

Jet Turbulento en Dos Fases
Silvina Cancelos y Fabian J. Bonetto
Instituto Balseiro/CAB-CNEA, Conicet

Resumen

En este trabajo analizamos numericamente el caso de un jet bifásico vertical ascendente. Realizamos un cálculo del sistema bifásico, en el que se utilizó el modelo de dos fluidos promediado sobre un conjunto de realizaciones posibles. Se llevaron las ecuaciones a una forma bidimensional y se realizó un cálculo integral. Para ello utilizamos funciones de forma que contenían la información acerca de la dependencia funcional de las variables en la dirección horizontal. Las funciones de forma, se obtuvieron a partir de un cálculo de un jet de líquido turbulento utilizando el modelo k-epsilon. Los resultados obtenidos muestran un comportamiento adecuado de las ecuaciones, pero debido a las simplificaciones utilizadas la solución no representa exactamente al sistema real.

Abstract

In this work we analyze the case of a upward two-phase vertical jet. We performed a calculation of the two-phase system, in which we use an ensemble averaged two-phase system. We reduced the equations to its 2D form and we use an integral technique. For that purpose we use form functions that contain the information of the functional dependence on the horizontal direction. The function form were obtained from a turbulent liquid jet calculation using k-epsilon model. The obtained results show a reasonable behavior but due to the simplifications we used the solution does not follow the real system.

Introducción

La amplia utilización de flujos de dos fases en la mayoría de las aplicaciones tecnológicas actuales, genera la necesidad de caracterizar cualitativamente y cuantitativamente los fenómenos involucrados en este tipo de flujo.

Este tipo de flujos existe en los reactores nucleares, en reactores químicos, en los equipos de generación eléctrica que emplean turbinas de vapor, en la industria del petróleo y sus derivados, en la refrigeración de componentes electrónicos, etc.

En las aplicaciones que involucran el uso de flujo de dos fases, las variables de mayor interés son la fracción de vacío y el área interfacial.

La predicción de la fracción de vacío en aplicaciones nucleares es de vital importancia, ya que influye en la moderación de neutrones y en el intercambio de calor.

El área interfacial determina la transferencia de masa, momento y energía entre las fases, y su determinación es de gran interés en todas las aplicaciones relacionadas con flujo de dos fases.

Para caracterizar el sistema bifásico en forma teórica, es necesario resolver las ecuaciones de conservación de masa, momento y energía de cada fase, y las ecuaciones constitutivas de transferencia en las interfases. Estas ecuaciones tienen condiciones de borde variables que dependen de la posición de las burbujas en cada instante, por lo tanto la resolución exacta del sistema es hasta el momento imposible, y por otro lado en la mayoría de las aplicaciones basta con conocer valores medios de las propiedades del sistema. Por esta razón los modelos teóricos utilizados para analizar los sistemas de flujo de dos fases se basan en algún tipo de promediado de las ecuaciones de conservación. Diferentes modelos para flujos bifásicos basados en la fenomenología del flujo, se propusieron en el pasado. El problema de estos modelos es que son aplicables solo a casos particulares.

Los flujos bifásicos, son generalmente turbulentos. En cálculos parabólicos de un jet de líquido turbulento¹ usando el modelo de turbulencia k- ϵ , Sini & Dekeyser (1987) encontraron

¹ Si se trata el problema del jet de líquido como un problema de capa límite, el problema pasa a ser parabólico en la dirección vertical.

que los cálculos y los experimentos se ajustaban satisfactoriamente, excepto en una pequeña región cerca de la entrada del jet. Estos resultados, se deben en parte al hecho de que ellos analizaron un jet libre de bordes, en el cual el flujo es débilmente anisotrópico. El próximo nivel de complejidad en la simulación de flujos bifásicos turbulentos es el uso de un modelo de tensiones algebraico (ASM Algebraic Stress Model). Muchos métodos diferentes se pueden encontrar en la literatura. Para el caso particular de un jet plano, la performance del modelo ASM es similar a la del modelo k- ϵ . Se podría esperar que el modelo anisotrópico ASM produjera mejores resultados que el modelo k- ϵ isotrópico para la distribución de presión. Sin embargo, cuando el modelo ASM propuesto por Gibson & Launder (1976) se utilizó para la evaluación de un jet plano, la distribución de presiones en la dirección vertical (Bergstrom, 1992) dio prácticamente lo mismo que el cálculo usando el modelo k- ϵ .

Debido a esta similitud entre los cálculos realizados utilizando el modelo k- ϵ y el modelo ASM, por simplicidad, en este trabajo se utilizó el modelo k- ϵ .

En muchos problemas bidimensionales de fluido dinámica existe una solución autosemejante del problema, esto simplifica el cálculo, pasando a un problema de ecuaciones diferenciales ordinarias. Wilcox (1998) en su libro "Turbulence Modeling for CFD" obtuvo la solución autosemejante de un jet de líquido turbulento utilizando el modelo de capa límite y el modelo de turbulencia k- ϵ .

Para el caso de flujo de dos fases se propusieron modelos basados en la mecánica del continuo, comúnmente conocidos como modelos de dos fluidos (TFM) [Ishii, 1975; Delhay, 1968 and Drew & Lahey, 1979]. Uno de los modelos de flujo de dos fases más completos desarrollados hasta el momento fue propuesto por Drew y Pasman (1999). Esta teoría fue utilizada por Carrica et al. (1998) para modelar el flujo alrededor de la superficie de una fragata. En este trabajo se predijo una modificación significativa en el campo de burbujas de fondo en la estela del barco, donde la disminución de burbujas ocurre debido a una reducción en el tamaño de las burbujas debido a la disolución. Este efecto se debe a los fenómenos de distribución de fase laterales y a la generación de una pluma emergente en las cercanías de la estela que lleva a las burbujas de menor tamaño hacia la superficie.

Es importante notar que en un flujo bifásico, la turbulencia del líquido tiene dos componentes, la turbulencia inducida por las tensiones de corte, presente en el caso de una única fase, y la turbulencia inducida por las burbujas, que es una especie de turbulencia virtual, ya que se debe a la fluctuación en la velocidad del líquido en un punto debido al bloqueo de las burbujas.

La realización de experimentos relacionados con flujo de dos fases y su modelado es de vital importancia, ya que con ellos se puede verificar que los modelos teóricos sean adecuados y obtener valores para las constantes empíricas utilizadas.

La mayoría de los procesos de gran escala no pueden ser llevados a escalas menores para realizar estudios experimentales, debido a que muchas variables que a gran escala tienen una importancia fundamental, tienen poca influencia cuando el problema se reduce a pequeña escala. El hecho de hacer experimentos a pequeña escala para poder contrastarlos con los modelos teóricos permite un posterior modelado de procesos a gran escala. Este trabajo consiste en la caracterización de un flujo bifásico bidimensional y tridimensional. El caso del jet bifásico turbulento vertical ascendente, es probablemente el caso más simple y no trivial de ser estudiado en flujo de dos fases.

La principal característica de muchos flujos bifásicos es el desconocimiento de las posiciones exactas de los constituyentes del flujo en un instante particular, lo que imposibilita especificar condiciones de contorno y condiciones iniciales. Para algunas predicciones esto no es importante ya que en general interesa conocer las propiedades medias del flujo. Para poder caracterizar el sistema es necesario realizar algún tipo de promediado. El promediado que utilizamos en este trabajo es el denominado ensemble average (Drew, D.A. y Pasman, S.L., 1999), que permite la interpretación de los fenómenos en términos de repetibilidad del flujo.

Si se tiene un conjunto de experimentos con las mismas condiciones de borde e iniciales

medias, y se quiere obtener el valor medio de ciertas propiedades, la distribución de partículas y sus velocidades medias, se puede tomar un conjunto de realizaciones y promediarlas.

Si se realizan infinitas pruebas, es posible, que algunas configuraciones sean más probables que otras, por esta razón, se define la probabilidad de ocurrencia de un dado suceso, $P(\xi)$. En el caso de tener un conjunto de muestras finito (N) y que las realizaciones sean independientes, $P(\xi)=1/N$.

El valor medio de una cierta propiedad, se define como,

$$\bar{f}(\mathbf{r}, t) = \int_S f(\mathbf{r}; \xi) P(\xi) d\xi \quad \text{con} \quad \int_S P(\xi) d\xi = 1 \quad (1)$$

siendo ξ una realización perteneciente a S , el conjunto de todas las posibles realizaciones.

Las ecuaciones de balance de masa, momento y energía son válidas localmente en cada realización para cada una de las fases independientemente. Dichas ecuaciones presentan la complejidad de poseer condiciones de borde que varían en el tiempo (problema de Stefan). Esto se debe al movimiento de las interfases que separan los componentes del flujo. Las propiedades son discontinuas, pero la masa, momento y energía de cada fase se deben conservar. Esto genera condiciones de salto, que son válidas a través de la interfase.

Condiciones de salto

Conservación de la masa

$$\rho_k (U_k - U_i) \cdot \hat{n} = 0 \quad (2)$$

Conservación del momento

$$[\rho_k U_k (U_k - U_i) + T] \cdot \hat{n} = m_i^\sigma \quad (3)$$

Donde el subíndice k indica la fase considerada, U_i es la velocidad de la interfase, \hat{n} es la normal unitaria a la interfase, m_i^σ es la tracción asociada con la tensión superficial, $m_i^\sigma = (H\sigma \hat{n} + \nabla_i \sigma)$ donde H es la curvatura media de la interfase, \hat{n} es la normal unitaria, y ∇_i denota el gradiente en coordenadas superficiales.

Una cantidad importante que se define es la función indicadora de una fase particular

$$\chi_k(\mathbf{r}, t; \xi) = \begin{cases} 1 & \text{si } \mathbf{r} \in k \text{ en la realización } \xi \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (4)$$

Las ecuaciones obtenidas después de modelar el término M_k con el modelo de celdas son, teniendo en cuenta las condiciones de salto [Bonetto, Drew, Lahey], son las siguientes,

Conservación del momento de la fase gaseosa

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial(\alpha_g \bar{\rho}_g \bar{U}_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_g \bar{\rho}_g \bar{U}_g \bar{U}_g) = \alpha_g \bar{\rho}_g \bar{b} - \alpha_g \nabla p \\
& - C_{vm} \alpha_g \bar{\rho}_l \left[\frac{\partial \bar{U}_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{U}_g \cdot \bar{U}_g) - \frac{\partial \bar{U}_l}{\partial t} - \nabla \cdot (\bar{U}_l \cdot \bar{U}_l) \right] \\
& - C_{rot} \alpha_g \bar{\rho}_l \bar{U}_r \times \nabla \times \bar{U}_g - C_L \alpha_g \bar{\rho}_l \bar{U}_r \times \nabla \times \bar{U}_l - \\
& (C_1 + C_2 - 2C_p - 2b_s) \alpha_g \bar{\rho}_l \bar{U}_r \cdot (\nabla \bar{U}_r)^T + \\
& (a_s - C_2) \alpha_g \bar{\rho}_l \bar{U}_r \cdot \nabla \bar{U}_r + (a_s - C_2) \alpha_g \bar{\rho}_l (\nabla \cdot \bar{U}_r) \bar{U}_r - \\
& \frac{C_D}{8} \bar{\rho}_l A_i \bar{U}_r \cdot \bar{U}_r - C_{TD} \bar{\rho}_l k_l \nabla \alpha_g
\end{aligned} \tag{5}$$

Conservación del momento de la fase líquida

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial(\alpha_l \bar{\rho}_l \bar{U}_l)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_l \bar{\rho}_l \bar{U}_l \bar{U}_l) = \nabla \cdot (\alpha_l \bar{\tau}_l) + \alpha_l \bar{\rho}_l \bar{b} - \alpha_l \nabla p + \\
& (C_p + b_s + b_l) \rho_l |U_r|^2 \nabla \alpha_g + \\
& C_{vm} \alpha_g \bar{\rho}_l \left[\frac{\partial \bar{U}_g}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{U}_g \cdot \bar{U}_g) - \frac{\partial \bar{U}_l}{\partial t} - \nabla \cdot (\bar{U}_l \cdot \bar{U}_l) \right] \\
& + C_{rot} \alpha_g \bar{\rho}_l \bar{U}_r \times \nabla \times \bar{U}_g + C_L \alpha_g \bar{\rho}_l \bar{U}_r \times \nabla \times \bar{U}_l + \\
& (C_1 + C_2 + 2b_l) \alpha_g \bar{\rho}_l \bar{U}_r \cdot (\nabla \bar{U}_r)^T + (C_2 + a_l) \alpha_g \bar{\rho}_l \bar{U}_r \cdot \nabla \bar{U}_r + \\
& (C_2 + a_l) \alpha_g \bar{\rho}_l (\nabla \cdot \bar{U}_r) \bar{U}_r + (a_s + a_l) \rho_l (\bar{U}_r \cdot \nabla \alpha_g) \bar{U}_r + \\
& \frac{C_D}{8} \bar{\rho}_l A_i \bar{U}_r \cdot \bar{U}_r + C_{TD} \bar{\rho}_l k_l \nabla \alpha_g
\end{aligned} \tag{6}$$

Siendo $\bar{U}_r = \bar{U}_g - \bar{U}_l$ la velocidad relativa promedio

Los últimos dos términos de la Ecs. (5) y (6) no salen del modelo de celdas, son empíricos, y tienen que ver con el Drag y con el efecto que la intensidad de la turbulencia genera en la fracción de vacío tratando de hacerla más uniforme.

Los valores de las constantes son los siguientes,

$$\begin{aligned}
a_s &= -\frac{9}{20} & b_s &= \frac{3}{20} & a_l &= -\frac{1}{20} & b_l &= -\frac{3}{20} & C_1 &= \frac{5}{4} & C_2 &= -\frac{9}{20} \\
C_{vm} &= \frac{1}{2} & C_{rot} &= \frac{1}{2} & C_p &= \frac{1}{4} & C_{TD} &= 0.1 & C_L &= 0.05
\end{aligned}$$

En este trabajo el diámetro de las burbujas es del orden de 1mm o mayor, consecuentemente, la tensión superficial tiene muy poca influencia y la presión del gas se considera igual a la presión del líquido ($p_l = p_g = p$).

Debido a la poca inercia de la fase gaseosa en comparación con la de la fase líquida, el tensor del gas no se considera.

Cálculo

Funciones de forma, calculo integral en dos dimensiones

Como primera aproximación para resolver el problema de un jet bifásico vertical ascendente, se tomaron la Ec. (5) y la Ec. (6) y se despreciaron términos de poca importancia.

Reemplazamos estas expresiones en las ecuaciones de flujo de dos. Las ecuaciones resultantes se escribieron de la forma,

Se integraron en x las componentes de M y b utilizando RungeKutta adaptivo de orden 4. Luego se invirtió la matriz M utilizando el algoritmo LU con pivoteo.

Este sistema se resolvió usando RungeKutta de orden 4 adaptivo. Por cada paso hay que hacer la integración de las componentes de M y b y la inversión de M .

Para realizar este cálculo se hizo un programa en C que calcula el valor de y a partir de este valor, se calculó el valor de las velocidades, la fracción de vacío y la presión.

Se resolvieron las ecuaciones para varios valores iniciales diferentes variando el valor de la constante C_D en las ecuaciones. En los resultados que se presentan en esta sección, se utilizó un valor de $C_D=0.3$ y un valor para el radio de las burbujas de $R=1$ mm. Las componentes de la matriz M y de b , se integraron para valores de la posición horizontal entre -0.05 m y 0.05 m. Debido a las funciones de forma utilizadas la integración en este rango da valores es similar a los obtenidos integrando en rangos mayores. Los valores de las condiciones iniciales para, se especificaron a una distancia de 1cm de la entrada de flujo bifásico al sistema, y se calcularon de forma tal que la fracción de vacío fuera de un 90%, las velocidades horizontales del líquido y del gas fueran cero y la presión tuviera un valor de donde el valor de 0.1m se eligió en base a la suposición de tener un jet bifásico plano en un sistema de 10 cm de altura. Las velocidades en la dirección vertical se obtuvieron a partir del caudal de líquido y aire propuestos.

Se observó que los valores de las velocidades verticales tienden a un valor límite, que es del orden de 0.5 m/s en el caso de las burbujas y 0.13 m/s en el caso del líquido.

En la Fig. 1 se observa el campo de velocidades del gas.

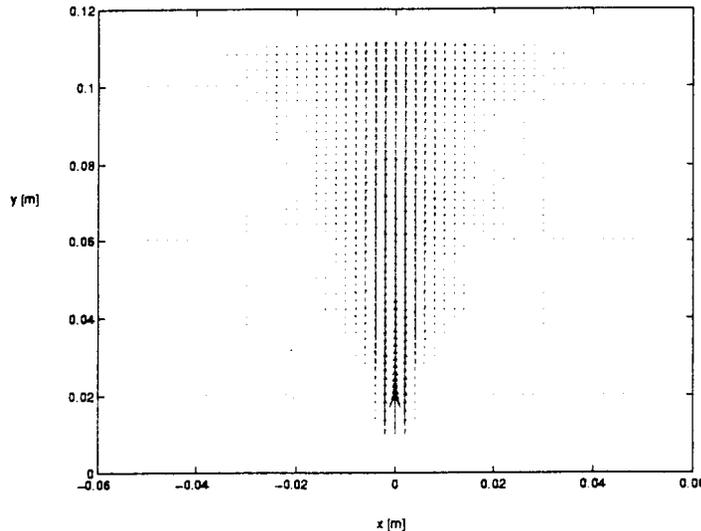


Figura 1. Campo de velocidades del gas.

Se resolvieron las ecuaciones del modelo de dos fluidos bidimensionales. Como primera aproximación al problema se realizó un cálculo integral de las ecuaciones. Para ello se utilizaron

funciones de forma, que se obtuvieron del resultado del problema de un jet de líquido turbulento. Los resultados obtenidos muestran un comportamiento adecuado del modelo propuesto, que difiere del problema real debido a las simplificaciones utilizadas, pero indica el camino a seguir en este campo.

Bibliografía

- [1] Bergstrom, D.J., A Prediction of the Pressure Field in a Plane Turbulent Jet Using an Algebraic Stress Model, *Int. J. Numerical Methods in Fluids*, Vol. 14, pp. 907-918, 1992.
- [2] Carrica, P.M., Bonetto, F.J., Drew, D.A. y Lahey, R.T., Jr., The interaction of background ocean air bubbles with a surface ship, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, Vol 28, pp. 571-600, 1998.
- [3] Delhaye, J.M., Equations Fondamentales des Ecoulement Diphasiques, Part I and II, CEA-R-3429, Centre d'Etudes Nucleaires de Grenoble, France, 1969.
- [4] Drew, D.A. y Lahey, R.T., Jr., Application of general Constitutive Principles to the Derivation of Multidimensional Two-Phase Flow Equations, *Int. J. Multiphase Flow*, Vol 5, pp. 423-464, 1979.
- [5] Drew, D.A. y Passman S.L., Theory of Multicomponent Fluids, *Applies Mathematical Sciences*, Vol. 135, Springer-Verlag New York, Inc., 1999.
- [6] Ishii, M., Thermo-Fluid Dynamic Theory of Two-Phase Flow, Eyrolles, 1975.
- [7] Sini, J.F., y DeKeyser, I., Numerical Prediction of Turbulent Plane Jets and Forced Plumes by Use of the k- ϵ Model of Turbulence, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 30, No. 9, pp. 1787-1801, 1987.
- [8] Wilcox, D.C., Turbulence Modeling for CFD, DCW Industries, Inc., 1998.