica Computacional.

Metodología: La investigación se llevó a cabo en tres fases: 1) preprocesamiento: en esta etapa se elaboró la geometría de un mezclador usado en un sistema portátil de potabilización, y se realizó un estudio de convergencia de malla para garantizar la precisión de los resultados; 2) procesamiento: en esta etapa se definieron e implementaron los modelos de transporte y de turbulencia para simular los flujos a través del mezclador; y 3) posprocesamiento: a partir de los resultados obtenidos en el procesamiento, se evaluaron los perfiles de velocidad dentro del mezclador con dos tipos diferentes de inyectores, uno existente y uno modificado. **Resultados:** El análisis hidrodinámico reveló un perfil de velocidad consistente a lo largo del mezclador, con cambios bruscos ocasionados por su diseño. La evaluación de los inyectores indicó que la propuesta de reubicar la tolva presenta una mejora en el funcionamiento del sistema con una velocidad de recirculación en promedio de: 0.08 m/s lo que representa una significativa reducción frente a la geometría original que arrojó una velocidad de recirculación que osciló entre: 0.2 m/s y 0.8 m/s , la nueva geometría logra reducir la velocidad en la salida del inyector hasta en un 474.7% respecto a la geometría original, mejorando el desempeño del sistema. Se obtuvo una solución al problema observado.

Conclusión: La simulación del sistema actual mostró una complicación en la mezcla, no

¹ Estudio Comparativo de Configuraciones de Diseño del Sistema de Inyección en un Mezclador Estático a través de un Análisis Hidrodinámico con Aplicación de Fluidodinámica Computacional

² Ingeniero Químico (F), Universidad del Valle, 0000-0003-0806-049X, daniel.gongora@correounivalle.edu.co

³ Ingeniero Químico (F), Universidad del Valle, 0009-0007-3823-0011, vivas.felipe@correounivalle.edu.co

⁴ Ph.D, Universidad del Valle, ORCID: 0000-0003-0346-4970, adriana.nino@correounivalle.edu.co

⁵ Ph.D, Universidad del Valle, ORCID: 0000-0003-0791-2996, nunez.diego@correounivalle.edu.co

obstante, al realizar la modificación propuesta se observó un sistema de mezcla más efectivo, lo que confirma que el diseño alternativo tiene un impacto positivo en la calidad de la mezcla. Finalmente, los resultados obtenidos concuerdan con lo observado en la experimentación, lo que respalda la selección del modelo y la metodología empleada.

Palabras claves: Inyector, mezclador estático, fluidodinámica computacional.

Abstract

Objective: Evaluate the effect of the injector on mixing efficiency in a portable water purification system using computational fluid dynamics (CFD) simulations. **Methodology:** The research was carried out in three phases: 1) pre-processing, where the mixer geometry was developed and a mesh convergence study was performed to ensure the accuracy of the results; 2) processing, where the transport and turbulence models were defined and implemented; and 3) post-processing: Based on the results obtained during processing, the velocity profiles were evaluated in two different types of injectors, one existing and another modified. **Results:** The hydrodynamic analysis revealed a consistent velocity profile throughout the mixer, with abrupt changes caused by its design. The evaluation of the injectors indicated that the proposal to relocate the hopper results in an improvement in the system's performance, with an average recirculation speed of 0.08 m/s, representing a significant reduction compared to the original geometry, which showed a recirculation speed ranging between 0.2 m/s and 0.8 m/s. The new geometry manages to reduce the speed at the injector's outlet by up to 474.7% compared to the original geometry, improving the system's performance. A solution to the observed problem was achieved. **Conclusion:** The simulation of the current system showed a complication in the mixing process; however, after implementing the proposed modification, a more effective mixing system was observed, confirming that the alternative design has a positive impact on the quality of the mix. Finally, the results obtained are consistent with what was observed in the experimentation, which supports the selection of the model and the methodology used.

Keywords: Injector, static mixer, computational fluid dynamics.

1. Introducción

Las deficiencias en la eliminación de contaminantes en los sistemas de tratamiento de agua frecuentemente se derivan de condiciones inadecuadas durante etapas críticas como la coagulación y la floculación. Estas deficiencias pueden ser el resultado de un bajo control en el sistema de inyección de reactivos, fallo en el funcionamiento de los equipos o un mantenimiento inadecuado. Como consecuencia se obtienen mezclas no homogéneas que limitan la eficiencia de remoción de contaminantes [1].

Durante el proceso de coagulación se emplean sistemas de mezcla para facilitar la neutralización de las cargas eléctricas de las partículas suspendidas presentes en el agua. Esto permite que las partículas se aglutinen y coagulen, lo que facilita su posterior separación en el proceso. En este contexto, los agitadores mecánicos, hidráulicos o estáticos son de gran importancia en la industria química ya que permiten mezclar diferentes compuestos de manera eficiente [2]. Particularmente, los estáticos no tienen partes móviles y funcionan mediante la formación de un flujo turbulento que toma lugar al hacer colisionar las sustancias del sistema con unos obstáculos fijos (agitadores), creando vórtices y homogeneizando la mezcla.

El análisis hidrodinámico de estos mezcladores es importante para poder asegurar que las condiciones requeridas para su funcionamiento óptimo se den sin mayor inconveniente. Una manera de hacerlo es a través de técnicas como Fluidodinámica Computacional (CFD por sus siglas en inglés) que involucra el estudio del flujo de fluidos, la transferencia de calor y otros fenómenos asociados, por medio de simulaciones computacionales [3].

Varios autores han destacado las ventajas de utilizar CFD para estudiar a fondo el modelo fenomenológico que representa distintos sistemas de mezclado. Por ejemplo, Salguero *et al* [4] presentaron un reactor de lecho empacado con un nuevo mezclador estático, favoreciendo la creación de vórtices. La simulación usando CFD permitió demostrar mayor eficiencia y economía del nuevo sistema en comparación con los convencionales.

Este tipo de simulaciones se pueden realizar mediante programas como OpenFoam, un *software* de código abierto que utiliza C++ para desarrollar ejecutables de aplicaciones predefinidas. En este contexto, Sasse J, *et al* [5] idearon un método para mejorar la homogeneidad térmica y material en la extrusión de plásticos variando geometría, tamaño y configuración del mezclador, cuya influencia se refleja en los resultados de la simulación con OpenFoam. De igual manera, Vikhansky [6] utilizó un enfoque euleriano multifásico para estudiar numéricamente el proceso de emulsificación de un mezclador vórtex identificando vórtices longitudinales de gran escala que contribuyen significativamente a mejorar la mezcla.

En esta investigación, se emplearon técnicas de CFD para analizar el efecto del inyector en un mezclador estático, mediante el estudio hidrodinámico realizado a través de simulaciones computacionales en OpenFOAM. El sistema comienza en un estado transitorio, conocido como falso trasciende, antes de estabilizarse y alcanzar el estado estacionario. El objetivo es comparar la geometría de dos tipos de inyectores y su efecto en las líneas de flujo.

Este trabajo contribuye a una mejor comprensión de los fenómenos que ocurren en estos sistemas y abre lugar a posibles mejoras que se puedan implementar para aumentar la eficiencia de mezcla [7,8].

2. Ecuaciones de Gobierno y Modelos de Turbulencia.

2.1 Ecuaciones de Gobierno

Las ecuaciones que describen el comportamiento del fluido a través del mezclador son la ecuación de continuidad (1) y de cantidad de movimiento (3) [9,10]:

$$\frac{\partial}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

Donde:

$\mathbf{u}$ Es la velocidad del fluido y ρ es la densidad del fluido.

Para flujo incompresible, la ecuación de continuidad y de cantidad de movimiento se presentan como:

$$(\nabla \cdot \rho \mathbf{u}) = 0 \quad (2)$$

$$\rho \frac{D}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \quad (3)$$

Donde:

$-\nabla p$ es la fuerza de presión en el fluido, $\mu \nabla^2 \mathbf{u}$ es la difusión viscosa de la cantidad de movimiento en el fluido, $\rho \mathbf{g}$ es la fuerza gravitacional en el fluido y $\frac{D}{Dt}$ es la derivada substancial definida como:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\nabla \cdot \mathbf{u}) \quad (4)$$

2.1.3 Modelos de Turbulencia

2.1.3.1 k - épsilon ($k - \varepsilon$)

El modelo $k - \varepsilon$ se define a partir de las ecuaciones (5) y (6) [11]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + d(\rho k) = d \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} g \right] + 2\mu_t S \cdot S - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + d(\rho \varepsilon) = d \left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} g \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} 2\mu_t S \cdot S - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

Donde:

μ_t Es la viscosidad turbulenta.

U Es la velocidad media del fluido.

S Es la tasa de deformación de un elemento en el flujo turbulento debido a las tensiones aplicadas.

σ_k y σ_ε Son los números de Prandtl para k y ε respectivamente, que conectan las difusividades con la viscosidad turbulenta.

$C_{1\varepsilon}$ y $C_{2\varepsilon}$ Son constantes.

2.1.3.2 $k - \omega$ SST ($k - \omega$ SST)

Este modelo se rige por la siguiente ecuación [11]:

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + d(\rho\omega U) = d\left[\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}g - \omega\right] + \gamma_2\left(2\rho S - \frac{2}{3}\rho\omega\frac{\partial}{\partial j}l_i\right) - \beta_2\rho\omega^2 + 2\frac{\rho}{\sigma_{\omega,2}\omega}\frac{\omega}{\partial} \quad (7)$$

Donde:

l_i es el delta de Kronecker que:

$$l_i = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}$$

β_2 es una constante que se obtiene con los datos de turbulencia cercanos a la pared.

$\frac{\rho}{\sigma_{\omega,2}\omega}\frac{\omega}{\partial}$ es el término de difusión cruzada que surge durante la transformación del modelo $k - \varepsilon$ hacia $k - \omega$.

Para la turbulencia isotrópica, la energía cinética turbulenta k se puede estimar como sigue [16]:

$$k = \frac{3}{2}(I|v_{r}|)^2 \quad (8)$$

Donde:

I es la intensidad.

v_r es la velocidad de referencia según corresponda.

La tasa de disipación específica de la turbulencia ω es definida como:

$$\omega = \frac{k^{0.5}}{C_\mu^{0.2} L} \quad ; \quad C_\mu = 0.09 \quad (9)$$

Donde:

L es el diámetro hidráulico del dominio.

En esta investigación se emplearon los modelos $k - \varepsilon$ y $k - \omega$ SST para el análisis de convergencia de malla y el estudio de las dos configuraciones del inyector.

El modelo $k - \varepsilon$ se enfoca en la energía cinética turbulenta, proporcionando escalas representativas de velocidad y longitud, lo que permite obtener resultados consistentes en diversos regímenes de flujo. Sin embargo, debido a sus limitaciones en la captura de efectos en la capa límite, se utilizó únicamente para la selección del refinamiento de malla.

De igual manera, aunque el modelo $k - \omega$ estándar ofrece un buen rendimiento en las capas límite, no predice de manera adecuada las viscosidades turbulentas lejos de la pared. Por esta razón, para el estudio de los inyectores, se optó por utilizar el modelo $k - \omega$ SST, un enfoque híbrido entre $k - \varepsilon$ y $k - \omega$ que es más robusto. Este modelo híbrido ofrece resultados más realistas al adaptar el análisis de turbulencia según la región del flujo.

3. Metodología

En esta investigación, se utilizó una máquina portátil con procesador AMD Ryzen 5 5600H, de 6 núcleos a 3.30 GHz y 13.9 GB de memoria RAM. Todas las simulaciones se llevaron a cabo utilizando los softwares SolidWorks, OpenFOAM v10 y el *solver* pimpleFoam. Para el análisis de posprocesamiento, se empleó el software ParaView v5.10.1.

3.1 Preprocesamiento

La geometría del mezclador estático (Figura 2) se elaboró basándose en el sistema de mezcla (Figura 1b) de una planta de potabilización portátil (Figura 1a). Las dimensiones del mezclador se presentan en la Figura 3. Las condiciones de borde que corresponden a entradas, salidas y paredes se representan en la Figura 2 y especifican en las Tablas 2 y 3.

Para el estudio de convergencia de malla se utilizaron tres tipos de mallas diferentes con la herramienta snappyHexMesh (enmallador automático que genera mallas tridimensionales hexaédricas en OpenFoam), tal y como se presenta en la Tabla 1. La malla se ajustó a la superficie refinando iterativamente una malla inicial y transformando la malla hexagonal dividida resultante en la superficie. [12]

En cuanto al tipo de fluido, se usó agua a 25°C.



Figura 1. (a) Montaje general de la planta de potabilización portátil, (b) sistema de mezcla.

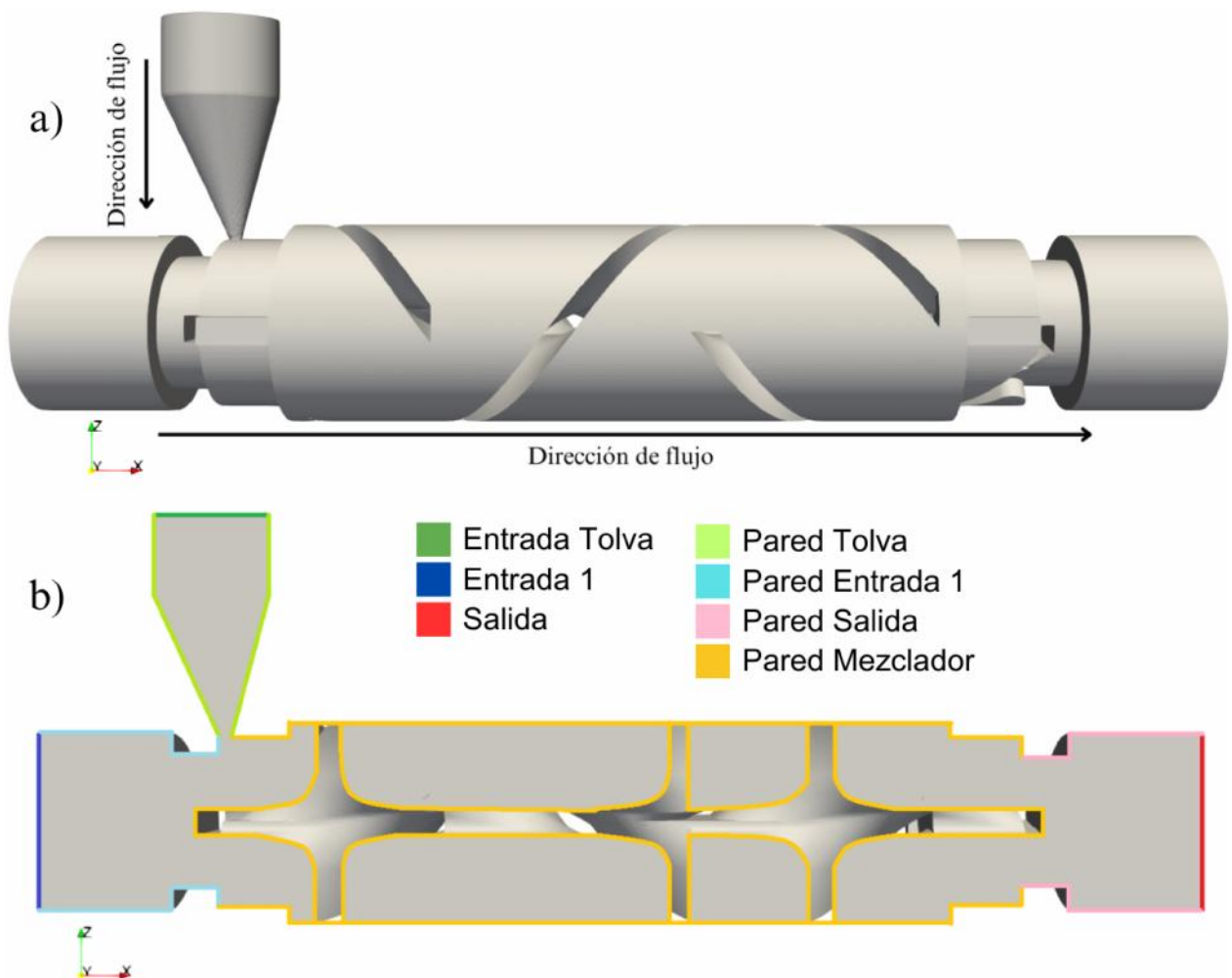


Figura 2. a) representación CAD (vista lateral 3D) de la geometría del recorrido del fluido interior del mezclador y b) corte transversal (justo por la mitad del mezclador en dirección y) indicando las condiciones de borde.

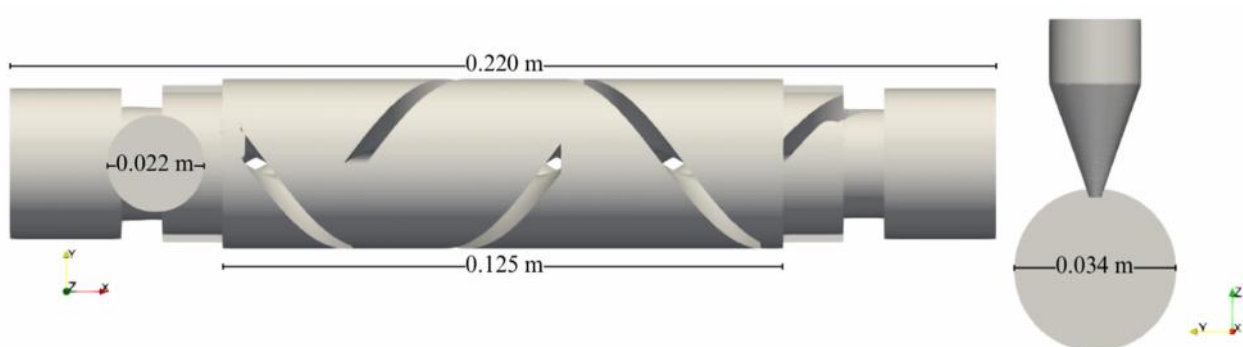


Figura 3. Representación CAD del recorrido del fluido (vista en planta). Medidas: diámetro de entrada y salida: 0.034 m; largo total de la geometría: 0.220 m, diámetro de la entrada de la tolva: 0.022 m, longitud del mezclador estático: 0.125 m.

Tabla 1. Mallas utilizadas para el estudio de convergencia.

Nomenclatura malla # de Nodos # de elementos

Malla 1	257,447	210,795
Malla 2	644,315	519,629
Malla 3	1,190,832	963,793

3.2 Procesamiento

Para realizar la descomposición de la malla, se empleó el método *hierarchical*, dividiendo el volumen de control en 6 dominios equivalentes a los subprocesadores disponibles. La configuración de la división fue: una partición a lo largo del eje y, seis particiones a lo largo del eje x, y una partición en el eje z.

Las condiciones de borde iniciales para las variables u, p, k, ω , se presentan en las Tablas 2 y 3:

Tabla 2. Condiciones de borde iniciales de las entradas y salidas.

Variable	Unidades	Entrada 1	Entrada Tolva	Salida
u	m/s	0.6	0.0024	zeroGradient
p	N/m ²	zeroGradient	zeroGradient	0
k	m ² /s ²	1.35E-03	2.16E-08	zeroGradient
ω	s ⁻¹	1.54E+01	9.54E-02	1.42E+01

Tabla 3. Condiciones de borde iniciales de las paredes.

Variable	Unidades	Pared Entrada	1 Pared Tolva	Pared Mezclador	Pared Salida
u	m/s	noSlip	noSlip	noSlip	noSlip
p	N/m ²	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient	zeroGradient
k	m ² /s ²	1.35E-03	2.16E-08	7.76E-04	1.13E-03
ω	s ⁻¹	1.54E+01	9.54E-02	1.05E+01	1.42E+01

4. Resultados

Con el fin de seleccionar la malla, se simuló el fluido a través del mezclador estático y se determinó el perfil de velocidad (u_x) en la posición observada en la Figura 4.

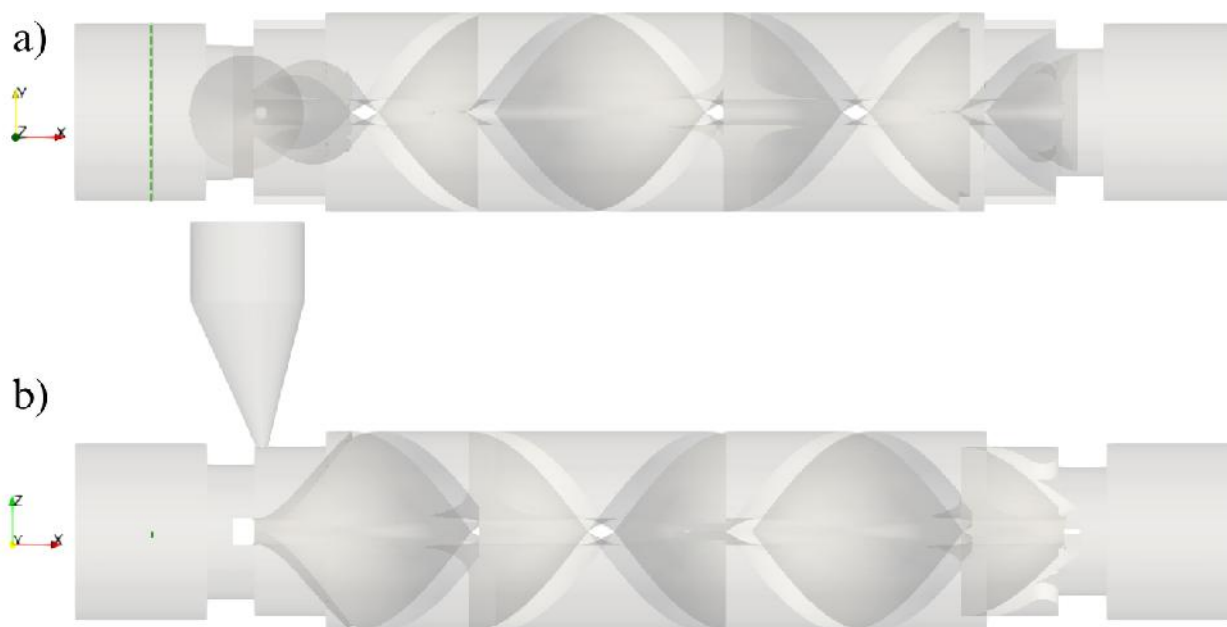


Figura 4. Posición en la que se evaluó la velocidad (u_x) para determinar convergencia de malla, donde a) vista aérea, y b) vista lateral.

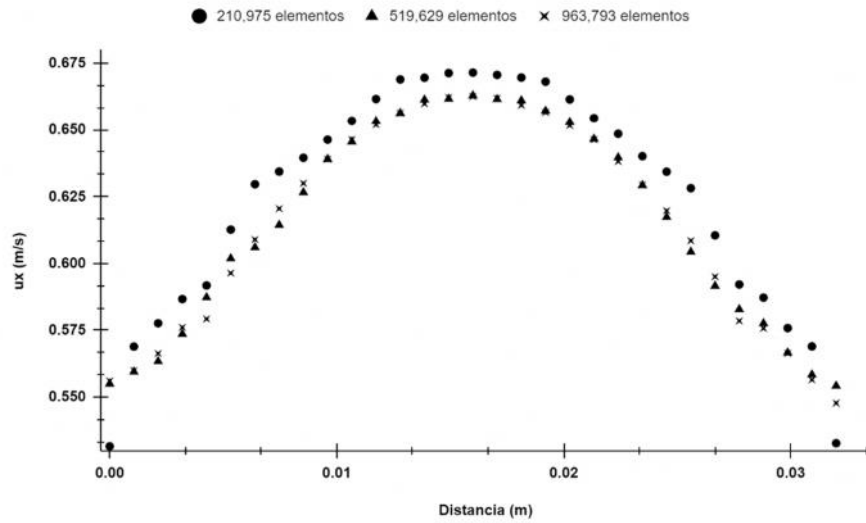


Figura 5. Perfil de velocidad sobre el área transversal.

De acuerdo con la Figura 5, se observa una mayor similitud entre los resultados obtenidos con la Malla 2 (519,629 elementos) y la Malla 3 (963,793 elementos). Esta observación preliminar condujo a descartar la Malla 1 para análisis posteriores.

Para corroborar esta observación, se determinó el error relativo. En este análisis se compararon las diferentes mallas secuencialmente, comenzando con la Malla 1 y la Malla 2, y luego comparando la Malla 2 con la Malla 3. Se determinó la velocidad promedio en cada caso, a partir de los resultados de velocidad de los 30 puntos que se establecieron para el análisis de independencia de malla (Tabla 4).

Tabla 4. Error relativo calculado para las 3 mallas generadas.

Malla	# de elementos	Promedio u_x (m/s)	Tiempo de simulación (s)	Error relativo (%)
Malla 1	210,795	0.632771	2,643	-
Malla 2	519,629	0.634292	7,606	1.50
Malla 3	963,793	0.635038	29,043	0.03

Aunque el error relativo entre la Malla 2 y la Malla 3 es del 0.03%, se observa una diferencia de aprox. 21,000 segundos en los tiempos de simulación que corresponde a un incremento del 381.8% de la Malla 3 en comparación con la Malla 2. Por esta razón, se optó por realizar las demás simulaciones utilizando la Malla 2 (Figura 6).

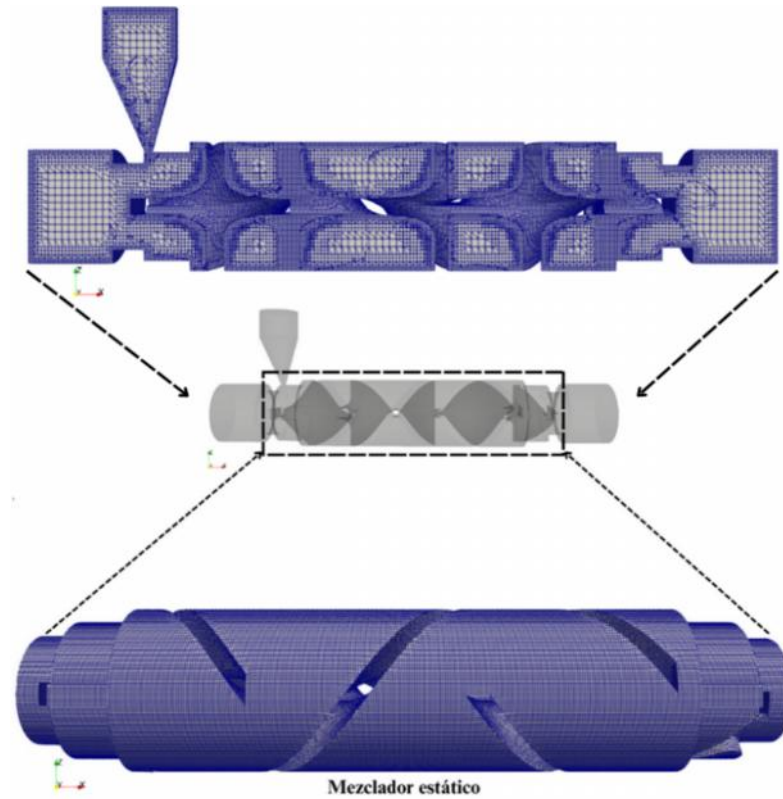


Figura 6. Diagrama esquemático de la Malla 2 del dominio computacional.

Como se indica en la Tabla 5, después de simular el fluido en la Malla 2, los residuales de parámetros como velocidad y presión son inferiores a 10^{-6} , lo que confirma la convergencia satisfactoria de la simulación.

Tabla 5. Residuales finales de los principales parámetros calculados en la simulación utilizando la Malla 2.

Variable Residual	
u_x	7.20×10^{-6}
u_y	8.31×10^{-6}
u_z	9.61×10^{-6}
p	7.75×10^{-7}
k	1.55×10^{-6}
ω	7.35×10^{-7}

El análisis de los perfiles de velocidad muestra la influencia de la geometría del mezclador en la distribución del flujo. Según la Figura 7a, la velocidad del flujo en la salida de la tolva se aproxima a cero, creándose un efecto de bloqueo que genera recirculación del flujo.

Esto sugiere que el fluido proveniente de la tolva probablemente no se mezcle adecuadamente con el flujo de agua de la Entrada 1, lo que produce un rebose en la tolva, tal como se observa en el sistema físico real. A pesar de que las líneas de corriente presentadas en la Figura 7b indican zonas de recirculación debido a choques entre el fluido y la estructura que facilitan la difusión del fluido, y de que en la salida del mezclador la velocidad alcance valores superiores a 1.2 m/s (Figura 8), el problema en la salida de la tolva genera una baja eficiencia de mezcla.

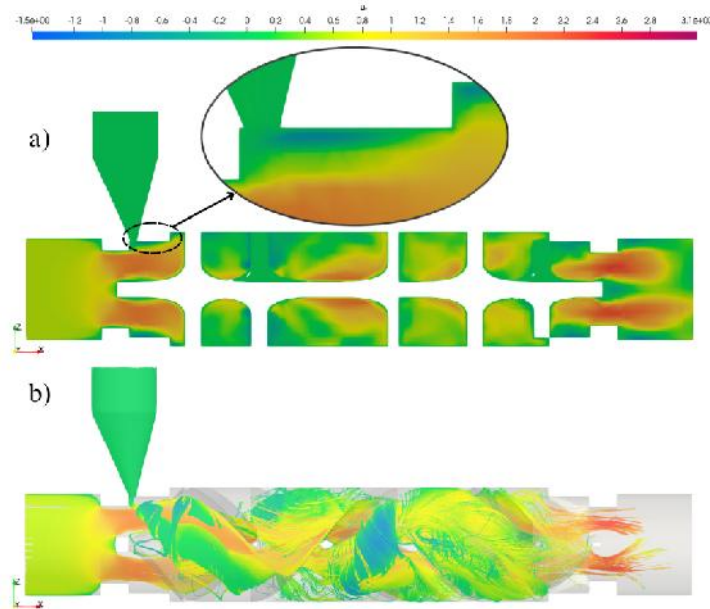


Figura 7. (a) Perfil de velocidad a lo largo del dominio mediante un corte de un plano xz. Ampliación en la salida de la tolva y (b) líneas de corriente a lo largo del dominio.

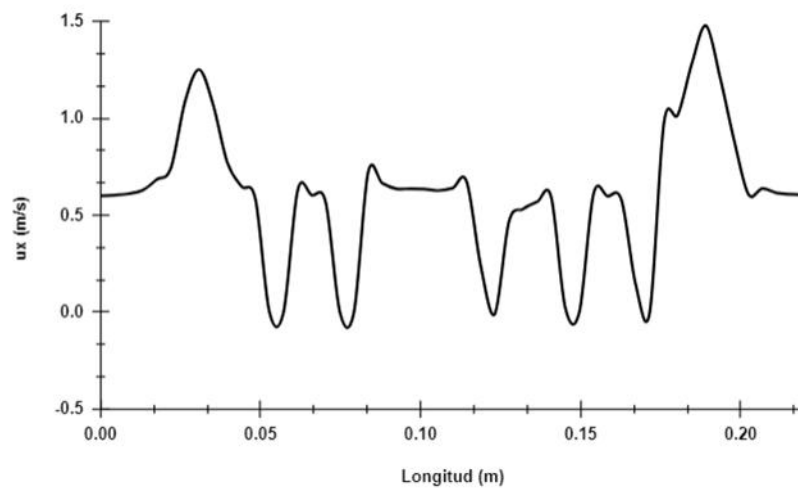


Figura 8. Análisis del perfil de la velocidad en dirección x a lo largo del mezclador usando la Malla 2.

4.3 Modificación geométrica de la tolva

Con el fin de reducir las zonas de recirculación a la salida de la tolva, se realizaron modificaciones geométricas del sistema, tal y como se presenta en la Figura 9.

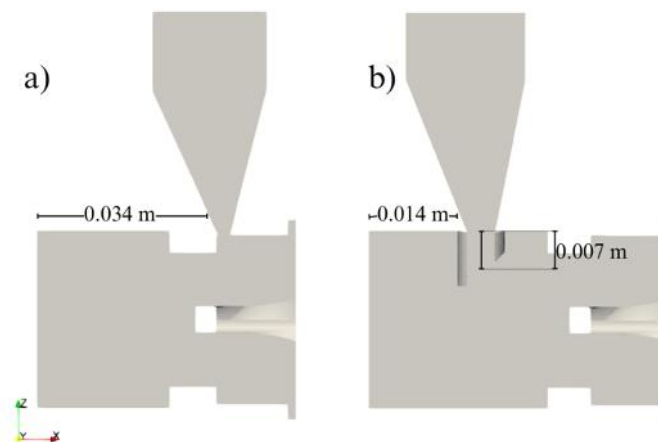


Figura 9. Comparación de las representaciones CAD del recorrido del fluido en (a) geometría original donde la distancia entre la Entrada 1 y la base de la tolva es 0.034 m, y (b) geometría modificada, donde: distancia entre la Entrada 1 y la base de la tolva (0.014 m), profundidad del sistema de inyección (0.007 m).

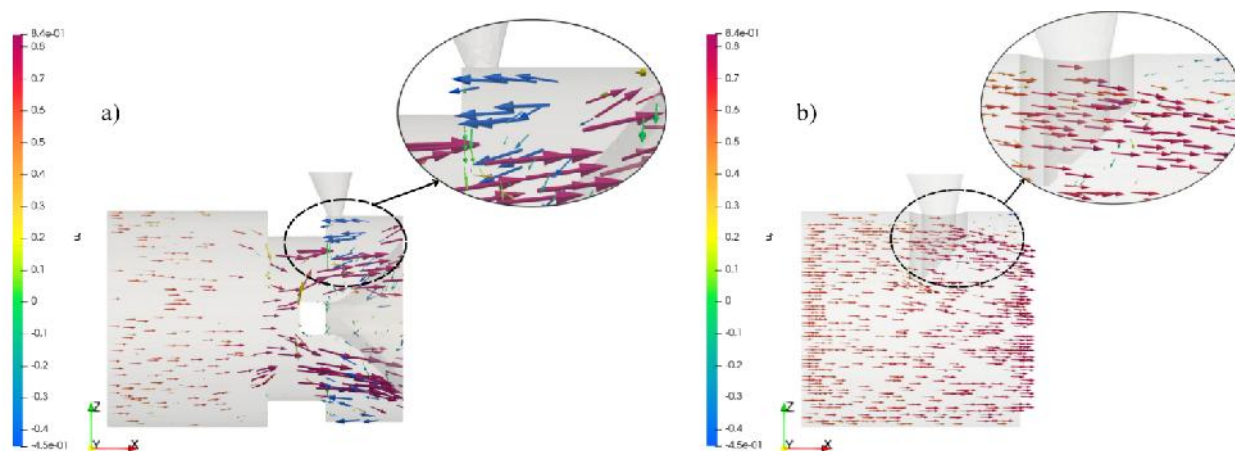


Figura 10. a) Líneas de flujo de la geometría original, b) Líneas de flujo de la geometría de la propuesta de mejora.

Al analizar la Figura 10, se observa que en la geometría original (Figura 10a), las flechas que representan el flujo retroceden hacia la entrada de la tolva, cuya magnitud de la velocidad oscila entre los 0.2 y 0.8 m/s, y como consecuencia intensifica la inundación al aumentar el flujo en recirculación. Mientras que con la nueva geometría (Figura 10b) la magnitud de la velocidad en recirculación es cercana a 0 m/s.

Este efecto se observa en las velocidades calculadas en el corte comparativo de velocidad en la dirección x para ambas geometrías (Figura 11), cuyos valores se presentan en la Figura 12. De acuerdo con los resultados, la curva de velocidad en la dirección x para la geometría original muestra una pendiente más pronunciada en comparación con la geometría modificada. La nueva geometría logra reducir la velocidad en la salida del inyector hasta en un 474.7% respecto a la geometría original, mejorando el desempeño del sistema.

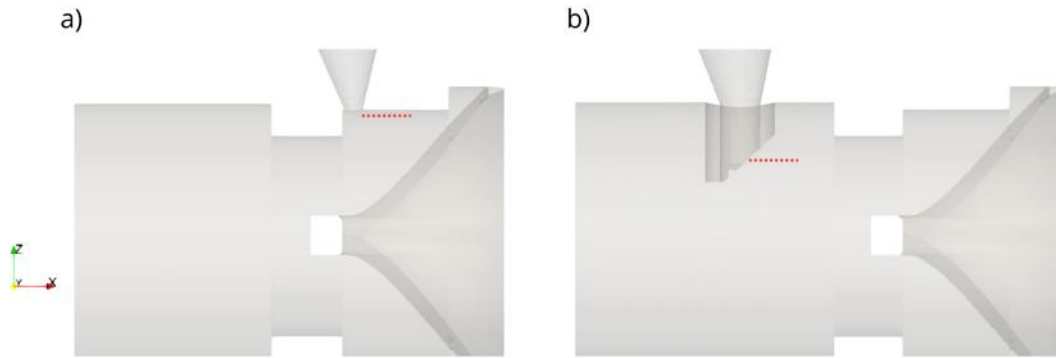


Figura 11. Corte comparativo (línea roja). (a) Geometría original, y (b) Geometría de la propuesta de mejora.

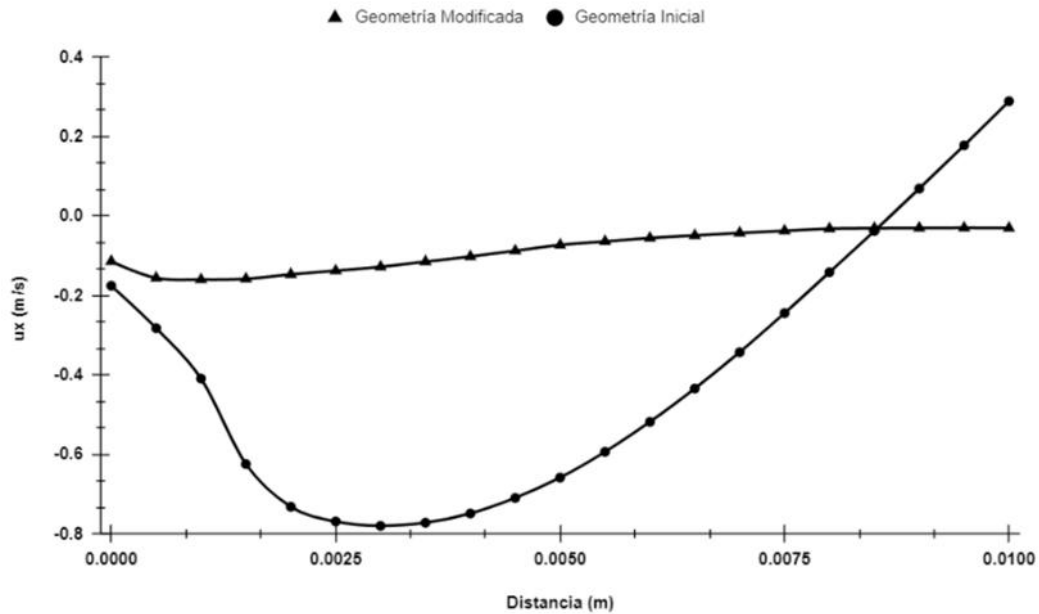


Figura 12. Comparación de perfiles de velocidad en dirección x entre las geometrías estudiadas.

Conclusiones

El análisis hidrodinámico detallado del sistema inicial reveló una mezcla ineficiente. Sin embargo, la implementación del sistema de inyección modificado resultó en una mejora significativa en la eficiencia de la mezcla, con magnitudes de velocidades de recirculación cercanas a 0 m/s frente a la geometría original, teniendo esta una velocidad de recirculación que osciló entre 0.2 m/s y 0.8 m/s , la nueva geometría logra reducir la velocidad en la salida del inyector hasta en un 474.7% respecto a la geometría original, mejorando el desempeño del sistema. Esto indica que el diseño alternativo reduce el problema encontrado, y que las condiciones de la configuración inicial afectan negativamente el proceso de mezcla.

Los resultados obtenidos fueron comparados con pruebas en el montaje real en planta. A través de la observación se evidenció que se presentaba inundación originalmente, problema que fue solucionado con la geometría propuesta. Lo que indicó la capacidad del modelo para representar el comportamiento del flujo y proporcionar información fluidodinámica valiosa.

Se recomienda realizar un análisis con fluidos como coagulantes y su interacción con el agua a tratar. Este análisis se sugiere llevar a cabo después del presente estudio para poder examinar los perfiles de concentración. La evaluación de estos perfiles permitirá comprender mejor la distribución y efectividad de los coagulantes en el proceso de coagulación y floculación, así como identificar posibles zonas de mejora en el diseño del mezclador estático.

Agradecimientos

Los autores de este artículo agradecen a la empresa Biomonty SAS por su colaboración en el apoyo técnico y suministro de información durante el desarrollo de este trabajo.

Referencias bibliográficas

- [1]. Kerry J. Howe; David W. Hand; John C. Crittenden; R. Rhodes Trussell; George Tchobanoglous. (2012). Principles of Water Treatment. John Wiley & Sons, Inc, p. 1
- [2]. Paul, E. L., Anderson, W. F., & Paul, D. R. (2004). Handbook of industrial mixing: science and practice. John Wiley & Sons. p. 380
- [3]. Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics Second Edition (Pearson Education Limited, 2nd Ed., p. 1
- [4]. Salguero-Rodríguez, Y., Gómez-Pérez, C. A., Arango-Restrepo, J. P., & Espinosa, J. (2021). Static mixer proposal for tubular photobioreactors to reduce mixing energy consumption and enhance light–dark cycles. Chemical Technology and Biotechnology, p.113–124. DOI: <https://doi.org/10.1002/jctb.6516>
- [5]. Sasse, J., Schön, M., & Hopmann, C. (2022). Static Mixers Producible by Additive Manufacturing: Novel Rapid Automatic Optimisation and Practical Evaluation. Polymers. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14214646>
- [6]. Vikhansky, A. (2020). CFD modelling of turbulent liquid–liquid dispersion in a static mixer. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, p. 149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2020.107840>
- [7]. Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics Second Edition (Pearson Education Limited, Ed.); p. 12,65,75,76.
- [8]. Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (2019). Fenómenos de transporte. 4ta edición, México, D.F: Limusa. p. 3-4 - 3-11
- [9]. Toapanta-Ramos, L. F., Zapata-Cautillo, J. A., Cholango-Gavilanes, A. I., Quitiaquez, W., Nieto-Londoño, C. Zapata-Benabithé, Z. (2019). Numerical and Comparative Study of the Turbulence Effect on Elbows and Bends for Sanitary Water Distribution. Revista Facultad de Ingeniería. DOI: <https://doi.org/10.19053/01211129.v28.n53.2019.10156>
- [10]. Mase, G. E. (1977). Teoría y problemas de mecánica del medio continuo. México: McGraw-Hill, 1 Ed; p. 25
- [11]. The OpenFOAM Foundation User Guide: Mesh Generation. Recuperado el 24 de Febrero de 2024, de <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/4-mesh-generation-and-conversion/4.4-mesh-generation-with-the-snappyhexmesh-utility>
- [12]. The OpenFOAM Foundation User Guide: Mesh generation with the snappyHexMesh utility. Recuperado el 20 de Julio de 2024 de <https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/4-mesh-generation-and-conversion/4.4-mesh-generation-with-the-snappyhexmesh-utility>