

Simulación Numérica de un Arreglo Generador de Regímenes de Flujo Bifásico (Agua – Aire) en Tubería Horizontal

Ing. Luis Rolando Mendez Miguel¹ y MC Iván Juárez Sosa²

Resumen—Este trabajo presenta los resultados obtenidos de las simulaciones del flujo bifásico (agua - aire) en una sección del arreglo de tubería propuesta de 1 in de diámetro nominal con una sección de desarrollo del fluido de 2.5 metros de longitud y la sección de prueba de 1.5 metros, donde se pretende recrear el régimen de flujo estratificado. Las simulaciones se realizaron en el software ANSYS Fluent utilizando la dinámica de fluidos computacionales (CFD) por sus siglas en inglés, los resultados se validaron con el mapa de regímenes de flujo bifásico de Mandhane et al. (1974), en donde se compararon los regímenes de flujos obtenidos con las velocidades superficiales del aire y agua y la determinación de los límites operacionales del sistema.

Palabras clave—Régimen de flujo estratificado, tubería horizontal, flujo bifásico, CFD, agua – aire.

Introducción

Los flujos multifásicos se encuentran presentes en muchos aspectos de la vida cotidiana tanto así, que no se les presta atención, más, sin embargo, cuando hablamos de un fluido con un alto costo económico entonces se vuelve importante medirlo correctamente, en el caso de los flujos monofásicos no se tiene problema con esa situación, ya que los estudios, modelos, etc. se han desarrollado hasta tal punto que se miden con alta precisión y baja incertidumbre, mientras que en los flujos multifásico no ocurre de esa manera, esto radica en su naturaleza física, que es compleja (Norwegian, 2005). Dado a lo anterior, surge la necesidad de mejorar la medición de los flujos multifásicos y para esto se requiere saber cómo es el comportamiento de las fases cuando viajan juntas ya sea separadas o mezcladas, a este comportamiento se le conoce como regímenes de flujo los cuales se desarrollan debido a características específicas como, diámetro de tubería, inclinación, velocidades de las fases, propiedades físico – químicas de las fases, entre otras (Basu, 2018). Para este caso, se pretende determinar los límites operacionales para desarrollar el flujo tipo estratificado en una tubería específica, considerando como fluidos el agua y aire, validando esta prueba con la comparación del mapa de regímenes de Mandhane et al. (1974).

Descripción del Método

El método utilizado se divide en cinco etapas esenciales las cuales darán las pautas para el desarrollo de la investigación realizada, con el fin de cumplir los objetivos. A continuación, se describen las etapas:

Etapa 1: Diseño conceptual del arreglo

En esta etapa se propone un concepto del arreglo generador de regímenes de flujo bifásico con base en las investigaciones realizadas de proyectos similares, tomando en cuenta todos los accesorios y equipos necesarios para obtener las condiciones operacionales requeridas.

Etapa 2: Diseño del arreglo preliminar

Con base al diseño conceptual del arreglo, se realiza el modelo 3D en software especializado, agregando todas las partes que lo componen como los accesorios, tuberías, válvulas, equipos, etc. con el fin de tener el dimensionamiento del arreglo y obtener la sección que se utilizara en la siguiente etapa (simulación numérica CFD por sus siglas en inglés).

Etapa 3: Simulación numérica CFD

En esta etapa se simula, mediante Dinámica de Fluidos Computacional el flujo bifásico (agua – aire) tipo estratificado con el diseño propuesto del arreglo de tuberías, accesorios, etc. para realizar esta etapa se tienen que seguir los siguientes pasos:

- Modelo 3D para utilizar en el CFD (etapa de volumen de control “geometría”), se refiere a la sección que se utiliza en la simulación numérica, en este caso es un extracto del arreglo general.
- Etapa de mallado, en este paso se trata de discretizar el modelo (geometría) utilizado en la simulación con el fin de resolver las ecuaciones de una mejor manera, se debe tener en cuenta que es un proceso iterativo hasta obtener el mallado adecuado para el análisis.

¹ Ing. Luis Rolando Mendez Miguel es estudiante de posgrado del centro CIATEQ A.C., de Querétaro, Querétaro, México. luis.rolando.mendez@outlook.es (autor corresponsal)

² MC Iván Juárez Sosa es Gerente del área de Manufactura virtual, Lean y CAD / CAE en CIATEQ A.C., de Querétaro, Querétaro, México. ivan.juarez@ciateq.mx

- Modelos utilizados, aquí se describen de forma breve los modelos utilizados en el software especializado (ANSYS Fluent), de esta manera se podrá replicar la simulación.
- Condiciones iniciales y condiciones de frontera, en esta sección se plantean las condiciones que se utilizan en la simulación con el fin de obtener los resultados con base a un mapa de regímenes de flujo bifásico.
- Resultados obtenidos de la simulación CFD.

Etapa 4: Validación del arreglo

Esta etapa comprende validar la simulación numérica (CFD), comparando de manera directa los resultados obtenidos en el análisis con los resultados dados de un mapa de regímenes de flujo de Mandhane et al. (1974).

Etapa 5: Límites operacionales

Con base en los resultados obtenidos en la simulación se determinan los límites operacionales que garanticen el régimen de flujo bifásico (agua – aire) tipo estratificado.

Desarrollo del Análisis

Resumen de resultados

Etapa 1: Diseño conceptual del arreglo. En esta etapa se desarrolla el concepto después de haber realizado una investigación exhaustiva y de manera iterativa, con el fin de obtener el concepto propuesto el cual se muestra en la figura 1. Se comenzará el diseño a partir de este concepto.

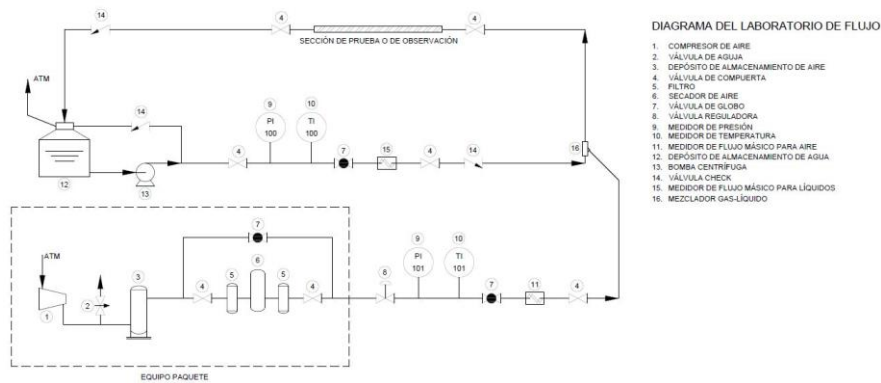


Figura 1. Concepto del arreglo.

Etapa 2: Diseño de arreglo preliminar. El arreglo está conformado por válvulas, accesorios, equipos, soportes, etc. Que forman el sistema de generación de regímenes de flujo bifásico (agua – aire), fue desarrollado con el software Autodesk Inventor, en la figura 2, se muestra el arreglo, también se indica las partes principales.

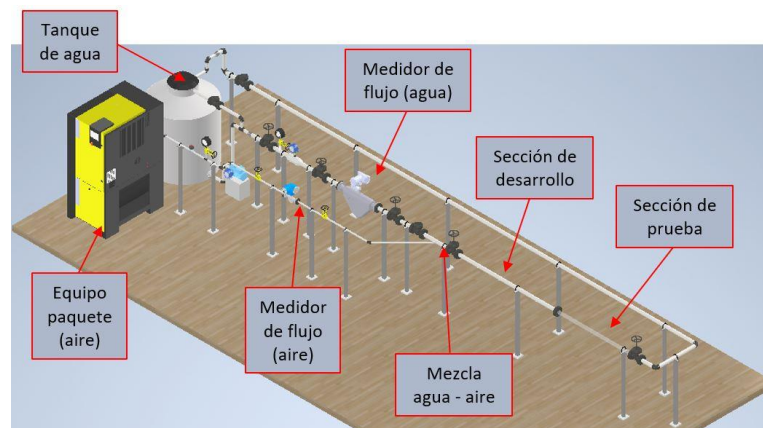


Figura 2. Arreglo preliminar con indicaciones de las secciones principales.

Etapa 3: Simulación numérica CFD. Esta etapa se divide en cinco partes tales como geometría utilizada, mallado, modelos utilizados y condiciones iniciales, condiciones de frontera y resultados. En esta sección se utiliza el software especializado ANSYS Fluent.

La geometría por utilizar (etapa de volumen de control) es el primer paso dentro de la simulación, esto quiere decir, que se selecciona una sección del arreglo general, donde radica el interés de saber lo que sucede, en específico se requiere saber el comportamiento del flujo bifásico en esta sección de tubería. En la figura 3 se encerró en color rojo la sección de prueba para la simulación, esta debe tener dos entradas (agua y aire), una salida (mezcla) y una longitud de tubería recta.

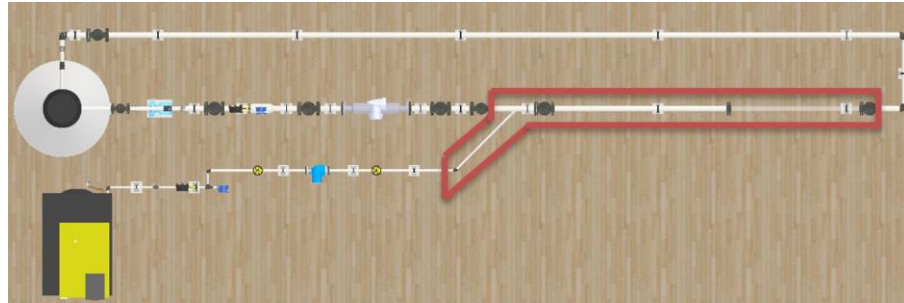


Figura 3. Sección que se utiliza del arreglo general.

De la figura 3, se obtiene el modelo (geometría) a utilizar en la simulación, para obtener mejores resultados se debe simplificar el modelo 3D, sin que afecta la simulación CFD, en la figura 4, se muestra el modelo simplificado que tiene las siguientes características, cuenta con una tubería principal de 25.4 mm (1 in) de diámetro nominal donde en un extremo entra el agua (inlet water) y del otro extremo sale la mezcla (agua – aire) (outlet), cuenta con una tubería secundaria de 12.7 mm (0.5 in) donde entra el aire (inlet air), la tubería principal cuenta con una longitud de 4 metros donde 2.5 metros son aplicados para el desarrollo del fluido y 1.5 metros son de la sección de observación.



Figura 4. Modelo simplificado para simulación CFD.

En la figura 4, se observan las entradas tanto de agua como de aire y del otro extremo observamos la salida de la mezcla (agua – aire).

Etapa de mallado, esta consiste en descomponer el modelo simplificado mostrado en la figura 4 en partes muy pequeñas con formas específicas, se le conoce como discretización del dominio, para el presente trabajo se considera el modelo tridimensional, de tal manera se da a entender que se utilizara volúmenes finitos. Esta etapa radica de un proceso iterativo en el cual se busca hallar el mejor mallado para la aplicación que se desea realizar, a continuación, se describe lo realizado para este trabajo.

Se inició con un mallado estándar del tipo tetraedros, el indicador utilizado para saber si el mallado es correcto, se llama “skewness”, con él se evalúa el mallado generado, el “skewness” debe ser menor a 0.85 para decir que el mallado está bien, teniendo en cuenta que la simulación es de flujo bifásico, se considera de gran importancia lo que sucedo cerca de la pared de la tubería conocida como capa límite, cuando es de interés las fuerzas viscosas como en este caso, debido a lo anterior se debe refinar la malla en esta área para eso se necesita el comando “inflation” el cual discretiza la zona deseada en secciones más pequeñas, para seguir mejorando el mallado se ejecuta el comando “total thickness” para este proyecto se aplicó 2.5 mm, para terminar con el mallado se realizaron dos pasos más, se cambia la opción de lineal a cuadrática aumento el número de elementos y por último la malla se pasa a octaedros, como se muestra en la figura 5.

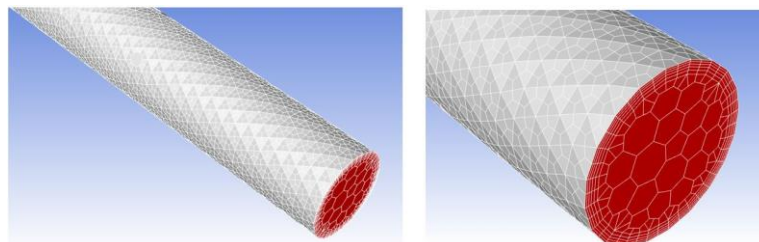


Figura 5. Mallado utilizado para la simulación.

Modelos utilizados, en esta sección se describen de forma breve los modelos matemáticos utilizados en la simulación del flujo bifásico (aguas – aire) tipo estratificado.

Modelo VOF, el modelo “VOF” por sus siglas en inglés (Volume of Fluid) este es un modelo denominado multifásico que se encuentra en la librería del software ANSYS, este método se basa en que los fluidos que se encuentran en el sistema son inmiscibles entre ellos, de esta manera se crea una interfase. Unas de las características de este modelo es que soluciona un conjunto de ecuaciones que son momento, energía y masa, este modelo establece propiedades y variables de mezcla, como densidad y viscosidad es dado por el promedio ponderado volumétrico. A continuación, se muestra la ecuación general de mezcla utilizada en este método (VOF), se puede observar que la “y” representa cualquier propiedad o variable del flujo (David, 2016).

$$y_m = \sum y_i a_i$$

Ecuación 1. Ecuación general de mezcla utilizando el método (VOF).

Modelo de turbulencia k – ω, este modelo de turbulencia es el más completo, debido a que tiene una ecuación para modelar k y también un parámetro, este corresponde a la disipación de energía por unidad de volumen y tiempo. El modelo de turbulencia k – ω, es utilizado como cierre de las ecuaciones de Navier – Stokes promediadas por Reynolds (RANS), el modelo predice la turbulencia a partir de dos ecuaciones diferenciales parciales de las variables k – ω (David, 2016).

Gravedad, esta se utiliza debido a que es fundamental que la gravedad actúe sobre las fases de los fluidos, esta se debe tener en cuenta en la ecuación de momento. La dirección de la gravedad está establecida en -Y.

Condiciones iniciales y condiciones de frontera, las condiciones de frontera son los valores que se encuentran en los límites de la geometría, para este modelo 3D cuenta con cuatro tipos de condiciones de frontera, entrada al sistema aire (inlet air) correspondiente a una velocidad, entrada al sistema agua (inlet water) correspondiente a una velocidad, salida del sistema (outlet) correspondiente a una presión y el límite del sistema (pared de la tubería) representa una condición de no desplazamiento, estas fronteras se observan en la figura 6.



Figura 6. Límites de la geometría.

Las condiciones iniciales del sistema son las velocidades de cada fase en este caso es la velocidad del aire y la velocidad del agua, se considera una matriz de velocidades, que representan los diferentes escenarios propuestos con base en el mapa de regímenes de flujo de Mandhane et al. (1974), se observa en la tabla 1.

Velocidad de agua m/s	Velocidad de Aire m/s						
	0.1	0.3	0.5	0.8	1	2.5	
0.01	E	E	E	E	E	E	0.01
0.025	E	E	E	E	E	E	0.025
0.05	E	E	E	E	E	E	0.05
0.075	E	E	E	E	E	E	0.075
0.1	E	E	E	E	E	E	0.1

E Escenario

Tabla 1. Matriz de velocidades del aire / agua para los escenarios.

Las características y condiciones que se aplican en la simulación por medio de ANSYS Fluent son las siguientes, **tubería**, diámetro interno de 27.86 mm, rugosidad de 0.0015mm, 4 metros de longitud de tubería, horizontal. **Aire**, velocidad variable de la tabla 1, presión de 1.01325 bar (atm), temperatura de 20°C (estándar), densidad de 1.2051 kg/m3 (estándar), viscosidad de 0.018CP (estándar). **Agua**, velocidad variable de la tabla 1,

densidad de 998.2 kg/m³, viscosidad de 1 CP, tensión superficial de 72.8 din/cm. Los **resultados** se plasman en una matriz con las velocidades como ejes, eje X, velocidad del aire y eje Y, velocidad del agua.

Resultados obtenidos, los resultados se muestran en la tabla 2, donde se puede apreciar el comportamiento del fluido, el color rojo representa el aire y el azul el agua, se realizó 30 escenarios diferentes con las condiciones mostradas tanto en la tabla 1.

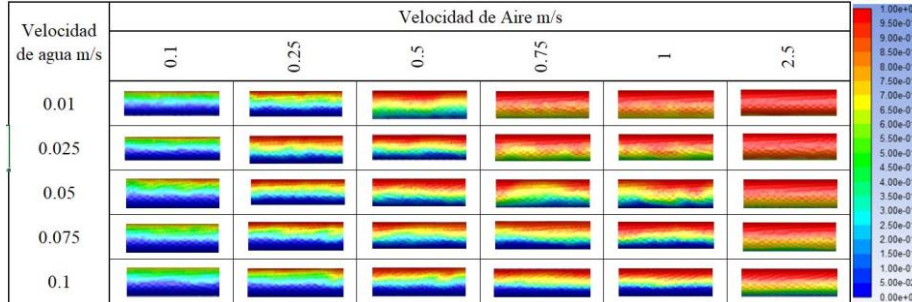


Tabla 2. Resultados obtenidos de la simulación CFD para el régimen de flujo tipo estratificado.

Con las condiciones utilizadas se puede generar el flujo tipo estratificado con base a los resultados obtenidos, más sin embargo dentro de esta matriz se puede apreciar que bajo ciertas condiciones de velocidades favorecen la generación del flujo estratificado, por ejemplo, la velocidad 0.1 m/s del agua con las velocidades de 0.5, 0.75 y 1 m/s del aire.

Etapa 4: Validación del arreglo. La validación se realiza mediante la observación y comparación de los resultados obtenidos conforme a la distribución de las fases dentro de la tubería con respecto al mapa de patrones de flujo de Mandhane et al. (1974). Como se muestra en la figura 7.

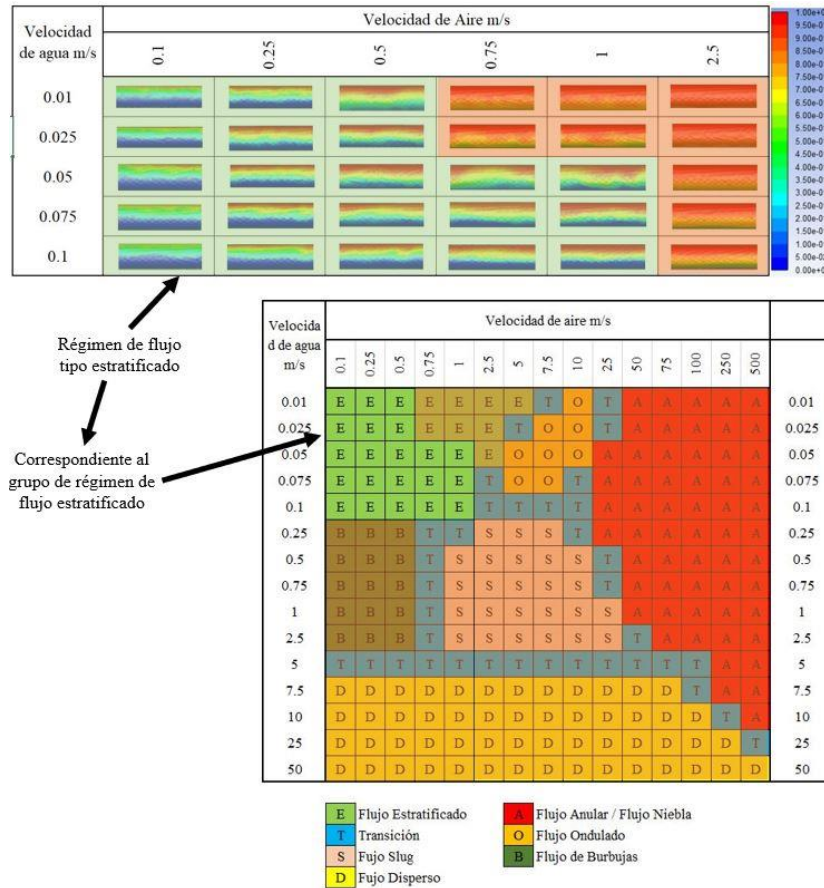


Figura 7. Validación de CFD y mapa de Mandhane et al. (1974).

Las condiciones utilizadas del mapa de Mandhane et al. demuestran el tipo de régimen que se genera, en este caso tipo estratificado, el cual se puede ver en los resultados obtenidos mediante la simulación en el software ANSYS, de tal manera se valida los resultados obtenidos. Las secciones marcadas en verde de la figura 7, pertenece al flujo tipo estratificado que se compara con los resultados.

Etapa 5: Límites operacionales. Los límites operaciones van de la mano con los resultados obtenidos en las simulaciones, se refiere a los escenarios en los cuales se logra generar el régimen de flujo estratificado. Con base en los resultados CFD, los intervalos de operación del arreglo son los descritos en la tabla 3.

Velocidades de las fases (m/s)		
Límite	Fase líquida (agua)	Fase gaseosa (aire)
Inferior	0.01	0.1
Superior	0.1	1

Tabla 3. Límites de operación para generar el flujo tipo estratificado.

Conclusiones

Los resultados demuestran la generación del régimen de flujo tipo estratificado en tubería horizontal de 25.4 mm (1 in) de diámetro nominal con una longitud de desarrollo del fluido de 2.5 m y una sección de prueba de 1.5 m de longitud, donde internamente está compuesta por dos fases líquido y gas (flujo bifásico) utilizando agua y aire. Se desarrollo treinta escenarios posibles recomendados por el mapa de regímenes de flujo bifásico Mandhane et al. (1974), sin embargo, dentro de estos escenarios solo el 70% presenta el régimen de flujo tipo estratificado con una pequeña zona mezclada de aire/agua y tan solo el 43% representa un régimen de flujo estratificado bien definido.

Por lo descrito en este trabajo, se afirma que el arreglo generador de régimen de flujo bifásico tipo estratificado simulado en el software ANSYS Fluent, genera adecuadamente el flujo estratificado obteniendo visualmente el régimen siempre y cuando se mantengan las velocidades o límites de operación mostrados en la tabla 3.

Referencias

- Basu, S. "Plant Flow Measurement and Control Handbook", London: Academic Press. 2018.
- David H.H.M. "Modelamiento en CFD de flujo bifásico (agua-aire) anular ascendente en tubería vertical", Universidad de las Andes. 2016.
- Mandhane, J., Gregory, G. y Aziz (1974). Critical Evaluation of Holdup Prediction Methods for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes, Society of Petroleum Engineers.
- Norwegian Society for Oil and Gas Measurement. "Handbook of Multiphase Flow Metering". Revision 2. marzo 2005.

Notas Biográficas

El **Ing. Luis Rolando Mendez Miguel** es estudiante de posgrado del programa maestría en manufactura avanzada en CIATEQ A.C. y profesionalista en el área de medición multifásica, perteneciente a la dirección de sistemas de medición de CIATEQ A.C., en Querétaro, Querétaro, México.

El **MC. Iván Juárez Sosa** es gerente de Manufactura Virtual, Lean y CAD / CAE, perteneciente a la Dirección de Ingeniería Virtual y Manufactura de CIATEQ A.C., desarrollando y gestionando proyectos de modelado y simulaciones en la rama de termofluidos