

ESTUDIO DEL FLUJO TURBULENTO BIFÁSICO EN UNA TUBERÍA HORIZONTAL UTILIZANDO DIFERENTES MODELOS NUMÉRICOS DE TURBULENCIA

Rosendo Franco¹, Herbert Yépez¹, Renato M. Yupa¹, Daniel Abarca¹

1. Grupo INACOM/Aula PUCP-CIMNE, Sección Ing. Mecánica, Dpto. de Ingeniería,
Pontificia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria 1801, Lima 32-Perú
e-mail: rofranco@pucp.edu.pe

Resumen

En el presente artículo se estudia el comportamiento de un flujo turbulento bifásico agua-aire en una tubería horizontal mediante simulación numérica. El objetivo del estudio es obtener la distribución de presión variable sobre la pared de la tubería en función del tiempo. En tal sentido se analizaron diferentes modelos de turbulencia descritos en la literatura y se seleccionaron dos modelos, el RANS $k - \omega$ SST y el LES – WALE, para evaluar cuál de ellos es el más adecuado para cumplir el objetivo planteado. Asimismo, para simular el flujo bifásico se utilizó el modelo VOF. En la investigación se evaluaron diferentes condiciones del flujo, considerando las dimensiones de la tubería y los valores de la velocidad superficial de cada fase, según resultados experimentales reportados en la literatura, para validar así los resultados numéricos. Se ha observado que ambos modelos de turbulencia son capaces de captar los patrones del comportamiento turbulento del flujo y ofrecen resultados similares en los valores máximos y mínimos de la presión. Se confirma lo planteado por otros autores, ya que el modelo LES permite alcanzar mayor precisión en los resultados, pero tiene también mayor costo computacional. Por tanto, se recomienda utilizar el modelo RANS descrito en el presente trabajo, si la variable de interés es la presión sobre la pared de la tubería.

Palabras claves: modelos de turbulencia, flujo bifásico, CFD, RANS, LES

1. Introducción

La turbulencia es un estado dependiente del tiempo, tridimensional, no lineal y caótico que se define a partir de la generación de vórtices (eddies) de gran tamaño que paulatinamente se dividen en estructuras cada vez más pequeñas hasta que la energía cinética transmitida entre ellas se disipa en forma de calor lo que se denomina como cascada de la energía [1]. El interés por abordar el estudio de la turbulencia radica en que la mayoría de los fluidos tienen un comportamiento turbulento en la naturaleza, así como en una variedad de aplicaciones en la industria [2]. Los trabajos pioneros de Ludwig Prandtl (1875-1953) y Theodore von Kármán (1881-1963) sobre el concepto de la capa límite y el desprendimiento de vórtices, respectivamente, dieron origen al estudio de este fenómeno [3]. Actualmente, la turbulencia se constituye como uno de los mayores retos de las líneas de investigación en el campo de la dinámica de fluidos computacional (CFD) [4], para modelar correctamente su comportamiento. Esto permitiría el análisis de los efectos que produce la turbulencia, como son las fluctuaciones de las variables fluido dinámicas (presión, velocidad, temperatura, concentración) y de la intensificación del transporte (masa, momento, energía). Por otro lado, existe una variedad de modelos de turbulencia concebidos bajo diferentes aproximaciones con características particulares y marcadas ventajas entre unos y otros. Sin embargo, no es posible establecer con total certeza qué modelo debe ser empleado en ciertas aplicaciones. Trabajos de investigación en diferentes campos de la ingeniería, tales como ventilación de recintos [4], flujo de viento alrededor de edificaciones [5], dispersión de contaminantes [6], diseño automotriz [7], turbo máquinas [8], flujo en tuberías [9, 10], evidencian la preocupación por evaluar diferentes modelos de turbulencia con el objetivo de determinar el más adecuado para un caso en particular.

De forma general se pueden mencionar tres tipos de aproximaciones numéricas para el tratamiento de la turbulencia. La simulación numérica directa (*Direct Numerical Simulation* - DNS), que resuelve las ecuaciones de Navier Stokes y requiere de un enmallado muy fino para captar todas las escalas de turbulencia. La simulación de vórtices grandes (*Large Eddy Simulation* - LES) que también resuelve las ecuaciones de Navier Stokes, sin demandar una malla tan fina como DNS, ya que es capaz de realizar un filtrado de las escalas de turbulencia. Las ecuaciones de Navier Stokes promediadas por Reynolds (*Reynolds*

Averaged Navier-Stokes - RANS) es la tercera aproximación, que emplea un promedio temporal sobre las ecuaciones de transporte e incorpora modelos que interpretan el comportamiento de la turbulencia. Cabe mencionar que estos enfoques han sido y seguirán siendo ampliamente empleados, sin embargo, la aproximación DNS, al resolver todas las escalas de turbulencia con pasos de tiempo suficientemente pequeños para captar las fluctuaciones más rápidas, tiene altísimo costo computacional haciéndola inviable en la mayoría de casos de aplicación industrial. El enfoque LES, cada vez más empleado, requiere de grandes espacios de almacenamiento computacional y el tiempo de ejecución es elevado. Mientras que el enfoque RANS, quizá sea la aproximación que se ha ajustado más a las prácticas en ingeniería, por tener un menor costo computacional y ofrecer resultados adecuados en la mayoría de aplicaciones.

Por otro lado, el empleo de CFD en aplicaciones industriales, concretamente en el estudio de fluidos en tuberías, además de requerir las ecuaciones de transporte y algún modelo de turbulencia ya mencionados, precisa de modelos físicos adicionales, debido a que es poco habitual encontrar en la industria casos donde un solo fluido participa de un proceso. Un gran número de aplicaciones de interés posee flujos compuestos por diferentes fases (líquido-gas, líquido-sólido, líquido-líquido, gas-sólido), haciendo que esta condición le agregue complejidad al estudio. En tal sentido, actualmente se señala que no hay un modelo bifásico capaz de interpretar de manera adecuada todo tipo de flujo compuesto, pero sí de modelos orientados a resolver casos específicos. Se definen cuatro modelos fundamentales para el estudio de fluidos bifásicos que son: de fase discreta (DPM), euleriano (Eulerian), de mezcla (Mixture), de volumen de fluido (VOF). El modelo VOF en general es empleado para fases inmiscibles y en la literatura se encuentra que lo emplean para el estudio de la turbulencia en flujos bifásicos [11, 12, 13].

Asimismo, hay una especial atención en el estudio de los efectos que produce la turbulencia de un flujo bifásico gas-líquido en tuberías horizontales. Algunos autores, como Fangqiu Li [14], Chen An [15], L. E. Ortiz Vidal [16], Shuichiro Miwa [17], realizaron análisis y experimentación de interacción fluido estructura (*Fluid-Structure Interaction* - FSI) y vibración inducida por flujo (*Flow-Induced Vibration* - FIV). Algunos de estos autores emplearon modelos de turbulencia RANS en sus estudios. Otros trabajos, como el de

Matthew Pittard [18], realizan estudios similares de forma experimental y numérica, haciendo uso del modelo de turbulencia LES, encontrando una fuerte correlación entre la fracción de volumen y la vibración.

El presente trabajo pretende evaluar dos modelos diferentes de turbulencia: un modelo RANS y un modelo LES, bajo diferentes condiciones de flujo bifásico agua-aire, con el objetivo de captar la distribución de presión en función del tiempo sobre la pared de una tubería horizontal. Los resultados del presente trabajo contribuirán a que los investigadores interesados en estudios FSI y FIV tomen decisiones adecuadas sobre el modelo de turbulencia a utilizar.

2. Modelos de turbulencia RANS

Los modelos RANS se basan en el empleo de un promedio temporal de las ecuaciones de Navier Stokes, denominado promedio de Reynolds, el cual consiste en sustituir la variable fluido dinámica de interés por la suma de un valor promedio y un fluctuante $v = \bar{v} + v'$. Basada en la ecuación general de conservación, la expresión (1) muestra la ecuación RANS que se puede obtener.

$$\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t} + \nabla(\bar{v}_i \bar{v}_j) = -\frac{1}{\rho} \nabla \bar{p} + \nabla(v \nabla \bar{v}_i) - \frac{1}{\rho} (\rho \overline{v'_i v'_j}) \quad (1)$$

Donde el subíndice i representa a los componentes espaciales y $\bar{v}_i \bar{v}_j$ es el producto de la componente i con las demás componentes. El procedimiento de sustituir una variable por sus componentes promedio y fluctuante introduce seis términos adicionales desconocidos $\rho \overline{v'_i v'_j}$, denominados tensiones de Reynolds, que se constituyen en nuevas incógnitas para el sistema. Un modo de expresar las tensiones de forma compacta es a través del tensor de Reynolds, ecuación (2).

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{v'_i v'_j} \quad (2)$$

Ya que se han generado nuevas incógnitas, se requiere de expresiones adicionales (modelos de turbulencia) que permitan el cierre del sistema de ecuaciones. Un medio para resolver la falta de ecuaciones es empleando la hipótesis de Boussinesq, la cual propone relacionar las tensiones de Reynolds con el tensor promedio de deformaciones S_{ij} , a través de un término conocido como viscosidad turbulenta μ_t , ecuación (3).

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{v'_i v'_j} \approx \mu_t \left(\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{v}_j}{\partial x_i} \right) = 2\mu_t S_{ij} \quad (3)$$

Actualmente se dispone de una variedad de modelos RANS que se diferencian en sus propuestas para estimar μ_t , dentro de los cuales se puede mencionar a los modelos algebraicos simples, modelos de viscosidad artificial y modelos de cierre completo [1]. Otra manera de clasificar a los modelos RANS es en base al número de ecuaciones de transporte que agregan al sistema: cero, una, dos y siete ecuaciones [2].

Los modelos algebraicos simples, también denominados modelos de cero ecuaciones, no agregan ninguna ecuación al sistema y establecen mediante una expresión algebraica una relación entre la viscosidad turbulenta y el gradiente de velocidad. El modelo de longitud de mezcla propuesto por Prandtl es quizá el modelo algebraico más representativo, indicado en la expresión (4).

$$\mu_t = \rho l_m^2 \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right| \quad (4)$$

Donde l_m es la longitud de mezcla, que depende de una longitud característica del flujo.

Los modelos de viscosidad artificial se pueden agrupar en modelos que introducen una y dos ecuaciones para lograr el cierre del sistema. El modelo de Spalart-Allmaras es considerado el modelo más representativo de los modelos de una ecuación. Mientras que los modelos $k - \varepsilon$ y $k - \omega$ son los modelos característicos de dos ecuaciones. También conocidos como modelos EVM (Eddy Viscosity Model), los modelos de viscosidad artificial, basados en la propuesta de Boussinesq, consideran isotrópica a la viscosidad turbulenta, permitiendo conservar la misma relación tensor de Reynolds y tensor promedio de deformaciones en todas las direcciones.

Por otro lado, los modelos de cierre completo, también conocidos como modelos de tensiones de Reynolds, surgen cuando la propuesta de Boussinesq deja de ser válida y se requiere introducir seis ecuaciones de transporte por cada tensión de Reynolds, logrando de esta forma garantizar el cierre del sistema.

El modelo $k - \varepsilon$ es muy utilizado en los últimos años y emplea una ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta k y otra para la disipación ε . Asimismo, define la relación para la viscosidad turbulenta según la ecuación (5).

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (5)$$

Actualmente se cuenta con variantes de la formulación estándar, tales como RNG $k - \varepsilon$ y Realizable $k - \varepsilon$. El modelo RNG $k - \varepsilon$, propuesto por Yakhot [19], presenta como principal variante la formulación de la ecuación de disipación. Se conoce que el modelo estándar es demasiado disipador, mientras que RNG es más sensible a los efectos de la deformación rápida y realiza adecuadas predicciones de flujos de remolinos. El modelo Realizable $k - \varepsilon$, propuesto por Shih [20], incorpora una corrección a la ecuación de la energía cinética turbulenta estándar, con el objetivo de que las tensiones normales sean positivas en todas las condiciones de flujo y, con ello, que el modelo sea más adecuado para flujos con gran tasa de deformación, tales como flujos con trayectorias curvilíneas y rotacionales, entre otros [21].

Con el propósito de mejorar los resultados en los estudios de flujos turbulentos con bajo números de Reynolds, se propuso cambios al modelo $k - \varepsilon$. Surge así el modelo $k - \omega$ [22], que emplea también dos ecuaciones, una para la energía cinética turbulenta k y otra para la tasa específica de disipación viscosa $\omega = \varepsilon/k$, y define la relación a la viscosidad turbulenta mediante la ecuación (6).

$$\mu_t = \alpha^* \rho \frac{k}{\omega} \quad (6)$$

Asimismo, han surgido variantes del modelo original, tal como $k - \omega$ SST, el cual busca mejorar la interpretación de la zona de transición entre la capa límite y la zona de flujo libre. El modelo de transporte de esfuerzo cortante (*Shear Stress Transport - SST*), propuesto por Menter [23], combina los atributos de dos modelos existentes. Emplea el modelo $k - \omega$ original de Wilcox en la región interna de la capa límite y el modelo $k - \varepsilon$ estándar en la región externa y en los flujos de superficie libre.

2.1. Modelos LES

Una estrategia práctica de tratar problemas bifásicos es seleccionar la escala de turbulencia que se necesita resolver. En los modelos LES las grandes escalas de turbulencia de naturaleza anisotrópica son resueltas directamente, mientras que las escalas pequeñas son modeladas. Se realiza un promediado espacial de las ecuaciones de transporte empleando un tamaño de filtro en el

orden del tamaño de los elementos de la malla, el cual establece la cantidad de energía que debe ser resuelta y la restante que debe ser modelada. La expresión (7) representa la aproximación LES del flujo.

$$\frac{\partial(\rho \bar{v}_i)}{\partial t} + \nabla(\rho \bar{v}_i \bar{v}_j) = -\nabla \bar{p} + \nabla(\mu \nabla \bar{v}_i) - \nabla \tau_{ij} \quad (7)$$

El término τ_{ij} se denomina tensiones turbulentas de subescala (*Sub-Grid Scale - SGS*) y se define mediante la expresión 8.

$$\tau_{ij} = \rho [\overline{v_i v_j} - \bar{v}_i \bar{v}_j] \quad (8)$$

Las tensiones SGS representan el efecto de las pequeñas escalas de turbulencia y el proceso de modelarlas las considera isotrópicas y se emplea modelos de viscosidad artificial (modelos SGS), tales como Smagorinsky-Lilly, WALE, dinámico de subescala (DSGS), de transporte de energía cinética, entre otros. Por otro lado, cabe mencionar que el costo computacional de LES es alto en comparación con los modelos de turbulencia RANS, ya que se requiere de una malla más fina y menores pasos de tiempo.

Varios autores reportan el uso del modelo RANS $k - \omega$ SST para estudiar el comportamiento de flujos turbulentos bifásicos con buenos resultados [24, 25]. Mientras que Pittard [18] utiliza el modelo LES – Smagorinsky-Lilly para estudiar la turbulencia en un tramo pequeño de tubería, recomendando su uso para el estudio de la turbulencia. Sin embargo, de acuerdo con lo estudiado, la modelación de las pequeñas escalas de turbulencia con la aproximación WALE produciría mejores resultados. Por lo antes expuesto, con la finalidad de determinar la distribución de presión sobre la pared de una tubería horizontal que transporta flujo bifásico agua-aire, para el presente trabajo se han seleccionado dos modelos de turbulencia: el RANS $k - \omega$ SST y el LES – WALE. Estos modelos serán utilizados para evaluar diferentes condiciones de flujo y sus resultados serán comparados entre sí para determinar cuál es el más adecuado para la aplicación analizada.

3. Casos de estudio

En el presente trabajo se estudiará una tubería horizontal de 2500 mm de longitud y 20.4 mm de diámetro, que transporta flujo bifásico agua-aire, a temperatura ambiente, bajo las condiciones que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Condiciones de flujo bifásico agua-aire

Caso	Velocidad superficial del agua / aire		Fracción de vacío β [%]	Caída de presión por longitud dP/dL_F [kPa/m]	Presión salida [kPa]
	J_L [m/s]	J_G [m/s]			
1	1.49	1.50	50	3.268	11
2	1.25	3.80	75	4.207	11
3	0.75	14.27	95	5.597	11

Las condiciones de flujo mostradas en la Tabla 1 son tomadas de ensayos experimentales reportados en la literatura [26], con la finalidad de estudiar condiciones reales de flujo y validar los resultados numéricos. Por otro lado, la figura 1 muestra la ubicación de los tres casos de estudio en el mapa de Mandhane [27], elaborado por Ortiz-Vidal [26] para sus ensayos experimentales.

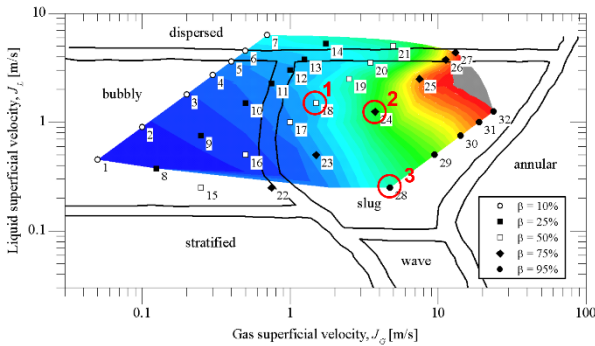


Figura 1: Mapa de patrones de flujo de Mandhane [26].

3.1. Modelo de análisis

El modelo geométrico desarrollado para el análisis del flujo se muestra en la figura 2. Este modelo se ha discretizado con una malla estructurada, con una adecuada distribución de elementos sobre la sección de la tubería y a lo largo de ésta, como se puede apreciar en la figura 3. Se han generado 1175020 elementos hexaédricos de primer orden, con un refinamiento de malla cerca a la pared, para captar adecuadamente el campo de presiones.

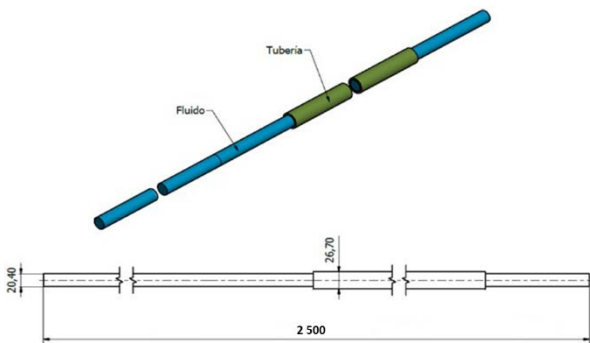


Figura 2: Geometría del fluido

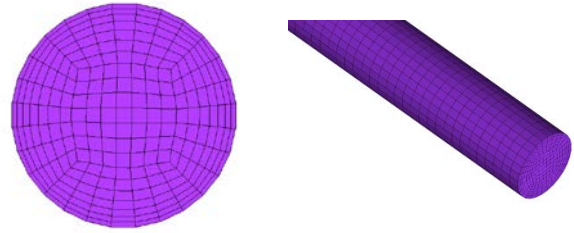


Figura 3: Malla del modelo

Las condiciones de contorno consistieron en imponer de la velocidad de la mezcla en la entrada del flujo y la presión manométrica en la salida del mismo. Como ya se mencionó, se seleccionaron los modelos de turbulencia RANS $k - \omega$ SST y LES -WALE. Asimismo, el modelo VOF en su formulación explícita fue seleccionado para simular el flujo bifásico. Se consideró al aire como fase primaria y se designó una constante de tensión superficial de 0.072 entre las fases. Se seleccionó el método SIMPLE y una formulación implícita de segundo orden para resolver las ecuaciones de conservación de forma desacoplada. Se definieron 20 iteraciones para alcanzar la convergencia en cada paso de tiempo. El paso de tiempo para la simulación RANS $k - \omega$ SST se definió en 0.001s y para la simulación LES - WALE en 0.0001 s.

4. Resultados y discusión

Las figuras 4 hasta la 8 muestran los resultados de las simulaciones empleando el modelo RANS $k - \omega$ SST.

En la figura 4 se aprecia los resultados de la fracción volumétrica para el caso 1 en 1.2, 2.3, 3.3, 4.1 y 5 segundos de análisis, donde se revela la formación de un patrón slug bien definido, que es uno de los tipos de patrones que pueden formarse en un flujo turbulento bifásico. Mientras que la figura 5 muestra los resultados de presión, para el mismo caso 1 y los mismos instantes de tiempo indicados anteriormente, sobre una sección de la tubería ubicada a 2300 mm de la entrada del flujo.

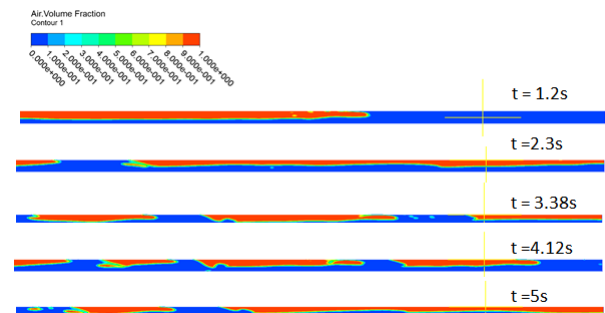


Figura 4: Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 1. Modelo RANS $k - \omega$ SST

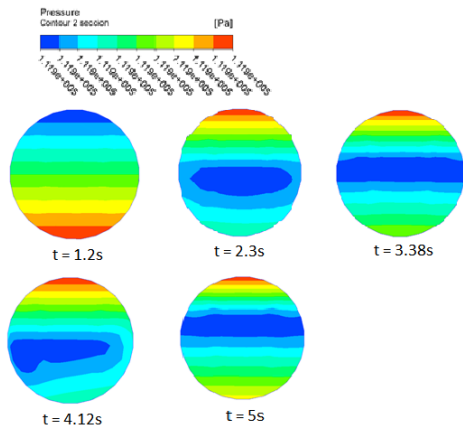


Figura 5: Resultados de presión a 2300 mm de la entrada - Caso 1. Modelo RANS $k - \omega$ SST

De forma similar a los resultados del caso 1, las figuras 6, 7, 8 y 9, muestran los resultados de la fracción volumétrica a lo largo de la tubería y de la presión sobre una sección para los casos 2 y 3. La figura 6 revela la formación de un patrón slug no tan bien definido como en el caso 1, mientras que la figura 8 muestra la formación de un patrón wave, que es otro patrón típico de flujos turbulentos bifásicos. La formación de diferentes patrones de turbulencia está definida por las condiciones de flujo, como se puede constatar en el mapa de Mandhane (ver figura 1).

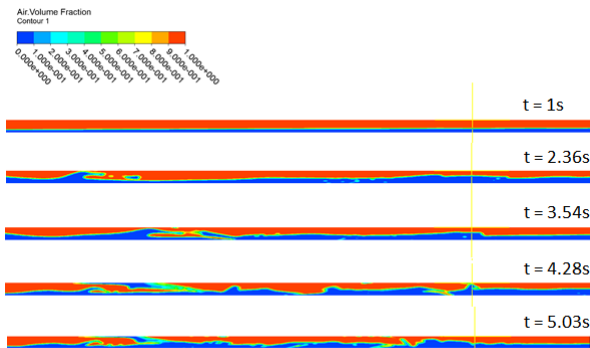


Figura 6: Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 2. Modelo RANS $k - \omega$ SST

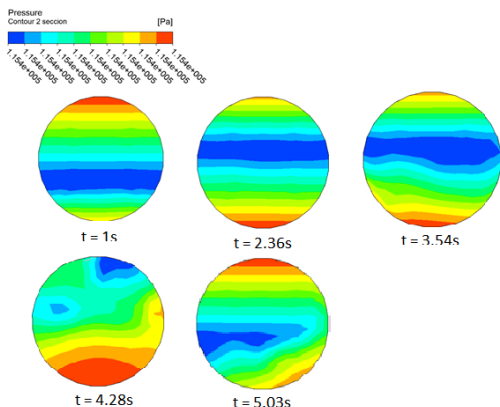


Figura 7: Resultados de presión a 2300 mm de la entrada - Caso 2. Modelo RANS $k - \omega$ SST

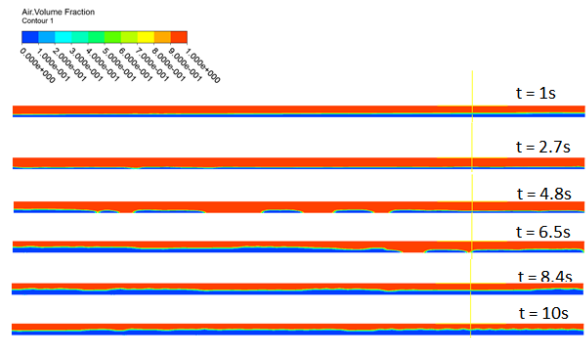


Figura 8: Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 3. Modelo RANS $k - \omega$ SST

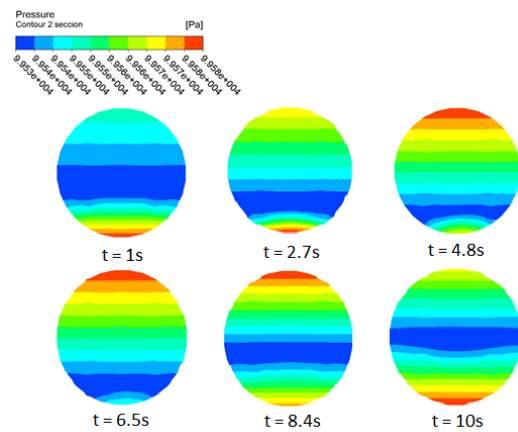


Figura 9: Resultados de presión a 2300 mm de la entrada - Caso 3. Modelo RANS $k - \omega$ SST

Las figuras 10 hasta la 15 muestran los resultados de las simulaciones empleando el modelo LES – WALE.

Las figuras 10, 12 y 14 muestran la formación de patrones slug bien definido, slug poco definido y wave para los casos 1, 2 y 3, respectivamente. Estos patrones son muy semejantes a los hallados en las simulaciones empleando el modelo RANS $k - \omega$ SST. Mientras que las figuras 11, 13 y 15 muestran los resultados de presión en una sección de la tubería ubicada a 2300 mm de la entrada del flujo.

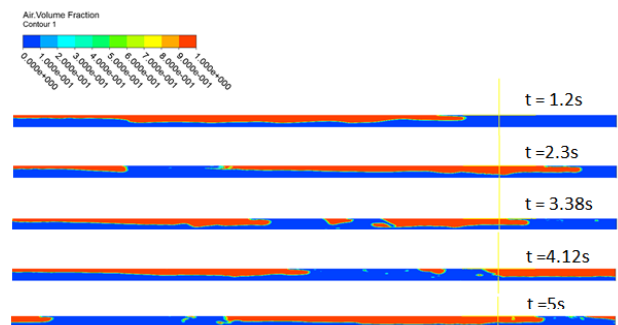


Figura 10: Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 1. Modelo LES – WALE.

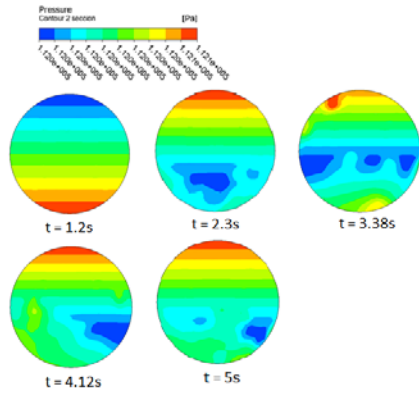


Figura 11: Resultados de presión a 2300 mm de la entrada - Caso 1. Modelo LES – WALE.

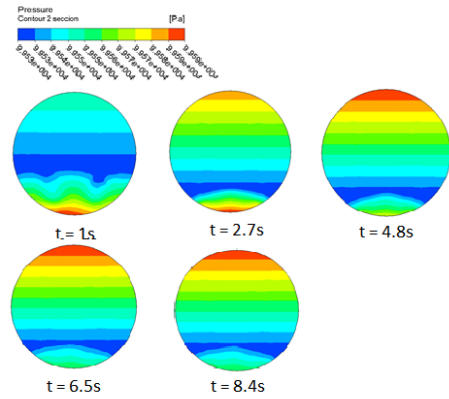


Figura 15: Resultados de presión a 2300 mm de la entrada - Caso 3. Modelo LES – WALE

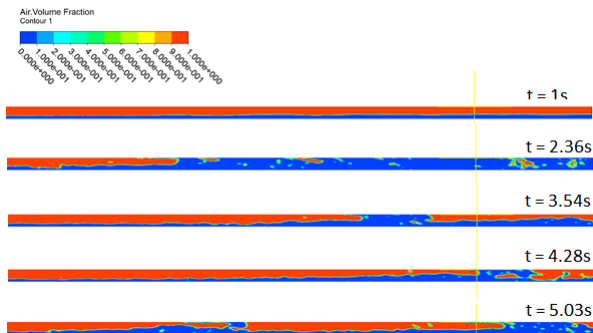


Figura 12: Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 2. Modelo LES – WALE.

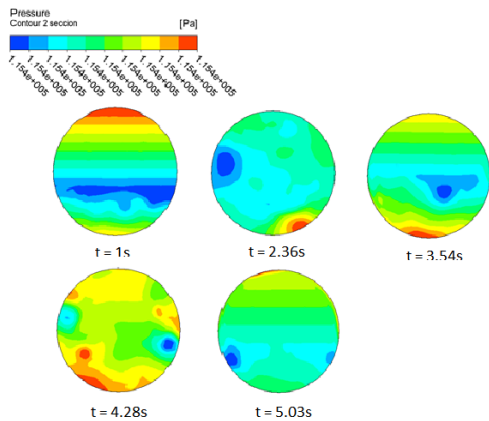


Figura 13: Resultados de presión a 2300 mm de la entrada - Caso 2. Modelo LES – WALE.

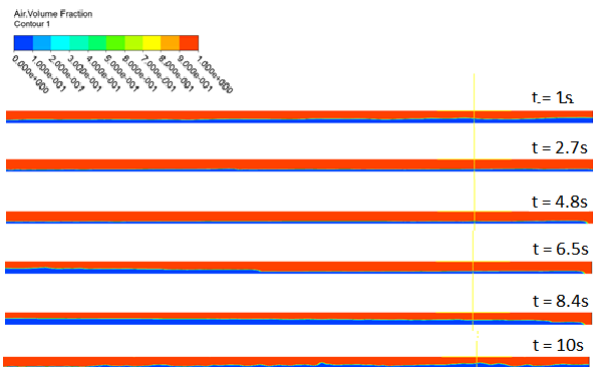


Figura 14: Resultados de fracción volumétrica (aire) - Caso 3. Modelo LES – WALE

Con la finalidad de determinar cuál de los modelos es el más adecuado para captar la distribución de presión sobre la pared de la tubería, se procesan los resultados de presión en función del tiempo de dos puntos contenidos en las mismas secciones definidas anteriormente. Los puntos se ubican de forma diametralmente opuesta, uno en la parte superior (1) y el otro en la parte inferior (2) de la sección. La figura 16 muestra los resultados de presión en función del tiempo de los puntos 1 y 2 del caso 1, empleando el modelo RANS $k - \omega$ SST. Se aprecia que el comportamiento de la presión de ambos puntos posee la misma tendencia y que los valores son similares. Por otro lado, la figura 17 muestra los resultados de presión del caso 1, pero empleando el modelo LES – WALE. También se aprecia que los resultados de ambos puntos tienen el mismo comportamiento y valores similares. Finalmente, la gráfica comparativa de la figura 18 muestra las curvas presión del punto 1 para ambos modelos. Es apreciable una tendencia y valores de presión similares para ambos modelos. Sin embargo, el modelo LES – WALE muestra una mayor sensibilidad a la captación de las fluctuaciones de la presión. El mismo análisis se puede hacer para los casos 2 y 3, a partir de las figuras 19, 20, 21, 22, 23 y 24.

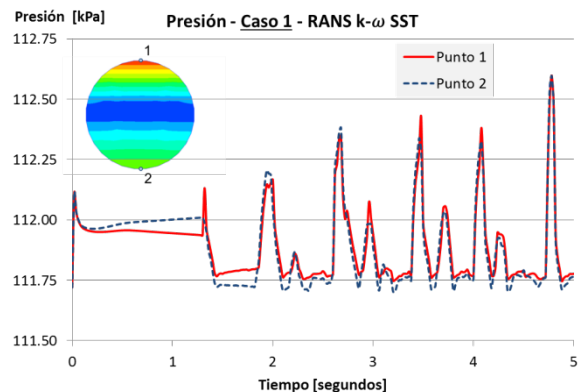


Figura 16: Variación de presión de dos puntos - Caso 1. Modelo RANS $k - \omega$ SST

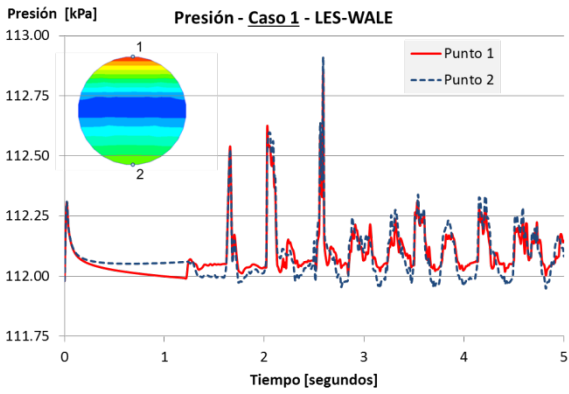


Figura 17: Variación de presión de dos puntos - Caso 1. Modelo LES – WALE

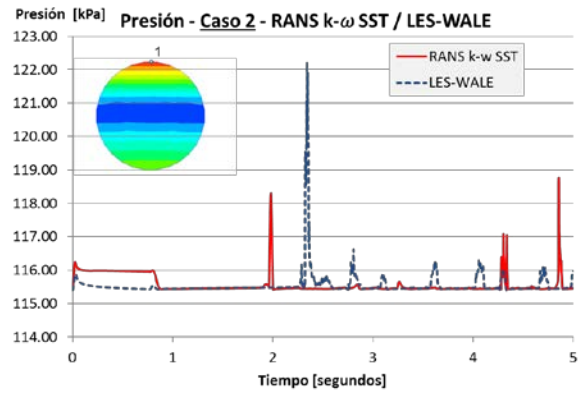


Figura 21: Comparación de resultados RANS y LES - Caso 2.

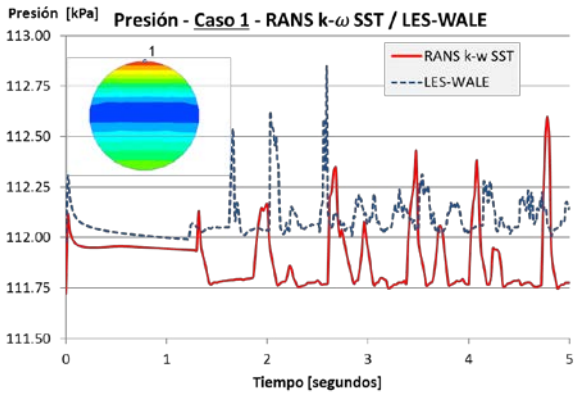


Figura 18: Comparación de resultados RANS y LES - Caso 1.

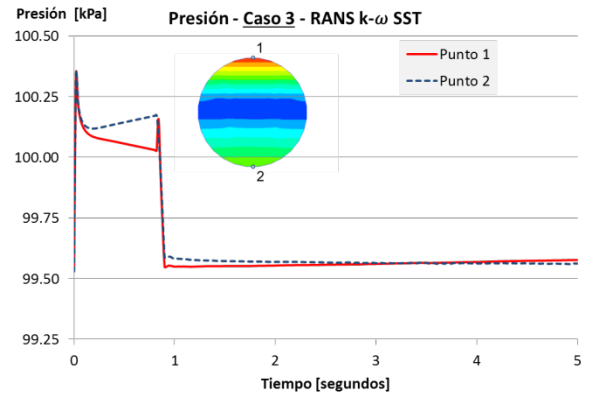


Figura 22: Variación de presión de dos puntos - Caso 3. Modelo RANS $k - \omega$ SST

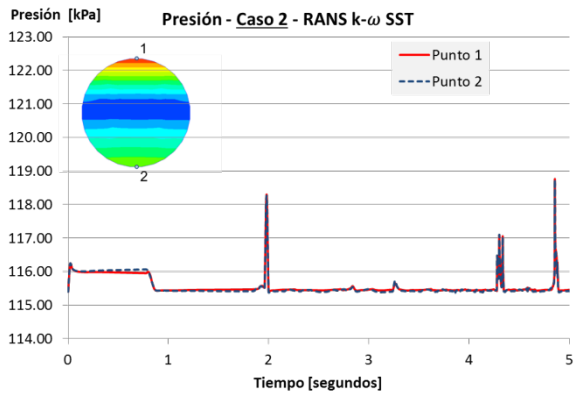


Figura 19: Variación de presión de dos puntos - Caso 2. Modelo RANS $k - \omega$ SST

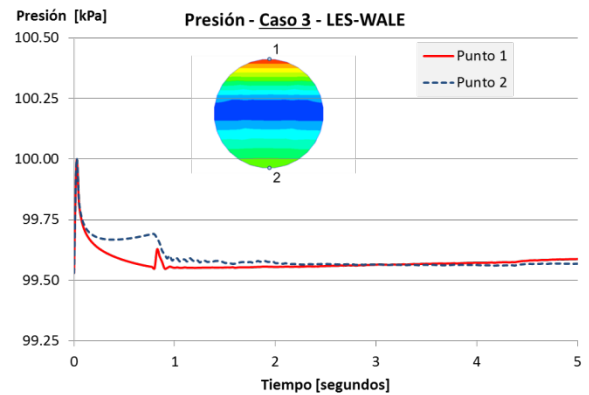


Figura 23: Variación de presión de dos puntos - Caso 3. Modelo LES – WALE

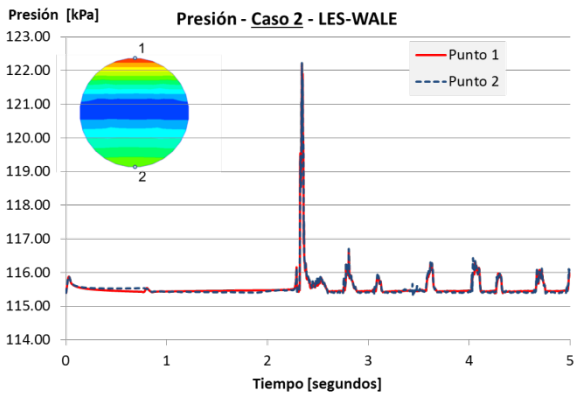


Figura 20: Variación de presión de dos puntos - Caso 2. Modelo LES – WALE

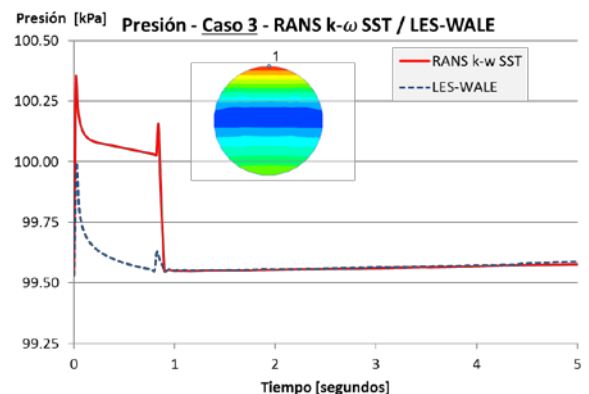


Figura 24: Comparación de resultados RANS y LES - Caso 3.

Es importante mencionar que todos los análisis se realizaron con una licencia de investigación del software ANSYS FLUENT, en una Workstation SUPERMICRO con procesamiento paralelo de 56 procesadores Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2697 v3 @ 2.60GHz, con 256 GB de memoria RAM y disco duro en estado sólido. Con estas características computacionales, para un análisis de 5 s, el tiempo de CPU fue de 20 a 24 horas en las simulaciones con el modelo RANS $k - \omega$ SST y de 50 a 60 horas en las simulaciones con el modelo LES – WALE.

5. Conclusiones

Cualitativamente, considerando los patrones de flujo, los dos modelos de turbulencia empleados para el análisis del flujo bifásico agua-aire en la tubería horizontal responden adecuadamente a los resultados experimentales, plasmados en la figura 1 en el mapa de Mandhane. La figura refleja que las tres condiciones de flujo analizadas deberían generar el patrón de flujo slug, lo cual se ha logrado en los casos 1 y 2, sin embargo, los resultados numéricos del caso 3 no se corresponden adecuadamente con el resultado experimental. Esto puede deberse a algún error en la configuración de la simulación que es necesario revisar, pero no influye en la comparación entre los dos modelos utilizados.

Desde el punto de vista cuantitativo y de comportamiento, los valores y la tendencia de la variable de interés, que es la distribución de la presión en la pared de la tubería en función del tiempo, ofrece resultados similares al emplear ambos modelos de turbulencia. Sólo puede apreciarse que el modelo LES – WALE es más sensible y capta con mayor detalle las fluctuaciones de la presión.

Teniendo en cuenta que los resultados de las simulaciones desarrolladas no presentan grandes diferencias entre los dos modelos de turbulencia utilizados y que el modelo LES – WALE es aproximadamente 2.5 veces más costoso en tiempo de CPU que el modelo RANS $k - \omega$ SST, se considera que este último es más adecuado para estudiar el comportamiento de la presión variable en el tiempo sobre la pared de la tubería.

Referencias

- [1] J. M. Fernández Oro, *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Reverté, 2012.
- [2] H. K. (Henk K. Versteeg and W. (Weeratunge) Malalasekera, *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson Education Ltd, 2007.
- [3] E. Bodenschatz and M. Eckert, *Prandtl and the G"ottingen School*. 2011.
- [4] A. Terziev, I. Antonov, and R. Velichkova, "Wind Data Analysis and Wind Flow Simulation Over Large Areas", *Math. Model. Civ. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–8, 2014.
- [5] A. Dhunny, F. Toja-Silva, C. Peralta, M. Lollchund, and S. Rughooputh, "Computational fluid dynamics simulation and full-scale experimental model inter-comparison of the wind flow around a university campus," *Wind Eng.*, vol. 41, no. 1, pp. 43–54, 2017.
- [6] N. Koutsourakis, J. G. Bartzis, and N. C. Markatos, "Evaluation of Reynolds stress, k- ϵ and RNG k- ϵ turbulence models in street canyon flows using various experimental datasets," *Environ. Fluid Mech.*, vol. 12, no. 4, pp. 379–403, 2012.
- [7] N. M. Murad, J. Naser, F. Alam, and S. Watkins, "Simulation of Vehicle A-Pillar Aerodynamics using various Turbulence Models," *Australasian Fluid Mechanics Conference*, The University of Sydney, Sydney, Australia, 2004.
- [8] H. Zhang, Y. Wu, and Y. Li, "Evaluation of RANS turbulence models in simulating the corner separation of a high-speed compressor cascade," *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.*, vol. 9, no. 1, pp. 477–489, 2015.
- [9] A. Khaleghi, M. Pasandideh-Fard, M. Malek-Jafarian, and Y. M. Chung, "Assessment of common turbulence models under conditions of temporal acceleration in a pipe," *J. Appl. Fluid Mech.*, vol. 3, no. 1, pp. 25–33, 2010.
- [10] S. Vijiapurapu and J. Cui, "Performance of turbulence models for flows through rough pipes," *Appl. Math. Model.*, vol. 34, no. 6, pp. 1458–1466, 2010.
- [11] S. Y. Razavi and M. M. Namin, "Numerical Model of Slug Development on Horizontal Two-phase Flow", *Int. Conf. on Recent Trends in Transportation, Environmental and Civil Engineering*, pp. 53–57, 2011.
- [12] T. Frank, "Numerical Simulation of Slug Flow Regime for an Air-Water Two-Phase Flow in Horizontal Pipes," *11th Int. Top. Meet. Nucl. React. Therm.*, pp. 1–13, 2005.
- [13] X. Liu, W. Chen, L. Liu, and D. Liu, "The numerical simulation of oil-water two phase flow in horizontal pipeline based on the VOF model," *AIP Conference Proceedings*, vol. 0, no. 2, pp. 741–745, 2013.

- [14] F. Li, J. Cao, M. Duan, C. An, and J. Su, “Two-phase Flow Induced Vibration of Subsea Span Pipeline,” pp. 1153–1160, 2016.
- [15] C. An and J. Su, “Dynamic behavior of pipes conveying gas-liquid two-phase flow,” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 292, pp. 204–212, 2015.
- [16] L. Enrique, O. Vidal, O. Mauricio, H. Rodriguez, and N. Mureithi, “Structural Excitation Response of a Straight Pipe Subjected To Air-Water Internal Flow”, *Tercer Encontro Brasileiro sobre Ebulição, Condensação e Escoamentos Multifásicos*, Curitiba, Brasil, 7 - 8 de Maio de 2012
- [17] S. Miwa, M. Mori, and T. Hibiki, “Two-phase flow induced vibration in piping systems,” *Prog. Nucl. Energy*, vol. 78, no. 2015, pp. 270–284, 2015.
- [18] M. T. Pittard, R. P. Evans, R. D. Maynes, and J. D. Blotter, “Experimental and numerical investigation of turbulent flow induced pipe vibration in fully developed flow,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 75, no. 7, pp. 2393–2401, 2004.
- [19] V. Yakhot, S. A. Orszag, S. Thangam, T. B. Gatski, and C. G. Speziale, “Development of turbulence models for shear flows by a double expansion technique,” *Phys. Fluids A Fluid Dyn.*, vol. 4, no. 7, pp. 1510–1520, 1992.
- [20] T.-H. Shih, W. W. Liou, A. Shabbir, Z. Yang, and J. Zhu, “A new $k-\epsilon$ eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows,” *Comput. Fluids*, vol. 24, no. 3, pp. 227–238, Mar. 1995.
- [21] B. Andersson, Computational fluid dynamics for engineers. *Cambridge University Press*, 2012.
- [22] D. C. Wilcox, “Multiscale model for turbulent flows,” *AIAA J.*, vol. 26, no. 11, pp. 1311–1320, Nov. 1988.
- [23] F. R. Menter, “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications,” *AIAA J.*, vol. 32, no. 8, pp. 1598–1605, Aug. 1994.
- [24] J. López, H. Pineda, D. Bello, and N. Ratkovich, “Study of liquid-gas two-phase flow in horizontal pipes using high speed filming and computational fluid dynamics,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 76, pp. 126–134, 2016.
- [25] C. Vallée, T. Höhne, H. M. Prasser, and T. Sühnel, “Experimental investigation and CFD simulation of horizontal stratified two-phase flow phenomena,” *Nucl. Eng. Des.*, vol. 238, no. 3, pp. 637–646, 2008.
- [26] L. E. Ortiz-Vidal, O. M. H. Rodriguez, and N. W. Mureithi, “An Exploratory Experimental Technique to Predict Two-Phase Flow Pattern From Vibration Response,” *ASME2013 Press. Vessel. Pip. Conf. Vol. 4 Fluid-Structure Interact.*, p. V004T04A061, 2013.
- [27] J. M. Mandhane, G. A. Gregory, and K. Azul, “A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes,” *Int. J. Multiph. Flow*, vol. 1(4), 1974.
- [28] P. J. K. Pouraria H., Seo J. K., “Numerical Modeling of two – phase oil – water flow patterns in a subsea pipeline,” *J. Ocean Eng.*, vol. 115, pp. 135–148, 2016.