

Validación de un Modelo CFD para la Simulación de Cavitación Hidrodinámica en Dispositivos Venturi

Enya Pulgarín Ramírez y Cristian Camilo Chiquillo Maldonado

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Químico

Modalidad Trabajo de Investigación

Director

Giovanni Morales Medina
Doctor en Ingeniería Química

Co-directora

María Mercedes Duarte Mantilla
Magíster en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela Ingeniería Química
Bucaramanga

2026

Dedicatoria

A mis padres, Claudia y Andrés, a mis hermanos, Mariae, Andrei y Pipe, mi familia. Mis amigas Tina, Karencilla y Chachita. A mi novio Cristian Velosa.

Enya Pulgarín Ramírez

A esas personas que día a día entregaron todo lo que tenían para que su hijo cumpliera un sueño, para que como ese par de personas dicen muy seguido “estudie para que sea alguien en la vida”, a esas llamadas muy temprano en la mañana para preguntar del como estoy y que ellos vean que el sueño cumplido de su hijo o el darle sentido a su dicho o ese amor paternal que los caracteriza, sea reconocido de la mejor manera y quiero en este pequeño espacio que va a quedar plasmado para siempre, decirle a mis padres Moises y Ana que ellos son los verdaderos ingenieros, porque nunca entendí por más formación que recibí, el cómo o el cuándo, crearon y formaron a esta persona, su hijo, porque aquí estoy y soy por ustedes, a mi hermano Santiago, que aún estando a la distancia, siempre con sus llamadas llenas de preguntas o de risas, me recargaban y me daban fuerzas para seguir, a la hermanita que me dio el paso por la universidad, Angelica tu compañía y cariño sin importar que fuera a 1 metro o a 565 kilómetros de distancia siempre fue el mismo, a Coco, el ser que sin tener la capacidad de hablar solo con sus miradas y sus juegos, fue, es y será un pequeño suspiro de tranquilidad, gracias y los amo.

Cristian Camilo Chiquillo Maldonado

Agradecimientos

A mi mamá Claudia Isabel por viajar conmigo y ubicarme cuando llegué a Bucaramanga, acompañarme a mercar, a recorrer el camino hacia la UIS y comprarme lo que necesitaba gastando hasta sus ahorros, marcando un inicio y nueva perspectiva de vida. A mi papá porque con su esfuerzo constante logró brindarme el sustento y las herramientas necesarias para culminar mi formación universitaria. A mi novio por siempre estar ahí cuando más lo necesité.

Enya Pulgarín Ramírez

A cada persona que hizo parte de mi vida durante esta aventura, algunos ya no están en este plano, otros solo tomaron rumbos diferentes y claro los que siguen, gracias, de todos es muy seguro que aprendí algo, algo que voy a poner en práctica en instancias o situaciones futuras en este camino denominado vida.

Cristian Camilo Chiquillo Maldonado

Tabla de Contenido

Introducción	1
1. Objetivos	2
1.1. Objetivo General	2
1.2. Objetivos específicos.....	2
2. Marco Teórico	3
2.1. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y el Métodos de Elementos Finitos (FEM)	3
2.2. Modelado de flujos multifásicos: Enfoque de Mezcla (Mixture Model)	4
2.2.1. Ecuación de continuidad	4
2.2.2. Ecuación de cantidad de movimiento (Navier-Stokes).....	5
2.2.3. Modelo de turbulencia κ - ω	5
2.3. Fundamentos físicos de la cavitación Hidrodinámica.....	6
2.4. Modelos Matemáticos de Cavitación	7
2.4.1. Ecuación de transporte de vapor.....	7
2.4.2. Modelo de Cavitación: Zwart-Gerber-Belamri (ZGB)	8
3. Estado del Arte	9
4. Metodología.....	12
4.1. Fase I: Construcción y Verificación del Sistema de Simulación	13

4.1.1.	Geometría del Venturi.....	13
4.1.2.	Configuración de la física del flujo modelado.....	13
4.1.3.	Discretización del dominio.....	15
4.1.4.	Estudio de independencia de malla.....	15
4.1.5.	Métricas de evaluación y calidad de malla.....	16
4.1.6.	Caracterización hidrodinámica.....	17
4.2.	Fase II: Validación Hidrodinámica y Calibración de la simulación.....	17
4.2.1.	Implementación del modelo de cavitación.....	17
4.2.2.	Proceso de calibración del modelo.....	17
4.3.	Fase III: Análisis de Sensibilidad Geométrica y Operativa.....	19
5.	Resultados.....	20
5.1.	Construcción del sistema de simulación.....	20
5.1.1.	Independencia de malla.....	20
5.1.2.	Perfil de presión y velocidad para la malla escogida.....	23
5.2.	Validación de la simulación.....	25
5.2.1.	Validación Hidrodinámica del Modelo $\alpha = 19^\circ$	25
5.3.	Análisis de Sensibilidad.....	30
5.3.1.	Validación Hidrodinámica del Modelo $\alpha = 45^\circ$	30
6.	Conclusiones.....	35

7. Recomendaciones	36
Agradecimientos.....	37
Referencias Bibliográficas	38
Apéndices.....	44

Lista de Tablas

Tabla 1.	Propiedades termofísicas del agua líquida y vapor a 20°C	13
Tabla 2.	Parámetros del modelo ZGB para la calibración COMSOL basados en Design-1.	19
Tabla 3.	Parámetros de calidad promedio y convergencia para los diferentes niveles de refinamiento de malla.	22
Tabla 4.	Valores objetivo de fracción volumétrica de vapor y caída de presión extraídos mediante digitalización de Shi et al. (2019) en Design-1 ($\alpha = 19^\circ$).	25
Tabla 5.	Parámetros de control <i>cavon</i> optimizados mediante calibración adaptativa para cada régimen de velocidad.	28
Tabla 6.	Valores objetivo de fracción volumétrica de vapor y caída de presión extraídos mediante digitalización de Shi et al. (2019) en Design-2 ($\alpha = 45^\circ$).	31
Tabla 7.	Parámetros de control <i>cavon</i> optimizados mediante calibración para cada régimen de velocidad ($\alpha = 45^\circ$).	32
Tabla 8.	Medidas para la construcción del Venturi en COMSOL Multiphysics.	45

Lista de Figuras

Figura 1.	Cavitación Hidrodinámica en tubos Venturi	10
Figura 2.	Imagen ilustrativa de la implosión en la cavitación hidrodinámica	10
Figura 3.	Diagrama de flujo de la descripción metodológica.	12
Figura 4.	Comparativa del refinamiento de malla en la garganta y zona de divergencia del Venturi	20
Figura 5.	Comparación de la caída de presión experimental vs. Numérica para las 3 mallas en régimen monofásico.	21
Figura 6.	Perfiles de presión longitudinal y delimitación de la zona de cavitación para diferentes velocidades de entrada $\alpha = 19^\circ$	23
Figura 7.	Perfil de velocidad para la malla escogida en régimen monofásico $\alpha = 19^\circ$	24
Figura 8.	Sensibilidad de la caída de presión estática (ΔP) frente al parámetro de control <i>cavon</i> a distintos regímenes de velocidad.	26
Figura 9.	Sensibilidad de la fracción volumétrica de vapor (Φd) frente al parámetro de control <i>cavon</i> a distintos regímenes de velocidad.	27
Figura 10.	Validación de la caída de presión ΔP mediante el modelo calibrado punto a punto frente a los datos experimentales de Shi et al. (2019).	29
Figura 11.	Validación de la fracción de vacío ϕd frente a Shi et al. (2019) tras la calibración adaptativa.	29

Figura 12. Sensibilidad de la caída de presión estática (ΔP) frente al parámetro de control <i>cavon</i> a distintos regímenes de velocidad ($\alpha = 45^\circ$).	31
Figura 13. Sensibilidad de la fracción volumétrica de vapor (Φd) frente al parámetro de control <i>cavon</i> a distintos regímenes de velocidad ($\alpha = 45^\circ$).	32
Figura 14. Validación de la caída de presión (ΔP) mediante el modelo calibrado punto a punto frente a los datos experimentales de Shi et al. (2019) ($\alpha = 45^\circ$).	33
Figura 15. Validación de la fracción de vacío (Φd) frente a Shi et al. (2019) tras la calibración — Design-2 ($\alpha = 45^\circ$).	34
Figura 16. Construcción del sistema de simulación en COMSOL Multiphysics.	44
Figura 17. Distribución de parámetros para la construcción del Venturi. Fuente (Shi et al., 2019)	45
Figura 18. Interfaz de construcción geométrica de COMSOL Multiphysics.	46
Figura 19. Implementación de variables k_0 y ω_0 en COMSOL Multiphysics.....	47
Figura 20. Búsqueda de parámetros de calidad de malla en COMSOL Multiphysics.....	49
Figura 21. Implementación del modelo ZGB en el término mdc en COMSOL Multiphysics .	50
Figura 22. Definición de operadores para extracción de datos ΔP y Φd en COMSOL Multiphysics	51
Figura 23. Perfiles de presión longitudinal y delimitación de la zona de cavitación para diferentes velocidades de entrada — Design-2 ($\alpha = 45^\circ$).	54

Figura 24. Perfil de velocidad longitudinal en el eje central para la malla escogida en régimen monofásico — Design-2 ($\alpha = 45^\circ$).....54

Lista de Apéndices

Apéndice A.	Guía de Construcción de Venturis en el entorno CFD COMSOL Multiphysics.	44
Apéndice B.	Guía técnica para la especificación de intensidad turbulenta y relación de viscosidad en el entorno CFD COMSOL Multiphysics.	46
Apéndice C.	Parámetros para la evaluación de la calidad de la malla en COMSOL Multiphysics	48
Apéndice D.	Guía de Parametrización e Implementación del Modelo ZGB en COMSOL Multiphysics	49
Apéndice E.	Configuración de Operadores de Integración para Dominios Axisimétricos en COMSOL Multiphysics.....	50
Apéndice F.	Datos gráfica de independencia de malla régimen monofásico.	52
Apéndice G.	Cálculos del error relativo y GCI para independencia de malla.....	53
Apéndice H.	Datos gráfica de independencia de malla régimen monofásico Desing-2 45°.	53
Apéndice I.	Número de cavitación calculado para cada velocidad a calibrar.....	55
Apéndice J.	Extensión de barrido de <i>cavon</i> para <i>U_{in}</i> =1.20 y 1.35 m/s	55

Resumen

Título: Validación de un Modelo CFD para la Simulación de Cavitación Hidrodinámica en Dispositivos Venturi*

Autor: Enya Pulgarín Ramírez**, Cristian Camilo Chiquillo Maldonado**.

Palabras clave: Cavitación Hidrodinámica, Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), Modelo de Mezcla, Validación Numérica, Dispositivo Venturi.

Descripción: Este trabajo valida un modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para caracterizar la cavitación hidrodinámica en dispositivos Venturi mediante un enfoque de mezcla y el modelo de transporte de masa Zwart-Gerber-Belamri (ZGB). La investigación aseguró la fiabilidad numérica mediante un estudio de independencia de malla que alcanzó un Índice de Convergencia de Malla (GCI) de 3.06%. A través de una calibración adaptativa del parámetro de control de transferencia de masa (cav_{on}), se obtuvieron predicciones de caída de presión con errores relativos mínimos de entre 1.47% y 1.54% para el diseño de 19°, y de 1.93% para el de 45°. Aunque se identificó una subestimación en la fracción volumétrica de vapor debido a la difusión numérica propia del método de elementos finitos, los resultados confirman que el modelo es una herramienta robusta para predecir variables globales de presión y optimizar el diseño hidráulico de reactores de flujo contraído.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, Director Giovanni Morales Medina, Codirectora María Mercedes Duarte Mantilla

Abstract

Title: Validation of a CFD Model for Simulating Hydrodynamic Cavitation in Venturi Devices*.

Authors: Enya Pulgarín Ramírez**, Cristian Camilo Chiquillo Maldonado**.

Keywords: Hydrodynamic Cavitation, Computational Fluid Dynamics (CFD), Mixing Model, Numerical Validation, Venturi Device.

Description: This study validates a Computational Fluid Dynamics (CFD) model to characterize hydrodynamic cavitation in Venturi devices using a mixing approach and the Zwart-Gerber-Belamri (ZGB) mass transport model. The research ensured numerical reliability through a mesh independence study that achieved a Grid Convergence Index (GCI) of 3.06%. Through adaptive calibration of the mass transfer control parameter (cav_{on}), pressure drop predictions were obtained with minimum relative errors ranging from 1.47% to 1.54% for the 19° design and 1.93% for the 45° design. Although an underestimation in the volumetric fraction of vapor was identified due to the numerical diffusion inherent in the finite element method, the results confirm that the model is a robust tool for predicting global pressure variables and optimizing the hydraulic design of contracted-flow reactors.

*Bachelor Thesis

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química, Director Giovanni Morales Medina, Codirectora María Mercedes Duarte Mantilla

Introducción

La cavitación hidrodinámica (CH) es un fenómeno de transición de fase que ocurre cuando un flujo líquido experimenta una caída de presión estática por debajo de su presión de vapor, debido a una aceleración local en una constricción. Este proceso provoca la formación de microburbujas, que al colapsar alcanzan temperaturas y presiones extremas (Gogate & Pandit, 2005). Estas condiciones inducen a la formación de radicales H^+ y OH^{\cdot} , útiles en procesos de oxidación avanzada para la degradación de contaminantes orgánicos persistentes (Chaudhuri & Chatterjee, 2024; Wang et al., 2021).

Dentro de las diversas configuraciones para inducir este fenómeno, el tubo Venturi destaca como una de las geometrías prometedoras para el tratamiento de aguas industriales debido a su eficiencia operativa y capacidad de recuperación de presión (Sech, 2022). No obstante, el diseño de estos dispositivos es altamente sensible, pues factores geométricos como la longitud de la garganta y los ángulos de convergencia y divergencia determinan tanto la intensidad de la cavitación como la tasa de generación de radicales (Sarvothaman et al., 2019).

Dada la complejidad del flujo cavitante y las limitaciones técnicas que presentan las mediciones experimentales directas, la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, *Computational Fluid Dynamics*) se ha consolidado como una herramienta indispensable para la optimización de estos reactores (Ji et al., 2017). Si bien la lectura predominante se ha centrado en el uso de códigos basados en Volúmenes Finitos (FVM), como ANSYS Fluent, por su robustez en el transporte de fases, el presente trabajo propone el uso de COMSOL Multiphysics® 6.4. basado en el Método de Elementos Finitos (FEM).

Esta selección se fundamenta en la versatilidad de COMSOL para gestionar arquitecturas multifásicas integradas. Mientras que los enfoques tradicionales se limitan al comportamiento hidrodinámico, la plataforma FEM facilita la incorporación futura de la cinética de degradación química y el análisis del deterioro mecánico del material en un único entorno de cómputo.

Bajo este enfoque, el estudio emplea el Modelo de Mezcla (Mixture Model) para validar la capacidad de COMSOL en la predicción del sistema, asumiendo que una configuración numérica rigurosa y la correlación con datos experimentales pueden consolidar a esta plataforma como una alternativa estratégica para el diseño de reactores de cavitación avanzados. En consecuencia, la investigación busca responder: ¿En qué medida el entorno de simulación COMSOL Multiphysics® 6.4 permite modelar con precisión la influencia de la geometría del tubo Venturi en la generación de cavitación hidrodinámica, garantizando la convergencia numérica y la correlación con resultados validados en la literatura?

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Evaluar la capacidad predictiva de un entorno de simulación y la convergencia numérica basado en el método de elementos finitos para el modelado de la cavitación hidrodinámica mediante la validación de un dispositivo tipo Venturi a partir de datos de referencia bibliográfica.

1.2. Objetivos específicos

- Desarrollar el dominio computacional del dispositivo de cavitación Venturi mediante herramientas CFD, seleccionando las propiedades geométricas y condiciones de contorno reportadas en la literatura para la fase de construcción del sistema.

- Validar el modelo numérico mediante un proceso de fitting entre los resultados obtenidos en las simulaciones y los datos reportados en el documento base, así el desempeño del software en regímenes de cavitación para dos configuraciones geométricas.
- Analizar la sensibilidad del modelo de transferencia de masa, determinando su impacto en la estabilidad del solver y en la precisión de las variables de respuesta (fracción de vapor y caída de presión).

2. Marco Teórico

2.1. Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y el Métodos de Elementos Finitos (FEM)

La dinámica de fluidos computacional constituye una herramienta muy potente para el análisis detallado de los flujos (Van Hoecke et al., 2023). La CFD utiliza algoritmos y técnicas numéricas para resolver e investigar problemas relacionados con el flujo de fluidos. Se utiliza la capacidad de cómputo para resolver numéricamente las ecuaciones que rigen estos fenómenos y que no pueden resolverse analíticamente (Židonis & Aggidis, 2015). En este estudio, se utiliza el Método de elementos Finitos (FEM) a través COMSOL Multiphysics®.

A diferencia del Método de Volúmenes Finitos (FVM), predominante en códigos como ANSYS Fluent y basado en el balance de flujos en volúmenes de control, el Método de los Elementos Finitos (FEM) se define como una técnica numérica avanzada diseñada para resolver problemas complejos de ingeniería y física que se expresan mediante ecuaciones diferenciales parciales. Su desarrollo se fundamenta en la necesidad de transformar un sistema continuo en un modelo discreto, lo que permite abordar problemas que no admiten solución analítica en dominios con geometrías complejas y condiciones de contorno arbitrarias (Gosz, 2017).

El proceso fundamental del FEM comienza con la discretización del dominio físico en un conjunto de subdominios denominados elementos, los cuales se interconectan a través de nodos donde se evalúan las variables desconocidas del sistema, tales como presión, velocidad o temperatura (Olek Zienkiewicz et al., 2024).

Para representar el comportamiento de las variables dentro de cada elemento, se emplean funciones de forma, generalmente de carácter polinómico, que permiten construir una aproximación continua de la solución global a partir de soluciones locales (Olek Zienkiewicz et al., 2025).

La precisión del método depende en gran medida de la calidad y densidad de la malla utilizada; un refinamiento adecuado permite capturar con mayor fidelidad los gradientes espaciales de las variables del campo, lo cual es fundamental en la resolución numérica de fenómenos gobernados por fuertes variaciones locales (Gosz, 2017).

2.2. Modelado de flujos multifásicos: Enfoque de Mezcla (Mixture Model)

El estudio de la cavitación hidrodinámica requiere un enfoque euleriano-euleriano simplificado conocido como Modelo de Mezcla. A diferencia del modelo de dos fluidos completo, este resuelve una única ecuación de cantidad de movimiento para la mezcla, tratando a las fases como campos continuos interpenetrables (Ishii & Hibiki, 2011). Las propiedades de la mezcla se determinan localmente mediante la fracción volumétrica (α) de la fase dispersa (vapor).

La densidad de la mezcla se define como:

$$\rho_m = \alpha_g \rho_g + (1 - \alpha_g) \rho_l \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde α_g representa la fracción volumétrica de la fase gaseosa para este caso particular es la fracción de vapor.

2.2.1. Ecuación de continuidad

Para un flujo multifásico, la ecuación de continuidad de la mezcla promedia las densidades de las fases líquida (ρ_l) y gaseosa (ρ_g). Según (Ishii & Hibiki, 2011), se expresa en estado transitorio y estacionario, respectivamente como:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m v_m) = 0 \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\nabla \cdot (\rho_m v_m) = 0 \quad (\text{Ec. 2a})$$

Donde, ρ_m : Densidad de la mezcla, v_m : Vector de velocidad de la mezcla, α_g : Fracción volumétrica de la fase gaseosa. La densidad de la mezcla (ρ_m) se define en la **Ec. 1**.

2.2.2. Ecuación de cantidad de movimiento (Navier-Stokes)

La ecuación de Navier-Stokes para la mezcla incorpora el efecto de las fuerzas interfaciales y el intercambio de momento. De acuerdo con la formulación de (Biswas & Mukherjee, 2014) se expresa en estado transitorio y estacionario, respectivamente como:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_m v_m) + \nabla \cdot (\rho_m v_m v_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla v_m + \nabla v_m^T)] + \rho_m g + F \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\nabla \cdot (\rho_m v_m v_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla v_m + \nabla v_m^T)] + \rho_m g + F \quad (\text{Ec. 3a})$$

Donde, p : Presión estática (Pa), μ_m : Viscosidad de la mezcla ($Pa \cdot s$), donde: $\mu_m = \alpha_g \mu_g + (1 - \alpha_g) \mu_l$, g : Vector de aceleración de la gravedad (m/s^2), F : Fuerzas externas o de interacción interfacial (N/m^3).

2.2.3. Modelo de turbulencia κ - ω

Para resolver las fluctuaciones en un flujo con altos gradientes de velocidad en la garganta del Venturi, se utiliza el modelo de dos ecuaciones de Wilcox (2006), el cual se encuentra codificado en los programas de CFD como COMSOL Multiphysics:

- **Energía cinética turbulenta (κ):** Representa la energía acumulada en las fluctuaciones y remolinos del flujo, indicando qué tan intensa es la turbulencia.

$$\text{E.T.} \quad \frac{\partial(\rho_m k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m k v_m) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta^* \rho_m k \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\text{E.E.} \quad \nabla \cdot (\rho_m k v_m) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \beta^* \rho_m k \quad (\text{Ec. 4a})$$

- **Tasa de disipación específica (ω):** Indica qué tan rápido se "descomponen" los remolinos de turbulencia en energía térmica por unidad de volumen y tiempo.

$$\text{E.T.} \quad \frac{\partial(\rho_m \omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \omega v_m) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho_m \omega^2 \quad (\text{Ec. 5})$$

$$\text{E.E.} \quad \nabla \cdot (\rho_m \omega v_m) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \nabla \omega \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho_m \omega^2 \quad (\text{Ec. 5a})$$

Donde, κ : Energía cinética turbulenta (m^2/s^2), ω : Tasa de disipación específica (s^{-1}).

μ_t : Viscosidad turbulenta, donde $\mu_t = \rho_m k / \omega$.

2.3. Fundamentos físicos de la cavitación Hidrodinámica

La cavitación hidrodinámica se genera mediante restricciones físicas como placas de orificio o Venturis, lo que facilita su implementación en procesos industriales de gran escala debido a su mayor eficiencia energética y escalabilidad (Gevari et al., 2020; Gogate, 2011). El potencial de este fenómeno radica en las condiciones extremas generadas durante la implosión de las burbujas, la cual produce puntos calientes localizados con temperaturas de miles de grados Kelvin y presiones de cientos de atmósferas, además de la formación de micro-jets de alta velocidad y ondas de choque (Zheng et al., 2022).

Estas condiciones inducen efectos mecánicos y químicos fundamentales para la intensificación de procesos en áreas como la desinfección de patógenos y la modificación de

biomasa (Rudolf et al., 2025; Zheng et al., 2022). En aplicaciones de ingeniería, el rendimiento de los reactores depende de parámetros operativos y geométricos críticos; el diseño de la restricción determina la intensidad de la cavitación y la distribución de las cavidades en el flujo (Ge et al., 2022). Estudios recientes indican que factores como la temperatura del fluido y las propiedades termofísicas desempeñan un papel dual: mientras que un aumento de temperatura puede facilitar la formación de vapor, también puede mitigar la intensidad del colapso debido a efectos termodinámicos de supresión (Ge et al., 2022; Gevari et al., 2020). Por lo tanto, el control preciso de estas variables es esencial para optimizar aplicaciones que van desde el procesamiento de alimentos hasta la degradación de contaminantes orgánicos persistentes (Gogate, 2011; Rudolf et al., 2025).

2.4. Modelos Matemáticos de Cavitación

El modelado numérico de la cavitación ha evolucionado hacia los Modelos de Ecuación de Transporte (TEM), los cuales son los más utilizados en la CFD actual. Estos modelos se fundamentan teóricamente en la ecuación de Rayleigh-Plesset (RP), la cual describe la dinámica física del crecimiento y colapso de una burbuja esférica en un líquido (Brennen, 2013). Al simplificar los términos de la ecuación de RP, los modelos TEM cuantifican la transferencia de masa entre fases mediante términos fuente de evaporación (R_e) y condensación (R_c).

2.4.1. Ecuación de transporte de vapor

Para poder implementar un modelo de cavitación se debe entender cómo interpreta COMSOL Multiphysics la distribución y evolución de la cavidad de vapor, en este caso la obtiene resolviendo la ecuación de transporte para la fracción volumétrica de la fase dispersa (ϕ_d), la cual se integra en el modelo de mezcla. De acuerdo con la guía de usuario de COMSOL (COMSOL Group, 2024), esta ecuación se expresa como:

$$\text{E.E.} \quad \frac{\partial}{\partial t} (\phi_d \rho_d) + \nabla \cdot (\phi_d \rho_d \mathbf{u}_d) = \nabla \cdot (\rho_d \mathbf{D}_{md} \nabla \phi_d) - m_{dc} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\text{E.T.} \quad \nabla \cdot (\phi_d \rho_d \mathbf{u}_d) = \nabla \cdot (\rho_d \mathbf{D}_{md} \nabla \phi_d) - m_{dc} \quad (\text{Ec. 6a})$$

Donde, ϕ_d : Fracción volumétrica de la fase dispersa (vapor), ρ_d : Densidad de la fase dispersa (kg/m^3), \mathbf{u}_d : Vector de velocidad de la fase dispersa (m/s), \mathbf{D}_{md} : Coeficiente de dispersión turbulenta (m^2/s), el cual representa la difusión extra debida a los remolinos turbulentos. En modelos laminares, este valor es igual a cero. m_{dc} : Tasa de transferencia de masa de la fase dispersa a la continua ($kg/(m^3 \cdot s)$).

2.4.2. Modelo de Cavitación: Zwart-Gerber-Belamri (ZGB)

El modelo que se implementó para este proyecto fue ZGB (propuesto en 2004), el cual se fundamenta en la simplificación de la ecuación de Rayleigh-Plesset, que describe la dinámica de una burbuja esférica en un líquido infinito. A diferencia de otros modelos, el ZGB asume que el cambio de masa total es proporcional a la densidad de sitios de nucleación presentes en el fluido, permitiendo una convergencia más rápida en geometrías complejas como el Venturi (Zwart et al., 2004). Los términos fuente de transferencia de masa se definen matemáticamente según el gradiente de presión respecto a la presión de vapor saturado (p_v):

- **Mecanismo de Evaporación ($p \leq p_v$):**

$$R_e = F_{vap} \frac{3\alpha_{nuc}(1 - \alpha_v)\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_l}} \quad (\text{Ec. 7})$$

- **Mecanismo de Condensación ($p > p_v$):**

$$R_c = F_{cond} \frac{3\alpha_v\rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l}} \quad (\text{Ec. 8})$$

Donde, los parámetros empíricos son: R_B : Radio de la burbuja nucleante (1×10^{-6} m), α_{nuc} : Fracción volumétrica de los sitios de nucleación (5×10^{-4}), F_{vap} : Factor de calibración de evaporación (50), F_{cond} : Factor de calibración de condensación (0.01) (ANSYS Inc, 2024)

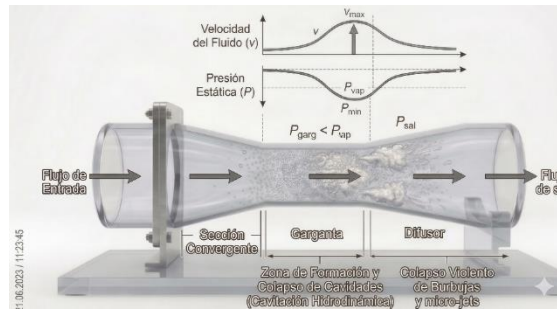
3. Estado del Arte

La cavitación hidrodinámica ha emergido como una alternativa superior a la cavitación acústica en procesos industriales de gran escala, debido principalmente a su mayor eficiencia energética y facilidad de escalabilidad mediante el uso de restricciones físicas como placas de orificio o tubos Venturi (Gevari et al., 2020; Gogate, 2011). El interés científico en este fenómeno radica en las condiciones termofísicas extremas que se generan durante la implosión de las cavidades de vapor, donde se alcanzan puntos calientes con temperaturas de miles de grados Kelvin y presiones de cientos de atmósferas (Zheng et al., 2022). Estas condiciones inducen efectos mecánicos y químicos, como la liberación de radicales libres y ondas de choque, que resultan fundamentales para la intensificación de procesos en el tratamiento de aguas residuales, la desinfección de patógenos y la transformación de biomasa (Rudolf et al., 2025; Zheng et al., 2022).

En el diseño de reactores, el rendimiento depende de una interacción compleja entre parámetros operativos y geométricos. En dispositivos tipo Venturi, la cavitación se induce por la aceleración del flujo en la sección convergente, alcanzando el estado crítico en la garganta donde la presión cae por debajo del umbral de vapor saturado (Liu & Li, 2023). La literatura reciente destaca que la transición entre las secciones convergentes y divergentes define la dinámica de formación y colapso de las burbujas, siendo influenciada significativamente por la temperatura del fluido (Ge et al., 2022). Aunque el aumento de temperatura facilita la formación de vapor, también

puede mitigar la intensidad del colapso debido a efectos termodinámicos de supresión, lo que exige un control preciso para optimizar procesos industriales (Gevari et al., 2020; Rudolf et al., 2025).

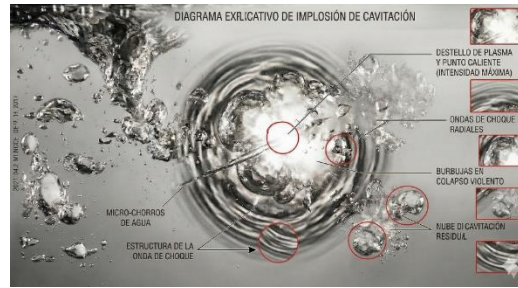
Figura 1. *Cavitación Hidrodinámica en tubos Venturi*



Nota. Imagen generada y editada mediante el modelo de lenguaje e imagen Gemini 3 Flash de Google, 2026.

Para abordar estos desafíos, el modelado numérico ha evolucionado desde soluciones analíticas simples hacia enfoques computacionales avanzados. En las últimas décadas, el Método de los Elementos Finitos (FEM) ha adquirido una relevancia significativa en la investigación académica y aplicaciones industriales, impulsado por el incremento de la capacidad computacional y el desarrollo de algoritmos numéricos más robustos (Chen, 2011). En el contexto de la cavitación, el FEM se ha consolidado como una herramienta clave para el análisis cuantitativo de las interacciones entre el fluido y las estructuras circundantes, permitiendo estudiar con alto detalle los campos de presión y velocidad asociados al fenómeno (Zhi & Wu, 2022). Su capacidad intrínseca para adaptarse a geometrías complejas lo hace especialmente adecuado para simular dispositivos de sección variable, donde las variaciones abruptas generan gradientes críticos que inducen el cambio de fase (Zienkiewicz et al., 2024).

Figura 2. *Imagen ilustrativa de la implosión en la cavitación hidrodinámica*



Nota. Imagen generada y editada mediante el modelo de lenguaje e imagen Gemini 3 Flash de Google, 2026.

La eficiencia de estos dispositivos se ha vinculado directamente con la optimización geométrica, donde el ángulo de contracción y el diámetro de la garganta juegan papeles determinantes. Investigaciones han demostrado que diámetros reducidos incrementan la intensidad cavitatoria, mientras que la inclusión de modificaciones estructurales, como protuberancias anulares, permite extender las áreas de baja presión y mejorar el rendimiento del reactor (Ding et al., 2024; Tang et al., 2019). No obstante, el modelado preciso de estos efectos requiere el acoplamiento de modelos multifísicos que integren la dinámica de fluidos con principios termodinámicos para predecir no solo el inicio del fenómeno, sino también el impacto erosivo de los micro-jets generados durante el colapso (Duan et al., 2024; You et al., 2024).

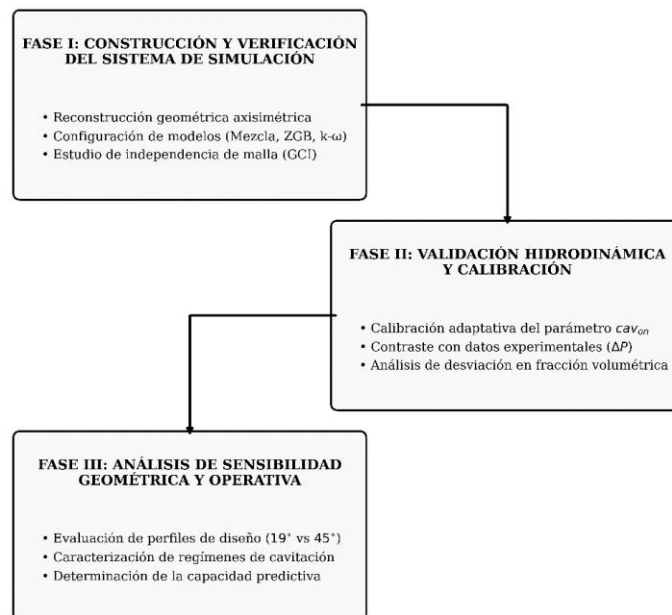
Actualmente, el estudio de la cavitación se apoya en la convergencia entre la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y la validación experimental mediante visualización de alta velocidad (Fang et al., 2023; Navarrete et al., 2015). A pesar de la robustez de los modelos tradicionales, el tratamiento de físicas complejas (como la interacción entre cavidades y vórtices analizada mediante métodos Liutex) sigue representando un desafío técnico (De Vanna et al., 2022; Liang et al., 2022). En este panorama, el uso de entornos de modelado como COMSOL Multiphysics ofrece ventajas competitivas gracias a su capacidad nativa para el acoplamiento multifísico, permitiendo una integración más fluida entre las ecuaciones de Navier-Stokes y los

modelos de transporte de fase dispersa. Sin embargo, persisten limitaciones asociadas a la difusión de la interfaz y la sensibilidad de la malla en esquemas FEM, lo que subraya la necesidad de estrategias de calibración rigurosas.

Partiendo de estos antecedentes, el presente estudio se enfoca en la selección de un caso representativo de un dispositivo tipo Venturi reportado en la literatura técnica para su implementación y validación en COMSOL Multiphysics. A través de este enfoque, se busca aprovechar las capacidades de integración multifísica identificadas en trabajos previos para superar las restricciones de los modelos simplificados, analizando críticamente el comportamiento de la fracción de vapor y los gradientes hidráulicos bajo condiciones de operación que reflejen los desafíos actuales de la ingeniería de procesos.

4. Metodología

Figura 3. Diagrama de flujo de la descripción metodológica.



4.1. Fase I: Construcción y Verificación del Sistema de Simulación

Se seleccionó un dominio bidimensional axisimétrico para representar los dispositivos Venturi, aprovechando la simetría radial para reducir el costo computacional sin comprometer la física del fenómeno.

4.1.1. Geometría del Venturi

La construcción del dominio computacional se basó en las configuraciones geométricas reportadas por *Shi et al. (2019)* para dispositivos generadores de cavitación tipo Venturi. Se seleccionaron dos perfiles específicos, denominados *Design-1* y *Design-2*, cuya diferencia fundamental radica en el ángulo de convergencia (α), fijado en 19° y 45° respectivamente. El procedimiento detallado de construcción paso a paso, la implementación de los nodos geométricos y las capturas de pantalla del entorno COMSOL Multiphysics® se presentan en el **Apéndice A**.

4.1.2. Configuración de la física del flujo modelado

- **Definición de materiales y propiedades multifásicas**

En este nodo se añadieron los materiales predefinidos por COMSOL agua (líquida) y agua (gas), es importante precisar que, dentro del entorno de COMSOL, la fase dispersa se define bajo la denominación de fase gaseosa; no obstante, para efectos de esta investigación, se asignaron las propiedades específicas del vapor de agua saturado.

Las propiedades termofísicas de cada componente se especificaron en sus respectivos subnodos de fase, tomando como base los valores de densidad y viscosidad para el agua a 20°C reportados en el artículo base (*Shi et al., 2019*) y validados por la literatura técnica (*Çengel & Cimbala, 2018*). Estos valores se pueden observar en la **Tabla 2**.

Tabla 1. *Propiedades termofísicas del agua líquida y vapor a 20°C*

Propiedad	Fase Líquida (Agua)	Fase Dispersa (Vapor)
Densidad [kg/m^3]	998.2	0.0173
Viscosidad Dinámica [$\text{Pa}\cdot\text{s}$]	0.001002	0.0000093

Presión de Vapor [Pa]	2338	--
------------------------------	------	----

Adaptado de Çengel & Cimbala, 2018..

- **Configuración del modelo multifásico y de turbulencia**

El comportamiento del sistema bifásico agua–vapor se modeló mediante la interfaz *Mixture Model*, κ - ω . En COMSOL, la selección de esta interfaz multifásica exige integrar automáticamente los efectos de la turbulencia, en este caso mediante el modelo κ - ω de Wilcox revisado.

- **Definición de condiciones de contorno y operación**

Para la resolución de las ecuaciones de transporte, se configuró las fronteras del dominio computacional replicando las condiciones de operación del estudio de (Shi et al., 2019):

- **Entrada (*Inlet*):** Se estableció una condición de velocidad de entrada, asumiendo que el fluido ingresa al dispositivo como fase líquida pura (fracción volumétrica de vapor igual a cero). Así mismo se adaptaron las siguientes condiciones de turbulencia en COMSOL: intensidad turbulenta $I_T = 10\%$ y la relación de viscosidad turbulenta $\mu_t/\mu_l = 10$, valores reportados por Shi et al. (2019), detalle en el **Apéndice B**.
- **Salida (*Outlet*):** Se definió la condición de presión de salida: 101325 [Pa]. Para garantizar la convergencia y la estabilidad del modelo multifásico.
- **Paredes (*Walls*):** Se aplicó la condición de No deslizamiento (No-slip) en todas las fronteras sólidas, obligando al modelo de turbulencia κ - ω a resolver el perfil de velocidades desde la superficie del conducto hasta el núcleo del flujo.
- **Interpretación de la transferencia de masa en COMSOL Multiphysics (m_{dc}):** El término m_{dc} es fundamental para el análisis de la cavitación, ya que cuantifica el intercambio de masa entre el líquido y el vapor. En el contexto del fenómeno de cavitación hidrodinámica, este término se define como la diferencia neta entre las tasas de cambio de fase:

$$m_{dc} = R_c - R_e \quad (\text{Ec. 9})$$

De esta manera, el término de la ecuación original ($-m_{dc}$) se transforma en el término fuente neto de vapor ($R_e - R_c$), donde R_e representa la tasa de evaporación (crecimiento de la cavidad) y R_c la tasa de condensación (colapso de la burbuja). Este término se modifica en el nodo de transferencia de masa acoplado a la física escogida.

4.1.3. Discretización del dominio

Definidas las condiciones físicas, se discretizó el dominio mediante una malla triangular no estructurada, para facilitar la adaptación a las pendientes de las secciones convergente y divergente del dispositivo. Partiendo de una configuración (ya definida por COMSOL Multiphysics) de tamaño *Normal* para todo el dominio, se aplicaron los siguientes refinamientos estratégicos para asegurar la convergencia:

- Refinamiento local en la garganta y zona de convergencia: Se incrementó la densidad de elementos en niveles *Fine* sólo en garganta para la malla 1, *Finer* y *Extra Fine* tanto en garganta como zona de divergencia para malla 2 y 3, respectivamente.
- Capas de frontera (*Boundary Layers*): Se integraron elementos estructurados en las paredes para resolver con precisión los efectos viscosos y el perfil de velocidades en la capa límite.

4.1.4. Estudio de independencia de malla

Para asegurar que la solución numérica sea independiente de la resolución de la red, se realizó un análisis de sensibilidad con los niveles progresivos de refinamiento descritos anteriormente, cuantificando su variación porcentual entre dos soluciones consecutivas calculado mediante la expresión:

$$E_{rel} = \left| \frac{P_n - P_{n-1}}{P_n} \right| \times 100 \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde P representa el parámetro evaluado, que corresponde al ΔP , n corresponde al nivel de refinamiento actual y $n-1$ al nivel inmediatamente anterior. Además, se halló el Índice de Convergencia de Malla (GCI), un método fundamentado en la extrapolación de Richardson y las directrices del NASA Glenn Research Center (NPARC Alliance), que permite determinar el error de discretización asintótico mediante la comparación de redes sucesivamente refinadas (NPARC Alliance & Slater, 2021).

Para el dominio 2D, se calculó la relación de refinamiento efectiva (r) y la banda de incertidumbre numérica (GCI) mediante las expresiones:

$$r = \sqrt{\frac{N_n}{N_{n-1}}} \quad (\text{Ec. 11})$$

$$GCI_{n,n-1} = \frac{F_s \cdot |E_{rel}|}{r^p - 1} \quad (\text{Ec. 12})$$

Donde $F_s = 1.25$ es el factor de seguridad y $p = 2$ el orden de precisión teórico de los esquemas de COMSOL. Un valor de $GCI < 5\%$ confirma que la solución se encuentra en el rango asintótico, garantizando que el error de la red es despreciable frente a los fenómenos físicos de interés.

4.1.5. Métricas de evaluación y calidad de malla

Para complementar la caracterización técnica de la red, se evaluaron métricas de control integradas en COMSOL Multiphysics (detalladas en el **Apéndice C**). El costo computacional y la

densidad de la discretización se determinaron mediante los Grados de Libertad (DoF) y el número total de elementos (*meshelementall*), parámetros base para el análisis de convergencia. La precisión en la captura de gradientes se aseguró mediante el tamaño promedio de elemento (h) y el volumen promedio (*meshvol*), mientras que la integridad numérica y estabilidad del solver se garantizaron monitoreando la distorsión angular media (*qualskewness*) y la regularidad geométrica media de las celdas (*qualvollength*).

4.1.6. Caracterización hidrodinámica

Una vez seleccionada la configuración de malla óptima, se procedió a realizar la caracterización del flujo monofásico para cada velocidad de entrada del barrido paramétrico. Este análisis comprende: Perfiles de Velocidad y Presión.

4.2. Fase II: Validación Hidrodinámica y Calibración de la simulación

4.2.1. Implementación del modelo de cavitación

La transición de fase se modeló mediante la interfaz de transporte de vapor acoplada al modelo de mezcla. Se seleccionó el modelo de Zwart-Gerber-Belamri (ZGB) por su estabilidad en geometrías de Venturi. Un componente crítico de esta implementación fue la introducción del parámetro de control cav_{on} , el cual actúa como un factor de escala global del término fuente de masa m_{dc} . Este parámetro es fundamental para la investigación, ya que funciona como una variable de control de la tasa de transferencia de masa y como factor de relajación numérica para garantizar la convergencia del solver en régimen estacionario. Mientras que los fundamentos físicos del modelo ZGB se encuentran en el marco teórico, el procedimiento técnico para la vinculación de variables y la activación del nodo de transferencia de masa en COMSOL Multiphysics® se detalla en el **Apéndice D**.

4.2.2. Proceso de calibración del modelo

- **Variable objetivo y punto de calibración**

La calibración se realizó sobre tres puntos de operación ($U_{in} = 1.05, 1.20$ y 1.35 m/s) que abarcan desde cavitación incipiente a desarrollada para el *Design-1*. El criterio consistió en reproducir la magnitud de la caída de presión estática (ΔP) y la fracción volumétrica de vapor (ϕ_d) reportadas por *Shi et al. (2019)*. Dado que las variables del número de cavitación (σ) —presión de referencia y velocidad en la garganta— mostraron sensibilidad mínima a los factores del modelo ZGB, se utilizaron los valores del régimen monofásico para su cálculo sistemático mediante una rutina en Python y la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{p_{out} - p_v}{0.5 \cdot \rho_l \cdot U_{thr}^2} \quad (\text{Ec. 13})$$

Donde: p_{out} es la presión promedio calculada sobre *outlet* utilizando *line average* en COMSOL, p_v es la presión de vapor definida 2 338 [Pa], ρ_l es la densidad el agua 998.2 kg/m³ y U_{thr} es la velocidad promedio de la garganta calculada en COMSOL con *surface average* seleccionando el dominio correspondiente a la misma.

Al no disponer de datos tabulares, se empleó digitalización asistida y refinamiento manual de las figuras originales, estimando errores de lectura de $\pm 10\%$ en escala lineal y $\pm 20\%$ en logarítmica. La implementación técnica de los operadores de integración ponderados por el radio para la extracción de estos datos desde COMSOL se detalla en el **Apéndice E**.

- **Exploración de parámetros y configuración final**

Se realizaron barridos paramétricos de F_{vap} , F_{cond} , r_{nuc} y R_b dentro de los rangos físicamente admisibles establecidos por *Escaler et al. (2018)* mediante un análisis de sensibilidad del modelo ZGB en turbinas Francis, quienes determinaron que los rangos válidos son $F_{vap} \in [0.5,$

500], $F_{cond} \in [10^{-4}, 0.1]$, $r_{nuc} \in [5 \times 10^{-5}, 5 \times 10^{-3}]$ y $R_b \in [2 \times 10^{-7}, 2 \times 10^{-5}]$ m. A partir de este análisis se identificó que los parámetros ZGB estándar superan el objetivo de ϕ_d por un factor de 2.7 a 4.0. La no monotonicidad de la respuesta motivó el ajuste de r_{nuc} , utilizando un valor inferior al estándar empleado por ANSYS Fluent (1×10^{-4} m) por ser consistente con el uso de agua parcialmente desgasificada.

Por su parte, el parámetro cav_{on} actúa adicionalmente como factor de relajación numérica del término fuente mdc , necesario para garantizar la convergencia del solver segregado en régimen estacionario, ya que valores cercanos a la unidad producen oscilaciones en la fracción volumétrica para esta geometría y condiciones de operación. La configuración base final adoptada para los tres puntos de calibración es:

Tabla 2. Parámetros del modelo ZGB para la calibración COMSOL basados en *Design-1*.

Parámetro	Valor	Justificación
Fvap	50	ZGB estándar (Zwart et al., 2004)
Fcond	0.01	Dentro del rango mínimo (Escaler et al., 2018)
rnuc	1×10^{-4} [m]	ZGB estándar (Singhal et al., 2002)
Rb	1×10^{-6} [m]	ZGB estándar (Escaler et al., 2018)
cav_on	Ajustado por punto	Factor de relajación numérica

El valor de cav_{on} se determina individualmente para cada punto de calibración ($U_{in} = 1.05, 1.20$ y 1.35 m/s) mediante barrido paramétrico, buscando minimizar el error relativo en ΔP y ϕ_d simultáneamente respecto a los valores objetivo de la **Tabla 2**.

4.3. Fase III: Análisis de Sensibilidad Geométrica y Operativa

Una vez validado el modelo con el *Design-1* ($\alpha = 19^\circ$), se procedió a evaluar el desempeño del sistema bajo una modificación geométrica crítica. Se replicó el protocolo de simulación y calibración para el *Design-2* ($\alpha = 45^\circ$), manteniendo constantes las condiciones de contorno y el modelo de transporte de masa. Este análisis de sensibilidad permitió comparar la respuesta

hidrodinámica entre ambas configuraciones, contrastando específicamente la evolución de la caída de presión y la distribución de la fracción volumétrica de vapor. La comparación entre ambos diseños facilitó la identificación de patrones de cavitación diferenciados y la evaluación de la robustez del parámetro cav_{on} ante cambios en la aceleración local del flujo.

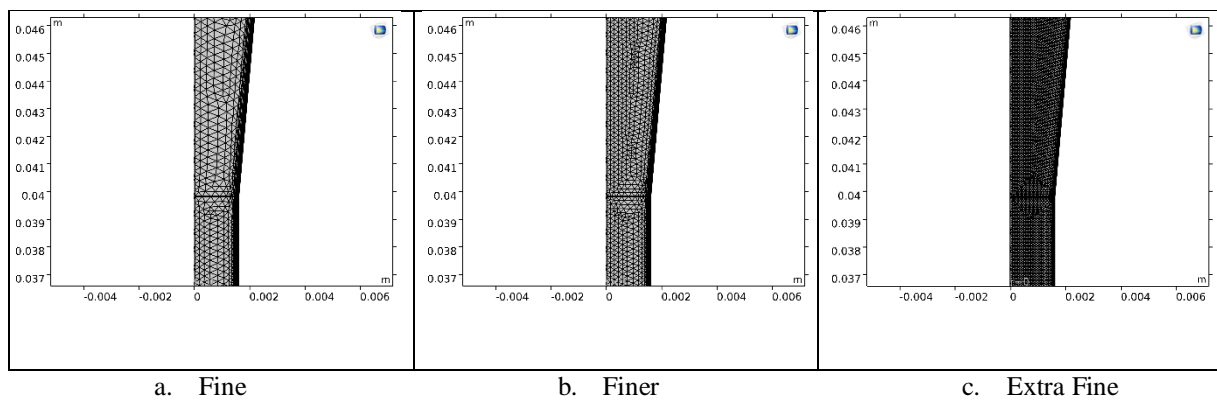
5. Resultados

5.1. Construcción del sistema de simulación

5.1.1. Independencia de malla

Se realizaron los refinamientos en la garganta del Venturi y zona divergente, zonas donde se presentan los mayores gradientes de presión y velocidad. En la **Figura 4**, se observa la evolución de la densidad del mallado para los niveles evaluados, apreciando la concentración de elementos en el estrechamiento y salida de este, para así lograr capturar con mayor precisión el comportamiento del flujo.

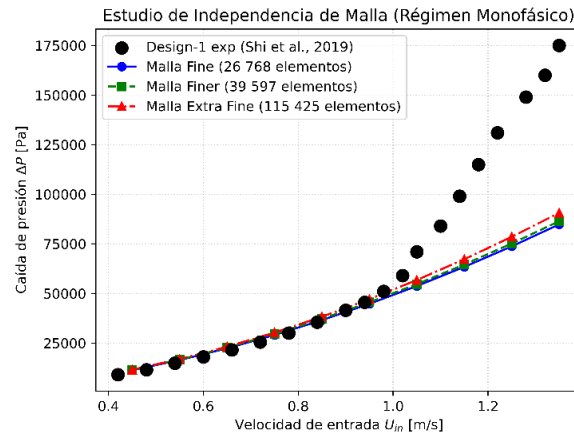
Figura 4. Comparativa del refinamiento de malla en la garganta y zona de divergencia del Venturi



Una vez definidas las configuraciones de malla, se ejecutó un barrido paramétrico para un rango de velocidades de entrada de 0.45 a 1.35 m/s, con un paso de 0.1 m/s. Este procedimiento permitió evaluar la independencia de malla y realizar una comparación preliminar con los datos

experimentales de referencia (los datos numéricos para construir esta comparativa de mallas se detallan en el **Apéndice F**). Es importante destacar que, para velocidades superiores a 1.05 m/s, se observa una desviación significativa respecto a la tendencia experimental. Este comportamiento se atribuye a que, en esta etapa inicial del modelo, no se ha habilitado la transferencia de masa, manteniendo un régimen puramente monofásico. Por lo tanto, el software no contabiliza la caída de presión adicional inducidos por la formación de las burbujas, como se ilustra en la **Figura 5**.

Figura 5. Comparación de la caída de presión experimental vs. Numérica para las 3 mallas en régimen monofásico.



La convergencia asintótica observada entre las mallas *Finer* y *Extra Fine* en la **Figura 5** demuestra que se ha alcanzado la independencia de la red para el régimen monofásico. El análisis arroja un error relativo máximo de 4.63 % y un índice GCI de 3.06 % en la condición más crítica (1.35 m/s); al situarse ambos valores por debajo del umbral del 5 %, se confirma la robustez de la discretización según los criterios para CFD (Liu et al., 2025)(detalle en **Apéndice G**).

No obstante, la divergencia respecto a los datos experimentales de *Shi et al. (2019)* constituye un error de modelado derivado de la omisión de la fase dispersa. De acuerdo con

Brennen (2013), la nucleación de vapor en la garganta del Venturi induce un efecto de bloqueo (*flow choking*) que reduce el área efectiva del flujo líquido, obligando a una aceleración adicional que dispara la caída de presión. Adicionalmente, la ausencia del modelo de transferencia de masa ZGB ignora la disipación energética interfacial y la variación de la densidad de la mezcla (ρ_m), factores determinantes en la magnitud real del ΔP en regímenes cavitantes (Franc & Michel, 2005).

Posteriormente, y en cumplimiento con los criterios de calidad establecidos, se consolidó en la **Tabla 3** los parámetros estadísticos y geométricos de las mallas en estudio.

Tabla 3. *Parámetros de calidad promedio y convergencia para los diferentes niveles de refinamiento de malla.*

Variable de Evaluación	Unidad	Fine	Finer	Extra Fine
Grados de Libertad	-	113 218	163 023	445 704
N° de Elementos	-	26 768	39 597	115 425
Tamaño de Elemento	m	2.99E-4	2.62E-4	2.35E-4
Volumen de Elemento	m ²	3.128E-8	3.112E-8	3.063E-8
Skewness	-	0.878	0.888	0.899
Volume vs. Length	-	0.903	0.914	0.925

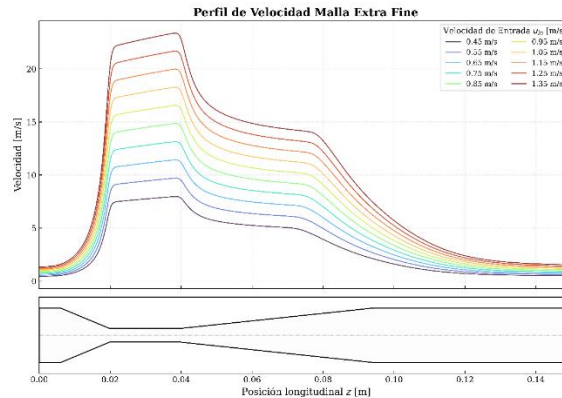
La configuración *Extra Fine* alcanzó 445 704 DoF (4 veces la carga de la malla *Fine*) y 115 425 elementos, proporcionando la densidad necesaria para capturar la cavitación. Aunque el tamaño lineal se mantuvo estable en 2.35E-4 m, la pequeña reducción del área promedio a 3.063E-8 m² permitió una resolución detallada de los gradientes en la garganta del Venturi. Finalmente, la alta calidad geométrica, confirmada por valores de Skewness (0.899) y Volume vs. Length (0.925) cercanos a la unidad, garantiza una estructura numéricamente robusta y estable para el solver, por lo que la malla *Extra Fine* es la escogida para continuar con el estudio. Cabe destacar que, para el *Design-2* ($\alpha = 45^\circ$), la configuración *Extra Fine* mantuvo parámetros de calidad excepcionales, con un volumen de elemento de 2.311×10^{-8} m² y métricas de Skewness (0.902) y Volume vs.

Complementando el análisis de presión, la **Figura 7** muestra la aceleración del fluido en la sección contraída del *Design-1*, lo cual justifica la caída de presión registrada previamente. En contraste, el *Design-2* (**Figura 24**)(ver **Apéndice H**) presenta un pico de velocidad en la garganta mucho más pronunciado, alcanzando los 21 m/s para una $U_{in} = 1.15$ m/s como consecuencia directa del mayor ángulo de contracción ($\alpha = 45^\circ$). Mientras que en el *Design-1* la sección divergente mitiga el desprendimiento de la capa límite mediante una deceleración progresiva, en el *Design-2* esta recuperación de velocidad no se traduce en una restauración de presión equivalente. La mayor resistencia hidráulica impuesta por la entrada de 45° genera una pérdida de carga tan severa que los valores de ΔP calculados por el software superan los reportados en el documento base para $U_{in} = 0.85$ y 0.95 m/s.

Según *Schlichting & Gersten (2016)*, este fenómeno ocurre cuando el flujo enfrenta un gradiente de presión adverso, provocando que las partículas cercanas a la pared pierdan su energía cinética hasta detenerse; esto da lugar a la formación de vórtices y a pérdidas considerables de energía mecánica que comprometerían la eficiencia del sistema.

De acuerdo con *Li et al. (2019)*, aunque las simulaciones monofásicas no pueden predecir con exactitud absoluta las presiones en la garganta una vez que se alcanza el régimen de cavitación —donde físicamente el valor se estabilizaría en la presión de vapor debido a la formación de burbujas—, son herramientas fundamentales para identificar parámetros críticos y tendencias globales. Por lo tanto, el incremento cinético y los perfiles de presión negativos resultantes actúan como indicadores matemáticos para delimitar las zonas donde se activará la transferencia de masa, permitiendo representar la física del fenómeno.

Figura 7. Perfil de velocidad para la malla escogida en régimen monofásico ($\alpha = 19^\circ$).



5.2. Validación de la simulación

5.2.1. Validación Hidrodinámica del Modelo ($\alpha = 19^\circ$)

Tras establecer la independencia de malla, se procedió a la validación del modelo de mezcla acoplado al término fuente de Zwart-Gerber-Belamri (ZGB). El objetivo de esta fase fue ajustar el parámetro de control de transferencia de masa (cav_{on}) para reproducir el comportamiento hidrodinámico y la producción de vapor observados experimentalmente por *Shi et al. (2019)*.

- **Determinación de puntos de operación ($\alpha = 19^\circ$):**

Como paso previo a la calibración, se calcularon los números de cavitación (σ) correspondientes a las velocidades de entrada escogidas para el análisis en régimen multifásico. Siguiendo la metodología descrita (**Ec. 13**), se utilizaron los valores de presión en la salida (*outlet*) y velocidad en la garganta obtenidos en régimen monofásico, dada su baja sensibilidad a los parámetros de cavitación. Así mismo, con los valores extraídos de *Shi et al. (2019)* se realizó una interpolación logarítmica para estimar el (Φ_d) objetivo (**Apéndice I**). Los resultados de este cálculo junto con los previamente extraídos se presentan en la **Tabla 4**.

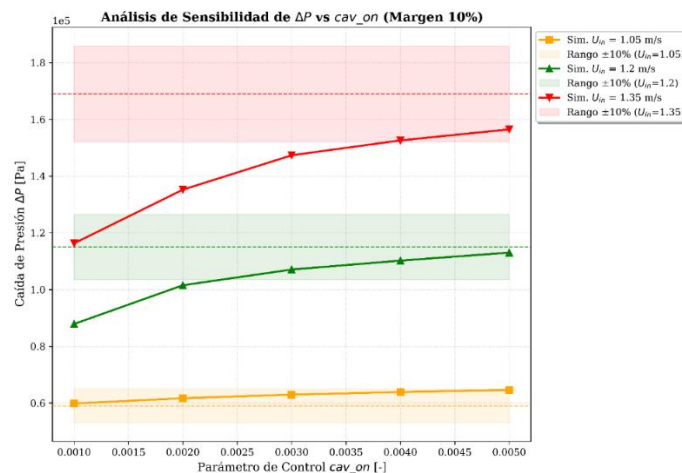
Tabla 4. Valores objetivo de fracción volumétrica de vapor y caída de presión extraídos mediante digitalización de *Shi et al. (2019)* en *Design-1* ($\alpha = 19^\circ$).

U_{in} [m/s]	σ aprox.	Φ_d objetivo	Φ_d rango aceptable ($\pm 20\%$)	ΔP objetivo	ΔP rango aceptable ($\pm 10\%$)
1.05	0.702	1.12×10^{-3}	$[8.96 \times 10^{-4} - 1.34 \times 10^{-3}]$	~59 000	[53 100 – 64 900]
1.20	0.518	2.94×10^{-3}	$[2.35 \times 10^{-3} - 3.53 \times 10^{-3}]$	~115 000	[103 500 – 126 500]
1.35	0.381	6.95×10^{-3}	$[5.56 \times 10^{-3} - 8.34 \times 10^{-3}]$	~169 000	[152 100 – 185 900]

- **Respuesta del modelo ante el factor de control (cav_{on}) ($\alpha = 19^\circ$)**

El proceso de calibración reveló que el parámetro cav_{on} no solo actúa como un factor de escala para la tasa de transferencia de masa (m_{dc}), sino también como un elemento crítico para la estabilidad numérica del solver. En la **Figura 8**, se observa la evolución de la caída de presión (ΔP) en función del parámetro para los tres puntos de control (1.05, 1.20 y 1.35 m/s).

Figura 8. Sensibilidad de la caída de presión estática (ΔP) frente al parámetro de control cav_{on} a distintos regímenes de velocidad.

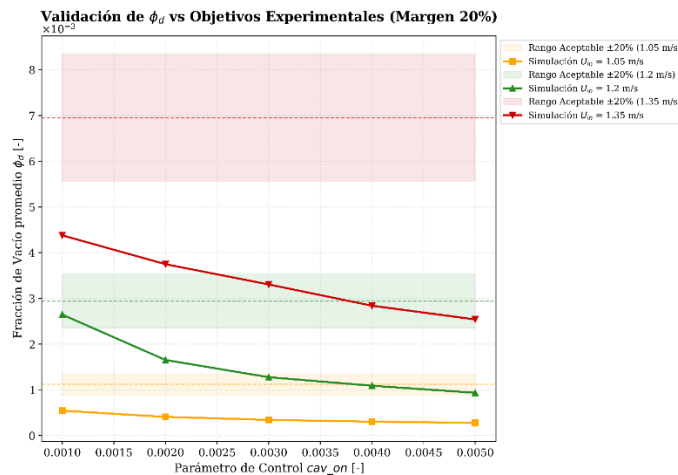


Al observar detenidamente la **Figura 8**, se hace evidente que un valor de $cav_{on} \leq 0.005$ es suficiente para que la simulación a 1.05 m/s alcance el valor experimental objetivo. Sin embargo, para los regímenes de 1.20 m/s y 1.35 m/s, las curvas de presión (aunque crecientes) permanecen por debajo del margen de error aceptable, subestimando la caída de presión real. Esta discrepancia indica que, a medida que aumenta el número de Reynolds y la intensidad de la cavitación, el modelo

requiere una activación más “potente” de la transferencia de masa para representar la resistencia al flujo generada por el vapor.

Por su parte, en el análisis de sensibilidad de la fracción volumétrica de vapor (Φ_d) presentado en la **Figura 9**, se observa que los valores simulados permanecen sistemáticamente por debajo de los objetivos experimentales. Esta tendencia responde a la naturaleza del Método de Elementos Finitos (FEM) utilizado por COMSOL que, para asegurar la convergencia en zonas de gradientes de fase extremadamente abruptos, el esquema numérico aplica funciones de suavizado que generan difusión numérica, que terminan por difuminar la interfaz líquido-vapor, resultando en una fracción de vacío significativamente menor a la real (Wendt et al., 2009).

Figura 9. Sensibilidad de la fracción volumétrica de vapor (Φ_d) frente al parámetro de control cav_{on} a distintos regímenes de velocidad.



Físicamente, este estancamiento de Φ_d se debe al amortiguamiento por cambio de densidad. En cuanto se genera vapor, la presión local se estabiliza cerca de P_v , reduciendo el diferencial ($P_v - P$) que actúa como el gradiente de la evaporación. Por consiguiente, la producción de burbujas se

limita para preservar la estabilidad del sistema, haciendo que incrementos lineales en el coeficiente cinético no se traduzcan en aumentos proporcionales de fase gaseosa (Delale et al., 2001).

Finalmente, la discrepancia se acentúa porque el presente estudio emplea el modelo de transporte ZGB, mientras que el artículo de referencia (Shi et al., 2019) utiliza el modelo Schnerr-Sauer. Dado que ambos modelos difieren en su formulación matemática de la densidad de núcleos y la tasa de crecimiento, el uso de un parámetro cav_{on} unificado resulta insuficiente.

Por esta razón, se optó por una estrategia de calibración adaptativa:

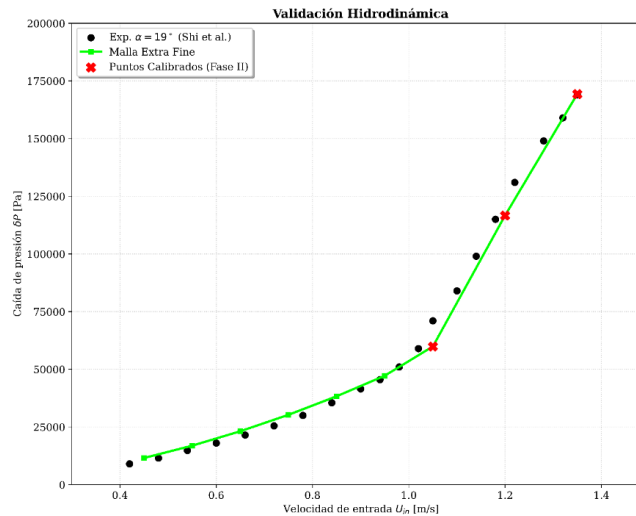
- Para velocidades bajas ($\leq 1.05 \text{ m/s}$): El parámetro óptimo se sitúa en el orden de 10^{-3} , donde el fenómeno es incipiente.
- Para velocidades altas ($> 1.05 \text{ m/s}$): Se expandió el barrido de cav_{on} hacia magnitudes de 10^{-2} (**Apéndice J**)

Este ajuste, cuyos valores específicos de cav_{on} para cada régimen se detallan en la **Tabla 5**, permitió minimizar el error relativo del ΔP respecto al artículo de Shi et al. (2019), logrando que los puntos de 1.20 m/s y 1.35 m/s entraran finalmente en el núcleo del rango experimental, como se puede observar en la **Figura 10**. Esta transición de órdenes de magnitud es fundamental para construir la gráfica ajustada, demostrando que la precisión del modelo multifásico depende de un ajuste fino del parámetro de control en función de la velocidad de entrada.

Tabla 5. Parámetros de control cav_{on} optimizados mediante calibración adaptativa para cada régimen de velocidad.

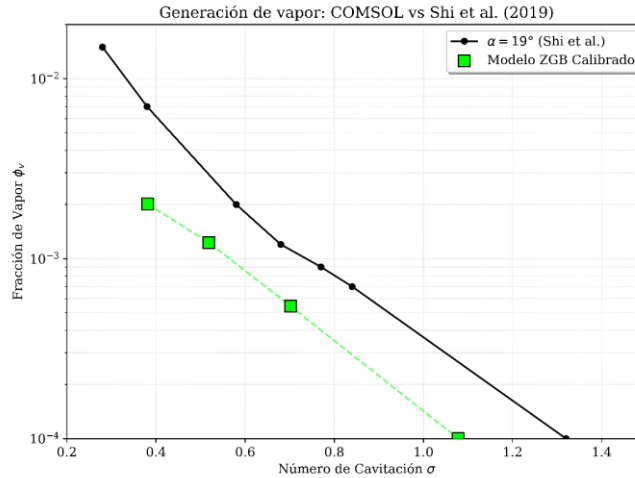
U_{in} [m/s]	σ	cav_{on}	ΔP	%Error ΔP objetivo	Φ_d	%Error Φ_d objetivo
1.05	0.702	0.001	59 867	1.47	0.00054523	51.32
1.20	0.518	0.02	116 647	1.43	0.001228	58.23
1.35	0.3811	0.014	169 276	0.16	0.0020147	71.01

Figura 10. Validación de la caída de presión (ΔP) mediante el modelo calibrado punto a punto frente a los datos experimentales de Shi et al. (2019).



De igual manera, la **Figura 11** presenta la validación final de la fracción volumétrica de vapor (ϕ_d) frente al artículo de referencia. Los resultados muestran que el modelo ZGB calibrado captura la tendencia fenomenológica de la cavitación, replicando la pendiente de crecimiento de la fase gaseosa a medida que disminuye el número de cavitación (σ). Aunque se observa una desviación significativa en los valores absolutos, la concordancia en la trayectoria de la curva valida la sensibilidad del modelo ante cambios en las condiciones operativas y su capacidad para identificar el inicio del régimen de cavitación desarrollada.

Figura 11. Validación de la fracción de vacío (ϕ_d) frente a Shi et al. (2019) tras la calibración adaptativa.



Esta discrepancia persistente en la fracción volumétrica de vapor (ϕ_d) confirma que las limitaciones intrínsecas del esquema numérico de elementos finitos y la difusión de la interfaz (discutidas en la sección anterior) imponen un límite a la magnitud de la fase dispersa que el modelo ZGB no logra superar por completo en este software. No obstante, esta calibración punto a punto garantiza el mejor ajuste posible dentro de las restricciones técnicas de la simulación, permitiendo una representación cualitativamente coherente de la evolución del vapor en el Venturi, a pesar de la subestimación cuantitativa heredada del método de discretización.

5.3. Análisis de Sensibilidad

5.3.1. Validación Hidrodinámica del Modelo ($\alpha = 45^\circ$)

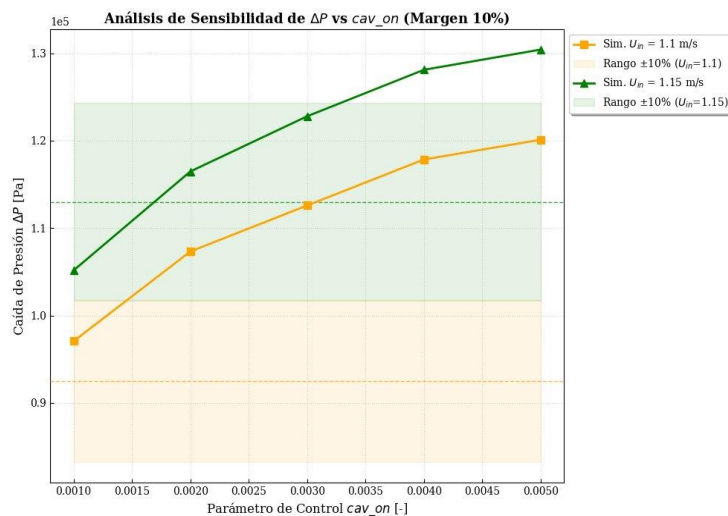
El comportamiento del parámetro cav_{on} descrito en la sección 5.2.1 se valida también en el *Design-2*. Como se observa en la **Figura 12**, ambas curvas de ΔP vs cav_{on} presentan un comportamiento creciente de tipo logarítmico, donde la calibración para 1.1 m/s requiere un rango de cav_{on} menor a 0.001 para situarse en el margen de aceptación definido en la **Tabla 6**. Por su parte, para 1.15 m/s, el ajuste efectivo se localiza entre 0.0015 y 0.0020, demostrando una respuesta monótona y consistente. Esta sensibilidad del modelo ante incrementos mínimos del factor de

control confirma que, en la geometría de 45° , la transición hacia el régimen de cavitación desarrollada ocurre bajo valores de activación significativamente más bajos que en el primer diseño.

Tabla 6. Valores objetivo de fracción volumétrica de vapor y caída de presión extraídos mediante digitalización de Shi et al. (2019) en Design-2 ($\alpha = 45^\circ$).

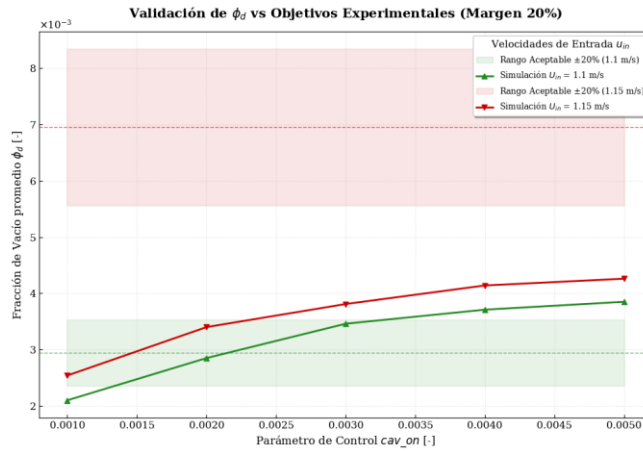
U_{in} [m/s]	σ aprox.	Φ_d objetivo	Φ_d rango aceptable ($\pm 20\%$)	ΔP objetivo [Pa]	ΔP rango aceptable ($\pm 10\%$)
1.10	0.6427	3.14×10^{-3}	$[2.51 \times 10^{-3} - 3.77 \times 10^{-3}]$	~92 500	[83 250 – 101 750]
1.15	0.5880	2.31×10^{-3}	$[1.85 \times 10^{-3} - 2.77 \times 10^{-3}]$	~113 000	[101 700 – 124 300]

Figura 12. Sensibilidad de la caída de presión estática (ΔP) frente al parámetro de control cav_{on} a distintos regímenes de velocidad ($\alpha = 45^\circ$).



La **Figura 13** confirma que la subestimación sistemática de Φ_d reportada para el *Design-1* se mantiene en el *Design-2*, acentuada por los gradientes de presión y fase más abruptos que genera $\alpha = 45^\circ$. Esta desviación se fundamenta en la difusión numérica del FEM, el amortiguamiento por cambio de densidad y las discrepancias intrínsecas entre los modelos ZGB y Schnerr-Sauer.

Figura 13. Sensibilidad de la fracción volumétrica de vapor (Φ_d) frente al parámetro de control cav_{on} a distintos regímenes de velocidad ($\alpha = 45^\circ$).



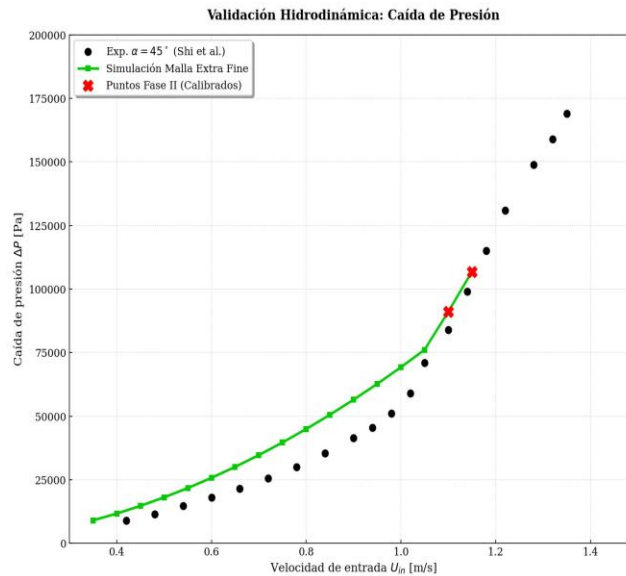
- **Configuración final y validación ($\alpha = 45^\circ$)**

En la **Figura 14** y la **Tabla 7** se presenta la validación de la caída de presión (ΔP) mediante el modelo calibrado frente a los datos experimentales para $\alpha = 45^\circ$. Los valores de cav_{on} optimizados permitieron alcanzar errores relativos de apenas 1.32% para $U_{in} = 1.10$ m/s y 1.8% para $U_{in} = 1.15$ m/s, situándose satisfactoriamente dentro del margen de aceptación del $\pm 10\%$. Se observa que los puntos calibrados se ubican sobre la curva monofásica en la región de transición hacia la cavitación desarrollada; no obstante, para velocidades no calibradas, la curva monofásica se separa progresivamente de los datos experimentales, evidenciando la resistencia adicional al flujo que el modelo monofásico no logra capturar en regímenes de cavitación avanzada.

Tabla 7. Parámetros de control cav_{on} optimizados mediante calibración para cada régimen de velocidad ($\alpha = 45^\circ$).

U_{in} [m/s]	σ	cav_{on}	ΔP	%Error ΔP objetivo	Φ_d	%Error Φ_d objetivo
1.10	0.6427	0.0004	91 283	1.32	2.33×10^{-3}	25.68
1.15	0.5880	0.0015	110 970	1.8	2.31×10^{-3}	0.19

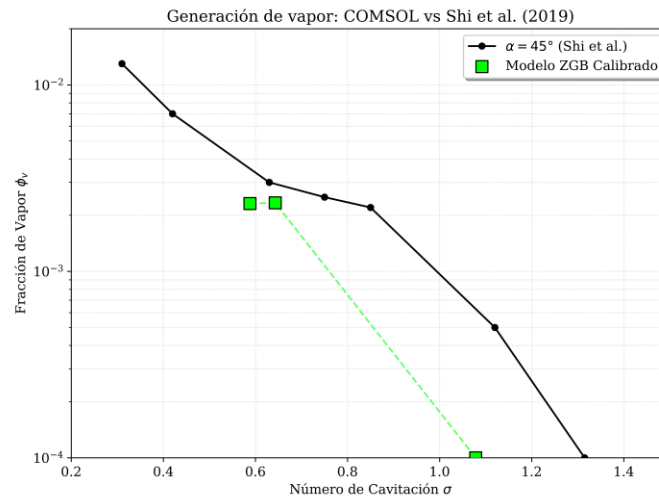
Figura 14. Validación de la caída de presión (ΔP) mediante el modelo calibrado punto a punto frente a los datos experimentales de Shi et al. (2019) ($\alpha = 45^\circ$).



La **Figura 15** presenta la validación de ϕ_d en escala logarítmica, donde los resultados simulados siguen cualitativamente la tendencia decreciente de la curva experimental respecto al número de cavitación (σ). No obstante, se observa una marcada subestimación cuantitativa para $U_{in} = 1.10$ m/s ($\sigma = 0.6427$), donde el error relativo alcanza el 25.68%, mientras que para $U_{in} = 1.15$ m/s ($\sigma = 0.5880$), este se reduce significativamente al 0.19%, siendo el único punto dentro del margen de aceptación del $\pm 20\%$. Al comparar este comportamiento con el *Design-1* (19°), se evidencia que la agresividad geométrica del *Design-2* (45°) acentúa las limitaciones del esquema numérico; mientras que en el primer *Design-1* los errores oscilaron entre 51% y 71%, en el segundo la dispersión es más extrema debido a los gradientes de presión y fase más abruptos que intensifican la difusión de la interfaz líquido-vapor propia del método de elementos finitos. Pese a esta desviación inicial, el *Design-2* logra una mayor precisión cuantitativa en el régimen de cavitación

desarrollada, confirmando que el modelo captura con mayor fidelidad la física del fenómeno una vez se establece la transferencia de masa en configuraciones de alta restricción hidráulica.

Figura 15. Validación de la fracción de vacío (Φ_d) frente a Shi et al. (2019) tras la calibración —
Design-2 ($\alpha = 45^\circ$).



Respondiendo la pregunta de investigación, COMSOL Multiphysics® 6.4 constituye una plataforma computacional válida para modelar la influencia de la geometría del tubo Venturi en la generación de cavitación hidrodinámica, aunque con una precisión diferenciada según la variable de análisis. La convergencia numérica fue garantizada mediante el estudio de independencia de malla, y la correlación con los datos experimentales resultó satisfactoria para la caída de presión en ambas geometrías, validando la capacidad del entorno para capturar el efecto del ángulo de contracción sobre el comportamiento del flujo. Sin embargo, la reproducción cuantitativa de la fracción volumétrica de vapor encontró limitaciones inherentes al esquema de elementos finitos, cuya difusión numérica y las discrepancias entre los modelos de transferencia de masa imponen restricciones a la precisión alcanzable. Por tanto, el software representa una herramienta confiable para la evaluación comparativa del efecto geométrico y la identificación de regímenes de

cavitación, siempre que sus resultados sean interpretados como una aproximación cualitativamente coherente del fenómeno.

6. Conclusiones

Se replicaron las geometrías de referencia mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), logrando la caracterización de los gradientes de presión y perfiles de velocidad en las regiones críticas del flujo. El análisis de independencia de malla demostró una convergencia asintótica estable, con errores relativos inferiores al 5%, lo cual valida la integridad del dominio computacional bajo estándares. Estos resultados garantizan la robustez del modelo numérico como herramienta para el análisis técnico y la toma de decisiones en el diseño de los dispositivos.

El proceso de *fitting* demostró la capacidad del solver para replicar los datos base mediante una estrategia de calibración adaptativa del parámetro \mathbf{cav}_{on} , con un rango operativo estable situado entre 1×10^{-4} y 2×10^{-2} para las condiciones valuadas donde presentó un comportamiento monótonico en ambos escenarios evaluados. Para el *Design-1*, ($U_{in} = 1.05 \text{ m/s}$, $\sigma = 0.702$) el valor óptimo fue $\mathbf{cav}_{on} = 0.001$, mientras que para cavitación desarrollada ($U_{in} = 1.20$ y 1.35 m/s , $\sigma = 0.518$ y 0.381) los valores ascendieron a 0.02 y 0.014 respectivamente, evidenciando que a mayor intensidad de cavitación el modelo requiere una activación más enérgica del término fuente *mdc* para representar la resistencia hidráulica generada por el vapor. Para el *Design-2*, se obtuvo una respuesta más estable con $\mathbf{cav}_{on} = 0.0004$ para $U_{in} = 1.10 \text{ m/s}$ ($\sigma = 0.6427$) y $\mathbf{cav}_{on} = 0.0015$ para $U_{in} = 1.15 \text{ m/s}$ ($\sigma = 0.5880$). Estos valores, situados un orden de magnitud por debajo de los requeridos para el *Design-1*, demuestran que la geometría de 45° incrementa la sensibilidad del modelo ante la formación de fase vapor. Esta consistencia en ambas configuraciones confirma que el modelo ZGB calibrado representa correctamente el aumento de la resistencia hidráulica y la caída de presión en función del régimen de cavitación desarrollado.

El análisis de sensibilidad determinó que la estabilidad del solver segregado está gobernada críticamente por el factor de relajación numérica cav_{on} , donde valores cercanos a la unidad provocan oscilaciones no convergentes. Asimismo, se concluyó que la precisión de las variables de respuesta (ϕ_a y ΔP) es altamente sensible al post-procesamiento; el uso de operadores de integración ponderados por el componente radial resultó indispensable en el dominio axisimétrico para evitar promedios erróneos que comprometerían la validez de la comparación frente a los datos experimentales.

7. Recomendaciones

Para investigaciones futuras orientadas a la predicción cuantitativa de la fracción volumétrica de vapor, se recomienda explorar el uso de esquemas de discretización basados en el método de Volúmenes Finitos (VFM). Esta aproximación, implementada en los estándares actuales de la industria, permitiría mitigar la difusión numérica observada en el presente estudio y capturar con mayor nitidez los gradientes en la interfase líquido-vapor, superando las restricciones intrínsecas encontradas en los esquemas de Elementos Finitos para flujos multifásicos con altas tasas de transferencia de masa.

No obstante, se aconseja mantener el uso de COMSOL de manera estratégica en fases orientadas a la optimización geométrica del dispositivo. Su flexibilidad para la parametrización y la rapidez en la configuración del modelo lo convierten en la herramienta ideal cuando la variable de interés primordial es la caída de presión, permitiendo iterar con agilidad sobre diferentes perfiles de *Design-1* antes de proceder a validaciones de mayor carga computacional.

Es fundamental establecer un protocolo de estabilidad numérica que incluya, de forma obligatoria, un barrido sistemático del parámetro de relajación antes de iniciar cualquier proceso de validación física. Este paso preventivo asegura que el investigador trabaje siempre dentro de un

rango de convergencia estable, eliminando la incertidumbre asociada a las oscilaciones numéricas y permitiendo que los ajustes posteriores se enfoquen exclusivamente en la precisión de los modelos de transferencia de masa.

Asimismo, se debe estandarizar el uso de operadores de integración que incorporen la componente radial en todas las rutinas de post-procesamiento para variables promediadas. Esta práctica garantiza que los indicadores de desempeño calculados reflejen fielmente el comportamiento del flujo en el volumen tridimensional representado, evitando interpretaciones sesgadas que podrían derivar de un análisis simplista de las superficies de corte en el plano 2D.

Por último, para futuras etapas de investigación, se sugiere priorizar la estandarización de las variables de calibración mediante el análisis de diferentes perfiles geométricos. El objetivo debe ser reducir la dependencia de ajustes punto a punto, buscando una correlación generalizada entre la tasa de transferencia de masa y las dimensiones del sistema.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial a COMSOL Multiphysics® por otorgar el acceso a la licencia académica del software. Y al proyecto Interno VIE 4495 por el apoyo económico.

Referencias Bibliográficas

- ANSYS Inc. (2024). *Fluent Theory Guide*.
https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=///Views/Secured/corp/v242/en/flu_th/flu_th.html
- Biswas, G., & Mukherjee, S. (2014). *Computational fluid dynamics* (1st ed.). Alpha Science International Ltd.
- Brennen, C. E. (2013). Cavitation and Bubble Dynamics. En *Cavitation and Bubble Dynamics* (Vol. 44). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107338760>
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). *Mecánica de fluidos* (1a ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Chaudhuri, J. H., & Chatterjee, D. (2024). Modelling of chemical kinetics in the presence of hydrodynamic cavitation for wastewater treatment applications. *Chemical Engineering Science*, 295, 120167. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2024.120167>
- Chen, Z. (2011). The finite element method: Its fundamentals and applications in engineering. *The Finite Element Method: Its Fundamentals and Applications in Engineering*, 1–326. <https://doi.org/10.1142/8155>
- COMSOL Group. (2024). *COMSOL Documentation*.
<https://doc.comsol.com/6.4/docserver/#!/com.comsol.help.comsol/helpdesk/helpdesk.html>
- De Vanna, F., Benato, A., Scramoncin, A., & Stoppato, A. (2022). CFD modelling of a Venturi tube for wastewater treatment applications. *Proceedings of ECOS 2022 35th International Conference on Efficiency Cost Optimization Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, 1055–1063.

- Delale, C. F., Schnerr, G. H., & Sauer, J. (2001). Quasi-one-dimensional steady-state cavitating nozzle flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 427, 167–204. <https://www.proquest.com/scholarly-journals/quasi-one-dimensional-steady-state-cavitating/docview/210899273/se-2?accountid=29068>
- Ding, W., Hong, F., Ying, D., Huang, Y., Nawaz Khan, S., & Jia, J. (2024). A comprehensive study on the effects of annular protrusion for cavitation intensification in Venturi tubes. *Chemical Engineering Journal*, 498. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.155306>
- Duan, Y., Dong, B., He, K., Chen, C., Xu, Q., Xue, J., Liu, S., & Li, M. (2024). Numerical simulation of cavitation flow field in Venturi tube. *Proceedings of SPIE the International Society for Optical Engineering*, 13163. <https://doi.org/10.1117/12.3030624>
- Escaler, X., Roig, R., & HIDALGO DIAZ, V. (2018). *Sensitivity Analysis of Zwart-Gerber-Belamri Model Parameters on the Numerical Simulation of Francis Runner Cavitation*. https://doi.org/10.1115/1.861851_ch173
- Fang, X., Chen, L., Zhang, B., Xue, R., Lai, T., Chen, S., & Hou, Y. (2023). Visualization of R134a cavitation flow in a rectangle Venturi tube and determination of thermal effects with cavity length and thickness. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2023.111014>
- Franc, J.-P., & Michel, J.-M. (2005). *Fundamentals of Cavitation. Fluid Mechanics and Its Applications*, 76. <https://doi.org/10.1007/1-4020-2233-6>
- Ge, M., Sun, C., Zhang, G., Coutier-Delgosha, O., & Fan, D. (2022). Combined suppression effects on hydrodynamic cavitation performance in Venturi-type reactor for process intensification. *Ultrasonics Sonochemistry*, 86. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2022.106035>

- Gevari, M. T., Abbasiasl, T., Niazi, S., Ghorbani, M., & Koşar, A. (2020). Direct and indirect thermal applications of hydrodynamic and acoustic cavitation: A review. *Applied Thermal Engineering*, 171. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115065>
- Gogate, P. R. (2011). Hydrodynamic Cavitation for Food and Water Processing. *Food and Bioprocess Technology*, 4(6), 996–1011. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0418-1>
- Gogate, P. R., & Pandit, A. B. (2005). A review and assessment of hydrodynamic cavitation as a technology for the future. *Ultrasonics Sonochemistry*, 12(1–2), 21–27. <https://doi.org/10.1016/J.ULTSONCH.2004.03.007>
- Ishii, M., & Hibiki, T. (2011). Thermo-fluid dynamics of two-phase flow (Second edition). *Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow (Second Edition)*, 1–518. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7985-8>
- Ji, B., Long, Y., Long, X. ping, Qian, Z. dong, & Zhou, J. jian. (2017). Large eddy simulation of turbulent attached cavitating flow with special emphasis on large scale structures of the hydrofoil wake and turbulence-cavitation interactions. *Journal of Hydrodynamics, Ser. B*, 29(1), 27–39. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058\(16\)60715-1](https://doi.org/10.1016/S1001-6058(16)60715-1)
- Li, M., Bussonnière, A., Bronson, M., Xu, Z., & Liu, Q. (2019). Study of Venturi tube geometry on the hydrodynamic cavitation for the generation of microbubbles. *Minerals Engineering*, 132, 268–274. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.11.001>
- Liang, Y., Zhang, Z., Cheng, H., & Long, X. (2022). Numerical investigation on the interaction between cavitation and vortex in a Venturi tube based on Liutex method. *Journal of Physics Conference Series*, 2217(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2217/1/012012>

- Liu, Y., & Li, B. (2023). Numerical Investigation of the Cavitation Characteristics in Venturi Tubes: The Role of Converging and Diverging Sections. *Applied Sciences Switzerland*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/app13137476>
- Liu, Y., Nie, H., He, Y., Xu, Y., Sun, J., Chen, N., Huang, S., Chen, H., & Li, D. (2025). Structural Optimization of Numerical Simulation for Spherical Grid-Structured Microporous Aeration Reactor. *Water* 2025, Vol. 17, 17(15). <https://doi.org/10.3390/w17152302>
- Navarrete, M., Naude, J., Mendez, F., & Godínez, F. A. (2015). Dynamics and acoustics of a cavitating Venturi flow using a homogeneous air-propylene glycol mixture. *Journal of Physics Conference Series*, 656(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/656/1/012103>
- NPARC Alliance, & Slater, J. W. (2021, febrero 10). *Examining Spatial (Grid) Convergence*. <https://www.grc.nasa.gov/www/wind/valid/tutorial/spatconv.html>
- Rudolf, P., Pochylý, F., Sřahel, P., Maršálek, B., Balko, M., Čech, J., Hudec, M., Prokeš, L., & Maršálková, E. (2025). Hydrodynamic cavitation and cold plasma: Innovative approaches for water treatment and disinfection. *Iop Conference Series Earth and Environmental Science*, 1483(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1483/1/012008>
- Sarvothaman, V. P., Simpson, A. T., & Ranade, V. V. (2019). Modelling of vortex based hydrodynamic cavitation reactors. *Chemical Engineering Journal*, 377(4), 119639. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.08.025>
- Schlichting, H., & Gersten, K. (2016). Boundary-Layer Theory. *Boundary-Layer Theory*, 1–799. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-52919-5>
- Sech, E. (2022). *Study of hydrodynamic cavitation in static appliances for industrial application* [Università degli studi di Padova]. <https://thesis.unipd.it/handle/20.500.12608/50952>

- Shi, H., Li, M., Nikrityuk, P., & Liu, Q. (2019). Experimental and numerical study of cavitation flows in venturi tubes: From CFD to an empirical model. *Chemical Engineering Science*, *207*, 672–687. <https://doi.org/10.1016/J.CES.2019.07.004>
- Singhal, A. K., Athavale, M. M., Li, H., & Jiang, Y. (2002). Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model. *Journal of Fluids Engineering*, *124*(3), 617–624. <https://doi.org/10.1115/1.1486223>
- Tang, P., Juárez, J. M., & Li, H. (2019). Investigation on the effect of structural parameters on cavitation characteristics for the venturi tube using the CFD method. *Water Switzerland*, *11*(10). <https://doi.org/10.3390/w11102194>
- Van Hoecke, L., Boeye, D., Gonzalez-Quiroga, A., Patience, G. S., & Perreault, P. (2023). Experimental methods in chemical engineering: Computational fluid dynamics/finite volume method—CFD/FVM. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, *101*(2), 545–561. <https://doi.org/10.1002/cjce.24571>
- Wang, B., Su, H., & Zhang, B. (2021). Hydrodynamic cavitation as a promising route for wastewater treatment – A review. *Chemical Engineering Journal*, *412*, 128685. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2021.128685>
- Wendt, J. F., Anderson, J. D., Degroote, J., Degrez, G., Dick, E., Grundmann, R., & Vierendeels, J. (2009). Computational fluid dynamics: An introduction. *Computational Fluid Dynamics*, 1–332. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-85056-4>
- You, W., Liu, T., Manickam, S., Wang, J., Wang, W., & Sun, X. (2024). Cavitation intensity prediction and optimization for a Venturi cavitation reactor using deep learning. *Physics of Fluids*, *36*(11). <https://doi.org/10.1063/5.0235109>

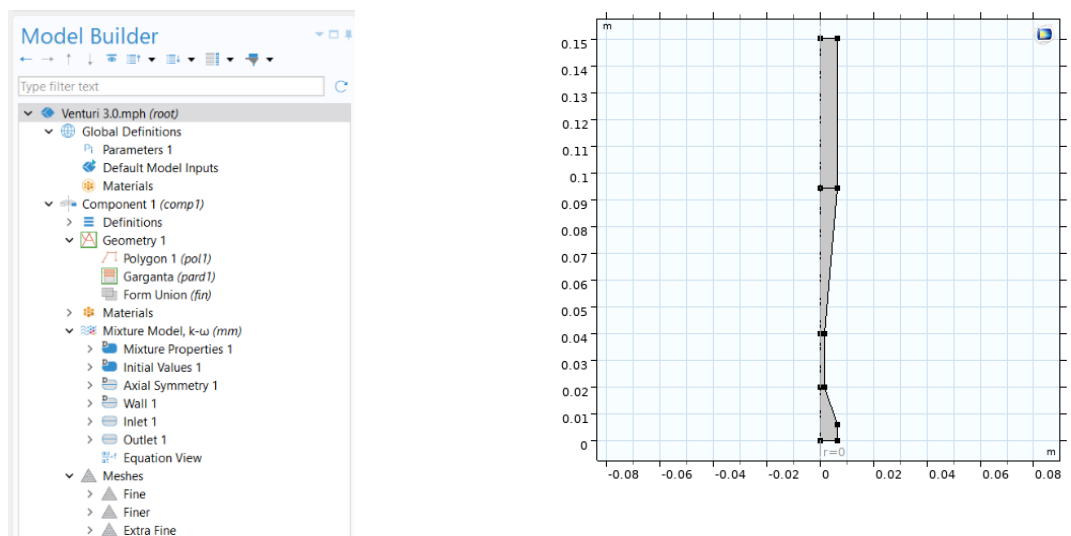
- Zheng, H., Zheng, Y., & Zhu, J. (2022). Recent Developments in Hydrodynamic Cavitation Reactors: Cavitation Mechanism, Reactor Design, and Applications. *Engineering*, *19*, 180–198. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.04.027>
- Zhi, P., & Wu, Y. C. (2022). FINITE ELEMENT QUANTITATIVE ANALYSIS AND DEEP LEARNING QUALITATIVE ESTIMATION IN STRUCTURAL ENGINEERING. *WCCM-APCOM 2022 - 15th World Congress on Computational Mechanics and 8th Asian Pacific Congress on Computational Mechanics: Pursuing the Infinite Potential of Computational Mechanics*. <https://doi.org/10.23967/wccm-apcom.2022.052>
- Židonis, A., & Aggidis, G. A. (2015). State of the art in numerical modelling of Pelton turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *45*(1–4), 135–144. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.01.037>
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Govindjee, S. (2024). The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, Eighth Edition. *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, Eighth Edition*, 1–613. <https://doi.org/10.1016/C2022-0-01494-X>
- Zwart, P., Gerber, A. G., & Belamri, T. (2004). A two-phase flow model for predicting cavitation dynamics. *Fifth International Conference on Multiphase Flow*.

Apéndices

Apéndice A. Guía de Construcción de Venturis en el entorno CFD COMSOL Multiphysics.

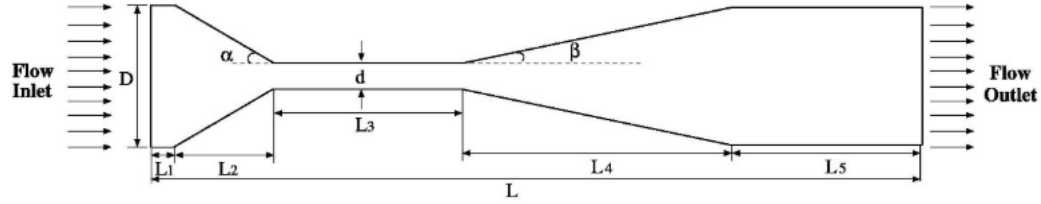
La configuración del modelo se realizó de forma sistemática siguiendo la estructura jerárquica mostrada en el Model Builder (**Figura 16a**):

Figura 16. Construcción del sistema de simulación en COMSOL Multiphysics.



- a. Estructura del árbol lógico (Model Builder) de la simulación en COMSOL Multiphysics®.
- b. Venturi construido en el entorno de COMSOL Multiphysics.

La representación del dominio computacional en el software se detalla en la **Figura 16b**, basado en la distribución de parámetros ilustrados en la **Figura 17** con las dimensiones específicas empleadas para la construcción del modelo resumidas en la **Tabla 8**.

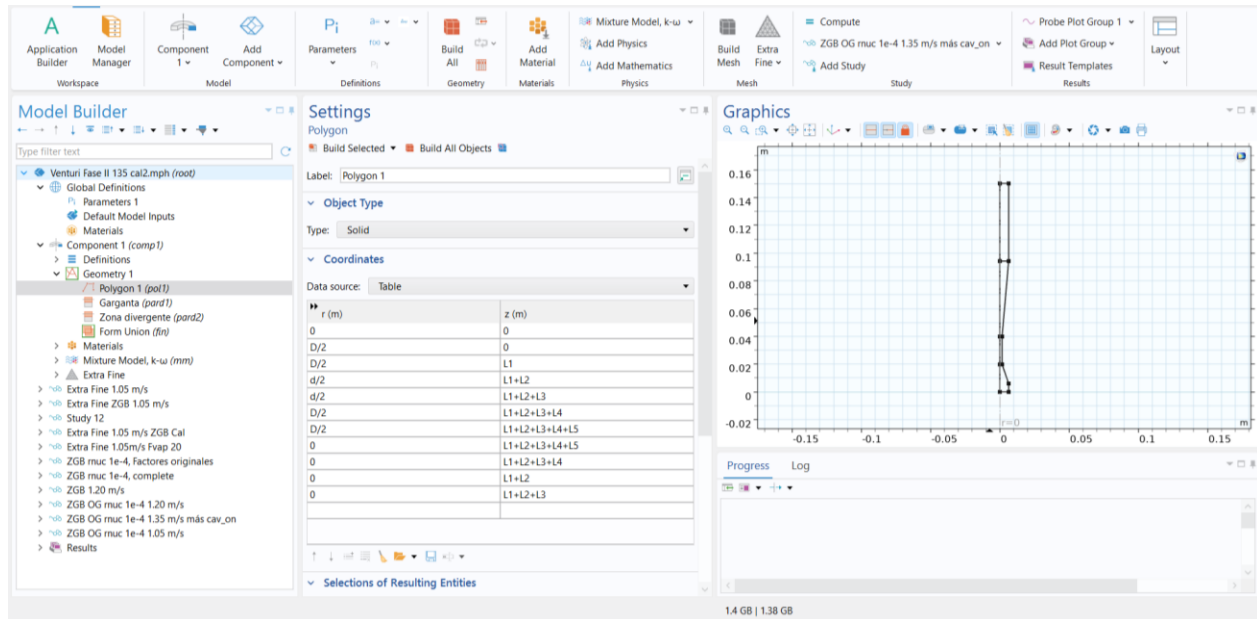
Figura 17. Distribución de parámetros para la construcción del Venturi. Fuente (Shi et al., 2019)**Tabla 8.** Medidas para la construcción del Venturi en COMSOL Multiphysics.

Parámetro	Medida	Significado
D	0.0127 [m]	Diámetro de la tubería
d	0.00318 [m]	Diámetro de la sección de la garganta
α	19 o 45 [°]	Ángulo de convergencia
β	5 [°]	Ángulo de divergencia
L1	0.006 [m]	Longitud de entrada
L2	$(D/2 - d/2) / \tan(\alpha)$ [m]	Longitud de sección convergente
L3	0.02 [m]	Longitud de garganta
L4	$(D/2 - d/2) / \tan(\beta)$ [m]	Longitud de sección divergente
L5	0.056 [m]	Longitud de salida

Para la construcción del perfil geométrico en el entorno de simulación, se utilizó el nodo tipo *Polygon* mediante la implementación de una tabla de coordenadas (r, z) parametrizadas, tal como se observa en la **Figura 18**. Este procedimiento implica una segmentación estratégica del dominio físico en secciones de entrada, convergencia, garganta y divergencia, una técnica

fundamental que permite un control riguroso sobre la densidad del mallado y facilita el refinamiento local en las zonas de mayor gradiente de presión y velocidad.

Figura 18. *Interfaz de construcción geométrica de COMSOL Multiphysics.*



Apéndice B. *Guía técnica para la especificación de intensidad turbulenta y relación de viscosidad en el entorno CFD COMSOL Multiphysics.*

Dado que la interfaz del modelo $k-\omega$ en COMSOL Multiphysics requiere la especificación directa de la energía cinética turbulenta k_0 y la tasa de disipación específica ω_0 , se derivaron las expresiones equivalentes a partir de las definiciones fundamentales de cada variable, lo que se detalla.

La energía cinética turbulenta se obtiene de la definición de intensidad turbulenta:

$$k_0 = \frac{3}{2}(U_{in} \cdot I_T)^2 \quad (\text{Ec. 14})$$

La tasa de disipación específica se obtiene despejando de la definición de viscosidad turbulenta para el modelo $k - \omega$, donde $\mu_t = \rho_l \cdot k / \omega$:

$$\omega_0 = \frac{\rho_l \cdot k_0}{(\mu_t / \mu_l) \cdot \mu_l} \quad (\text{Ec. 15})$$

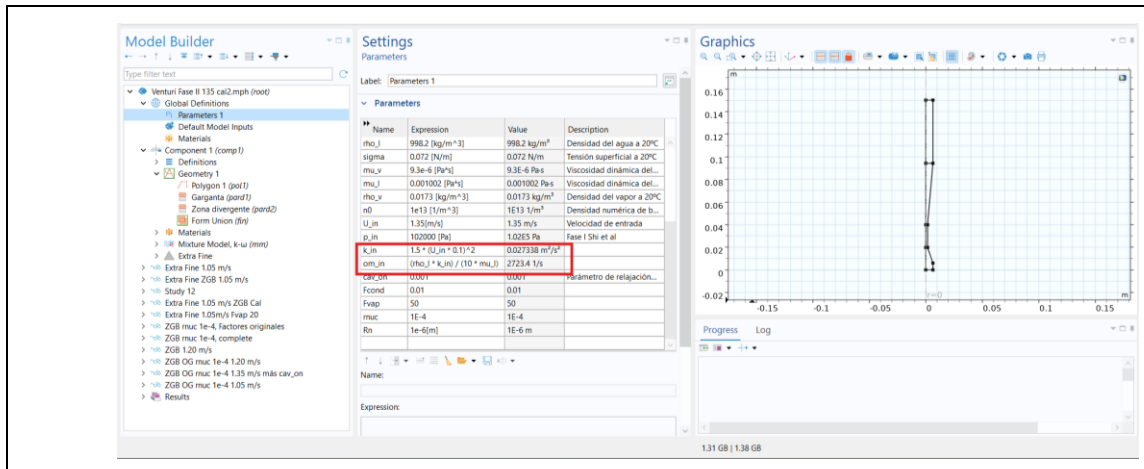
Sustituyendo los valores del fluido a 20°C $\rho_l = 998.2 \text{ kg/m}^3$, $\mu_l = 0.001002 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ y los parámetros de turbulencia especificados:

$$k_0 = \frac{3}{2} (U_{in} \cdot 0.1)^2 \quad [\text{m}^2/\text{s}^2] \quad (\text{Ec. 16})$$

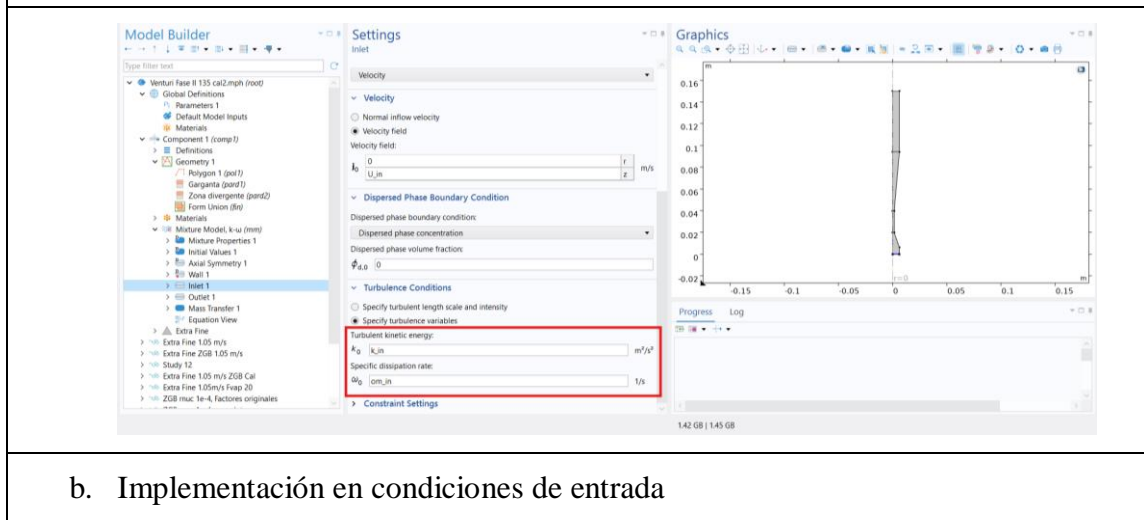
$$\omega_0 = \frac{998.2 \cdot k_0}{10 \times 0.001002} \quad [\text{s}^{-1}] \quad (\text{Ec. 17})$$

Estas expresiones fueron implementadas directamente en la tabla de parámetros de COMSOL como variables dependientes de U_{in} , como se observa en la **Figura 19**.

Figura 19. *Implementación de variables k_0 y ω_0 en COMSOL Multiphysics*



a. Definición en nodo parámetros



b. Implementación en condiciones de entrada

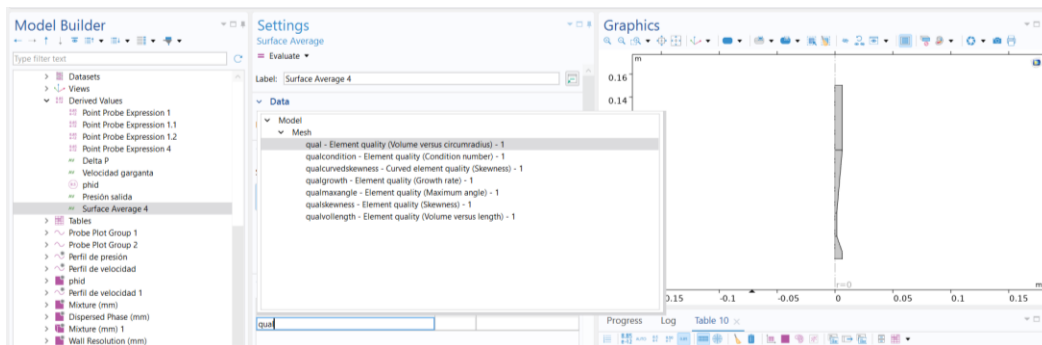
Apéndice C. Parámetros para la evaluación de la calidad de la malla en COMSOL

Multiphysics

Categoría	Parámetro COMSOL	en	Métrica	Función de la métrica
Escala de Red	DoF	Valor	de Log	Indica los grados de libertad extraídos del registro de cálculos (Log) del programa; representa el costo computacional total y el tamaño de la matriz que el solver resuelve.
	meshelementall	Valor	de Log	Registra el número total de celdas que componen la red; es el parámetro base para construir la gráfica de convergencia que realiza el programa y para comparar la densidad de la malla.

Precisión Local	h (Element size)	Surface average	Identifica la longitud del lado del elemento más pequeño en la garganta; asegura que el refinamiento local sea suficiente para capturar gradientes de alta velocidad.
Calidad de Celda	qualskewness	Surface average	Mide la deformación de los ángulos de los elementos; el valor máximo garantiza que ninguna celda tenga elementos demasiado deformados que puedan generar errores numéricos o divergencia.
	qualvollength	Surface average	Evalúa qué tan cerca está cada triángulo de ser equilátero; se usa para asegurar la estabilidad del solver en zonas de alta aceleración.
Geometría	meshvol	Surface Average	Promedia el área/volumen de los elementos en el dominio, complementando la información del tamaño lineal (h).

Figura 20. Búsqueda de parámetros de calidad de malla en COMSOL Multiphysics.



Apéndice D. Guía de Parametrización e Implementación del Modelo ZGB en COMSOL Multiphysics

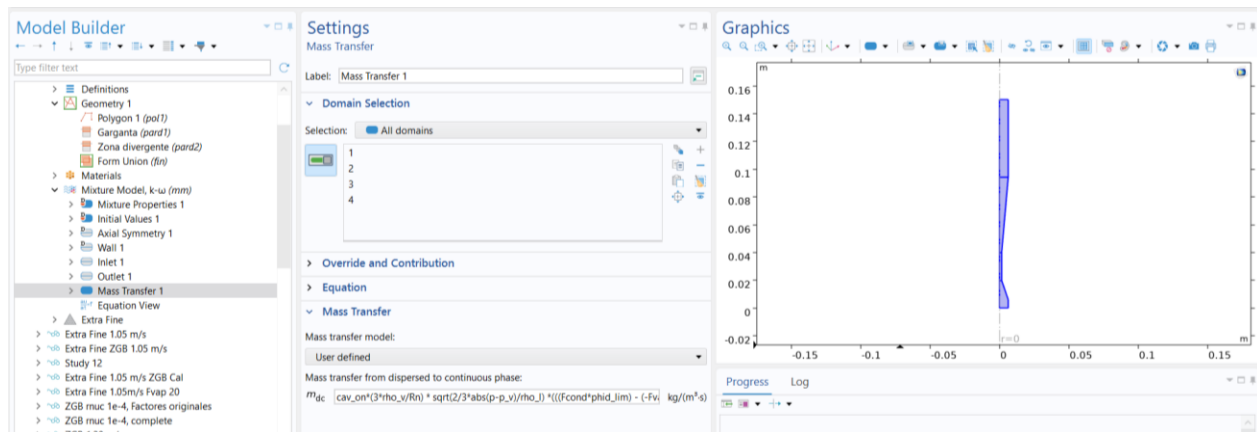
En el modelo de mezcla (*Mixture Model*), acoplado con el modelo de turbulencia κ - ω , se activó el nodo de transferencia de masa, en el cual se integró a través del término fuente (mdc), el modelo de Zwart-Gerber-Belamri (ZGB), el cual es formulado como un término de transferencia de masa por unidad de volumen [$\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s})$]. La expresión implementada en COMSOL para mdc es:

$$mdc = cav_{on} \cdot \left(\frac{3\rho_v}{R_b} \right) \cdot \sqrt{\frac{2}{3} \cdot \frac{|p - p_v|}{\rho_l}} \cdot f(\phi_d, p) \quad (\text{Ec. 18})$$

Donde $\mathbf{f}(\varphi_d, \mathbf{p})$ combina el término de evaporación ($\mathbf{F}_{vap} \cdot \mathbf{r}_{nuc} \cdot (1 - \varphi_d, \mathbf{lim})$) activo cuando $p < p_v$, y el término de condensación ($\mathbf{F}_{cond} \cdot \varphi_d, \mathbf{lim}$) activo cuando $p > p_v$. El término φ_d, \mathbf{lim} es una versión acotada de φ_d definida como: $\varphi_d, \mathbf{lim} = \max(\min(\varphi_d, 1 - 10^{-6}), 10^{-6})$ cuyo propósito es prevenir singularidades numéricas en los límites $\varphi_d = 0$ y $\varphi_d = 1$, garantizando que el argumento de la raíz cuadrada y los coeficientes del término fuente permanezcan definidos en todo el dominio.

El parámetro cav_{on} actúa como factor de escala global del término fuente m_{dc} y fue introducido como variable de control de la tasa de transferencia de masa durante el proceso de calibración numérica, tal como se describe en la sección siguiente. Un valor $cav_{on} = 0$ desactiva completamente el modelo de cavitación, recuperando el flujo monofásico, mientras que $cav_{on} = 1$ corresponde al modelo ZGB sin modificación.

Figura 21. Implementación del modelo ZGB en el término m_{dc} en COMSOL Multiphysics

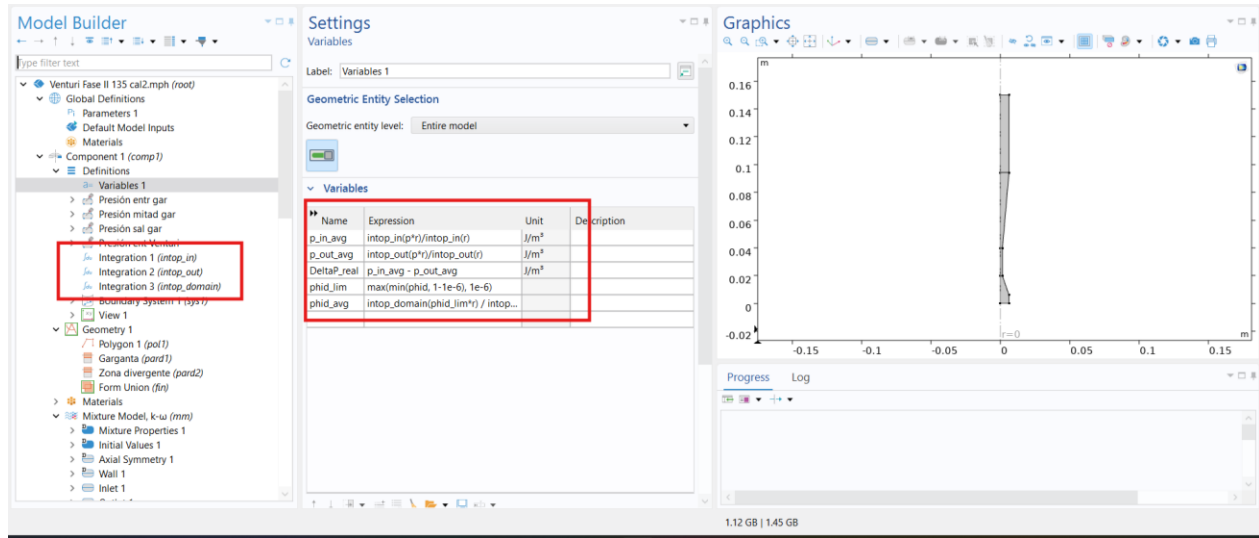


Apéndice E. Configuración de Operadores de Integración para Dominios Axisimétricos en COMSOL Multiphysics

Para calcular las variables necesarias para el análisis, en COMSOL Multiphysics 6.4 se utilizan los operadores de integración no local (*Integration Coupling Operators*) que definidos sobre un dominio 2D axisimétrico, integran sobre la superficie del plano meridional. Específicamente, `intop_domain(f)` calcula $\iint f \cdot dA$ en el plano 2D, sin incluir el factor $2\pi r$ asociado a la revolución. Esto implica que, para obtener promedios físicamente correctos sobre secciones circulares o volúmenes de revolución, es necesario introducir explícitamente la ponderación por r .

- Presión promedio y caída de presión: Las presiones promedio en la sección de entrada y salida se calculan como: $p_{in_avg} = \text{intop_in}(p \cdot r) / \text{intop_in}(r)$ y $p_{out_avg} = \text{intop_out}(p \cdot r) / \text{intop_out}(r)$. La ponderación por r produce el promedio de presión sobre la sección transversal circular, equivalente a $\int p \cdot dA / \int dA$ donde $dA = 2\pi r \cdot dr$, asignando mayor peso a las zonas periféricas en proporción a su área de revolución. Las unidades resultantes son Pa (equivalentes a J/m^3) y la caída de presión se obtiene como $\Delta P_{real} = p_{in_avg} - p_{out_avg}$.
- Fracción volumétrica promedio: Por el mismo principio, `phid_v` se calcula como $\text{intop_domain}(phid_lim \cdot r) / \text{intop_domain}(r)$, garantizando un promedio ponderado por volumen de revolución equivalente al reportado *Shi et al. (2019)* en la Figura 7a.

Figura 22. Definición de operadores para extracción de datos ΔP y Φ_d en COMSOL Multiphysics



Apéndice F. Datos gráfica de independencia de malla régimen monofásico.

Velocidad de entrada U _{in} [m/s]	ΔP Malla Fine [Pa]	ΔP Malla Finer [Pa]	ΔP Malla Extra Fine [Pa]
0.45	11319.407	11447.043	11537.343
0.55	16411.716	16624.985	16883.635
0.65	22325.218	22649.481	23130.208
0.75	29040.774	29492.850	30260.261
0.85	36538.828	37133.444	38258.015
0.95	44771.097	45539.390	47095.564
1.05	53724.417	54696.826	56764.497
1.15	63377.127	64574.812	67252.089
1.25	73735.595	75162.124	78542.352
1.35	84805.305	86422.084	90622.469

Datos Experimentales Design-1 19°			
Velocidad de entrada U _{in} [m/s]	Caída de presión ΔP [Pa]	Velocidad de entrada U _{in} [m/s]	Caída de presión ΔP [Pa]
0.42	9000	0.98	51000
0.48	11500	1.02	59000

0.54	14800	1.05	71000
0.6	18000	1.1	84000
0.66	21500	1.14	99000
0.72	25500	1.18	115000
0.78	30000	1.22	131000
0.84	35500	1.28	149000
0.9	41500	1.32	160000
0.94	45500	1.35	175000

Apéndice G. *Cálculos del error relativo y GCI para independencia de malla*

U_in [m/s]	Malla finer-finer r	E_rel_Finer [%]	GCI_Finer [%]	Malla finer extra fine r	E_rel_ExtraFine [%]	GCI_ExtraFine [%]
0.45	1.2163	1.115	2.9081	1.7073	0.7827	0.5109
0.55	1.2163	1.2828	3.3458	1.7073	1.532	1
0.65	1.2163	1.4317	3.734	1.7073	2.0784	1.3566
0.75	1.2163	1.5328	3.9979	1.7073	2.536	1.6554
0.85	1.2163	1.6013	4.1764	1.7073	2.9394	1.9187
0.95	1.2163	1.6871	4.4002	1.7073	3.3043	2.1569
1.05	1.2163	1.7778	4.6368	1.7073	3.6425	2.3776
1.15	1.2163	1.8547	4.8374	1.7073	3.981	2.5985
1.25	1.2163	1.8979	4.9501	1.7073	4.3037	2.8092
1.35	1.2163	1.8708	4.8793	1.7073	4.635	3.0255

Apéndice H. *Datos gráfica de independencia de malla régimen monofásico Desing-2 45°.*

Variable de Evaluación	Unidad	Extra Fine
Grados de Libertad	-	440 104
N° de Elementos	-	116 630
Tamaño de Elemento	m	2.35E-4
Volumen de Elemento	m ²	2.311E-8
Skewness	-	0.902
Volume vs. Length	-	0.927

Velocidad de entrada U_{in} [m/s]	ΔP Malla Extra Fine [Pa]
-------------------------------------	----------------------------------

0.35	9006.256
0.45	14694.829
0.55	21717.692
0.65	30031.386
0.75	39638.049
0.85	50530.732
0.95	62689.105
1.05	76110.968
1.15	90788.169

Figura 23. Perfiles de presión longitudinal y delimitación de la zona de cavitación para diferentes velocidades de entrada — Design-2 ($\alpha = 45^\circ$).

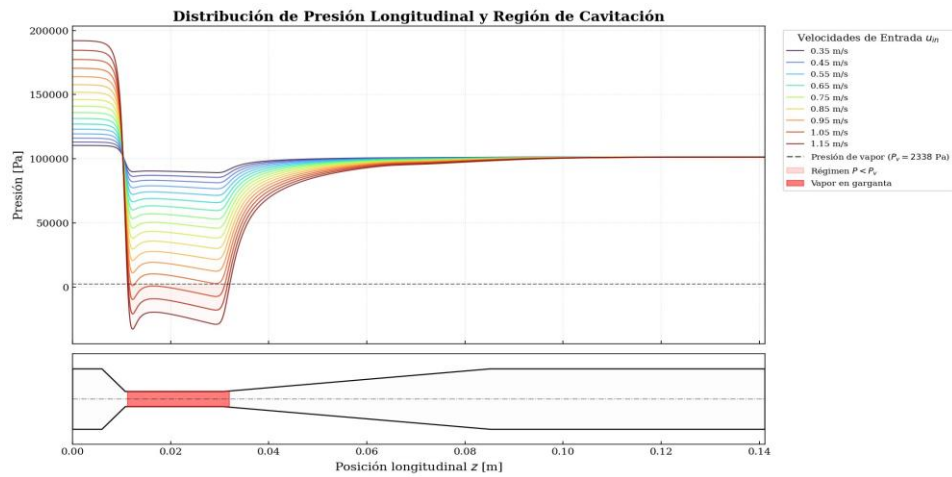
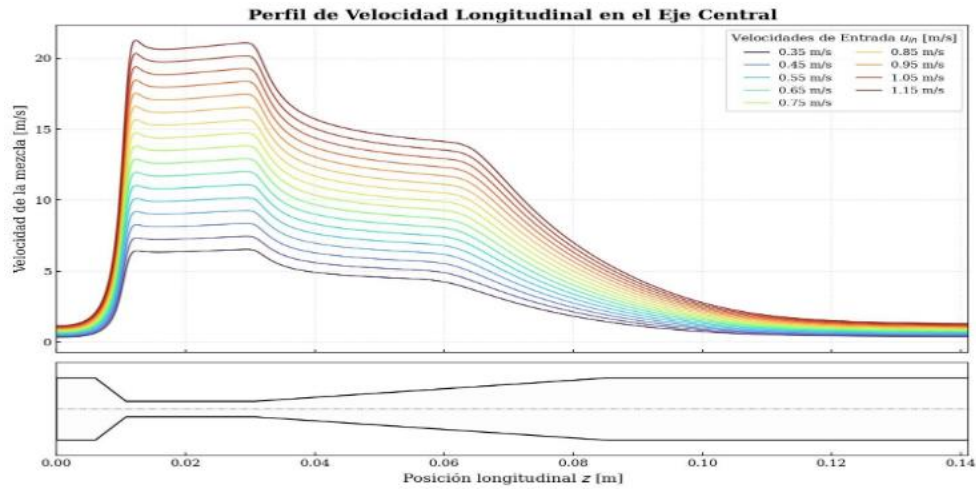


Figura 24. Perfil de velocidad longitudinal en el eje central para la malla escogida en régimen monofásico — Design-2 ($\alpha = 45^\circ$).



Apéndice I. Número de cavitación calculado para cada velocidad a calibrar

U_{in} [m/s]	Presión en la salida [Pa]	Velocidad promedio en la garganta [m/s]	Número de cavitación σ	de Valor de interpolado	ϕ_d
0.85	101 300	13.560	1.078	0.0001	
1.05	101 285	16.806	0.702	0.00112	
1.20	101 271	19.553	0.518	0.00294	
1.35	101 255	22.806	0.381	0.006952	

Apéndice J. Extensión de barrido de cav_{on} para $U_{in}=1.20$ y 1.35 m/s

1.2			1.35		
cav_on	DeltaP_real (Pa)	compl.phid_avg (1)	cav_on	DeltaP_real (Pa)	compl.phid_avg (1)
0.007	110222	0.0010901	0.007	161771	0.0021651
0.008	111343	0.001027	0.008	163595	0.0020464
0.01	113049	0.00093568	0.01	166823	0.0019041
0.02	116647	0.001228	0.014	169276	0.0020147
0.03	119315	0.00013893			