

## **Patrones en dos Fases para Tuberías verticales**

Antonio Aguilar, José Riesco, Vicente Pérez, José Ramírez, José Rodríguez y Alejandro Ramírez

A. Aguilar, J. Riesco, V. Pérez, J. Ramírez, J. Rodríguez y A. Ramírez  
Universidad Tecnológica del Suroeste de Guanajuato. Departamento de Ingeniería Metal-Mecánica Carretera Valle–  
Huanímaro km. 1.2, Valle de Santiago, Gto., México. Teléfono: (456) 643 7180 Ext. 136  
Universidad de Guanajuato. Departamento de Ingeniería Mecánica Carretera Salamanca–Valle de Santiago km. 3.5 +  
1.8 km, Comunidad de Palo Blanco, Salamanca, Gto., México. Teléfono: (464) 647 9940 Ext. 2306  
jaaguilarm@utsoe.edu.mx

M. Ramos., V.Aguilera., (eds.) .Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Handbook -©ECORFAN- Valle de Santiago,  
Guanajuato, 2014.

## Abstract

This paper presents a study of the patterns in two phase flow developed in a vertical tube of small diameter. The design and construction of the experimental setup allowed observed the flow regimes developed under different conditions of each fluid (air and water). The data obtained allowed the development of two types of flow maps commonly used to characterize the flow in two phases (gas and liquid) in vertical pipes. The results show a good correspondence of one of the maps developed in this work with those found in the literature, while the other map obtained differs considerably from those obtained by other authors. The analysis of the results obtained here allowed developing interesting conclusions about the relationship between the properties and conditions of two-phase flow and the development of different patterns flow.

## Nomenclatura

$A$	Área de flujo libre [m <sup>2</sup> ]
$G$	Flujo másico por unidad de área [kg/s.m <sup>2</sup> ]
$j$	Velocidad superficial [m/s]
$\dot{m}$	Flujo másico [kg/s]
$P$	Presión [Pa]
$Q$	Flujo volumétrico [m <sup>3</sup> /s]
$x$	Calidad [-]
$Re$	Numero de Reynolds [-]

## Letras Griegas

$\Delta$	Incremento
$\alpha$	Viscosidad [kg/m.s]
$\rho$	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho^2$	Flujo de momento superficial [kg/m.s <sup>2</sup> ]

## Subíndices

$g$	Gas
$l$	Líquido
$m$	mezcla
$tp$	Dos fases

## 6 Introducción

### Patrones de flujo

La descripción de flujo en dos fases en tuberías se complica por la existencia de una interfaz entre las dos fases. Para un flujo gas-líquido, dependiendo de las velocidades de flujo, de las propiedades físicas de las fases, de la geometría e inclinación del tubo, existe una interfaz que se presenta en una amplia variedad de formas.

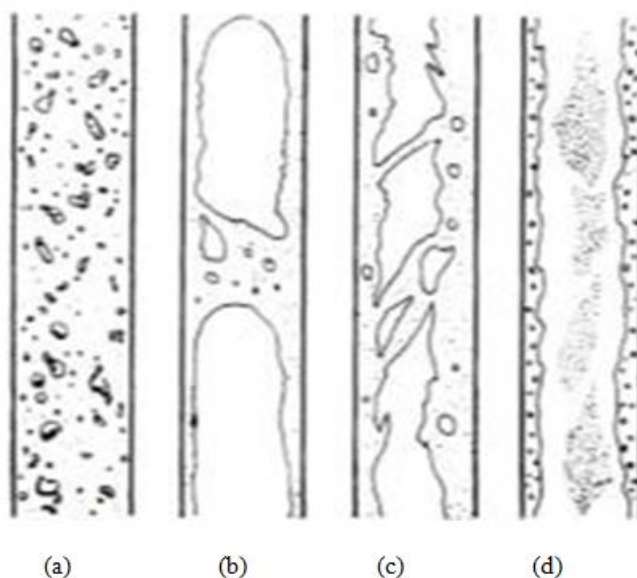
Dichas formas o estructuras interraciales se denominan patrones de flujo o regímenes de flujo. Para el caso particular de flujo hacia arriba en tubos verticales se pueden distinguir principalmente los siguientes patrones de flujo (Hewitt & Taylor , 1970):

- (i) Flujo de burbujas. En el flujo burbuja la fase gaseosa fluye en forma de burbujas en un continuo líquido. Las burbujas son generalmente esferas distorsionadas.
- (ii) Flujo Bala. Cuando la concentración de burbujas llega a ser alta se produce coalescencia. En este caso, las burbujas más grandes son del mismo orden y tamaño que el diámetro del tubo, y se produce una deformación que resulta en burbujas de gas con forma de “bala”. A este patrón de flujo también se le llama flujo de tapón. El flujo de tapón consiste entonces en estas bolsas de gas, también llamadas tapones o burbujas de Taylor, separadas por regiones de flujo burbujeante, comúnmente llamado bala. Los tapones de gas están rodeados por una fina película líquida que fluye verticalmente hacia abajo.
- (iii) Flujo semi-anular (*Churn*). El Flujo semi-anular es un régimen de flujo altamente desordenado en el que el movimiento vertical del líquido es oscilatorio. El Flujo *Churn* posee algunas de las características de flujo de bala, con las siguientes diferencias: (a) Las balas de gas se vuelven más estrechas y más irregulares. (b) La continuidad del líquido en la bala es repetidamente destruida por las regiones de alta concentración de gas. (c) La película delgada de caída de líquido que rodea a los tapones de gas ya no se puede observar.
- (iv) Flujo anular. En un flujo anular el gas fluye a lo largo del centro del tubo. El líquido fluye parcialmente como una película a lo largo de las paredes del tubo, y parcialmente en forma de gotitas en el núcleo central de gas.

Es posible extender la descripción anterior de los patrones de flujo. Por ejemplo, el régimen de flujo anular puede ser sub-dividido en flujo anular disperso y no disperso. El flujo anular disperso ocurre como resultado de la aglomeración de las gotitas de líquido en el núcleo de gas en grandes rayas o mechones. En el flujo anular no disperso el líquido fluye por las paredes del tubo y en el núcleo solamente gas.

Además, debido a que las transiciones entre los diversos regímenes de flujo no se producen repentinamente, es posible observar una serie de patrones de flujo en transición que poseen características de más de uno de los principales patrones de flujo descritos anteriormente.

**Figura 6** Patrones de flujo en ductos verticales (a)Burbuja, (b)Bala, (c)Semianular (d)Anular



## Mapa de patrones de flujo

Cuando se produce un flujo en dos fases en los tubos, a menudo es importante predecir el patrón de flujo que se presentará para cualquier combinación dada de propiedades de las fases y tasas de flujo, así como para cualquier diámetro de tubo dado. La predicción del patrón de flujo se obtiene generalmente a partir de mapas de patrones de flujo, los cuales se dividen en mapas de flujo teórico y experimental.

Mapas de patrón de flujo teórico. En este enfoque se modelan las transiciones entre patrones de flujo y se producen una serie de ecuaciones que, dadas las propiedades físicas de las fases y el diámetro del tubo, permiten calcular las fronteras del patrón de flujo. Usando éste método, Taitel et al. (1980) obtuvieron mapas de patrones de flujo que compararon con mapas de flujo experimentales existentes y con resultados obtenidos de un flujo aire-agua, observándose una similitud razonable. Éste enfoque teórico también ha sido utilizado por Mishima & Ishii (1984).

Mapas de patrón de flujo experimentales. Los métodos experimentales utilizados para identificar la transición de regímenes se pueden clasificar en los siguientes grupos (Ashfaq & Muthanna, 2007):

- Observación Visual.
- Evolución del parámetro global (fracción de vacío).
- Señales temporales de la cantidad de las fases relacionadas con la hidrodinámica.
- Técnicas avanzadas de medición.

En este trabajo se muestran los patrones de flujo obtenidos mediante el método de observación visual para diferentes condiciones de operación de un flujo vertical ascendente aire-agua en un tubo de diámetro pequeño. También se presenta un mapa de patrón de flujo para el sistema bajo estudio y se compara con otros mapas existentes en la literatura.

## 6.1 Desarrollo

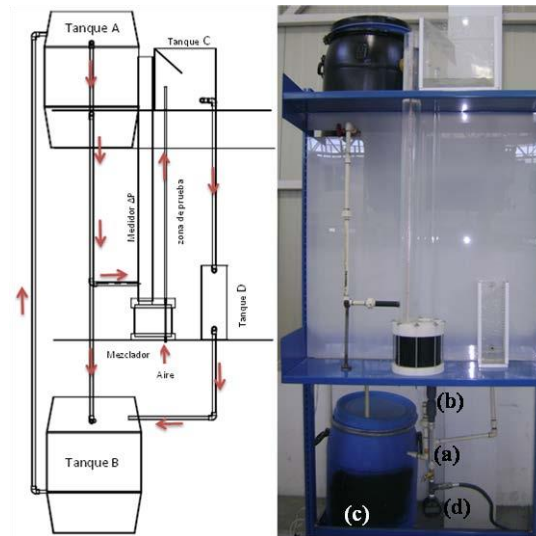
### Instalación experimental

Para visualizar los patrones de flujo a través de un ducto vertical se diseñó y construyó una instalación experimental (Figura 2) con las siguientes características:

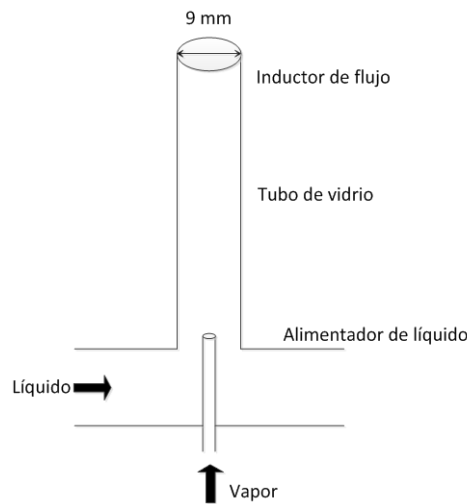
- Zona de prueba (tubo de vidrio de 9 mm de diámetro interno y 87 cm de longitud) Ver Figura 3.
- Medidor de  $\Delta P$  (tubo de acrílico graduado de 5.7 cm de diámetro interno y 99 cm de longitud).
- Tanque A (tanque de alimentación con una capacidad 60 L con nivel de agua constante de 42 cm).
- Tanque B (tanque de recirculación del sistema con una capacidad de 60 L).
- Tanque C (depósito de descarga de la zona de prueba con una capacidad de 12.5 L).
- Tanque D (depósito graduado para medir flujo de agua con una capacidad de 3 L).
- Rotámetro para aire con rango de operación de hasta 14 L/min (a).
- Válvula check (b).
- Tubo de acero para alimentación de aire de 3.1 mm de diámetro interno y 17 cm de longitud.

- Tubería de distribución de CPVC 1/2".
- Bomba sumergible para el sistema de recirculación (c).
- Manómetro digital con rango de operación de 0-100 psi (d).
- Mezclador (depósito cilíndrico de 15.2 cm de diámetro y 16.8 cm de longitud).

**Figura 6.1** Instalación experimental de flujo a dos fases



**Figura 6.2** Zona de prueba, inductor de flujo

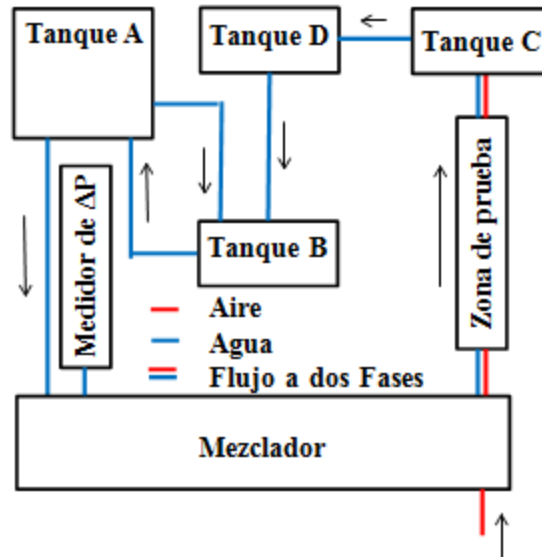


El funcionamiento de la instalación experimental consiste en tres subsistemas:

El primero de estos subsistemas consiste en hacer circular agua desde el Tanque A al mezclador para después producir las dos fases en la zona de pruebas. Una vez que el flujo a dos fases abandona la zona de prueba, en el Tanque C se separa el agua y pasa al Tanque D (medidor de flujo), el cual está conectado con el tanque de recirculación (Tanque B), este último cuenta con dos líneas de flujo hacia el Tanque A, una de alimentación y otra de drene, esto con la finalidad mantener el nivel del Tanque A constante.

El segundo y tercer subsistemas son el del aire y el del flujo a dos fases, respectivamente, los cuales están representados por el mezclador y la zona de prueba de la Figura.

**Figura 6.3** Funcionamiento de la instalación experimental



### Desarrollo de las pruebas

En el desarrollo de las pruebas de visualización se realizaron 650 experimentos con la finalidad de analizar el comportamiento del flujo en dos fases. Dichos experimentos se desarrollaron en condiciones adiabáticas, utilizando agua como fase líquida y aire como fase gaseosa.

Se realizaron una serie de mediciones fijando un valor de flujo de aire determinado y se controló el flujo de agua hacia la columna de alimentación para mantener una altura de la columna de agua y proporcionar una caída de presión constante en la región de prueba.

Las pruebas experimentales se efectuaron en una tubería de 9 mm de diámetro y una longitud de 87 cm con un rango de flujo másico de aire por unidad de área de  $0.262$  a  $\text{kg/s m}^2$ . La altura de la columna de agua se fue variando en distancias de 0.05 m, con lo cual se registraba el flujo de agua correspondiente.

Al variar los flujos de agua y de aire, se presentaron diferentes patrones de flujo, tales como bala, semi-anular, anular disperso y anular. La visualización de los patrones de flujo fue realizada con la cámara rápida FASTCAM-PCI R2, la cual puede ser operada a velocidades de hasta 1000 cuadros por segundo.

## 6.2 Resultados

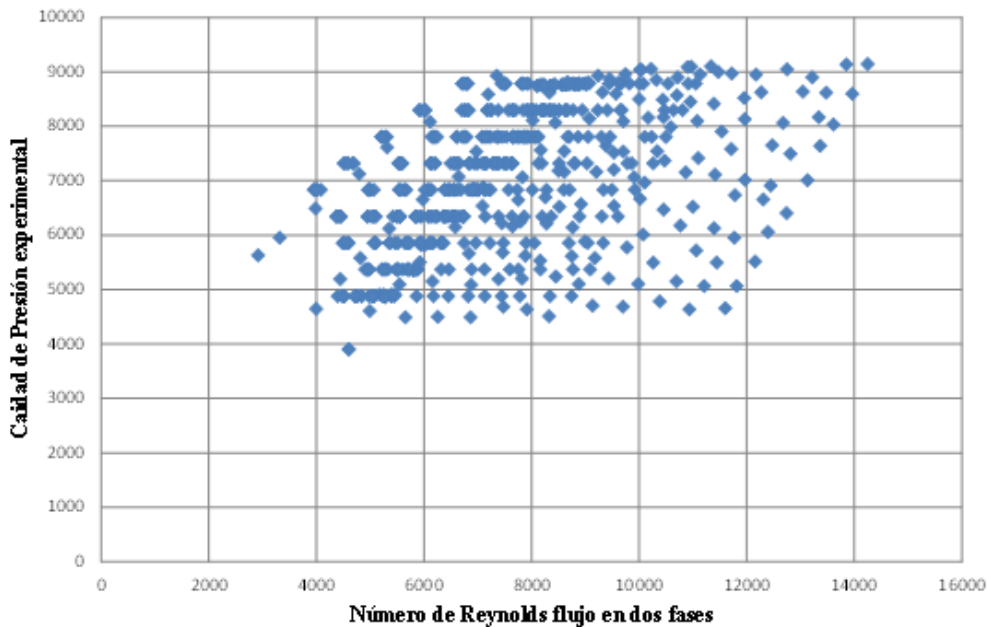
### Datos experimentales

En la Tabla se muestran algunos resultados para flujos máscicos por unidad de área del aire y del agua para flujos altos, medios y bajos. Adicionalmente se presentan las velocidades superficiales de ambos fluidos y la caída de presión medida.

**Tabla 6** Parámetros de flujo experimentales obtenidos mediante las pruebas realizadas

$G_{\text{aire}}$ (kg/s m <sup>2</sup> )	$G_{\text{agua}}$ (kg/s m <sup>2</sup> )	$U_{\text{sg}}$ (m/s)	$U_{\text{sl}}$ (m/s)	$\Delta P_{\text{exp}}$ (Pa)
12.4	538.3	3.668	0.5397	9102
12.4	509.6	3.668	0.5109	8780
12.5	480.8	3.668	0.4821	8292
12.5	449.5	3.668	0.4506	7805
6.1	640.2	1.834	0.6419	8927
6.2	679.4	1.834	0.6812	8780
6.1	608.9	1.834	0.6104	8292
6.1	585.3	1.834	0.5868	7805
0.9	642.8	0.262	0.6445	8780
0.9	561.8	0.262	0.5633	8292
0.9	488.6	0.262	0.4899	7805
0.9	418.1	0.262	0.4192	7317

**Figura 6.4** Caída de presión experimental contra el número de Reynolds



En la Figura se grafican los valores obtenidos de caída de presión. Se muestran las 650 pruebas realizadas en la instalación experimental.

Considerando propiedades pseudo críticas del flujo; esto es, tratando el flujo en dos fases como una mezcla perfecta con velocidades iguales y propiedades físicas promedio, se calcularon la densidad y viscosidad de la mezcla como sigue:

$$\rho_{tt} = \frac{x\rho_g + (1-x)\rho_l}{x + (1-x)}$$

$$\mu_{tt} = \frac{x\mu_g + (1-x)\mu_l}{x + (1-x)}$$

donde  $x$  es la calidad de vapor de la mezcla.

Una vez calculadas las propiedades promedio del flujo en dos fases, se encontraron las velocidades superficiales de ambos fluidos y el número de Reynolds de la mezcla.

### Patrones de flujo

En los flujos de gas-líquido, las dos fases pueden adoptar varias configuraciones geométricas. Éstas se conocen como patrones de flujo o regímenes de flujo. En la Figura se mostró una representación esquemática de los patrones de flujo característicos en ductos verticales. El patrón real dependerá en cada caso principalmente de la velocidad de flujo y de las cantidades relativas de líquido y gas.

La comprensión de estos regímenes de flujo y de las condiciones necesarias para una transición de uno a otro está lejos de ser completa. Sin embargo, se cuenta con *mapas* de flujo como los reportados por Hewitt y Roberts en 1969 (Figura) y Fair, J. R. en 1960 (Figura), que permiten identificar el tipo de flujo que se presenta en el tubo vertical y cuándo ocurre la transición de un tipo de flujo a otro.

Los parámetros utilizados en los mapas de flujo son:

- a) Calidad de masa,  $x$ ,

$$x = \frac{m_g}{m_g + m_l}$$

- b) Flujo másico por unidad de área,

$$G = G_g + G_l = \frac{m_g}{A} + \frac{m_l}{A}$$

- c) Flujo de momento superficial,

$$\rho_l j_l^2 = \frac{[G(1-x)]^2}{\rho_l}$$

$$\rho_g j_g^2 = \frac{[Gx]^2}{\rho_g}$$

- d) Reynolds de la mezcla

$$Re_m = \frac{\rho_m U_m D}{\mu_m}$$



Figura 6.5 Mapa de patrones de flujo en ductos verticales (Hewitt and Roberts 1969)

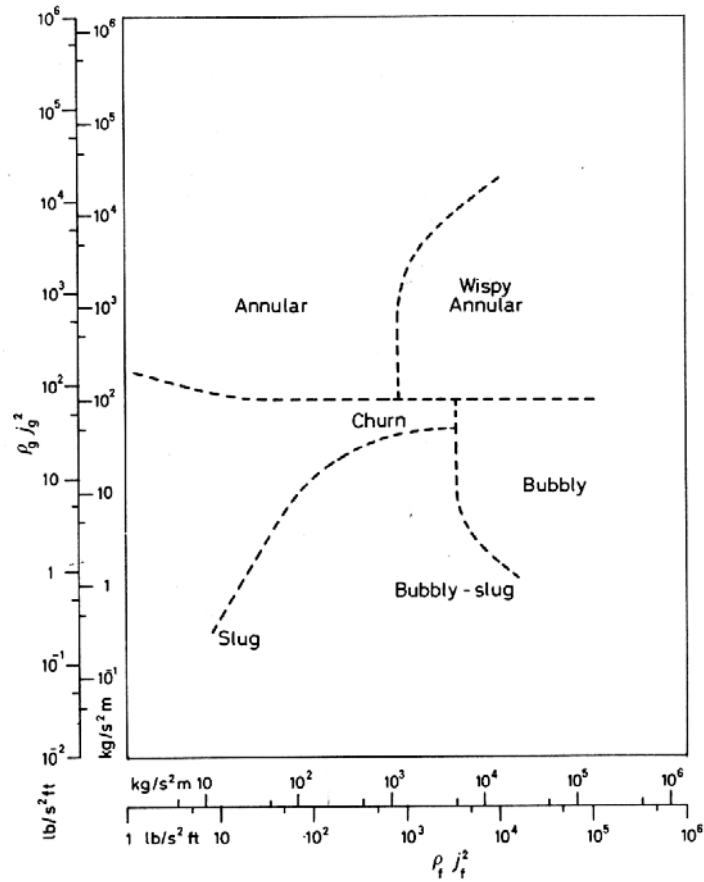
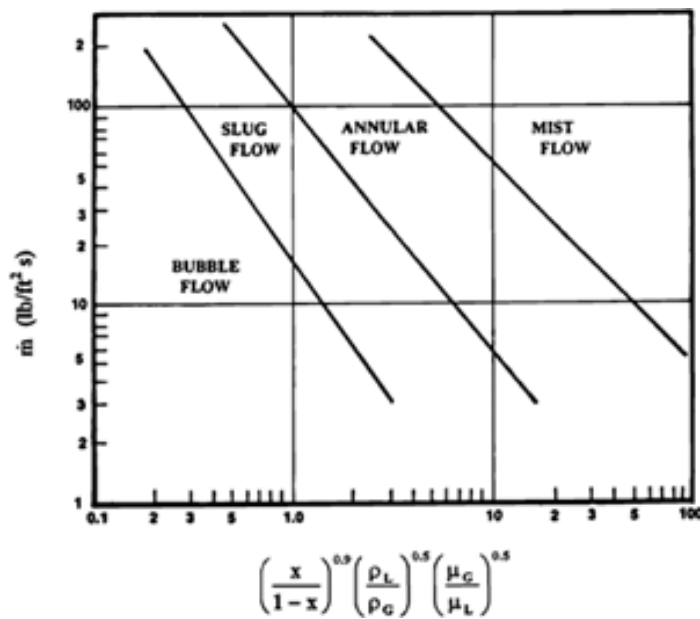


Figura 6.6 Mapa de patrones de flujo en ductos verticales (Fair J. R. 1960)



## Obtención del mapa de flujo

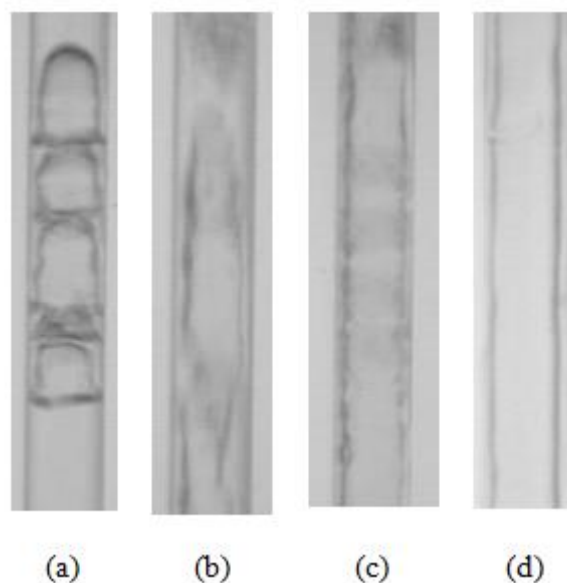
La creación de los mapas de flujo se sustenta en la experimentación y visualización, para lo cual es necesario contar con una instalación experimental (Figura 2), así como de las herramientas (medición y visualización) necesarias para llevar a cabo dicha experimentación.

Las pruebas experimentales se efectúan en una tubería de 9 mm de diámetro y una longitud de 87 cm. Al variar los flujos del agua y del aire, se presentan diferentes patrones de flujo, tales como bala, semi-anular, anular disperso y anular. En la Figura 10 se presenta la visualización de los patrones de flujo obtenida mediante la cámara rápida FASTCAM-PCI R2 la cual puede ser operada a velocidades de hasta 1000 cuadros por segundo.

A continuación se describe la visualización de los patrones de flujo:

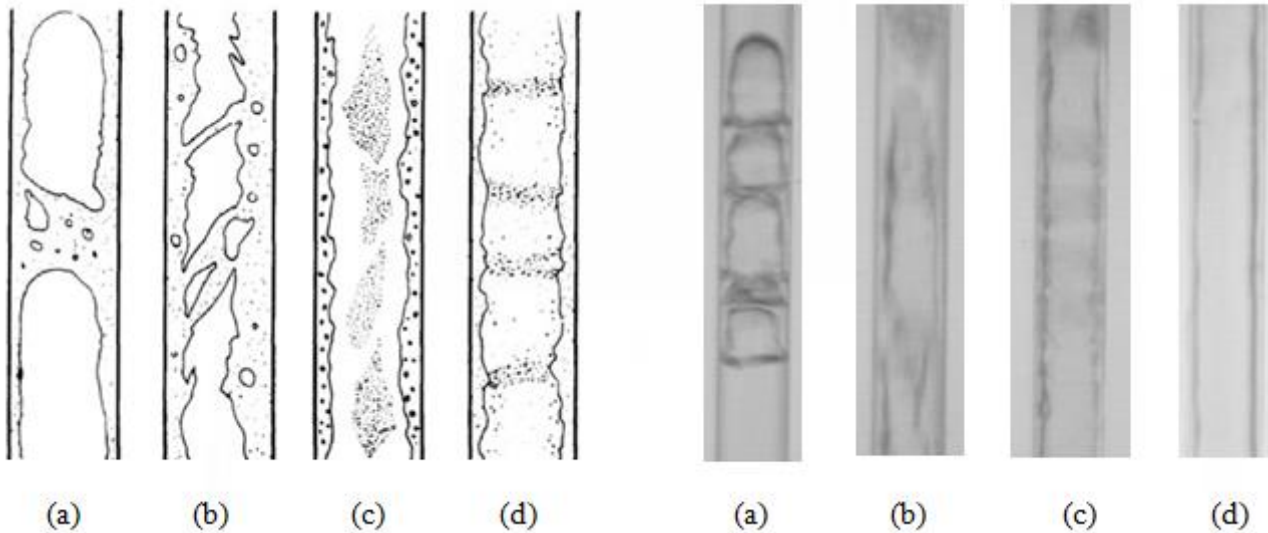
- (a) Bala: En este patrón de flujo la fase gaseosa forma tapones o balas con un diámetro muy aproximado al de la tubería, una característica de este tipo de flujo es que la parte superior de la bala es esférica y están separada por una pequeña capa de la fase líquida.
- (b) Semianular: Este patrón de flujo es irregular e inestable debido a las fluctuaciones en la formación de burbujas irregulares de gran tamaño que se unen y se separan constantemente. El flujo del líquido tiende a estar cerca de la pared.
- (c) Anular disperso: En este patrón se puede apreciar una película relativamente gruesa de la fase líquida cercana a las paredes de la tubería, mientras que en el centro de la tubería viaja la fase gaseosa acompañada de pequeñas gotas o nubes de líquido.
- (d) Anular: En este caso es posible observar que las fases están completamente separadas y la fase gaseosa se encuentra en la parte central de la tubería. En ocasiones se puede observar arrastre de pequeñas gotitas que se desprenden de la fase líquida debido a perturbaciones en esta fase.

**Figura 6.7** Visualización de patrones de flujo en la instalación experimental. (a)Bala, (b)Semianular (c)Anular disperso y (d)Anular



En la Figura se muestran los patrones de flujo para ductos verticales encontrados en la literatura contra los visualizados en este trabajo.

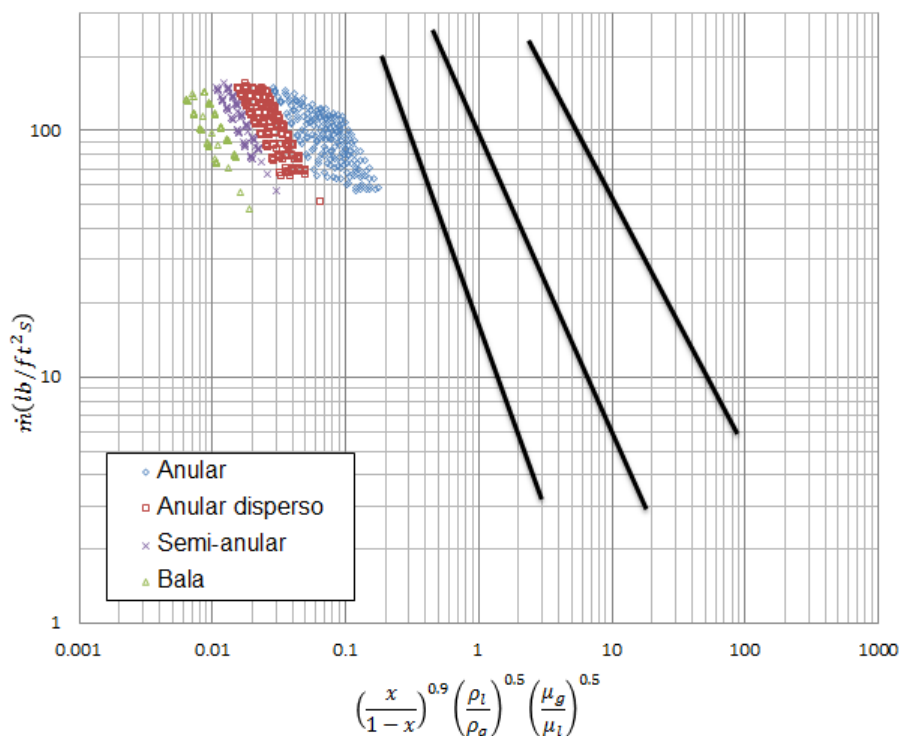
**Figura 6.8** Patrones de flujo en ductos verticales (a) Bala, (b) Semianular, (c) Anular disperso y (d) Anular



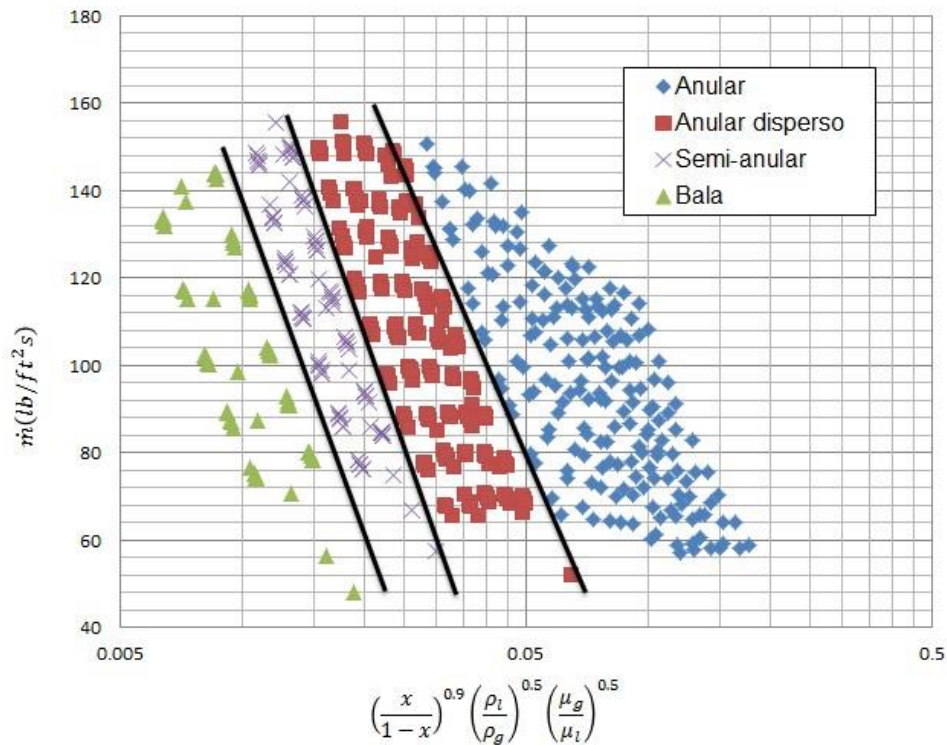
Una vez identificado cada uno de los patrones de flujo y con apoyo de las ecuaciones (3)-(6) es posible generar un mapa de flujo propio.

En la Figura se representa una comparación entre los datos obtenidos en las pruebas realizadas y los resultados de la Figura. Se observan tendencias con pendientes similares aunque desfasadas.

**Figura 6.9** Comparación de los datos experimentales (puntos) obtenidos contra el mapa de Fair J. R. 1960 (Fig., líneas sólidas)

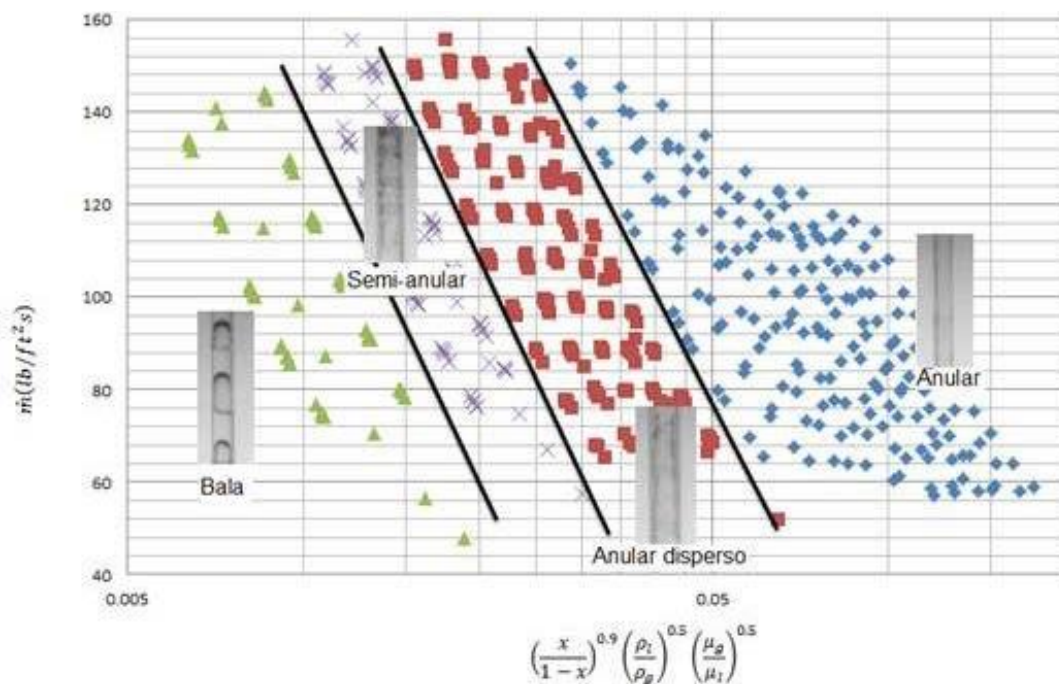


**Figura 6.10** Superposición de los datos mostrados en la Figura

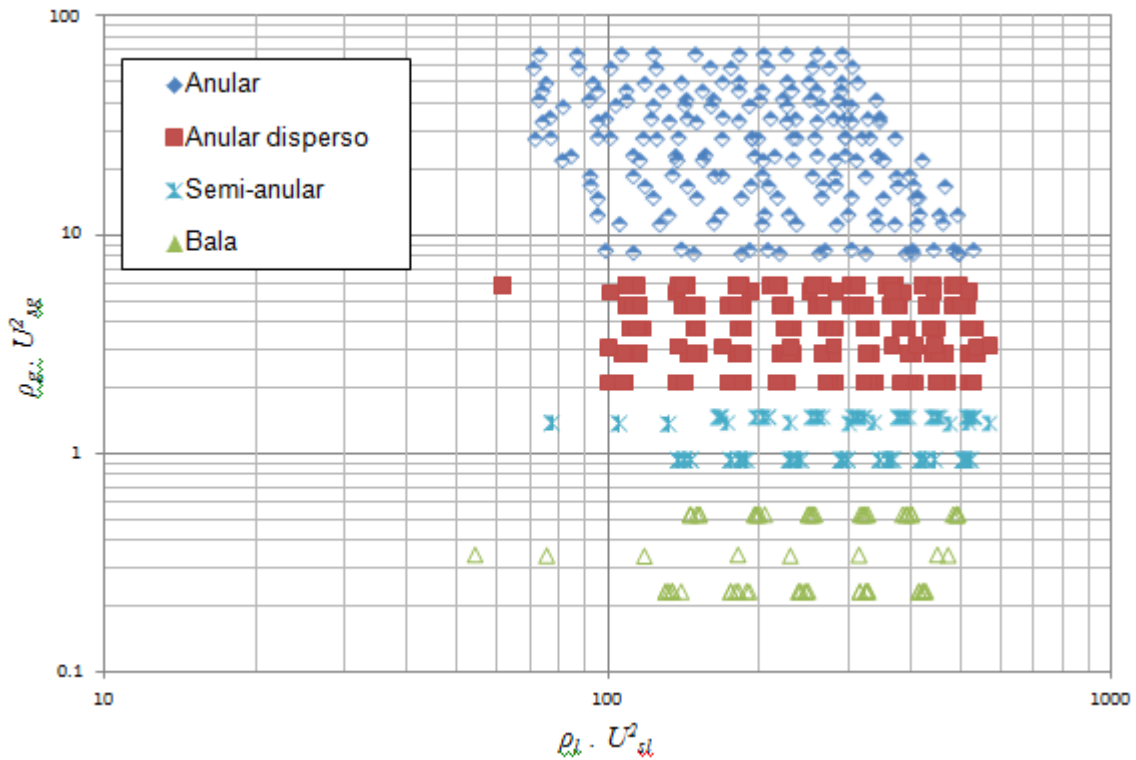


La Figura muestra la superposición de los mapas de flujo encontrados en la literatura con el obtenido en este trabajo. El ajuste se logró gráficamente, esto es, manteniendo la pendiente de las líneas de transición que separan los patrones de flujo, se realizó una sobreposición sobre los datos experimentales, con lo que se observa una buena concordancia. Para una mejor referencia, en la Figura se presenta el mapa de flujo obtenido en este trabajo con la visualización correspondiente a cada régimen.

**Figura 6.11** Mapa de patrones de flujo con sus respectivas visualizaciones



**Figura 6.12** Mapa de patrones de flujo formado con los momentos superficiales de gas y líquido



### 6.3 Conclusiones

La instalación experimental funcionó adecuadamente, ya que cumplió el objetivo para el cual fue diseñada. Permitió la observación del fenómeno de flujo en dos fases del sistema que se deseaba.

El equipo usado para la visualización, medición y control de las variables involucradas en el sistema resultó ser correctamente seleccionado.

Los patrones de flujo desarrollados en el tubo vertical de diámetro pequeño son una consecuencia de las propiedades y características de flujo de cada fluido. Tales patrones de flujo pueden ser usados para caracterizar el flujo en dos fases.

Los resultados obtenidos muestran una correspondencia aceptable con un tipo de mapas de flujo comúnmente usado para caracterizar el flujo en dos fases en tubos verticales, lo que muestra el nivel de experimentación realizado en este trabajo.

Como trabajos futuros se proponen análisis adicionales a los resultados experimentales obtenidos. Por ejemplo, respecto a la caída de presión presente en el sistema, la cual es una variable importante para dimensionar sistemas y equipos de transferencia de energía donde se involucra un flujo en dos fases.

## Referencias

- G. Kaibel (1987). 'Distillation columns with vertical partitions', Chem. Eng. Technol. Vol. 10, no. 2, pp. 92-98
- S. Bandyopadhyay (2007), Thermal Integration of a Distillation Column Through Side-Exchangers, Chemical Engineering Research and Design, Vol. 85, No.1, pp. 155-166.
- I. Malinen and J. Tanskanen (2009), Thermally coupled side-column configurations enabling distillation boundary crossing. 2. Effects of intermediate heat exchangers, Industrial & Engineering Chemistry Research Vol. 48 No.13, pp. 6372-6386.
- G.F. Hewitt and D.N. Roberts (1969), Studies of two-phase flow patterns by simultaneous X-ray and flash photography, Report AERE-M2159, Atomic Energy Research Establishment, Harwell.
- J. C. Chen (1966), "Correlations for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow", Ind. Eng. Chem. Process Design Development, Vol. 5, no. 3 pp. 322-329
- E.E. Vázquez Ramírez, G.T Polley , J.M. Riesco Avila (2009), "Engineering equations for the estimation of heat transfer in pool boiling and flow boiling during upward flow in tubes", AMIDIQ XXX, México.
- Fair, J. R. (1960) "What you need to know to design thermosyphon reboilers", Petroleum Refiner, Vol. 39, No. 2, pp. 105,
- Hewitt, G. F. and Hall-Taylor (1969), N. S. Annular Two-Phase flow, Pergamon Press, New York,
- TAITEL, Y., BORNEA, D. & DUKLER, A. E. (1980). Modelling flow pattern transitions for steady upward gas-liquid flow in vertical tubes. AIChE J. 26, 345-354.
- WEISMAN, J., DUNCAN, D., GIBSON, J. & CRAWFORD, T. (1979). Effects of fluid properties and pipe diameter on two-phase flow patterns in horizontal lines. Int. J. Multiphase Flow 5, 437-462.
- MISHIMA, K. M. & ISHII, M. (1984), Flow regime transition criteria for upward two-phase flow in vertical tubes. Int. J. Heat Mass Transfer 27, 723-737.
- Ashfaq, S. and Muthanna H. Al-Dahhan. (2007), A Review on flow Regime Transition in bubble Columns. International Journal of Chemical Reactor Engineering, Vol 5, Review R1