

Simulación Numérica de la Iniciación del Flujo Tapón en una Tubería Horizontal

Jorge Luis Montiel Maldonado^{1*}, Valente Hernández Pérez¹

¹ División de Estudios de Posgrado e Investigación, Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Pachuca, Carretera México-Pachuca Km. 87.5, C. P. 42080, Col. Venta Prieta, Pachuca de Soto, Hidalgo, México.

*Autor de correspondencia: *m24201290@pachuca.tecnm.mx

Fecha de Envío: 21, octubre, 2025

Fecha de Aceptación: 03, febrero, 2026

Resumen

La simulación precisa del flujo tapón (del inglés, *slug flow*) es crucial para la seguridad y eficiencia en la industria energética. El presente estudio lleva a cabo la simulación de la iniciación de este fenómeno mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). Se empleó el solucionador *compressibleVoF* de OpenFOAM para modelar un flujo bifásico aire-agua en una tubería horizontal de 0.1016 m de diámetro y 20 m de longitud. Las condiciones operativas fueron velocidades superficiales de líquido (U_{sl}) y de gas (U_{sg}) de 0.15 m/s y de 1.5 m/s respectivamente, a presión atmosférica. El modelo numérico reprodujo exitosamente la morfología del flujo. La contribución principal es la descripción de su evolución temporal, desde la formación de ondas hasta el establecimiento del régimen, obteniendo un comportamiento de la fracción de líquido consistente con los principios fundamentales de mecánica de fluidos. Los resultados muestran la capacidad del modelo para representar este complejo fenómeno.

Palabras clave

Flujo bifásico, flujo tapón, CFD, OpenFOAM, tubería horizontal.

Abstract

The accurate simulation of slug flow is crucial for safety and efficiency in the energy industry. The present study performs the simulation of the initiation of this phenomenon using Computational Fluid Dynamics (CFD). The *compressibleVoF* solver in OpenFOAM was employed to model an air–water two-phase flow in a horizontal pipe with a diameter of 0.1016 m and a length of 20 m. The operating conditions were superficial liquid (U_{sl}) and gas (U_{sg}) velocities of 0.15 m/s and 1.5 m/s, respectively, at atmospheric pressure. The numerical model successfully reproduced the flow morphology. The main contribution is the description of its temporal evolution, from wave formation to the establishment of the regime, yielding a liquid holdup behavior consistent with fundamental fluid mechanics principles. The results show the model's capability to represent this complex phenomenon.

Keywords

Two-phase flow, slug flow, CFD, OpenFOAM, horizontal pipe.

1. Introducción

El transporte simultáneo de gas y líquido en tuberías, conocido como flujo bifásico, es un fenómeno fundamental en la industria energética, particularmente en la producción y transporte de petróleo y gas [1]. La interacción entre las fases puede generar diversos patrones de flujo, de los cuales el flujo tapón (del inglés, slug flow) es uno de los más críticos y complejos. Este régimen se caracteriza por la formación de grandes cuerpos de líquido (tapones) que ocupan toda la sección transversal de la tubería, los cuales son impulsados por grandes burbujas de gas [1]. La naturaleza inherentemente transitoria del flujo tapón genera severas fluctuaciones de presión, vibraciones y cargas de impacto que pueden comprometer la integridad estructural de los ductos, causar paradas no programadas y reducir la eficiencia de los equipos de separación aguas abajo [2]. Por estas razones, la predicción precisa de las características de los tapones, así como de su evolución es un objetivo primordial para la garantía de flujo.

Aunque existen modelos teóricos, como el de Taitel y Dukler [3], que proporcionan un marco para predecir las transiciones de régimen, la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) se ha consolidado como una herramienta indispensable para analizar la física detallada de estos flujos. Enfoques como el Método de Volumen de Fluido (VoF) permiten simular la formación de ondas en la interfaz y su posterior crecimiento hasta convertirse en tapones, capturando la dinámica interfacial de este fenómeno [4].

La contribución de este trabajo es la simulación mediante un modelo numérico CFD de la iniciación del flujo tapón en una tubería horizontal. Este estudio se enfoca en demostrar la capacidad del modelo para reproducir la

morfología del flujo y su desarrollo a lo largo de la tubería, consolidándolo como una herramienta predictiva confiable.

A pesar de los numerosos estudios, la simulación de la iniciación y evolución del flujo tapón sigue siendo un área de investigación activa, ya que cada configuración de flujo presenta desafíos únicos en cuanto a la captura de la física interfacial y la turbulencia [1, 5]. Este artículo se enfoca en la simulación de un caso experimental documentado por Loh et al. [6], correspondiente a un flujo de aire-agua con velocidades superficiales de líquido (U_{sl}) de $0.15 \frac{m}{s}$ y de gas (U_{sg}) de $1.5 \frac{m}{s}$ en una tubería de $0.1016 m$ de diámetro con más $20 m$ de longitud. Estas condiciones son conocidas por generar un régimen de flujo tapón claramente definido, proporcionando una excelente base para el estudio de su desarrollo.

La hipótesis central de este trabajo es que la simulación numérica, utilizando el solucionador *compressibleVoF* de OpenFOAM, puede representar la evolución del flujo tapón, desde su iniciación como ondas interfaciales hasta su desarrollo como un tren de tapones recurrente. El objetivo es, por tanto, desarrollar un modelo CFD y analizar su capacidad para describir la dinámica del flujo, contrastando sus resultados cualitativos y la evolución de la fracción de líquido con el comportamiento físico esperado, sentando así las bases para su uso en análisis más complejos.

2. Metodología

Para investigar la formación y propagación del flujo tapón, se desarrolló un modelo numérico tridimensional utilizando la plataforma de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de código abierto OpenFOAM. La metodología se describe en detalle a continuación, abarcando el modelo matemático gobernante, que incluye

las ecuaciones fundamentales de conservación, y la configuración numérica específica de la simulación.

2.1. Modelo Gobernante y Ecuaciones Fundamentales

El flujo bifásico se modela asumiendo que ambas fases (aire y agua) son fluidos newtonianos e isotérmicos, pero para el caso del gas al utilizar el solucionador *compressibleVoF*, asume que existen efectos de compresibilidad. Para el presente estudio, se asume que el proceso es **isotérmico**. El comportamiento del sistema se rige por las ecuaciones de conservación de masa y momento, las cuales se presentan a continuación en su forma general para un flujo bifásico [9, 11].

2.1.1. Ecuación de Conservación de Masa (Continuidad)

El fundamento de todo modelo de flujo de fluidos reside en las leyes de conservación. El primer principio fundamental es la conservación de la masa. En el contexto de un flujo bifásico, este principio se aplica a cada fase k (líquido o gas) de forma independiente. La ecuación de continuidad establece que la tasa de acumulación de masa de la fase k dentro de un volumen de control más el flujo neto de masa de esa fase a través de sus fronteras debe ser igual a la tasa neta de transferencia de masa interfacial [9]. La ecuación general es:

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_k \rho_k v_k)}{\partial x} = \Gamma_{ki} + \Gamma_{kW} \quad (1)$$

Donde α_k , ρ_k , y v_k son la fracción de volumen, la densidad y la velocidad de la fase k , respectivamente. Los términos Γ_{ki} y Γ_{kW} representan la transferencia de masa entre fases y desde fuentes externas. Para este estudio, al tratarse de un flujo aire-agua

isotérmico y sin cambio de estado, estos términos son nulos.

2.1.2. Ecuación de Conservación de Momento

La segunda ley de Newton, aplicada a un volumen de fluido, establece que la tasa de cambio del momento es igual a la suma de todas las fuerzas que actúan sobre él. En un flujo bifásico, esta ley debe considerar no solo las fuerzas de presión, viscosas y gravitacionales, sino también las complejas interacciones en la interfaz entre las fases. La ecuación de conservación de momento para una fase k es [9]:

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k v_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_k \rho_k v_k^2)}{\partial x} = -\alpha_k \frac{\partial p_k}{\partial x} + (R_{ki} + R_{kW}) + (S_{ki} + S_{kW}) - \alpha_k \rho_k g \sin \theta \quad (2)$$

Donde los términos principales son:

- Lado izquierdo: Representa la tasa de cambio del momento en el tiempo (término transitorio) y el flujo de momento convectivo.
- $-\alpha_k \frac{\partial p_k}{\partial x}$: Fuerza debida al gradiente de presión.
- $R_{ki} + R_{kW}$: Fuerzas de fricción viscosa, tanto en la interfaz entre fases (R_{ki}) como en la pared de la tubería (R_{kW}).
- $S_{ki} + S_{kW}$: Fuerzas debidas a la tensión superficial en la interfaz y en la pared.
- $-\alpha_k \rho_k g \sin \theta$: Componente de la fuerza gravitacional que actúa en la dirección del flujo.

En el marco del Método de Volumen de Fluido (VoF) utilizado en este estudio, se resuelve una única ecuación de momento para la mezcla, donde las fuerzas interfaciales como la fricción (R_{ki}) y la tensión superficial (S_{ki}) se modelan

como términos fuente que actúan sobre la mezcla de fluidos.

2.2. Modelo de Simulación Numérica

La resolución de las ecuaciones gobernantes para el flujo bifásico se realiza mediante un enfoque numérico que discretiza el dominio espacial y temporal. Este estudio emplea el Método de Volumen de Fluido, que es la base del solucionador *compressibleVoF* el cual se elige con la intención de prevenir cualquier cambio en la presión a lo largo de la tubería dada su naturaleza compresible, esto en la plataforma de código abierto OpenFOAM. A continuación, se describen los componentes clave del modelo numérico.

2.2.1. Método de Volumen de Fluido

Para capturar la interfaz discreta y móvil entre las fases de aire y agua, se utiliza el Método de Volumen de Fluido (VoF). Este es un método de captura de interfaz Euleriano que no rastrea explícitamente las partículas de fluido, sino que determina la distribución de las fases resolviendo una ecuación de advección para la fracción de volumen de una de las fases, [7]. En este estudio, representa la fracción de volumen de la fase líquida (agua).

La ecuación de transporte para la fracción de fase es:

$$\frac{\partial(\alpha)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha u) = 0 \quad (4)$$

donde u es el campo de velocidad de la mezcla. La solución de esta ecuación se maneja con esquemas numéricos de alta resolución para evitar la difusión numérica y mantener una interfaz nítida entre las fases. Las propiedades físicas de la mezcla en cada celda computacional, como la densidad (ρ) y la viscosidad (μ), se calculan como un promedio ponderado basado en α :

$$\rho = \alpha\rho_{agua} + (1 - \alpha)\rho_{aire} \quad (5)$$

$$\mu = \alpha\mu_{agua} + (1 - \alpha)\mu_{aire} \quad (6)$$

2.2.2. Modelo de Turbulencia k- ω SST

La naturaleza inherentemente inestable y caótica del flujo tapón implica la presencia de turbulencia en múltiples escalas. Para cerrar el sistema de ecuaciones *RANS*, se empleó el modelo de dos ecuaciones $\kappa - \omega$ *SST* (por sus siglas en inglés, *Shear Stress Transport*). Este modelo es una formulación híbrida que combina las ventajas del modelo $\kappa - \epsilon$ en la región de flujo libre (lejos de las paredes) y del modelo $\kappa - \omega$ en la subcapa viscosa cerca de las paredes. Esta característica lo hace especialmente robusto y preciso para flujos que involucran capas límite adversas y fenómenos de separación, condiciones que son prevalentes en la interfaz ondulada y en la región de mezcla del frente del tapón, proporcionando una predicción fiable de los esfuerzos de cizalla en la pared y en la interfaz [8].

2.2.3. Configuración Numérica y Paso de Tiempo

Las ecuaciones gobernantes se discretizan utilizando el Método de Volumen Finito. El acoplamiento entre la presión y la velocidad se maneja a través del algoritmo PIMPLE, una combinación de los algoritmos PISO (por sus siglas en inglés, Pressure-Implicit with Splitting of Operators) y SIMPLE (por sus siglas en inglés, Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations), que es robusto tanto para simulaciones transitorias como para aquellas con números de Courant elevados. Para la discretización de los términos en las ecuaciones se emplearon los siguientes esquemas: Derivada temporal ($\frac{\partial}{\partial t}$): Se utilizó un esquema de Euler de primer orden, adecuado para la naturaleza transitoria del flujo tapón.

Gradientes (∇): Se empleó un esquema de Gauss con interpolación lineal.

Términos convectivos ($\nabla \cdot$): Se utilizaron esquemas de segundo orden, como el *Gauss vanLeer*, para la advección de momento, con el fin de minimizar la difusión numérica y mantener la precisión.

Términos de difusión ($\nabla \cdot \mu \nabla$): Se discretizaron con un esquema *Gauss linear corrected* para asegurar la conservación y la estabilidad.

Para la integración temporal, se empleó un esquema de paso de tiempo adaptable (*adjustTimeStep*) controlado rigurosamente por la estabilidad numérica. Se establecieron criterios conservadores: un Número de Courant máximo global (Co_{max}) de 0.5, para asegurar la estabilidad de la solución de la ecuación de fracción de fase (MULES) y la correcta propagación de la interfaz y, fundamentalmente para la precisión del método VoF, un Número de Courant de interfaz (Co_{α}) restringido a 0.25.

Esta configuración dual asegura que el paso de tiempo (Δt) se reduzca automáticamente durante los eventos de alta velocidad interfacial, como el momento de la formación del tapón, garantizando la estabilidad de la solución de la fracción de fase y minimizando la difusión numérica sin depender de un paso de tiempo fijo arbitrario.

2.3. Configuración del Caso de Estudio

Para estudiar la iniciación y evolución del flujo tapón bajo condiciones realistas y bien definidas, la configuración de la simulación se basa en un caso experimental documentado en la literatura. Se seleccionaron estas condiciones de referencia ya que son conocidas por generar de manera consistente un régimen de flujo tapón, lo que permite que el estudio numérico represente un escenario físicamente coherente.

2.3.1. Dominio Computacional y Malla

El dominio computacional como se muestra en la Figura 1 consiste en una tubería horizontal recta con un diámetro interno (D) de 0.1016 m y una longitud total (L) de 20 m. Esto resulta en una relación longitud/diámetro ($\frac{L}{D}$) de aproximadamente 197, una longitud que se considera suficiente para permitir que las inestabilidades interfaciales, originadas en la entrada de la tubería, evolucionen hasta formar un tren de tapones completamente desarrollado en la sección de análisis [4, 5].

La geometría fue discretizada como se observa en la Figura 2 utilizando una malla estructurada tipo O-grid, la cual está compuesta por 170,000 celdas hexaédricas. La elección de este tipo de mado es fundamental, ya que estudios previos han demostrado su superioridad para modelar flujos en tuberías cilíndricas en comparación con otras topologías [12, 13]. El número de celdas para la malla se eligió tomando como referencia mallas utilizadas en la literatura para casos de flujo similares, por ejemplo, Hernandez-Perez [13]. Además, se justificó que, en estudios exploratorios de iniciación, se puede emplear una malla única de buena calidad como punto base, siempre que la intención del estudio no sea obtener métricas cuantitativas finas. La estructura O-grid, incluso, mantiene la ortogonalidad y la calidad de las celdas en todo el dominio, lo cual es esencial para la precisión de la simulación.

Se obtuvieron métricas de alta calidad con una no-ortogonalidad máxima de 29.10° (promedio 5.84°) y un *skewness* máximo de 0.85. Estos valores aseguran la estabilidad numérica y validan el uso de esta discretización para los objetivos del estudio sin requerir refinamientos adicionales.

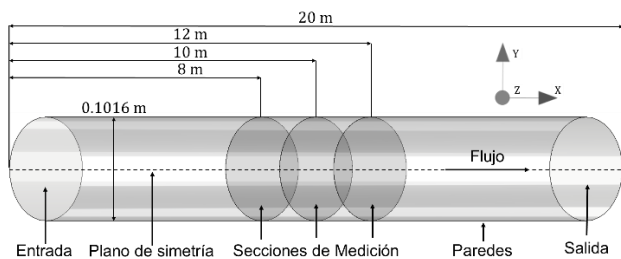


Figura 1. Geometría tridimensional del modelo CFD que muestra la ubicación de las secciones de medición.

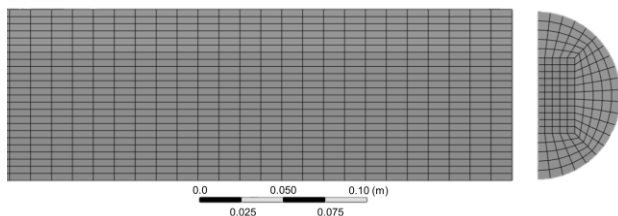


Figura 2. Dominio computacional utilizando una malla estructurada tipo O-grid.

Para el análisis de los resultados, se definieron tres planos transversales. En cada plano se obtienen los monitoreos a los 8, 10 y 12 m de la entrada. En estos mismos, se recolectaron los datos de las variables de flujo en cada instante de tiempo de la simulación.

2.3.2. Propiedades de los Fluidos

Las propiedades físicas del aire y el agua, se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de los fluidos utilizados en la simulación

Propiedad	Aire	Agua	Unidad
Densidad (ρ)	1.18	997	$\frac{kg}{m^3}$
Viscosidad Dinámica (μ)	1.83×10^{-5}	8.90×10^{-4}	$Pa \cdot s$
Tensión Superficial (σ)	0.072		N/m
Temperatura (K)	300		K
Presión (Bar g)	0		Bar g

2.3.3. Condiciones de Frontera e Iniciales

Las condiciones operativas se basan en un caso experimental de Loh et al. [6], y se resumen a continuación:

- **Entrada:** Se impuso una condición de velocidad fija para cada fase. Las velocidades superficiales fueron de $U_{sl} = 0.15 \frac{m}{s}$ para el agua y $U_{sg} = 1.5 \frac{m}{s}$ para el aire. En la sección de entrada, la fase líquida se inicializó ocupando la mitad inferior de la tubería ($\frac{H_L}{D} = 0.5$).
- **Salida:** Se estableció una condición de presión de salida fija, correspondiente a la presión atmosférica (0 bar g).
- **Paredes:** Se aplicó una condición de no deslizamiento (*no-slip*) en las paredes de la tubería.
- **Simetría:** Se aplicó una condición de simetría en el plano de corte a lo largo de la mitad de la tubería con el propósito de reducir el tiempo de cómputo.

3. Resultados y Discusión

En esta sección, se presentan los resultados de la simulación numérica del flujo bifásico aire-agua para las condiciones de $U_{sl} = 0.15 \frac{m}{s}$ y $U_{sg} = 1.5 \frac{m}{s}$. El análisis se divide en una descripción cualitativa de la morfología del flujo y un análisis de su evolución temporal a medida que se propaga a lo largo de la tubería.

3.1. Morfología del Flujo Tapón

El primer paso para el análisis del modelo es confirmar que la simulación reproduce cualitativamente la estructura física característica del flujo tapón.

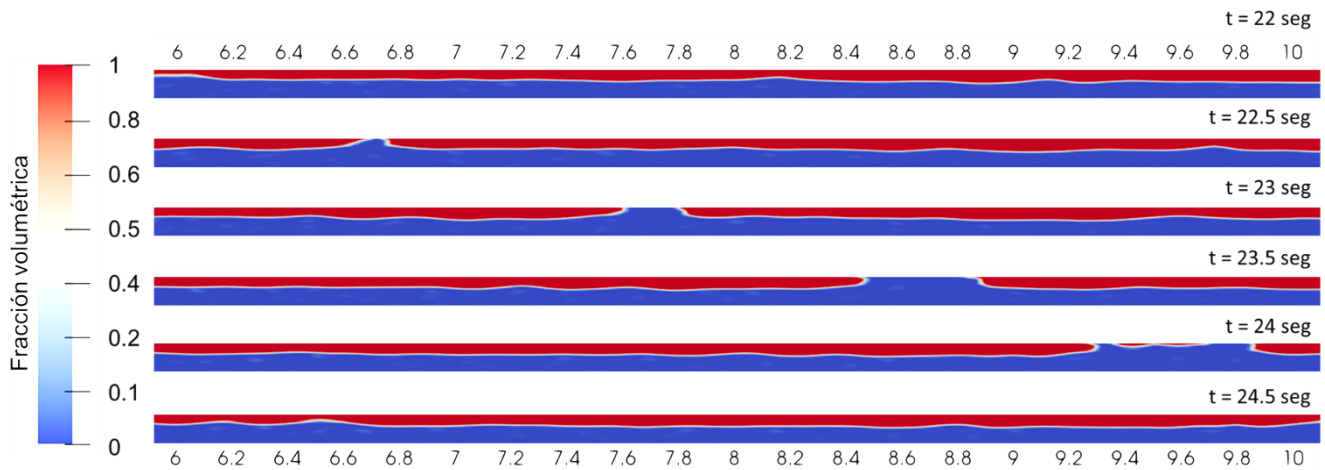


Figura 3. Secuencia de instantáneas de los contornos de la fracción volumétrica (de gas) y tiempo en la transición del flujo a lo largo de la distancia del tubo (en metros).

La Figura 3 muestra una secuencia de instantáneas de los contornos de la fracción de fase (α) que ilustran la formación y propagación de una unidad de tapón a lo largo de un segmento de la tubería a través del tiempo:

- a) Formación de Ondas (t = 22 seg): Se observa la inestabilidad inicial en la interfaz gas-líquido, donde se forman ondas de gran amplitud.
- b) Crecimiento y Bloqueo (t = 22.5 seg): Una de estas ondas crece hasta tocar la pared superior de la tubería, bloqueando el paso del gas y comenzando a formar el frente del tapón.
- c) Propagación del Tapón (t = 23 a 24 seg): Se muestra un tapón completamente desarrollado, caracterizado por un cuerpo de líquido con un ligero arrastre de gas que ocupa gran parte de la tubería, seguido por un cúmulo de gas (burbuja de Taylor) que se desliza sobre una delgada película de líquido en la parte inferior.
- d) Cola del tapón (t = 24.5 seg): Se observa cómo el cuerpo del tapón avanza, y la altura del líquido desciende para volver a formar la película líquida estratificada ondulada que sigue al tapón.

La morfología observada en la simulación es consistente con las descripciones clásicas del flujo tapón en la literatura [1, 9]. La captura de estas características, desde la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz que da origen a las ondas hasta la estructura del tapón y la burbuja de Taylor, confirma que la configuración numérica es adecuada para representar la física fundamental del proceso de iniciación del flujo tapón.

3.2. Análisis Transitorio en las Secciones de Medición

Para analizar la evolución del flujo a lo largo de la tubería, se extrajeron las series de tiempo de la fracción de líquido en tres planos transversales distintos, ubicados a 8, 10 y 12 m de la entrada.

La Figura 4 presenta la evolución de esta variable en las tres ubicaciones, mostrando el desarrollo del régimen de flujo tapón.

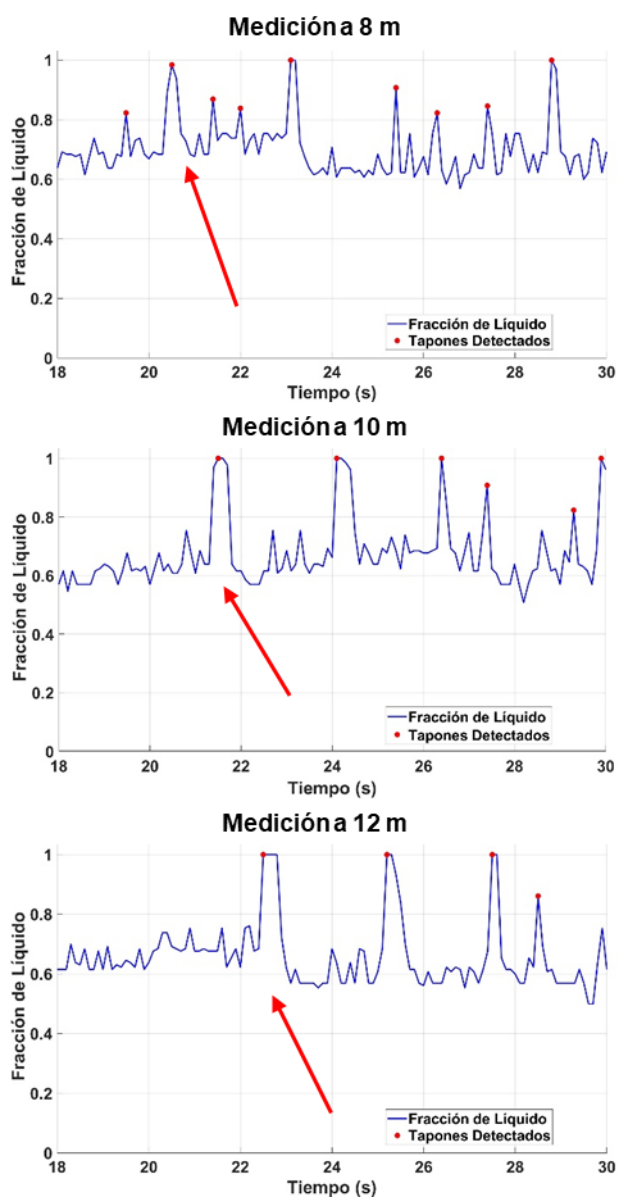


Figura 4. Análisis Transitorio del Flujo de Tapones en tres ubicaciones axiales: 8, 10 y 12 metros respectivamente.

En las tres gráficas se observa un comportamiento claramente intermitente, característico del flujo tapón. Se aprecian picos agudos donde la fracción de líquido se aproxima a la unidad, lo que indica el paso de los cuerpos de los tapones. Entre estos picos, la fracción de líquido desciende a un valor bajo y relativamente constante, correspondiente al paso de las burbujas de Taylor sobre la película de líquido.

La comparación visual de las tres señales revela una clara evolución en el patrón de flujo a medida que avanza por la tubería, lo cual se discutirá en detalle en la siguiente sección.

3.3. Análisis de la Evolución del Flujo Tapón

Las series de tiempo presentadas en la Figura 4 permiten realizar un análisis detallado de la evolución del flujo tapón a medida que se propaga a lo largo de la tubería. Este enfoque, centrado en la dinámica del desarrollo del flujo, es consistente con trabajos experimentales dedicados a la iniciación y evolución de tapones, como el presentado por Ujang et al. [14].

La comparación de las señales en las tres ubicaciones revela la progresión física del régimen. Como vemos las flechas apuntan a un tapón generado en la posición más cercana a la entrada ($x = 8\text{ m}$), donde la señal presenta una mayor irregularidad, con picos de amplitud y espaciamiento variables. Esto es característico de un régimen en desarrollo, donde coexisten ondas de gran amplitud y tapones recién formados que aún no han alcanzado un equilibrio dinámico. A medida que el flujo avanza hacia $x = 10\text{ m}$ y $x = 12\text{ m}$, se observan dos fenómenos interrelacionados que son fundamentales en la física del desarrollo del tapón:

1. Crecimiento del Tapón: Los picos en la señal, que representan los cuerpos de los tapones, se vuelven más anchos y definidos, lo que indica que los tapones están creciendo en longitud y estabilizándose.
2. Adelgazamiento de la Película Líquida: Un segundo fenómeno, interconectado con el crecimiento del tapón, es el comportamiento de la película líquida. A medida que un tapón avanza y aumenta su longitud, debe incorporar el líquido de la película que lo precede. Este mecanismo de “recolección de

líquido” provoca necesariamente que la altura de la película disminuya progresivamente a lo largo de la tubería. Esta tendencia se confirma en las gráficas, donde el nivel mínimo de la fracción de líquido que corresponde a la película bajo la burbuja de Taylor) es visiblemente menor en las posiciones más alejadas de la entrada ($x = 12\text{ m}$) en comparación con las más cercanas ($x = 8\text{ m}$).

Este comportamiento, donde el crecimiento del tapón se produce a expensas de la película de líquido, está bien documentado en la literatura [14] y es una característica esencial de la evolución del flujo tapón. El hecho de que la simulación capture esta interdependencia entre el crecimiento del tapón y el adelgazamiento de la película líquida confirma que el modelo no solo genera la estructura de un tapón, sino que también reproduce con éxito su dinámica evolutiva y los mecanismos físicos que la gobiernan.

3.4. Limitaciones y Alcances del Modelo

Es importante establecer los alcances y limitaciones del presente estudio numérico dentro del contexto de la modelación de flujos multifásicos:

1. Enfoque en la Iniciación: El objetivo primordial de este trabajo es reproducir el mecanismo físico de iniciación y la evolución morfológica del flujo tapón (transición de flujo estratificado a taponés). En concordancia con estudios exploratorios similares, se priorizó una discretización espacial (O-grid) y temporal ($Co < 0.5$) de alta calidad conocida, en lugar de realizar un estudio extensivo de independencia de malla, el cual suele requerirse para predicciones cuantitativas de variables de diseño (como caídas de presión precisas u otros parámetros clave).

2. Validación Morfológica: Si bien no se presenta una validación cuantitativa contra datos experimentales, la validación del modelo reside en su capacidad para replicar desde la fenomenología la dinámica de fluidos esperada: la inestabilidad de Kelvin-Helmholtz, el mecanismo de bloqueo de la sección transversal y el adelgazamiento de la película líquida, comportamientos que confirman la fidelidad física de la simulación para propósitos de análisis de mecanismos de flujo.

4. Conclusiones

Se desarrolló un modelo numérico tridimensional en OpenFOAM para la simulación del flujo tapón en una tubería horizontal, demostrando la capacidad de la CFD para reproducir este complejo fenómeno hidrodinámico. Las principales conclusiones son:

- Simulación del Fenómeno: El modelo, basado en el método VoF y el modelo de turbulencia $\kappa - \omega$ SST, representó con fidelidad la morfología característica del flujo tapón y, fundamentalmente, su correcta evolución dinámica a lo largo de la tubería, en concordancia con el comportamiento físico descrito en la literatura.
- Captura de Mecanismos Físicos Clave: El análisis de la evolución del flujo en múltiples puntos confirmó que la simulación captura los mecanismos físicos que gobiernan el desarrollo del tapón. Se validó la interdependencia entre el crecimiento del cuerpo del tapón y el adelgazamiento de la película de líquido que lo precede, lo que demuestra que el modelo reproduce con alta fidelidad la dinámica evolutiva del régimen.
- Aplicabilidad: Este estudio señala el modelo numérico como una herramienta para la predicción de la dinámica del flujo tapón. Se

confirma su capacidad para ser utilizado en estudios más detallados sobre la formación y propagación de este complejo régimen de flujo.

Agradecimientos

El autor agradece el apoyo otorgado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) mediante la beca para estudios de posgrado, la cual ha sido fundamental para la realización de este trabajo.

Referencias

- [1] A. O. Mohammed, H. H. Al-Kayiem, and A. B. Osman, "Investigations on the slug two-phase flow in horizontal pipes: Past, presents, and future directives," *Chemical Engineering Science*, vol. 238, p. 116611, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.ces.2021.116611.
- [2] K. Havre, K. O. Stornes, and H. Stray, "Taming slug flow in pipelines," *ABB Review*, no. 4, pp. 55–63, 2000.
- [3] Y. Taitel and A. E. Dukler, "A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow," *AIChE Journal*, vol. 22, no. 1, pp. 47–55, Jan. 1976, doi: 10.1002/aic.690220105.
- [4] W. Pao, B. Sam, M. S. Nasif, and R. B. M. Norpiah, "Numerical validation of two-phase slug flow and its liquid holdup correlation in horizontal pipeline," *Key Engineering Materials*, vol. 740, pp. 173–182, 2017, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.740.173.
- [5] S. Schmelter, M. Olbrich, E. Schmeier, and M. Bär, "Numerical simulation, validation, and analysis of two-phase slug flow in large horizontal pipes," *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 73, p. 101722, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2020.101722.
- [6] W. L. Loh, V. Hernandez-Perez, N. D. Tam, T. T. Wan, Z. Yuqiao, and V. K. Premanadhan, "Experimental study of the effect of pressure and gas density on the transition from stratified to slug flow in a horizontal pipe," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 85, pp. 196–208, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2016.06.005.
- [7] C. W. Hirt and B. D. Nichols, "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries," *Journal of Computational Physics*, vol. 39, no. 1, pp. 201–225, Jan. 1981, doi: 10.1016/0021-9991(81)90145-5.
- [8] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, 2nd ed. Harlow, UK: Pearson Education, 2007.
- [9] O. Bratland, *Pipe Flow 2: Multi-phase Flow Assurance*, 2nd ed. 2013. [Online]. Available: drbratland.com
- [10] J. U. Brackbill, D. B. Kothe, and C. Zemach, "A continuum method for modeling surface tension," *Journal of Computational Physics*, vol. 100, no. 2, pp. 335–354, Jun. 1992, doi: 10.1016/0021-9991(92)90240-Y.
- [11] L. Cheng, G. Ribatski, and J. R. Thome, "Two-Phase Flow Patterns and Flow-Pattern Maps: Fundamentals and Applications," *Applied Mechanics Reviews*, vol. 61, no. 5, Sep. 2008, Art. no. 050802, doi: 10.1115/1.2955990.
- [12] V. Hernandez-Perez, M. Abdulkadir, and B. J. Azzopardi, "Grid Generation Issues in the CFD Modelling of Two-Phase Flow in a Pipe," *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, vol. 9, no. 1, 2011, doi: 10.2202/1542-6580.2598.
- [13] Hernandez-Perez, V. Gas-liquid two-phase flow in inclined pipes. PhD thesis, University of Nottingham (2008).
- [14] P. M. Ujang, C. J. Lawrence, C. P. Hale, and G. F. Hewitt, "Slug initiation and evolution in two-phase horizontal flow," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 32, no. 5, pp. 527–552, May 2006, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2005.11.001.