



## Diseño y análisis mediante DFC de un aireador tipo Venturi para su uso en el tratamiento de agua residual

### Design and analysis using CFD of a Venturi aerator for use in wastewater treatment

Nadin-Fernández Salvador  
Universidad Autónoma del Estado de México  
Facultad de Ingeniería  
Correo: [nadinf34@gmail.com](mailto:nadinf34@gmail.com)  
<https://orcid.org/0009-0009-0595-3752>

Fonseca-Ortiz Carlos Roberto  
Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA)  
Correo: [crfonsecao@uaemex.mx](mailto:crfonsecao@uaemex.mx)  
<https://orcid.org/0000-0002-3377-6564>

López-Rebollar Boris Miguel  
Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA)  
Correo: [bmlopezr@uaemex.mx](mailto:bmlopezr@uaemex.mx)  
<https://orcid.org/0000-0002-6914-0787>

#### Resumen

El presente trabajo tuvo como objetivo establecer los parámetros geométricos de diseño de un aireador Venturi y evaluar su desempeño en términos de flujo másico de aire mediante el uso de Dinámica de Fluidos Computacional (DFC) bajo un esquema de flujo bifásico aire-agua. Este análisis es crucial para la viabilidad de implementar este tipo de aireador en el tratamiento de aguas residuales, un área donde la eficiencia del proceso de aireación es fundamental para mejorar la calidad del agua. La geometría del aireador Venturi se estableció siguiendo las recomendaciones descritas en la norma ASME-MFC3-3M-1989, lo que asegura un diseño con los estándares internacionales de calidad y seguridad. El análisis consistió en una descripción detallada de los flujos másicos tanto de agua como de aire, junto con perfiles de presión y velocidad, lo que permite una comprensión profunda del comportamiento hidráulico del aireador desde un punto de vista numérico. Este enfoque facilita la identificación de áreas de oportunidad y el mejoramiento del diseño para maximizar la eficiencia en la inyección de aire, etapa fundamental en los procesos de tratamiento aerobios. El uso de la DFC en este contexto ofrece una simulación versátil y rentable del aireador Venturi, presentándose como una alternativa viable a los métodos tradicionales basados en sopladores que suelen ser más costosos y menos eficientes. Para validar el diseño propuesto y evaluar la eficiencia en la inyección de aire, se llevaron a cabo experimentos físicos donde se obtuvo un flujo de aire de 2.2 l/s, mientras que los resultados obtenidos mediante la simulación numérica se estimaron en 2.27 l/s, resultando con una diferencia de 3.2 % para un caudal de agua de 15.33 l/s. Este enfoque integral busca no solo mejorar la eficiencia del proceso de lodos activados bajo un esquema factible y bajo costo que ofrece la simulación numérica, sino también reducir significativamente el consumo energético en comparación con los aireadores sumergibles convencionales.

**Descriptores:** Tratamiento de agua, aireación, Venturi, DFC.

#### Abstract

The objective of this study was to establish the geometric parameters of design for a Venturi aerator and evaluate its performance in terms of air mass flow using Computational Fluid Dynamics (CFD) based on a biphasic air-water flow scheme. This analysis is crucial for determining the feasibility of implementing this type of aerator in wastewater treatment, an area where the efficiency of the aeration process is fundamental for improving water quality. The geometry of the Venturi aerator was established according to the recommendations outlined in the ASME-MFC3-3M-1989 standard, ensuring that the design reaches international quality and safety standards. The analysis involved a detailed description of both water and air mass flows, along with pressure and velocity profiles, providing a deep understanding of the aerator's hydraulic behavior from a numerical perspective. This approach facilitates the identification of improvement opportunities and the optimization of the design to maximize air injection efficiency, a key stage in aerobic treatment processes. CFD offers a versatile and cost-effective simulation of the Venturi aerator in this context, presenting itself as a viable alternative to traditional blower-based methods, which are typically more expensive and less efficient. To validate the proposed design and assess air injection efficiency, physical experiments were conducted, achieving an air flow rate of 2.2 l/s, while the numerical simulation estimated 2.27 l/s, resulting in a 3.2 % difference for a water flow rate of 15.33 l/s. This comprehensive approach seeks, besides improving the efficiency of the activated sludge process through a feasible and cost-effective numerical simulation but also aims to significantly reduce energy consumption compared to conventional submersible aerators.

**Keywords:** Water treatment, aeration, Venturi, CFD.

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas la contaminación del agua se ha incrementado debido al aumento de las actividades antropogénicas y a la explosión demográfica, llegando a ser un problema muy serio y acentuando la escasez del vital líquido (García, 2014). Considerando esto, se buscan alternativas tecnológicas eficientes y amigables con el entorno para la recaptación de los recursos hídricos. Los sistemas de tratamiento de agua residual, según Valdez & Vázquez (2003), se dividen en subsistemas, iniciando con el pretratamiento que consiste en el cribado, desarenado, trampas de grasa u otra operación unitaria para remover sólidos de mayor tamaño. Luego, el tratamiento primario, el cual se aplica para la remoción de sólidos suspendidos del influente donde la materia orgánica es descartada dependiendo del tamaño de la partícula, volumen de agua, caudal, entre otros factores. Por otro lado, el tratamiento secundario que consiste en descartar la materia orgánica mediante procesos biológicos, en el cual los microorganismos usan los compuestos orgánicos presentes en el agua residual como fuente de carbono para realizar sus procesos metabólicos de reproducción y consecuente formación de biomasa. Finalmente, el tratamiento terciario que considera la remoción adicional de sólidos suspendidos y remoción de nutrientes. Este se enfoca en la eliminación de nutrientes como fósforo y nitrógeno, combinando procesos físicos, químicos y biológicos. En cada una de estas etapas, la eficiencia del tratamiento depende del uso adecuado de equipos y tecnologías avanzadas.

Dentro de estas tecnologías, los sistemas de lodos activados han demostrado ser una alternativa económicamente viable para el tratamiento secundario (Mueller *et al.*, 2002). Dentro de estos sistemas, la mezcla de agua residual con oxígeno permite que las bacterias aeróbicas digieran las partículas biosólidas en el agua, en consecuencia, se tiene una degradación de nutrientes y un aumento de calidad del efluente. Para este proceso, se emplean equipos mecánicos que inyectan aire, y a su vez, recirculan el agua.

La aireación se lleva a cabo mediante distintos métodos, siendo uno de los más comunes el uso de aireadores sumergibles, también conocidos como sopladores. Estos dispositivos introducen oxígeno en el sistema de tratamiento, promoviendo la formación de pequeñas burbujas que aumentan la transferencia de masa y elevan los niveles de oxígeno disuelto en el agua (Baylar & Ozkan, 2006). Sin embargo, estos sistemas pueden presentar altos costos operativos y de mantenimiento, lo que impulsa la búsqueda de alternativas más eficientes y sostenibles.

Una de estas alternativas es el aireador basado en el efecto Venturi, un dispositivo que opera a partir de di-

ferencias de presión y velocidad en un conducto cerrado. Al pasar el fluido por una zona de menor diámetro, su velocidad aumenta y la presión disminuye, lo que permite la succión de un segundo fluido, en este caso, aire. De esta manera, el Venturi facilita la mezcla aire-agua, generando burbujas finas que mejoran la eficiencia del proceso de oxigenación (López, 2019).

Investigaciones previas han demostrado la eficacia del Venturi como aireador en el tratamiento de aguas residuales. Therrien *et al.* (2019) demostraron que estos dispositivos son altamente eficientes para la mezcla de agua y transferencia de oxígeno en entornos de bajos recursos. Asimismo, Dong *et al.* (2012) analizaron cómo la configuración del aireador, la tasa de flujo y la profundidad de los difusores influyen en la eficiencia de aireación, mientras que Baylar & Ozkan (2006) destacaron el bajo costo y la alta eficiencia del Venturi en la disolución de oxígeno.

Además de su aplicación en aireación, el diseño de estos sistemas ha sido optimizado mediante Dinámica de Fluidos Computacional (DFC). Esta herramienta permite simular distintos escenarios geométricos y multiparamétricos a partir de ecuaciones matemáticas que describen el comportamiento de los fluidos, como la continuidad, el *momentum* y la energía (Cockx *et al.*, 2001). Con los avances en computación, estas simulaciones pueden realizarse con mayor rapidez, optimizando procesos de diseño y experimentación.

Ejemplos de su aplicación incluyen el trabajo de Guimet *et al.* (2007), quienes utilizaron DFC para modelar la transferencia de oxígeno en clarificadores y aireadores en plantas de tratamiento de aguas residuales. Sus resultados mostraron una buena concordancia con datos experimentales, facilitando la evaluación y optimización del funcionamiento de estas plantas. Por su parte, Iñiguez *et al.* (2015) compararon los resultados experimentales con simulaciones de DFC en dispositivos tipo Venturi, demostrando una alta correlación entre ambos métodos. Su estudio permitió identificar las condiciones óptimas de operación del Venturi y minimizar las pérdidas de carga, mejorando su eficiencia en sistemas de riego.

Asimismo, Herrmann *et al.* (2020) investigaron la aireación dinámica como una estrategia innovadora para mejorar la transferencia de oxígeno en el tratamiento de aguas residuales. Utilizando CFD simularon las características de transferencia de masa en flujos de gas pulsados y los compararon con condiciones de flujo continuo. Los resultados mostraron que la aireación pulsada aumenta la transferencia de oxígeno hasta un 24 % en comparación con la aireación continua, permitiendo reducir el caudal de gas y mejorar la eficiencia energética.

De manera complementaria, Zhou *et al.* (2025) demostraron que la optimización de parámetros geométricos como el ángulo de divergencia, la profundidad de la entrada de aire y la posición de la boquilla mejora la eficiencia de mezcla gas-líquido y reduce significativamente el tamaño de las burbujas, logrando una concentración de oxígeno disuelto 12.6 % por encima del nivel de saturación. Estos hallazgos refuerzan la superioridad del Venturi frente a métodos convencionales de aireación y su potencial en la optimización de sistemas de tratamiento de aguas residuales (Li *et al.*, 2023).

En este contexto, el presente trabajo se enfocó en evaluar el desempeño de un aireador basado en el efecto Venturi como alternativa a los equipos de aireación convencionales, utilizando Dinámica de Fluidos Computacional para su diseño y optimización. Se realizó un análisis multiparamétrico de la relación de contracción en la tubería de recirculación y se llevó a cabo una comparación experimental del análisis numérico. Con ello, se busca proporcionar una alternativa viable para la mejora de sistemas de tratamiento aerobios, donde se requiera una eficiente mezcla aire-agua con recirculación.

### ECUACIONES

La teoría básica de la modelación con DFC son las ecuaciones de la dinámica de fluidos de Navier-Stokes, las cuales son usadas para modelar parámetros del flujo de un fluido, como velocidad, temperatura y presión (López, 2019). Las ecuaciones de Reynolds-Averaged Navier Stokes (RANS) son las ecuaciones más usadas en el análisis de fluctuaciones turbulentas de flujos incompresibles. Estas ecuaciones se obtienen al promediar las ecuaciones de Navier Stokes (energía y *momentum*) en función del tiempo. Las ecuaciones resultantes describen los parámetros medios del flujo de velocidad, presión y transporte, más no los detalles instantáneos de las fluctuaciones turbulentas (Mejía, 2020).

Ecuación de conservación de masa:

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

Ecuación de cantidad de movimiento (*momentum*)

$$\frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla P + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

$$\vec{\tau} = \mu \left[ (\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{V} I \right] \quad (3)$$

Donde:

- $\rho$  = densidad del fluido
- $\nabla$  = operador diferencial vectorial
- $\vec{V}$  = vector de velocidad
- $P$  = presión absoluta
- $\vec{\tau}$  = tensor de esfuerzos
- $\rho \vec{g}$  y  $\vec{F}$  = fuerza gravitacional y fuerzas externas
- $I$  = tensor unitario
- $\mu$  = viscosidad dinámica

### MODELO BIFÁSICO DE MEZCLA (MIXTURE)

Para el análisis realizado en esta investigación se aplicó un modelo bifásico de mezcla con aire y agua. Un flujo de multifásico está compuesto por una o varias fases, estas se dividen en fase primaria y secundarias. Usualmente la materia que usa DCF sólido, líquido y gas. El modelo de mezcla *mixture* modela el comportamiento de diferentes fluidos, los cuales conocen sus propiedades resolviendo las ecuaciones de *momentum*, continuidad y energía para la mezcla. Se resuelve una ecuación de fracción de volumen para la fase secundaria y expresiones algebraicas para las velocidades relativas (López, 2019).

El modelo *mixture* se emplea en flujos donde las fases tengan la misma dirección, éstas son las ecuaciones que resuelven el modelo:

- Ecuación de continuidad de la mezcla de fases:

$$\frac{\partial (\rho m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}_m) = 0 \quad (4)$$

- Ecuación de *momentum* de la mezcla de fases:

$$\frac{\partial (\rho m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{u}_m \vec{u}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{u}_m + \nabla \vec{u}_m^T)] \quad (5)$$

$$+ \rho m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot (\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{u}_k' \vec{u}_k')$$

Transporte de la fracción de volumen de cada fase secundaria:

$$\frac{\partial (\alpha_p \rho_p)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{u}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{u}_p') \quad (6)$$

Donde:

- $\vec{u}_m$  = velocidad de masa ponderada
- $\rho_m$  = densidad de la mezcla
- $\alpha_k$  = fracción de volumen de la fase  $k$
- $n$  = número de fases

$\bar{F}$  = fuerza de un cuerpo  
 $\mu_m$  = viscosidad de la mezcla  
 $\vec{u}_k^r$  = velocidad de derivada de la fase secundaria k

Densidad promedio:

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (7)$$

Viscosidad de la mezcla:

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (8)$$

Velocidad promedio ponderada de masa:

$$\vec{u}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{u}_k}{\rho_m} \quad (9)$$

Velocidad de derivada (transporte de la fase secundaria k, debido a la turbulencia):

$$\vec{u}_k^r = \vec{u}_k - \vec{u}_m \quad (10)$$

Velocidad de deslizamiento (también conocida como velocidad relativa: definida como la velocidad de la fase secundaria p relativa a la fase primaria q):

$$\vec{u}_{pq} = \vec{u}_p - \vec{u}_q \quad (11)$$

Relación entre las velocidades de derivada y deslizamiento:

$$\vec{u}_k^r = \vec{u}_{pq} - \sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \vec{u}_{qk} \quad (12)$$

Donde:  $\vec{u}_p$  y  $\vec{u}_q$  son las velocidades de la fase secundaria y de la fase primaria, respectivamente.

### MATERIALES Y MÉTODOS

Este artículo se centra en la propuesta y evaluación de un aireador tipo Venturi como una solución en el tratamiento de aguas residuales. Estos equipos consisten en impulsar el líquido a través de una boquilla, instalada en una bifurcación con interacción a la atmósfera, donde una reducción en la sección (garganta) produce el efecto "Venturi". Al aumentar la velocidad del fluido se produce una reducción de la presión que permite aspirar o succionar aire de la atmósfera, que se mezcla con el líquido que fluye dentro del medio (Ferrer & Seco, 2007).

El diseño del Venturi presentado en esta investigación se realizó de acuerdo con las recomendaciones establecidas en el código ASME-MFC3-3M-1989. Se toma en cuenta la relación de diámetros en los ángulos de convergencia y divergencia como se muestra en la Figura 1. No obstante, se realizaron ajustes y mejoras geométricas de curvatura en la parte central de la garganta y succión para evitar zonas de turbulencia.

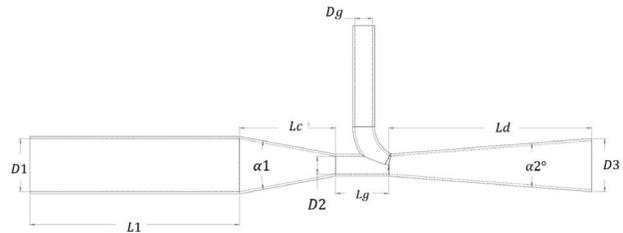


Figura 1. Componentes geométricos principales de un dispositivo Venturi

Las relaciones principales para el diseño geométrico se enlistan de acuerdo con la relación de diámetros, longitudes y ángulos de contracción. Por mencionar las más importantes utilizadas en esta investigación son:

Relación de diámetros:  $\beta = \frac{D_2}{D_1} = 0.3$

Longitud de la garganta:  $L_g \geq \frac{D_2}{3}$

Ángulo de convergencia:  $\alpha_1 = 21^\circ \pm 1^\circ$

Ángulo de divergencia:  $7^\circ \leq \alpha_2 \leq 15^\circ$

Longitud de entrada a la convergencia:  $L_1 \geq D_1$  ó  $L_1 \geq$

$$\frac{D_1}{4} + 250 \text{ mm}$$

Longitud de la convergencia:  $L_c \approx 2.7 * (D_1 - D_g)$

Con estos parámetros se establecieron 3 modelos geométricos de Venturi con el uso de dibujo técnico asistido por computadora con el software SolidWorks®.

La longitud del tubo vertical del Venturi se propuso a 200 mm del plano medio del tubo de la garganta con una conexión tipo codo para la transición en la garganta. Para el modelo físico se insertó una manguera de 76.2 mm de diámetro interior para la succión de aire, lo que permite sumergirlo sin que entre agua por el tubo de succión.

Los dispositivos propuestos fueron tres: V3a1, V2a1 y V2a1\_G1. La letra V corresponde a Venturi, mientras que los números corresponden a la relación de diámetros de garganta respecto al diámetro de la tubería  $D_1$ . En la Tabla 1 se especifica la relación geométrica de cada prototipo propuesto.

Tabla 1. Dimensiones geométricas propuestas

Código de geometría	$D_1$ [mm]	$D_2$ [mm]	$L_g$ [mm]	$D_g$ [mm]	$D_3$ [mm]
V3a1	76.2	25.4	76.2	25.4	76.2
V2a1	76.2	38.1	114	38.1	76.2
V2a1_S1	76.2	38.1	114	25.4	76.2

CONDICIONES DE FRONTERA

El flujo de agua en la entrada del Venturi y la presión hidrostática son condiciones iniciales de la simulación. La velocidad de entrada del fluido se obtiene mediante la ecuación de continuidad, siendo el agua la fase principal y la fase secundaria el aire (Figura 2). El flujo másico de aire, la velocidad y la presión se obtienen mediante las simulaciones con DFC y el software ANSYS-FLUENT®. La presión estática en la salida (*outlet*) corresponde al funcionamiento sumergido del dispositivo.

DISCRETIZACIÓN ESPACIAL

El software ANSYS-Meshing® permite generar una malla tridimensional que consiste en discretizar el dominio del flujo que se desea analizar, fragmentándolo en pequeños elementos que pueden cambiar de tamaño y forma. Estos pueden ser hexaédricos, prismáticos, piramidales y tetraédricos. Dependiendo del número de elementos y su calidad geométrica se puede lograr la convergencia satisfactoria. Para las simulaciones realizadas en esta investigación se generó una malla no estructurada mediante tetraedros, ya que estos se ajustan a las secciones de garganta, ángulo divergencia y ángulo convergencia.

Con la finalidad de garantizar que los resultados del análisis numérico fuesen independientes del tamaño del elemento, se realizó un análisis de sensibilidad de malla que consistió en la propuesta de tres estructuras de malla con distinto número de elementos. Se realizó un refinamiento local en entradas y salida de las geometrías Venturi como se observa en la Figura 3, mientras que en la Tabla 2 se observan el número de elementos total correspondiente al tamaño del elemento y del refinamiento local de las geometrías propuestas.

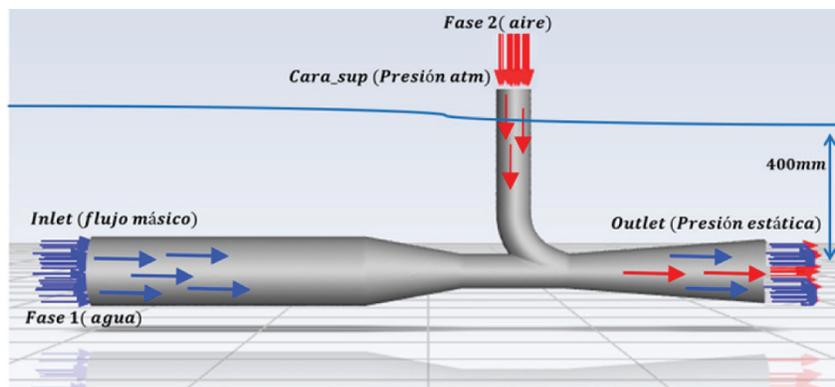


Figura 2. Modelo conceptual del dispositivo

Tabla 2. Características de malla de prototipos Venturi analizados

Código de la geometría	Número de elementos [-]	Nodos [-]	Tamaño max. elemento [mm]	Tamaño global del elemento [mm]	Tamaño del refinamiento local [mm]
V3a1	115,299	182,747	10	4.0	2.0
V3a1	211,162	211,162	10	3.0	1.5
V3a1	1,242,601	773,967	10	1.5	0.75
V2a1	1,344,783	279,010	10	1.5	0.75
V2a1_S1	1,198,795	742,924	10	1.5	0.75

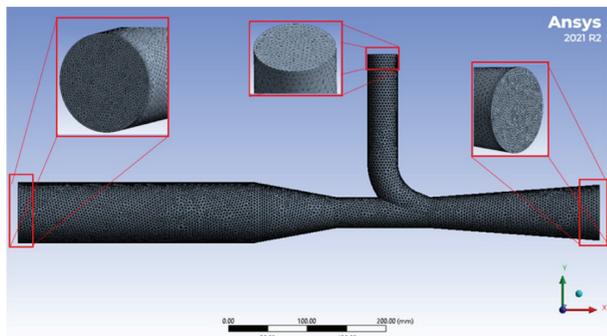


Figura 3. Detalle de malla en diferentes zonas del dominio

Para la simulación se establecieron las características y propiedades de los fluidos a analizar. En el proceso de solución el software estima el flujo de aire que pasa por el Venturi de manera ideal (Mejía, 2020), dado que es una simulación bifásica, así como las ecuaciones de conservación de masa y *momentum*. Se estableció el agua como la fase primaria y el aire como la fase secundaria (Tabla 3).

Tabla 3. Propiedades de los fluidos utilizados en la simulación

Fase	Densidad [kg / m <sup>3</sup> ]
Agua	998
Aire	0.92

Las condiciones de frontera en la entrada para la fase 1 (agua) fue velocidad y para la fase 2 (aire) fue presión. El tubo vertical succiona aire a presión atmosférica. El dispositivo fue simulado bajo condiciones de descarga ahogada (sumergido) a una distancia de 400 mm por debajo del espejo de agua, dando como condición de salida la presión estática de 3924 Pascales. En la Tabla 4

Tabla 4. Parámetros de simulación del Venturi

Modelos	Zona	Condición de frontera	Fase	Valor inicial	Observaciones
Mixture Turbulencia SST K-omega (2eqn)	Entrada (in)	Velocidad	Agua (Primaria)	3.36 m/s	Representa 15.33 l/s, para una bomba sumergible de 3HP modelo 80WQ30-23
	Entrada (in)	Fracción de volumen	Aire (secundaria)	0	No ingresa aire Agua =1
	Cara_sup (in 2)	Presión	Aire (secundaria)	101,325	Presión Atmosférica
	Cara_sup (in 2)	Fracción de volumen	Aire (secundaria)	1	ingresa aire Agua =0
	Salida (out)	Presión estática	Mezcla	3924	Empuje hidrostático
	Salida (out)	Fracción de volumen	Aire (secundaria)	1	Sale Agua + aire

se muestran las condiciones de frontera que se aplicaron para la simulación en ANSYS-FLUENT.

Los esquemas de simulación y de solución del FLUENT fueron bajo un régimen incompresible, estacionario y basado en presión, con un total de 1000 iteraciones para lograr la convergencia numérica.

#### VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Para relacionar los valores del modelo numérico se realizó una comparación con datos experimentales, como resultado se ejecutó la manufactura de un prototipo con las dimensiones geométricas correspondientes al caso de una contracción diámetro de garganta/diámetro de tubería de 2:1. El proceso de manufactura del prototipo se realizó primeramente con una impresora Dremel 3D40. El tipo de filamento que se uso fue PLA (ácido poliláctico) con diámetro de 1.75mm. Por limitaciones de la capacidad de impresión de la máquina se seccionó la geometría en 5. Una vez manufacturado en impresión 3D se realizó la manufactura con material de acero al carbón en taller especializado bajo las mismas dimensiones geométricas que en la impresión 3D, evitando las conexiones con bridas para evitar pérdidas locales en el dispositivo.

Para la comparación de los resultados numéricos con el prototipo experimental, se realizó un montaje del dispositivo físico bajo las mismas condiciones de la simulación, esto es, un flujo de agua de 15.33 l/s y una sumergencia de 400 mm. Se colocó un caudalímetro de 2" en la manguera de succión para medir el flujo de aire que circulaba hacia el interior del dispositivo Venturi, como se muestra en la Figura 4.

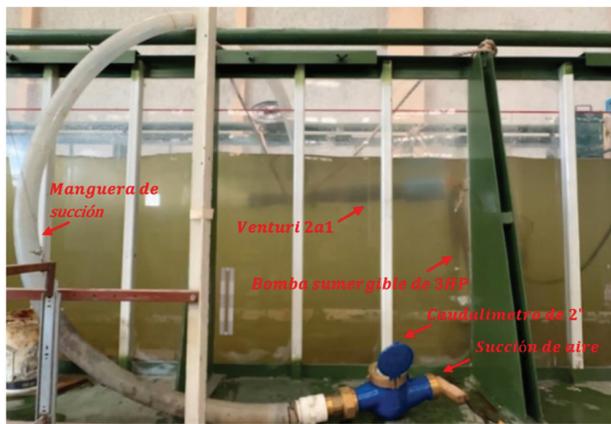


Figura 4. Montaje experimental del dispositivo

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Derivado del análisis mediante DFC se estimó el flujo masico de aire que es succionado. También se presentan los campos de velocidad y presión dentro del dispositivo que permiten visualizar de manera gráfica el comportamiento del flujo. Mediante la aplicación de la DFC se lograron realizar simulaciones del proceso de aireación a escala real, lo que conlleva a un mejor diseño y mejoras en la eficiencia del modelo físico, evitando discrepancias en la aplicación de análisis de similitud. Es importante tomar en cuenta que los datos experimentales permitieron validar los análisis realizados mediante CFD para lograr una mayor certeza en los resultados (Labatut *et al.*, 2015).

Derivado del análisis de independencia de malla, la Tabla 5 muestra los resultados de las simulaciones y estimación del flujo masico de agua y aire para diferentes mallas y geometrías.

La Figura 5 muestra el perfil de presión y velocidad a lo largo de las diferentes geometrías propuestas, en el lado izquierdo se observa que la presión se mantiene constante en la entrada y va disminuyendo gradualmente en la sección convergente, al entrar en la garganta ésta alcanza valores negativos, lo que representa la

succión aire. Del lado izquierdo de la Figura 5 están los diagramas de velocidad, se observa que la velocidad de entrada es similar al valor mostrado en la Tabla 4, la velocidad aumenta gradualmente al llegar a la sección convergente teniendo el valor máximo en la garganta, posteriormente disminuye al llegar a la sección divergente. La Tabla 6 muestra los valores numéricos de los perfiles de presión y velocidad en la sección horizontal de las 3 geometrías propuestas.

Derivado de las presiones obtenidas, se asume la presencia de cavitación hidrodinámica, la cual se define como el fenómeno de formación, desarrollo, crecimiento e implosión de cavidades o burbujas en un medio líquido. Esto, debido a la variación de presión existente en un fluido tras aumentarse repentinamente su velocidad como resultado de un cambio abrupto en la geometría o área de sección transversal del conducto de transporte del dispositivo Venturi, provocando que los efectos de la cavitación sean mucho más drásticos. En trabajos posteriores se evaluará el grado de cavitación asociado a las presiones obtenidas en esta investigación (Gutiérrez *et al.*, 2019).

En la Tabla 5 se observa que la cantidad de aire succionado de las geometrías V3a1 y V2a1\_S1 es de 4.25 l/s y 3.48 l/s respectivamente, ya que tienen mejor desempeño que V2a1 con succión de aire de 2.27 l/s, debido a la posible formación de cavitación de los valores de presión y velocidad de la Tabla 6 en las geometrías V3a1 y V2a1\_S1. Los equipos utilizados para la manufactura es otro factor que limita el análisis y comparativa de los resultados experimentales y los obtenidos mediante DFC.

Mejía (2020) refiere que una forma de garantizar que los valores de las simulaciones son correctos es observar los reportes de flujos para verificar que la cantidad de agua y la cantidad de aire que entra sea la misma que se presenta en la salida. Esto se cumple al realizar un análisis de los valores numéricos de las simulaciones como se muestra en la Tabla 7. Se muestra la comparación de flujo masico de aire y agua para el caso del prototipo con contracción de 38.1mm. El aire ingresa por la succión, se

Tabla 5. Flujos masicos de agua y aire

Código de geometría	Tamaño de elemento [mm]	Refinamiento [mm]	Agua (entrada) [l/s]	Agua (salida) [l/s]	Aire (succión) [l/s]	Aire (salida) [l/s]
V3a1	4	2	15.28	- 15.28	3.29	3.29
V3a1	3	1.5	15.29	- 15.33	4.48	4.45
V3a1	1.5	0.75	15.29	- 15.30	4.25	4.24
V2a1	1.5	0.75	15.29	- 15.48	2.27	2.13
V2a1_S1	1.5	0.75	15.29	- 15.49	3.48	3.32

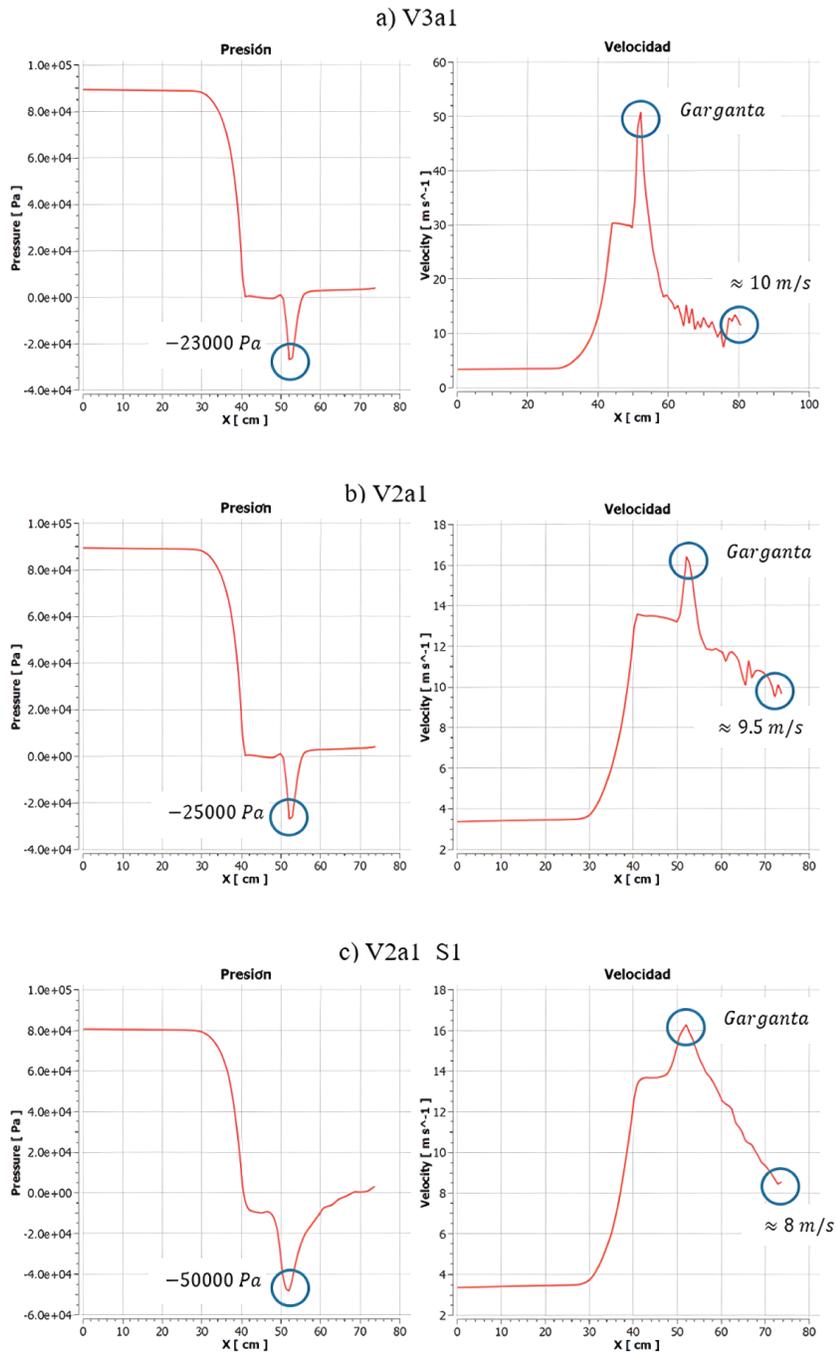


Figura 5. Perfiles de velocidad y presión de la sección horizontal de los prototipos: a) V3a1, b) V2a1 y c) V2a1\_S1

Tabla 6. Valores numéricos de los perfiles de presión y velocidad de las geometrías

Código de geometría	Presión de entrada [Pa]	Presión negativa max. [Pa]	Velocidad max. [m/s]	Velocidad de Salida [m/s]
V3a1	$9.3 \times 10^4$	$-2.3 \times 10^4$	50	10
V2a1	$9.1 \times 10^4$	$-2.5 \times 10^4$	16.5	9.5
V2a1_S1	$8.2 \times 10^4$	$-5.0 \times 10^4$	16	8

Tabla 7. Resultados de la simulación comparados con el experimental

Código de geometría	Fase agua (entrada)	Fase agua (salida)	Fase aire (cara_sup)	Fase aire (salida)	Fase aire (cara_sup) Experimental
V2a1	15.29 l/s	15.26 l/s	2.27 l/s	2.13 l/s	2.2 l/s

mezcla con el agua en la garganta, posteriormente pasa a la sección divergente hasta su salida.

El flujo de agua cumple con continuidad en la entrada y la salida después de 3000 iteraciones, por lo tanto, se asume que el flujo de aire es de 2.27 l/s. A partir de estos resultados se establece que los parámetros y condiciones de frontera fueron correctos para la simulación numérica al presentarse una diferencia de 3.2 % respecto al valor obtenido en las pruebas experimentales.

En la Figura 6 se observa la velocidad total de la mezcla en las diferentes zonas del dispositivo. En la zona de la entrada ésta se mantiene constante con magnitud de 4 m/s aproximadamente, hasta llegar a la garganta en donde aumenta por la reducción de diámetro. En esta zona el aire es succionado por la conexión vertical. La velocidad máxima se localiza en la sección superior de la garganta y divergencia, alcanzando una velocidad máxima de hasta 20 m/s.

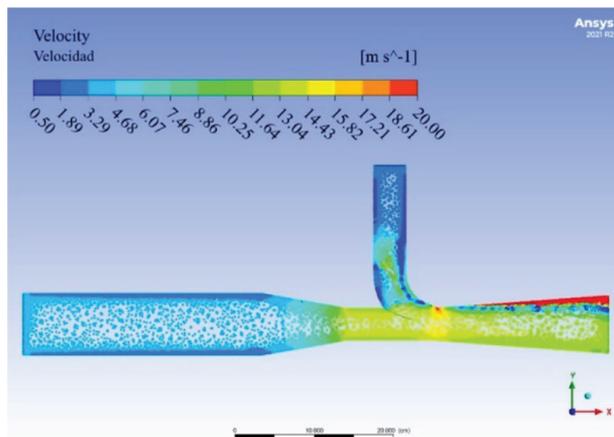


Figura 6. Contorno de velocidad del prototipo, en un plano medio

La Figura 7 muestra el campo de presión teórica calculada en la simulación. La presión de entrada calculada fue de 91262 Pa mientras que la presión en la salida fue de 3924 Pa, aproximadamente. La presión negativa máxima en la zona de la garganta fue de -25000 Pa. Esta situación garantizó la succión de aire a través del tubo vertical.

Finalmente se presenta como resultado y aporte de desarrollo tecnológico el dispositivo manufacturado, con el cuál se realizaron las pruebas de medición de flujo de aire de manera física. La Figura 8 muestra el mo-

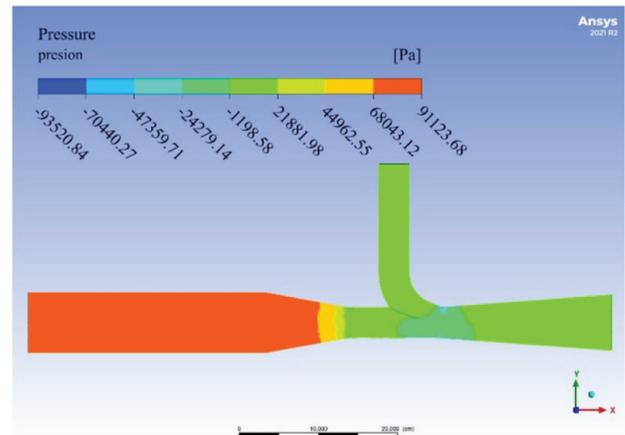


Figura 7. Contorno de presión del prototipo Venturi, en un plano medio

delo geométrico para su impresión en 3D (izquierda), el modelo impreso (centro) y el prototipo final de acero (derecha). El caudal de aire medido en este último fue de 2.2 l/s, teniendo una diferencia de 3.2 % respecto al estimado con la simulación, el cual fue de 2.27 l/s.



Figura 8. Modelo geométrico y prototipo físico del dispositivo

### CONCLUSIONES

El presente estudio permitió desarrollar y evaluar un aireador tipo Venturi para su aplicación como aireador en el tratamiento de aguas residuales, estableciendo parámetros geométricos clave y validando su desempeño mediante Dinámica de Fluidos Computacional (DFC) y experimentación física. Se demostró que la DFC es una herramienta efectiva para modelar el comportamiento del flujo bifásico aire-agua, proporcionando información detallada sobre la distribución de presión, velocidad y flujo másico dentro del dispositivo.

Uno de los principales hallazgos fue la validación experimental de los resultados numéricos, con una diferencia de 3.2 % entre el flujo de aire obtenido en la simulación (2.27 l/s) y el medido en pruebas físicas (2.2

l/s), lo que confirma la precisión del modelo computacional para predecir el comportamiento hidráulico del aireador. Además, se identificó que una relación de diámetros en la garganta de 2:1 y un ángulo de convergencia de 3.5° optimizan la succión de aire, generando una presión negativa máxima de -25000 Pa, lo que permite alcanzar velocidades de hasta 20 m/s en la zona de mayor estrechamiento.

Desde una perspectiva aplicada, los resultados obtenidos aportan información clave para el diseño y optimización de sistemas de aireación en plantas de tratamiento de aguas residuales, presentando el Venturi como una alternativa viable a los aireadores sumergibles convencionales. Su implementación podría reducir significativamente el consumo energético y los costos operativos al aprovechar la presión hidráulica del flujo sin necesidad de equipos mecánicos adicionales.

Para futuras investigaciones se recomienda evaluar el desempeño del aireador Venturi en condiciones reales de operación dentro de una planta de tratamiento, así como realizar estudios de transferencia de oxígeno para determinar su eficiencia en la aireación del agua. Asimismo, se sugiere analizar el impacto de la cavitación en la durabilidad del dispositivo y explorar modificaciones geométricas que mejoren aún más su desempeño hidráulico.

## REFERENCIAS

- Baylar, A., & Ozkan, F. (2006). Applications of Venturi principle to water aeration systems. *Environmental fluid mechanics*, (6), 341-357. <https://doi.org/10.1007/s10652-005-5664-9>
- Cockx, A., Do, Z., Audic, J. M., Liné, A., & Roustan, M. (2001). Global and local mass transfer coefficients in wastewater treatment process by computational fluid dynamics. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 40(2), 187-194. [https://doi.org/10.1016/s0255-2701\(00\)00138-0](https://doi.org/10.1016/s0255-2701(00)00138-0)
- Dong, C., Zhu, J., Wu, X., & Miller, C. F. (2012). Aeration efficiency influenced by venturi aerator arrangement, liquid flow rate and depth of diffusing pipes. *Environmental Technology*, 33(11), 1289-1298. <https://doi.org/10.1080/09593330.2011.620986>
- Ferrer-Polo, J., & Seco-Torrecillas, A. (2007). *Tratamientos biológicos de aguas residuales*. 2a ed. Universidad Politécnica de València.
- García-Morales, M. A. (2014). *Evaluación de tratamientos terciarios para la reutilización de agua proveniente de efluentes industriales*. (Tesis de doctorado). Facultad de Química. UAEM. Toluca, Estado de México
- Guimet, V., Honoré, T., Audic, J. M., & Do-Quang, Z. (2007). Rheology and oxygen transfer in CFD models for wastewater. *Progress in Computational Fluid Dynamics an International Journal*, 7(2). <https://doi.org/10.1504/PCFD.2007.013014>
- Gutiérrez-Mosquera, L. F., Arias-Giraldo, S., & Cardona-Naranjo, D. F. (2019). Cavitación hidrodinámica: Un enfoque desde la

ingeniería y la agroindustria. *Scientia Et Technica*, 24(2), 283-304.

- Herrmann-Heber, R., Reinecke, S. F., & Hampel, U. (2020). Dynamic aeration for improved oxygen mass transfer in the wastewater treatment process. *Chemical Engineering Journal*, 386, 122068. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122068>
- Iñiguez-Covarrubias, M., Flores-Velazquez, J., Ojeda-Bustamante, W., Díaz-Delgado, C., & Mercado-Escalante, R. (2015). Comparación de resultados experimentales de un Venturi con simulación de dinámica de fluidos computacional. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(4), 141-152.
- Labatut, R. A., Ebeling, J. M., Bhaskaran, R., & Timmons, M. B. (2015). Modeling hydrodynamics and path/residence time of aquaculture-like particles in a mixed-cell raceway (MCR) using 3D computational fluid dynamics (CFD). *Aquacultural Engineering*, 67, 39-52. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.05.006>
- Li, H., Zhang, Q., Zeng, M., Cao, J., Zhao, Q., & Hao L. (2023). Insights into gas flow behavior in venturi aerator by CFD-PBM model and verification of its efficiency in sludge reduction through O3 aeration. *Journal of Water Process Engineering*, 54, 103960. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103960>
- López-Rebollar, B. M. (2019). *Optimización de parámetros hidrodinámicos en el diseño de estanques de acuicultura, aplicando dinámica de fluidos computacional*. (Tesis de doctorado). IITCA. UAEM. Toluca, Estado de México.
- Mejía-Rómulo E. (2020). *Aplicación del principio de un Venturi en el proceso de aireación en un estanque acuícola de un sistema de recirculación, aplicando dinámica de fluidos computacional*. (Tesis de licenciatura). Facultad de Ingeniería. UAEM. Toluca, Estado de México.
- Mueller, J. A., Boyle, W. C., & Popel, H. J. (2002). *Aeration: principles and practice*. Vol. 11. 1a ed. CRC press.
- Therrien, J. D., Vanrolleghem, P. A., & Dorea, C. C. (2019). Characterization of the performance of venturi-based aeration devices for use in wastewater treatment in low-resource settings. *Water SA*, 45(2), 251-258. <https://doi.org/10.4314/wsa.v45i2.12>
- Valdez, E. C., & Vázquez, A. (2003). *Ingeniería de los sistemas de tratamiento y disposición de aguas residuales*. México: Fundación ICA.
- Zhou, Y., Cui, J., Chen, Z., Liu, J., He, L., Fan, W., & Huo, M. (2025). Parametric analysis of venturi-type microbubble generator and the bubble fragmentation dynamics. *Desalination and Water Treatment*, 322, 101116. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2025.101116>

## BIBLIOGRAFÍA SUGERIDA

- Akita, K., & Yoshida, F. (1974). Bubble size, interfacial area, and liquid-phase mass transfer coefficient in bubble columns. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, 13(1), 84-91. <https://doi.org/10.1021/i260049a016>
- Baylar, A., Cihan, A. M., Unsal, M., & Ozkan, F. (2009). Numerical modeling of venture flows for determining air injection rates-

- using fluent. *Mathematical and Computational Applications*, (14), 97-108. <http://dx.doi.org/10.3390/mca14020097>
- De La Rosa-Pérez, A. (2022). *Mejora del proceso fisicoquímico de tratamiento de aguas residuales industriales*. (Tesis de maestría). Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, Estado de México.
- Flores-Gutiérrez, L. M., & López-Rebollar, B. M. (2012). *Análisis hidrodinámico de un sistema de recirculación de agua para uso en acuicultura, utilizando técnicas ópticas, PIV y PTV*. (Tesis de licenciatura). Facultad de Ingeniería, Centro Interamericano de Recursos del Agua. Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, Estado de México.
- Ghadouani, A., & Coggins, L. X. (2011). Science, technology and policy for water pollution control at the watershed. Scale: Current issues and future challenges. *Physics and Chemistry of the Earth*. 36(9-11), 335-341. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.05.011>
- López-Rebollar B. M. (2015). *Aplicación de CFD-ANSYS-FLUENT en el estudio hidrodinámico de tanques de recirculación empleados en acuicultura*. (Tesis de maestría). Estado de México.
- Metcalf & Eddy Inc. (2002). *Ingeniería de aguas residuales*. Vol. 1. 3a ed. McGraw Hill Higher Education.
- Ramalho, R. S. (1996). *Tratamiento de aguas residuales*. London: REVERTÉ.
- Ranald, V. G. (1978). *Mecánica de fluidos e Hidráulica*. 2a ed. CDMX: McGraw-Hill.
- Tejocote-Pérez, M., Balderas-Hernández, P., Barrera-Díaz, C. E., Roa-Morales, G., & Natividad-Rangel, R. (2010). Treatment of industrial effluents by a continuous system: Electrocoagulation-Activated sludge. *Bioresource Technology*, 101(20), 7761-7766. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.05.027>
- Tolentino-Masgo, S. L. B. (2020). Estudio experimental y numérico de la presión del flujo de agua en un tubo Venturi. Redalyc.org. Recuperado en 2022 de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=505561581001>
- Cómo citar:**  
Nadin-Fernández, S., López-Rebollar, B. M., & Fonseca-Ortiz, C. R. (2025). Diseño y análisis mediante DFC de un aireador tipo Venturi para su uso en el tratamiento de agua residual. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 26(02), 1-11. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2025.26.2.016>