

CARACTERIZACIÓN DE FLUJO BIFÁSICO “CAIDA DE PRESIÓN TRANSFERENCIA DE CALOR Y LOS MÉTODOS DE SOLUCIÓN”

Miguel Antonio Manrique Rojas¹, David Alfredo Fuentes², Samuel Fernando Muñoz Navarro³

RESUMEN

En el siguiente trabajo se realizó una revisión general de publicaciones realizadas en los últimos años sobre el flujo bifásico. El eje central se estableció en la determinación de correlaciones y modelos para la predicción de la caída de presión y el coeficiente de transferencia de calor presentes en el flujo bifásico. También se revisaron documentos sobre casos puntuales de análisis del flujo bifásico, desarrollo de técnicas de medición y métodos numéricos relacionados con el tema.

Palabras clave: Flujo bifásico, Vapor, Hidrocarburos, Condensación, Caída de presión, Transferencia de calor, Métodos numéricos.

ABSTRACT

In this paper, were conducted a comprehensive review of publications for the last years on the two-phase flow. The center was established in the determination of correlations and models for predicting the pressure drop and heat transfer coefficient. Also were reviewed papers on specific cases of two-phase flow analysis, development of measurement techniques and numerical methods related to the subject.

Keywords: Biphasic Flow, Steam, Hydrocarbon, Condensation, Pressure drop, Heat Transfer, Numerical Methods

1. Candidato de Maestría en Ingeniería de Hidrocarburos. Grupo de Investigación Recobro Mejorado, GRM. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia. e-mail: miguel.manrique@grmuis.com

2. Ph D. Ingeniería Mecánica. Grupo de Investigación en Energía y Medio Ambiente (GIEMA). Universidad Industrial de Santander, UIS. Bucaramanga, Colombia. e-mail: dfuentes@uis.edu.co

3. M. Sc. en Ingeniería de Petróleos. M. Sc. en Ingeniería de Hidrocarburos. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. Colombia. e-mail: samuel@uis.edu.co

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de metodologías para caracterizar los flujos bifásicos ha sido un trabajo realizado desde diversos campos de aplicación, principalmente en el área de análisis de refrigerantes y en algunos casos en aplicaciones de generación de energía geotérmica y nuclear.

No obstante, la industria petrolera requiere constantemente de servicios que involucren el flujo bifásico, como lo son el transporte de crudos con gas y agua o la inyección de vapor para recobro térmico de hidrocarburos, entre otros. Por este motivo se desarrolló un trabajo que estableciera factores que permitan realizar el estudio y modelado del flujo de vapor en líneas de transporte; teniendo en cuenta que el vapor corresponde a un flujo bifásico, se realizó el estudio de algunas investigaciones realizadas por diversos grupos alrededor del mundo, que han contribuido a esclarecer las grandes incógnitas que rodean el análisis de este tipo de flujos.

Hasta el año 1995, los estudios sobre la caída de presión y los coeficientes de transferencia de calor en flujo bifásico, habían sido bien documentados por el análisis de flujos de tipo homogéneo y separado, en el cual se consideraba que el flujo circulaba como una mezcla de propiedades intermedias entre las fases líquida y gaseosa. En este punto, las correlaciones para caída de presión se adecuaban al modelo propuesto por Lockhart-Martinelli, correspondiente a una corrección de la caída de presión asumiendo la totalidad del flujo como líquido, por medio de un multiplicador. Sin embargo, otros estudios demostraron que la caída de presión se ve afectada por factores como la velocidad másica, e incluso por los fenómenos de transferencia de calor. Ante estas limitaciones aparecieron estudios como los de Chisholm, Baroczy y Friedel que intentaron corregir algunas de estas falencias implementando diagramas desarrollados experimentalmente.

Por su parte, los fenómenos de transferencia de calor se encontraban mucho más rezagados por las limitaciones técnicas existentes para su estudio, y la mayoría de ellos al igual que en el caso de la caída de presión, se dedicaban a considerar un flujo homogéneo poco frecuente, el cual se limita en su mayoría a tuberías verticales. Por su parte, casi la totalidad de los modelos representaban una modificación del modelo de Nusselt para el flujo monofásico, en los cuales se determinaban nuevos valores para los parámetros involucrados. Sin embargo, el desarrollo de técnicas como la termografía, la captura de video o la medición de resistividades en flujos, permitió llevar a cabo pruebas experimentales más precisas para desarrollar modelos más acertados.

En el presente trabajo se consideraron cuatro ejes generales, el primero fue el desarrollo de pruebas y modelos para determinar la caída de presión y el coeficiente de transferencia de calor en flujos bifásicos; el segundo fueron los estudios particulares o fuera de lo común, que realizaron interesantes aportes al entendimiento de estos fenómenos; en el tercer eje se presentan algunas investigaciones realizadas para desarrollar técnicas de medición aplicables al estudio de flujos bifásicos; y por último se presentan algunos trabajos enfocados en la implementación de métodos numéricos para el análisis de flujos bifásicos.

MEDICIONES DE CAÍDA DE PRESIÓN Y TRANSFERENCIA DE CALOR

En el año de 1996 Collier & Thome¹ desarrollaron un extenso trabajo sobre el análisis de flujos bifásicos, en éste se encuentra una compilación de los trabajos más relevantes llevados a cabo hasta el momento, partiendo de los análisis de patrones de flujo y caída de presión, hasta las características y condiciones en las que se realizan procesos de evaporación y condensación. Además determinaron el diámetro crítico de burbuja a partir del cual el modelo homogéneo deja de ser válido, bajo diferentes condiciones de flujo bifásico.

Para el año 1997, Fore et al.², realizaron mediciones hidrodinámicas y de transferencia de calor para flujos bala bifásicos en ambientes de gravedad reducida. Como fluidos se emplearon aire y dos líquidos: agua y 50% de glicerina acuosa; con el fin de obtener una serie de números de Reynolds de líquido desde 1000 hasta 20.000 en un tubo con diámetro de 25,4 mm. Estas mediciones incluyeron el void fraction, el gradiente de presión y coeficiente de transferencia de calor. Los resultados se compararon con las correlaciones de Vijay et al. (1982), Elamvaluthi & Srinivas (1984), Chu and Jones (1980), Sieder-Tate (1936), resultando inferiores a los predichos. Tras las pruebas se pudo determinar que el coeficiente de transferencia de calor es mejor para el flujo bifásico que para el de una sola fase líquida, aumentando con el crecimiento del void fraction y es algo más grande para la solución de glicerina al 50% que para el agua. También se estableció que los coeficientes de transferencia de calor son menores bajo gravedades reducidas que bajo la gravedad normal, conservando las mismas condiciones de flujo.

Un trabajo un poco más profundo fue el desarrollado por Hetsroni et al.³, en el cual, se llevaron a cabo pruebas experimentales para medir los coeficientes de transferencia de calor en el flujo intermitente de agua-aire en línea horizontal. La técnica se basó en termografía infrarroja de la pared de la tubería calentada eléctricamente, lo que permitía una visualización del campo de temperaturas y la medición puntual de temperaturas en la pared. Los números de Froude para el agua y el aire variaban entre 0,9-2 y 0,03-0,43 respectivamente. Como conclusión de su trabajo plantearon que el coeficiente de transferencia de calor varía circunferencialmente y depende de la velocidad superficial, de la longitud de las burbujas y de la frecuencia de éstas. Finalmente presentaron una correlación sencilla para determinar los coeficientes de transferencia de calor.

En la segunda parte⁴ de ese trabajo se analizaron flujos bifásicos ascendentes con inclinaciones entre 2 y 5° dentro de una tubería de 49,2mm. Los números de Froude estudiados estuvieron entre 0,59-2 y 0,03-0,57 para el agua y el aire respectivamente. El resultado fue un sencillo modelo físico para calcular el coeficiente de transferencia de calor bajo estas condiciones.

En 1998 Boissieux et al.⁵, realizaron un estudio sobre la condensación de refrigerantes en tubos lisos horizontales, entregando los resultados puntuales de los coeficientes de transferencia de calor obtenidos durante la condensación de Isceon 59, R407C y R404A. Los resultados se compararon con las correlaciones existentes para transferencia de calor durante condensación y se validó para las mezclas de refrigerante con las correlaciones de Dobson-Chato y Shah, por estar acordes con las condiciones planteadas para las pruebas. El resultado fue que la correlación de Dobson y Chato generaba mejores pronósticos para estas mezclas de refrigerantes.

Un estudio relevante que buscaba aplicaciones específicas en el área de los hidrocarburos fue el desarrollado por Badie et al.⁶, en el cual se obtuvieron las mediciones del gradiente de presión y holdup para el flujo horizontal de aire-agua y aire-aceite, en tuberías de diámetro 0,079m. Los datos del gradiente de presión y el holdup se compararon con las predicciones del modelo "apparent rough surface" (ARS) de Hart et al. (1989) y el modelo "double-circle" de Chen et al. (1997). El modelo del ARS en general proporcionó mejores predicciones para el holdup en el intervalo experimental. Ambos modelos predijeron razonablemente bien el gradiente de presión del flujo aire-agua para altos flujos de gas. Sin embargo, las predicciones de ambos

métodos no fueron satisfactorias para los experimentos aire-agua con tasas bajas de gas. Además, para flujos muy pequeños de líquido se encontró un aumento considerable del gradiente de presión en comparación con el flujo monofásico gaseoso. En general, el modelo de ARS se consideró el más robusto.

Con el surgimiento de nuevas técnicas para mejorar los procesos de condensación, en el año 2000 Cavallini et al.⁷, realizaron una revisión crítica de las correlaciones para calcular los coeficientes de transferencia de calor y la caída de presión, durante la condensación de refrigerantes dentro de las tuberías disponibles comercialmente; estas tuberías poseían superficies realizadas de varios tipos. Además, analizaron el fenómeno de la condensación y compararon las predicciones de algunas ecuaciones (Cavallini et al., 1993; Yu & Koyama, 1998; Kedzierski & Goncalves, 1997; Haraguchi et al., 1993; Miyara et al., 1998 y Nozu et al., 1998) con datos experimentales. Su conclusión fue declarar la necesidad de desarrollar nuevas herramientas de cálculo que permitieran mejorar las predicciones de este tipo de tuberías con realces o "microaleteados" (microfin), pues el incremento en su uso lo requería.

En el año 2001, Cavallini et al.⁸, presentaron los resultados de los coeficientes experimentales de transferencia de calor y las caídas de presión medidos durante la condensación dentro de tubos lisos de refrigerantes HFC (R134a, R125, R236ea, R32) puros y la mezcla casi azeotrópica de refrigerante HFC R410A. Las pruebas experimentales se realizaron a una temperatura de saturación entre 30 y 50°C, y velocidades máxicas desde 100 hasta 750 kg / (m² · s), con un rango de calidad de vapor de 0,15- 0,85. Los datos experimentales fueron comparados con las predicciones de la correlación de Jaster & Kosky para flujo estratificado y de Kosky & Staub para flujo anular, concluyendo que pueden arrojar resultados adecuados aún para los nuevos refrigerantes a alta presión.

Una de las situaciones más comunes en la investigación sobre flujos bifásicos ha sido comparar la eficacia de los modelos. Smit et al.⁹, realizaron un trabajo de este tipo para contrastar los métodos de Dobson-Chato, Shah, Cavallini-Zecchin y Silver-Bell-Ghaly, para flujo anular y estratificado-ondulatorio. Se determinaron los coeficientes de transferencia de calor durante la condensación zeotrópica de mezclas de refrigerantes en fracciones de masa de 90/10, 80/20, 70/30, 60/40, y 50/50 de HCFC-22/HCFC-142b y HCFC-22 puro en un tubo liso horizontal, a una presión de saturación de 2,43 MPa. Las mediciones se realizaron en una serie tubos lisos de 8,11 mm de diámetro interior con longitudes

de 1603 mm. De las pruebas se pudo concluir que la correlación de Dobson-Chato suministra las mejores predicciones para el coeficiente de transferencia de calor para el HCFC-22 puro y para las mezclas resulta acertado el método de Silver-Bell-Ghaly.

Continuando con la línea de evaluar las correlaciones más acertadas para calcular las condiciones de flujo bifásico, Cavallini et al.¹⁰, en el año 2003, realizaron una revisión de las investigaciones más recientes. Para ello evaluaron las publicaciones abiertas en las áreas de la refrigeración y diseño de condensadores, referentes a la condensación dentro de tuberías lisas (Cavallini et al., 2002; Shah, 1979; Haraguchi et al., 1993 y Dobson & Chato, 1998) y microaleteadas (Cavallini et al., 1999; Yu and Koyama, 1998 y Kedzierski and Goncalves, 1997), así como la condensación externa en bancos de tubería (Beatty and Katz, 1948; Sardesai et al., 1983; Briggs and Rose, 1994; Sreepathi et al., 1996 y Murata and Hashizume, 1992). La conclusión fue que las correlaciones existentes para las tuberías lisas son adecuadas pero encuentran serias limitaciones para algunos rangos de uso. En el caso de las tuberías microaleteadas, las restricciones eran más fuertes por las diversas geometrías posibles.

Nuevamente en el año 2003, Hetsroni et al.¹¹, realizaron experimentos para estudiar los regímenes de flujo y la transferencia de calor en mezclas de aire-agua en tuberías inclinadas. Esta vez la inclinación fue de 8°, en tuberías con diámetro interior de 25 y 49,2mm. Los regímenes de flujo fueron analizados empleando una técnica de vídeo de alta velocidad y la tomografía conductiva, mientras los patrones térmicos en la pared con calefacción y la transferencia de calor puntual se obtuvieron con termografía infrarroja. Bajo las condiciones estudiadas, se pudo observar perturbaciones de onda de diferentes formas. El análisis del comportamiento de los coeficientes de transferencia de calor, junto con la visualización de flujo y la tomografía conductiva mostraron que el proceso de dryout se presenta en el flujo anular sin movimiento de las gotas, o con un movimiento lento de estas. Incluso en estas condiciones, el coeficiente de transferencia de calor fue aproximadamente 10 veces superior que para el flujo de aire monofásico.

Ante las nuevas demandas de correlaciones para el análisis de flujo en tuberías con geometrías diferentes, Infante et al.¹², desarrollaron una investigación experimental de las características del coeficiente de transferencia de calor bifásico durante la condensación, para el R404A bajo condiciones de flujo forzado en

el interior de tubos lisos, microaleteados y estriados horizontales. Los parámetros experimentales incluyen un lubricante de poliol-éster de aceite con concentración entre 0 a 4%. Las pruebas se realizaron con una temperatura media de condensación saturada de 40°C en la entrada y el vapor a la entrada se mantuvo con una calidad igual a 1,0. Los flujos máxicos estaban entre 200 y 600 kg/m² s, y los flujos de calor se seleccionaron para obtener una calidad de cero a la salida de la sección de prueba, oscilando desde 5 hasta 45kW/m².

La comparación se realizó con las correlaciones de Dobson-Chato, Cavallini y Shah, de lo cual se pudo concluir que las correlaciones de Dobson-Chato y Shah son adecuadas para los tubos lisos, en tanto la de Cavallini lo es para los tubos microaleteados. Además, se pudo determinar que la presencia de un 4% en masa de aceite en el flujo de refrigerante puede incrementar la caída de presión hasta en un 25%.

En los años 2003 y 2004 salieron a la luz una serie de investigaciones realizadas por Jung et al., todas ellas relacionadas con la determinación de los coeficientes de transferencia de calor durante los procesos de condensación.

El primer estudio¹³ se centró en la medición de los coeficientes de transferencia de calor para condensación en un tubo liso horizontal, un tubo de aletas en la parte inferior, y un tubo tipo "Turbo-C". La temperatura de vapor saturado fue de 39°C para R22, R407C, R410A y con la pared subenfriada entre 3-8°C. Durante las pruebas una mezcla no azeotrópica del refrigerante R407C, exhibió un fenómeno de condensación muy diferente de las presentadas por el R22 y el R410A. Como contraparte teórica se utilizó la correlación de Nusselt, y el resultado fue una subestimación entre el 4,2 y el 17,7% del coeficiente de transferencia de calor para el R22 y R410A en los tubos lisos. En tanto, los coeficientes de transferencia de calor para las mezclas casi azeotrópicas de R410A son 3,2 y 17,4% más altos que para el R22 en los tubos microaleteados, mientras son entre 4,2 y 5,2% más bajos para los tubos "Turbo-C".

En el segundo estudio¹⁴ se midieron experimentalmente los coeficientes de transferencia de calor en flujos durante la condensación de R12, R22, R32, R123, R125, R134a, y R142b en un tubo liso horizontal. El equipo experimental estaba compuesto de tres partes principales: un bucle de refrigeración, un circuito de agua y un circuito de agua y glicol. La sección de prueba en el circuito de refrigerante se hizo con un tubo de cobre de diámetro exterior 9,52 mm y 1 m de

longitud. El refrigerante se enfriaba con agua que pasa por un anillo que rodea la sección de prueba. Todas las pruebas se realizaron a una temperatura de saturación del refrigerante fija de 40°C, con flujos máscicos de 100, 200, 300 kg/m²·s y un flujo de calor de 7.3-7.7kW/m². Los datos experimentales se compararon con las correlaciones de Traviss et al., Cavallini-Zecchin, Shah, Dobson-Chato, Akers- Rosson, Soliman et al. y Tandon et al., obteniendo resultados con desviaciones promedio del 20%. Por último se presentó una nueva correlación a partir de la propuesta por Dobson-Chato teniendo en cuenta el flujo de calor, el flujo máscico y el calor latente de condensación.

Durante el tercer estudio¹⁵ se midieron los coeficientes de transferencia de calor externos para la condensación de mezclas no azeotrópicas de refrigerantes HFC32/HFC134a y HFC134a/HCFC123 de diferentes composiciones. Las pruebas se realizaron en tubos lisos horizontales con diámetro exterior de 19mm y para una temperatura de vapor de 39°C con una pared subenfriada de 3-8°C. Los resultados mostraron que los coeficientes de transferencia de calor para la mezcla HFC32/HFC134a fueron entre 19,4-46,7% más bajos que los calculados por el método de “mole fraction weighting of pure components” y para la mezcla HFC134a/HCFC123 fue de 23,6-85,1%.

El cuarto estudio¹⁶ trabajó alrededor de la medición de los coeficientes de transferencia de calor para flujos durante la condensación de R22, R134a, R407C, R410A; en el interior de tubos de 9,52 mm de diámetro exterior y 1 m de longitud. Los tubos eran horizontales y podían ser lisos o con microaletas. Los flujos máscicos fueron de 100, 200 y 300 kg/m²·s, con una temperatura de condensación de 40°C y un flujo de calor de 7.7 a 7,9kW/m². Los resultados se compararon con las correlaciones de Akers and Rosson, Soliman et al., Traviss et al., Cavallini- Zecchin, Shah, Tandon et al., Dobson-Chato, y Jung et al. Como conclusión se obtuvo que los coeficientes de transferencia de calor en los tubos microaleteados dieran como resultado entre 2 y 3 veces más altos que los de los tubos lisos.

En el quinto de estos trabajos¹⁷ se midieron los coeficientes de transferencia de calor para condensación externa, de seis refrigerantes inflamables: propileno (R1270), el propano (R290), isobutano (R600a), butano (R600), dimetil-éter (RE170), y HFC32; a una temperatura de vapor de 39°C en un tubo horizontal de 19,0 mm de diámetro exterior, con una pared subenfriada entre 3 y 8°C. Para las pruebas se mantuvo un flujo de calor de 7-23kW/m². El resultado fue el desarrollo de

una nueva correlación general, al modificar la ecuación de Nusselt, y al compararla presentó una desviación menor al 3% con los datos experimentales

Ante la evidente dependencia que existe entre las condiciones hidrodinámicas del flujo bifásico y el coeficiente de transferencia de calor presente, El Hajal et al., culminaron un proyecto que cubría ambos campos en el año 2003, el cual dividieron en dos partes.

La primera parte¹⁸ fue el desarrollo de una nueva versión de un mapa de patrón de flujo bifásico, implementado originalmente por Kattan et al. (1998) para el flujo en ebullición, se presenta para la condensación dentro de tubos horizontales. Este nuevo mapa se realizó teniendo como base las pruebas experimentales de Cavallini^{19, 20} y empleando la técnica del void fraction logarítmico promedio.

En la segunda parte²¹ se propone una nueva metodología para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor, empleando el mapa de patrones de flujo desarrollado en la primera parte. El modelo predice los coeficientes de transferencia de calor puntuales para condensación de los regímenes de flujo anular, intermitente, estratificado ondulado, estratificado totalmente y el flujo de niebla; partiendo del modelo propuesto por Kattan et al. El nuevo modelo se comparó con los datos de pruebas realizadas a 15 fluidos (R-11, R-12, R-22, R-32, R-113, R-125, R-134a, R-236ea, un R-32/R-125 casi azeotrópico, R-404A, R-410A, propano, n-butano, isobutano y propileno) obtenidos en nueve laboratorios de investigación independientes. El nuevo modelo se probó en todo el rango de las siguientes condiciones: velocidades máscicas desde 24 hasta 1022 kg/m²·s, calidad del vapor 0,03 a 0,97, una presión reducida de 0,02 a 0,80 y diámetro interno del tubo de 3,1 a 21,4 mm. El modelo predijo el 85% de los coeficientes de transferencia de calor dentro de un rango de ±20%.

En el 2004 García et al., llevaron a cabo una extensa revisión bibliográfica de las investigaciones realizadas sobre la transferencia de calor en flujo bifásico en pozos y tuberías. Como en otras ocasiones este trabajo se dividió en dos partes.

La primera parte²² es un recuento de los estudios de transferencia de calor de flujo bifásico sin cambio de fase en pozos y tuberías horizontales. Se incluyeron las directrices existentes para modelar el fenómeno, las correlaciones para evaluar el coeficiente por convección forzada, los estudios de fenómenos específicos y las técnicas experimentales utilizadas. Algunas de las

correlaciones analizadas fueron: King (1952), Oliver y Wright (1964), Hughmark (1965), Pletcher y McManus (1968), Martin y Sims (1971), Kago et al. (1986), Deshpande et al. (1991), Hetsroni et al. (1998) y Manabe (2001).

La segunda parte²³ incluye los estudios de transferencia de calor en flujo bifásico sin cambio de fase aplicados a tuberías verticales y conductos anulares.

La conclusión de estos trabajos fue que la mayoría de trabajos desarrollados en este campo se enfocan en fluidos de baja viscosidad, y un amplio porcentaje de los que plantean correlaciones para la transferencia de calor, lo hacen por medio de la ecuación de energía considerando un flujo bifásico homogéneo. Todo esto limita el campo de aplicación de estos modelos en la industria petroquímica, en la cual la mayoría de flujos son de tipo estratificado y de alta viscosidad.

La implementación de sistemas comerciales que utilizan mezclas zeotrópicas de refrigerantes impulsó el desarrollo de nuevos métodos predictivos para el diseño de los mismos, que hasta el momento se analizaban superficialmente. Por este motivo Del Col et al.²⁴, propusieron una versión modificada de la aproximación simplificada de Silver y Bell-Ghaly, la cual incluía los efectos de la rugosidad en la interfaz y de la inestabilidad; además de extenderse el modelo de patrones de flujo de Thome, El Hajal, y Cavallini (2003), para la condensación de líquidos puros y mezclas azeotrópicas para su empleo con mezclas zeotrópicas. Con estos dos trabajos se consiguió una mayor exactitud en la predicción con un menor esfuerzo en el cálculo. Como es normal, los resultados se evaluaron al compararlos con la base de datos obtenida por Cavallini^{25,26}, logrando predecir el 98% de los coeficientes dentro de un rango de $\pm 20\%$, y para el caso de los refrigerantes halogenados más hidrocarburos logró un 85% dentro del rango $\pm 20\%$.

En el año 2005, García et al.²⁷, evaluaron el holdup en tuberías horizontales, mediante el análisis de datos de diferentes fuentes y empleando un modelo teórico que se propone en ese trabajo. Se incluyeron 2276 experimentos de flujo bifásico en tuberías horizontales, que se encontraban dentro de un amplio rango de condiciones operacionales. Los experimentos fueron clasificados por medio de rangos del número de Reynolds de la mezcla y expresiones analíticas para relacionar el holdup del líquido y holdup no deslizante del líquido, con la tasa de flujo volumétrico gas-líquido. La precisión de las correlaciones que se presentaron, fueron comparadas con 26 modelos encontrados en la

literatura, lo cual ratificó que la correlación propuesta presenta una mayor precisión que el resto de modelos.

En ese mismo año Médéric et al.²⁸, presentaron mediciones del perfil de void fraction puntual para un flujo con condensación dentro de un tubo capilar con diámetro interior de 0,56mm. Se debe resaltar que la configuración de las pruebas permitió considerar el estudio de la condensación convectiva. Durante las pruebas se observó que la geometría cilíndrica del tubo induce una distorsión en la forma de la interfaz líquido-vapor, y se usó un modelo óptico para corregir el cálculo del espesor de la película. También graficaron los perfiles del void fraction en tiempo promedio para los diferentes regímenes de flujo establecidos de acuerdo a la tasa de flujo másico. Finalmente, el void fraction promediado de acuerdo a la longitud de condensación, se presentó como una función de los regímenes de flujo.

En el 2006 Rozenblit et al.²⁹, estudiaron de forma experimental los patrones de flujo, la reducción de la resistencia por presión y la transferencia de calor en un flujo vertical ascendente de aire-agua con surfactante, en un tubo de 2,5 cm de diámetro. Por medio de observaciones visuales se concluyó que las burbujas de gas en la solución de aire-agua con surfactante son más pequeñas en tamaño, pero mucho mayor en número que en una mezcla pura de aire-agua, en cualquiera de los regímenes de flujo. Los resultados se compararon con las correlaciones de Sieder & Tate y Kudirka et al., mostrando comportamientos notablemente diferentes. Las líneas de transición en el mapa de régimen de flujo para la solución de agua-aire mezclada con surfactante con una concentración de 300 ppm fueron coherentes con los datos experimentales obtenidos en mezclas diluidas de aire-agua. Además, el surfactante redujo la caída de presión total en el flujo bifásico y la transferencia de calor, especialmente en el régimen de flujo “churn”.

Un estudio particular fue realizado por Walsh et al.³⁰, sobre el flujo bifásico segmentado. El flujo bifásico segmentado slug/bubble se presenta cuando un líquido y un gas se bombean dentro de un tubo en un rango determinado del número de Reynolds. Este flujo segmentado va acompañado de un incremento en la caída de presión que se puede relacionar con el flujo monofásico, donde solo un fluido atraviesa un capilar. Este trabajo examinó teórica y experimentalmente la caída de presión en el flujo slug/bubble con diferentes longitudes de slugs en minicanales. Las correlaciones empleadas para el análisis fueron las de Bretherton (1961) y Kreutzer et al. (2005). En él se determinó que la caída de presión en este tipo de flujo es función de

la longitud de los slugs, el diámetro de la tubería, el número de Reynolds y la capilaridad.

Retornando al campo de revisión de modelos, García³¹ realizó una evaluación experimental de las correlaciones disponibles en el 2009. Además, realizó un estudio experimental de patrones de flujo bifásico aire-agua en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas. En total hizo 493 pruebas de flujo bifásico aire-agua de los cuales 191 correspondían a tubería horizontal y 302 a flujo ascendente. Las distribuciones de las pruebas incluyeron los patrones de flujo estratificado liso y ondulado, tapón, anular y burbuja dispersa. Como resultado de este trabajo se desarrollaron los mapas de patrones de flujo experimentales para cada ángulo de inclinación y se evaluó la capacidad de predicción de cuatro modelos mecanicistas (Taitel y Dukler (1976), Barnea (1987), Xiao et al. (1990) y Ouyang y Aziz (2002)) y dos modelos de correlación (Mandhane et al. (1974) y Mukherjee y Brill (1985)) utilizados comúnmente en la literatura para determinar patrones de flujo. La conclusión fue que los modelos seleccionados tienen un porcentaje de acierto superior al 75 %.

CASOS ESPECIALES

No siempre el interés de analizar flujos bifásicos se ha centrado en la tuberías circulares, en el año 2000 Fore et al.³², midieron el espesor de película y el gradiente de presión en un ducto rectangular de 5,08 x 101,6mm para un flujo anular ascendente de agua y nitrógeno. Durante las pruebas la densidad del gas se modificó con presiones de 3,4 a 17atm y temperaturas de 38 a 93°C. Estas mediciones se compararon con las correlaciones de Fore & Dukler y Asali. Del mismo modo se desarrolló una nueva correlación para el factor de fricción en la interfaz, mejorando la precisión dentro de un amplio rango de números de Reynolds para el gas y espesores de película para el líquido.

Siguiendo un camino similar Tran et al.³³, midieron las caídas de presión durante un cambio de fase con transferencia de calor de tres refrigerantes (R-134a, R-12, y R-113) a seis presiones diferentes dentro del rango 138-856 kPa. Para ello emplearon dos diámetros interiores diferentes de tubería (2,46 y 2,92mm) y un canal rectangular (4,06 x 1,7mm). Los resultados se compararon con la información obtenida de las correlaciones de Friedel (1979), Chisholm (1983), Jung and Radermacher (1989) y Souza and Pimenta (1995); encontrando que en general no se adecúan al comportamiento de las pruebas, pues suministran

valores por debajo de los medidos. Con estos datos se desarrolló una nueva correlación para determinar la caída de presión durante un proceso de evaporación en canales pequeños, la cual se contrastó con los datos experimentales arrojando un error de $\pm 20\%$.

Un trabajo interesante fue presentado por Bilicki³⁴ en el 2002, en él se exploran los aspectos termodinámicos del modelamiento de sistemas bifásicos por los métodos de irreversibilidades termodinámicas, tanto en el modelo clásico (CIT) como en el extendido (IET). Derivó las leyes de conservación para el modelo continuo bifásico y analizó la producción de entropía para sistemas homogéneos y de flujo separado. Como resultado se obtuvieron expresiones de la tasa de producción de entropía por unidad de volumen que permiten identificar los mecanismos de disipación en el sistema de fases separadas y sugerir las formas de las relaciones fenomenológicas para ser adoptadas en las ecuaciones constitutivas.

Dado que una de las principales aplicaciones donde se encuentran flujo bifásicos es en la refrigeración, los capilares han sido blanco de análisis específicos como el realizado por Kawahara et al.³⁵, en el 2002, quienes llevaron a cabo una investigación sobre las características de flujo bifásico en tuberías de diámetro de 100 μm . Para ello determinaron los patrones de flujo bifásico mediante la grabación en vídeo del flujo en tubos capilares transparentes de sílice fundida, en los que se inyectó agua desionizada y nitrógeno a velocidades superficiales de $j_g = 0,1-60$ m/s para el gas, y $j_l = 0,02-4$ m/s para el líquido. También analizaron el void fraction en tiempo promedio y la caída de presión por fricción. Los patrones de flujo observados fueron casi siempre intermitentes y semi-anulares. Con las pruebas se desarrolló un mapa de patrón de flujo con base en la probabilidad de aparición de cada tipo de flujo, y se comparó con los mapas para tuberías de $\sim 1\text{mm}$ de diámetro de Damianides & Westwater (1988), Fukano & Kariyasaki (1993), Triplett et al. (1999) y Zhao & Bi (2001); tras lo cual se pudo encontrar puntos tanto de concordancia como de diferencia.

Yu et al.³⁶, también estudiaron la caída de presión bifásica, la transferencia de calor en procesos de ebullición y el flujo crítico de calor en un pequeño tubo horizontal de 2,98 mm de diámetro interior y una longitud de calentamiento de 0,91 metros. Los experimentos fueron realizados en un sistema presurizado a 200 kPa, mientras los flujos máxicos fueron de 50-200 $\text{kg/m}^2\text{s}$, y las temperaturas de entrada desde la temperatura ambiente hasta 80°C.

Tras las pruebas fue posible realizar algunas modificaciones a la correlación del multiplicador bifásico de Chisholm y a la correlación de transferencia de calor del Laboratorio Nacional de Argonne para pequeños canales con ebullición, con el fin de obtener mejores aproximaciones.

En la búsqueda de mejorar los coeficientes de transferencia de calor en los procesos de condensación, se han desarrollado las placas multicanales, las cuales operan como canales paralelos en los cuales se incrementa el área de transferencia de calor. Kim et al.³⁷, realizaron experimentos en los que se comparó el comportamiento entre las mismas placas de aluminio, unas con microaletas y otras sin ellas. Las pruebas se hicieron con R-410A, y los resultados se compararon con los del R-22 y se obtuvieron para una calidad del vapor entre 0,1-0,9. Del trabajo se pudo extraer que la correlación de Webb suministra resultados razonablemente buenos para las superficies lisas, y se desarrolló una modificación del modelo de Webb & Yang para las superficies con microaletas, la cual suministraba predicciones en un rango de $\pm 30\%$.

Un trabajo que estuvo fuera de lo común fue desarrollado por Wilson et al.³⁸, en éste, tubos de cobre horizontales con un diámetro aproximado de 9 mm, lisos y microaleteados, fueron aplanados sucesivamente con el fin de determinar los cambios en las características del campo de flujo cuando se altera el perfil de un tubo redondo. Para las pruebas se emplearon los refrigerantes R134a y R410A en un rango de flujo de másico de 75 a 400 kg/m²·s y un rango de calidad de 10-80% aproximadamente. La caída de presión se contrastó con las correlaciones de Jung-Radermacher y Souza et al., mientras los coeficientes de transferencia de calor contra la correlación de Dobson-Chato. El trabajo arrojó como resultado que la caída de presión es proporcional al diámetro hidráulico y que el coeficiente de transferencia de calor se incrementó con el aplanamiento de los tubos.

Los mecanismos de condensación también representan una fuente de interés, por este motivo, Coleman et al.³⁹, realizaron una investigación experimental de los mecanismos de flujo para el flujo bifásico durante la condensación del refrigerante R134a. Las pruebas se realizaron en seis tubos de diámetro (4,91 mm), cuadrado ($D_h = 4$ mm, $\alpha = 1$), y rectangulares (4x6 y 6x4 mm : $D_h = 4.8$ mm, $\alpha = 0,67$ y 1,5; 2x4 y 4x2 mm: $D_h = 2,67$ mm, $\alpha = 0,5$ y 2). Para cada tubo se registraron los mecanismos de flujo en toda la gama de calidades, y para cinco flujos másicos de refrigerante diferentes entre 150 y 750 kg/m²·s. Los mecanismos de flujo se

clasificaron en los regímenes de flujo: intermitentes, flujo ondulado, flujo anular, y el flujo disperso. Con los resultados obtenidos se estableció un nuevo mapa de patrones de flujo y límites de transición, cuyos resultados se compararon con los trabajos de Wang et al., Weisman et al. y Coleman & Garimella.

Continuando con las aplicaciones en refrigeración del flujo bifásico, Han et al.⁴⁰, realizaron experimentos de transferencia de calor por evaporación y caída de presión en intercambiadores de calor de placas soldadas con refrigerantes R22 y R410A. Utilizaron intercambiadores de calor de placas con diferentes ángulos 45°, 35° y 20° y durante las pruebas se variaron el flujo másico del refrigerante (13-34 kg / m²·s), la temperatura de evaporación (5, 10 y 15°C), la calidad de vapor (0.15-0,9) y el flujo de calor (2,5, 5,5 y 8,5 kW / m²). Siendo el objetivo medir el calor de vaporización, los coeficientes de transferencia de calor y las caídas de presión. Tras las pruebas se determinó que el número de Nusselt calculado con la correlación de Hsieh & Lin presentaba un error respecto al experimental del $\pm 25\%$ y el factor de fricción del $\pm 15\%$.

En el año 2003, Belghazi et al.⁴¹, llevaron a cabo mediciones del coeficiente de transferencia de calor puntual durante la condensación, para cada fila de un arreglo de tubos trapecoidal con aletas horizontales. Los fluidos empleados fueron HFC-134a puro y varias composiciones de la mezcla binaria no azeotrópica de HFC 134a /HFC 23. La sección de pruebas era de 3 columnas y 13 filas y el coeficiente de transferencia de calor se midió utilizando el método gráfico modificado de Wilson. La temperatura del vapor de entrada fue de 40°C y el caudal de agua en cada fila activa varió desde 170 hasta 600 l/h. La serie de ensayos abarcaron cinco tubos con diferentes tipos de aletas, todas disponibles en el mercado, K11 (11 aletas/pulgada), K19 (19 aletas/pulgada), K26 (26 aletas/pulgada), K32 (32 aletas/pulgada), K40 (40 aletas/pulgada). Los resultados experimentales se evaluaron con los modelos disponibles para predecir el coeficiente de transferencia calor, durante la condensación de fluidos puros en bancos de tubos con aletas. Con los resultados se determinó que los modelos de Honda et al., Murata & Hashizume, y Katz & Geist conducen a valores razonablemente acertados.

Una aplicación especial del flujo bifásico es la inyección de vapor en yacimientos con el fin de mejorar su productividad. Con este enfoque Muñoz⁴² presentó un trabajo en el cual incorporó un balance de los fluidos inyectados y producidos, permitiendo que el modelo evalúe los valores de saturación de agua, saturación

residual de aceite y permeabilidades relativas de los fluidos. La validación del modelo se realizó con el simulador Stars, comprobando que el modelo se comporta bien para yacimientos de crudo pesado con reducida presencia de efectos de frontera.

Otro trabajo que resalta por su particularidad es el de García et al.⁴³, quienes analizaron el accionamiento rápido de sistemas de control de fluidos, que pueden producir flujos transitorios. En esta investigación, se introdujo el comportamiento de proceso politrópico y se obtuvo una nueva ecuación para la velocidad de la onda. Para verificar la validez de los resultados numéricos, se construyó un montaje experimental; los resultados obtenidos se usaron para analizar la respuesta del sistema y estudiar la variación de la velocidad de la onda a lo largo de la zona de cavitación vaporosa distribuida. Al final se obtuvo una buena predicción de la magnitud de la máxima presión con ambos modelos; sin embargo, comparado con los datos medidos, ambos modelos predijeron mayores intervalos de tiempo entre pulsos de presión consecutivos.

En el año 2005 Kuo et al.⁴⁴, realizaron un análisis de la transferencia de calor y la caída de presión asociada a la fricción, con datos experimentales durante un flujo con condensación. El refrigerante seleccionado fue el R-410A, y circulaba en un intercambiador de calor de placas verticales, el cual estaba formado por tres placas de forma sinusoidal en V con un ángulo de 60°. Los resultados permitieron concluir que la caída de presión y el coeficiente de transferencia de calor para el R-410A en el intercambiador de calor, se incrementan linealmente con la calidad promedio del vapor. Con esta información se plantearon nuevas ecuaciones para el diseño de intercambiadores de calor de placas que operen con R-410A.

Un efecto particular sobre los flujos bifásicos fue estudiado por Johnson et al.⁴⁵, quienes en el año 2009, examinaron los efectos de pequeñas inclinaciones en flujos ascendentes, sobre la formación de ondas y las propiedades de las ondas totalmente desarrolladas en condiciones de alta presión. Se realizaron 984 experimentos con seis inclinaciones positivas de la tubería $\theta = 0.00^\circ, 0.10^\circ, 0.25^\circ, 1.00^\circ, 2.50^\circ$ y 5.00° , usando una tubería de 25m de longitud y 10cm de diámetro interior. Se empleó sulfuro hexafluoruro (SF₆) a 8 bares para darle al gas una densidad de 50kg/m³. Las pruebas permitieron identificar dos mecanismos independientes para la formación de las ondas; el primero es la interacción entre las ondas 2D pequeñas y el segundo la inestabilidad de la longitud de onda en

la zona estratificada. El incremento de la fricción en la interfaz asociada a la presencia de ondulaciones se comparó con los modelos de Andritsos (1986) y Johnson et al. (2009).

Un nuevo estudio alrededor de los fenómenos ondulatorios en flujo bifásico fue hecho por Kadri et al.⁴⁶, quienes presentaron un modelo de transición del flujo estratificado al flujo tapón u ondulatorio. El modelo describe la cresta de la onda a lo largo de la tubería y concluyó que si la cresta alcanza la onda descendente y la superpone antes de golpear la parte superior de la tubería, se forma un flujo ondulatorio, de lo contrario será un flujo “slug”. Para la validación del modelo se realizaron mediciones en flujo de aire-agua para flujo horizontal en tubos con diámetros interiores de 0,052 y 0,06 m y se realizaron cálculos numéricos utilizando un simulador de flujo multifásico unidimensional transitorio (MAST).

Por último se abordará el fenómeno del salto hidráulico. Un salto hidráulico es la repentina transición de una alta velocidad de flujo en canal abierto a un flujo con movimiento subcrítico. En el año 2009 Murzyn et al.⁴⁷, realizaron una nueva serie de mediciones experimentales en saltos hidráulicos con números de Froude entre 5 y 8,5, y números de Reynolds a la entrada entre 38.000 y 62.000. Las mediciones en el flujo bifásico incluyeron algunos perfiles verticales de void fraction, la tasa de número de burbujas, y la velocidad de la interfase. En este estudio se encontró que los perfiles de void fraction verticales muestran dos regiones, la primera es la región de esfuerzo cortante turbulento en la parte inferior, y la segunda es la región de superficie libre en la parte superior del flujo. También se encontró que en la región de esfuerzo cortante turbulento se presentan los picos de void fraction y tasa de burbujas. Se encontró que las correlaciones de Resch & Leutheusser (1972) Chanson (1995), Chanson & Brattberg (2000), Murzyn et al. (2005), Chanson (2007) y Gualtieri & Chanson (2007) suministran buenas aproximaciones de los datos experimentales.

PRODUCCIÓN DE HIDROCARBUROS

Ante la complejidad que reviste el análisis de flujos bifásicos, durante años se han empleado correlaciones que involucran simplificaciones del comportamiento térmico de los fluidos como las propuestas por Ramey (1962), Willhite (1967), y Alves (1992) entre otras, lo que reduce su rango de aplicación.

El modelo de Ramey⁴⁸ (1962) para pozos verticales con flujo descendente, supone que la transferencia de calor en el pozo es en régimen permanente mientras que en el yacimiento existe conducción radial en régimen transitorio. También consideró el gradiente geotérmico como constante, aunque no siempre es correcto asumirlo.

Un progreso de este trabajo fue presentado por Satter (1965) quién evaluó el efecto de la condensación del vapor en sistemas de producción de crudo con inyección de vapor. El planteamiento es similar al de Ramey pero es mediante el método de diferencias finitas.

En tanto, Willhite⁴⁹ (1967) desarrolló una ecuación para el coeficiente global de transferencia de calor (U) en pozos verticales de inyección de agua caliente o vapor, así como un procedimiento para el cálculo del coeficiente y de la temperatura del revestimiento. El desarrollo de la ecuación incluyó los procesos de transferencia en cada uno.

Cawkwell y Charles⁵⁰ (1985) desarrollaron un procedimiento para determinar las variaciones de presión, temperatura y composición a lo largo de tuberías con flujo bifásico (gas con líquido condensado) en la tubería de gas de la Isla Sable, costa este de Canadá.

Para ello requirieron dieciséis modelos y correlaciones para predecir gradientes de presión en flujo gas-líquido, planteando el balance de energía para flujo homogéneo en función del cambio de entalpía, que se determinó al igual que el resto de las propiedades termodinámicas con la ecuación de estado de Peng y Robinson.

Un modelo térmico simple fue presentado por Barua⁵¹ (1991) para las corrientes de fluido y los elementos del pozo (de producción o de inyección) en régimen transitorio para la formación. El trabajo incluyó tres algoritmos de solución: uno para arreglo simple (single completion), otro para arreglo doble concéntrico (dual concentric completion) y un tercero para arreglo doble paralelo (dual parallel completion).

En 1991 Hasan & Kabir⁵² desarrollaron dos soluciones analíticas para predecir la distribución radial de temperatura en la formación, una rigurosa y otra aproximada. Estas soluciones se compararon con la de Ramey y presentaron diferencias porcentuales menores a 5% para números de Fourier mayores a 10. En tanto, la solución aproximada mostró una diferencia máxima de alrededor del 5%, respecto a la solución rigurosa, para números de Fourier mayores a 1.5.

Uno de los trabajos más relevantes que presentan modelos térmicos es el de Alves et al.⁵³ (1992), quienes desarrollaron un modelo general unificado para evaluar la distribución de temperatura en tuberías, pozos productores o inyectoras, con flujo monofásico o bifásico para cualquier inclinación desde horizontal hasta vertical.

Bruce y Frederick⁵⁴ (1996) presentaron un modelo semi-analítico para calcular la distribución de temperatura a lo largo de un pozo horizontal que está siendo calentado eléctricamente. El modelo analítico puede ser usado para determinar una estrategia de operación segura, basada en la distribución de temperatura resultante para una corriente de operación y una tasa de producción dada. Encontraron que a lo largo de un pozo horizontal, el calor transferido del yacimiento adyacente por conducción es más significativo que el calor transferido por convección y calentamiento eléctrico. También encontraron que la intensidad de corriente eléctrica para una operación segura en el pozo horizontal, determinada por el incremento de temperatura aceptado, es limitada por el efecto de enfriamiento producido por el fluido.

El modelo desarrollado por Hughmark⁵⁵ permite evaluar el coeficiente de transferencia de calor para flujo intermitente en tuberías horizontales. Este modelo se dedujo de manera analítica, a partir de la analogía entre la ecuación de cantidad lineal de movimiento y la ecuación de energía para flujo turbulento.

Kago et al.⁵⁶, presentaron nuevas correlaciones para evaluar el gradiente de presión y la fracción volumétrica de gas basadas en modificaciones del modelo de Lockhart y Martinelli (1949), además de una correlación para el coeficiente convectivo promedio. La correlación para el cálculo del número de Nusselt bifásico es válida para un número de Reynolds de líquido entre 300 y 300000 considerando que la transferencia de calor depende sólo del flujo de líquido.

Deshpande et al.⁵⁷, desarrollaron correlaciones para determinar coeficientes convectivos en la pared interna de la tubería, analizando principalmente el comportamiento de los mismos en el fondo y en el tope de la tubería. Adicionalmente desarrollaron una correlación para evaluar el coeficiente convectivo bifásico promedio. Deshpande et al. resaltaron la influencia de parámetros hidrodinámicos (frecuencia de tapones y relación de las longitudes del tapón y de la unidad) en la transferencia de calor.

Con el propósito de obtener correlaciones que se adapten mejor el comportamiento de la transferencia de calor en flujo intermitente, correlacionaron los datos experimentales tratando de incorporar en las correlaciones parámetros característicos del flujo intermitente tales como la frecuencia de tapones (v) y la relación entre las longitudes del tapón de líquido y de la unidad (LS/LU).

Los errores de los valores evaluados con las correlaciones para el Nusselt en la parte inferior de la tubería y promedio se mantienen dentro del intervalo de $\pm 10\%$ para el 93.5% de los datos experimentales. Los errores de los valores evaluados con la correlación para el Nusselt en el tope de la tubería están en el intervalo de $\pm 15\%$ para el 90% de los datos experimentales.

En el 2001, Manabe⁵⁸ desarrolló un modelo de transferencia de calor mecanicista el cual está constituido por correlaciones para evaluar el coeficiente convectivo bifásico para cada patrón de flujo. Para flujo horizontal estratificado Manabe propuso evaluar el coeficiente convectivo bifásico a partir del coeficiente convectivo de la película de líquido. Para régimen turbulento, propuso una correlación basada en la relación de presión adimensional, Φ , definida por Lockhart y Martinelli (1949). Este modelo se desarrolló originalmente para el flujo gas natural y crudo con una gravedad de 35° API, pero se empleará en este caso por ser un modelo bastante completo y como punto comparativo.

EQUIPOS Y TÉCNICAS DE MEDICIÓN

Los desarrollos de nuevas correlaciones o modelos que permitan predecir la caída de presión o el coeficiente de transferencia de calor en flujos bifásicos, se hallan condicionados a la capacidad técnica de realizar mediciones precisas y detalladas de las variables involucradas en estos procesos. A continuación se resaltan algunas de las labores más importantes en los últimos años realizadas en este campo.

En el año 1996 Boyer & Lemonnier⁵⁹ presentaron un flujómetro que empleaba un Vénturi como elemento de medición para flujo bifásico disperso; el cual podía ser aire-agua o aceite-agua. También se adaptó un modelo analítico para predecir la velocidad y distribuciones de presión a lo largo de un tubo de Venturi. Las mediciones realizadas se contrastaron con una serie de datos experimentales de modelos clásicos para flujo bifásico, obteniendo una mayor precisión, lo que contribuía enormemente al desarrollo de pruebas más fiables.

El estudio de flujo en capilares y microcanales representa un gran reto para los equipos de medición, pues es frecuente que la precisión de los equipos sea un factor de mayor peso que en el estudio de flujos en tuberías convencionales. Ante este panorama Shin et al.⁶⁰, desarrollaron un equipo y nuevas técnicas experimentales para medir los coeficientes de transferencia de calor para condensación en microcanales. En este estudio se pudo estimar tasas de disipación de calor muy bajas (alrededor de algunos vatios), así como tasas máxicas por debajo de los 0,2 kg/h; todo con una incertidumbre razonable. Estas técnicas proporcionan un medio experimental único para la medición de los coeficientes de transferencia de calor en condensación dentro de canales hidráulicos de diámetro sub-milimétrico. Para el cuidadoso diseño y la construcción del equipo de medición, se investigaron las características de la transferencia de calor puntual y la caída de presión utilizando la condensación del R134a en flujo bifásico, dentro de un tubo horizontal con un diámetro interior de 0,691 mm. Se realizaron pruebas para un flujo másico de 100-600 kg/m²s, un flujo de calor de 5-20 kW/m² y una temperatura de saturación de 40°C. También se presentaron y compararon los datos experimentales del número de Nusselt y del gradiente de presión bifásico por fricción, con las correlaciones existentes de Friedel, Shah y Akers, las cuales no fueron lo suficientemente precisas.

En el 2006 Spielman⁶¹, desarrolló pruebas para comparar la resistividad de una mezcla de aire y agua que fluye por tubos de 1 y 2 pulgadas, con la fracción de líquido en volumen (LVF), en un rango de caudales de aire y agua del 2% al 74% LVF. Se encontró que la resistividad se correlaciona con las mediciones de fracción de líquido en los regímenes de flujo anular y disperso (de 0,5% a 20% LVF) pero no en regímenes de flujo bala, estratificado u ondulatorio. De la misma forma se desarrolló una ecuación para cuantificar la correlación y permitir que la fracción líquida se calcule a partir de mediciones de resistividad, lo que proporcionó una nueva técnica para realizar pruebas experimentales.

MÉTODOS NUMÉRICOS

Un interesante salto hacia el análisis numérico de flujos bifásicos el que dio Panday⁶² al desarrollar una metodología para la condensación en película de vapor que fluye dentro de un tubo vertical y entre placas paralelas. Este modelo permite determinar numéricamente los coeficientes de transferencia de calor, el espesor de película y la caída de presión en el flujo. El análisis se basa en la resolución completa del conjunto

de ecuaciones de capa límite tanto de la fase líquida como del vapor, sin despreciar la inercia ni los términos de convección en las ecuaciones que la gobiernan. De igual forma se tomó en cuenta la turbulencia en el vapor y la película de condensado, mediante el uso de modelos especiales. En el trabajo se describe el método explícito y los procedimientos implícitos por diferencias finitas que se deben emplear.

En el año 2005 Sparrow et al.⁶³, desarrollaron un método de simulación (DOS) que empleó para mejorar la simulación numérica del flujo y la transferencia de calor a través de una placa de microaletas con offset. El problema básico involucra 11 parámetros independientes, pero pudo reducirse gracias a la transformación de las condiciones de frontera. Luego de reducir el número de parámetros, el DOS se usó para limitar el número simulaciones necesarias manteniendo una precisión representativa de los parámetros espaciales. Los resultados obtenidos se contrastaron con la analogía de Colburn para transferencia de momentum y calor, obteniendo que el coeficiente de fricción que se obtiene por el nuevo método sea considerablemente mayor al calculado por la analogía.

En el 2005 Wemmenhove et al.⁶⁴, presentaron el método numérico “improved Volume Of Fluid” (iVOF), el cual se desarrolló para analizar fenómenos específicos en el combustible líquido de satélites, sin embargo, se realizó una modificación en éste para poder analizar los flujos bifásicos. En este método de análisis del flujo bifásico, tanto la fase líquida como la fase gaseosa pueden tener sus propias ecuaciones de continuidad y de movimiento. El manejo de la compresibilidad de la fase gaseosa es importante, pero, como un primer paso en el proceso de modelización, la fase gaseosa se consideró como incompresible. Como contraparte se emplearon el modelo monofásico y el bifásico incompresible, y al compararlos se concluyó que sus resultados son adecuados para el análisis de este tipo de flujos. También es claro que el modelo bifásico presenta menores picos de presión lo cual resalta la precisión de la simulación.

En el año 2007, Fuentes et al.⁶⁵ realizaron un análisis de los esquemas disponibles para el cálculo de intercambiadores de calor con flujo unidimensional, basados en el método de volúmenes finitos (FVM). En este trabajo se evaluó el tiempo que consume el desarrollo de los cálculos con el método secuencial (Temperatura de pared constante, TPC) y el simultáneo (Variación lineal de temperatura, VLT), mostrando que el método más preciso y de menos tiempo de cálculo es el método secuencial.

Como aplicación puntual del flujo bifásico en la generación de energía geotérmica, Kumamoto et al.⁶⁶,

desarrollaron un modelo numérico del reservorio Ogiri, Japón; el cual se caracteriza por la presencia de vapor de agua en dos fases y una zona de fractura a lo largo de Ginyu. En el estudio se aplicó el método MINC a la red bloques correspondientes a la zona de producción del modelo numérico y se llevó a cabo una simulación histórica del modelo, mediante el código TOUGH2 (Pruess et al, 1999). Tras este trabajo se pudo concluir que esta metodología de modelamiento proporcionó la mejor correspondencia con las mediciones realizadas de los transientes de presión y temperatura pero no con las de entalpía.

El más reciente avance en el área del análisis numérico es el desarrollo de un software para simular el flujo de vapor en una tubería, como parte de “GeoSteamNet”: un paquete informático para la simulación del flujo de vapor en una red de plantas de energía geotérmica. En este trabajo⁶⁷ el movimiento de la fase líquida se rige por los siguientes criterios básicos: la conservación de la masa, el principio de movimiento lineal (segunda ley de Newton o Navier Stokes) y la primera y segunda leyes de la termodinámica y donde las ecuaciones no lineales se resuelven con el método de Newton-Raphson. En este trabajo se encontraron limitaciones al empleo de la ecuación de Bernoulli para simular el flujo de vapor, lo cual condujo a reducciones del 36% en la densidad del vapor. Además, se estableció la necesidad de realizar una calibración del modelo numérico, pues muchas de las correlaciones se establecen a partir de estudios experimentales.

CONCLUSIONES

Durante los últimos años se ha logrado reducir el margen de error de las correlaciones y modelos predictivos para el flujo bifásico, desde un 40% hasta valores de alrededor de 25%, gracias a la optimización de los modelos por medio de pruebas experimentales más precisas, con mejores herramientas de control y monitoreo.

Una mayor comprensión de los fenómenos que se presentan en el flujo bifásico ha permitido extender su aplicación, y establecer campos específicos de estudio como los son las superficies microaleteadas en el campo de la refrigeración o los parámetros de flujo en la producción de energía geotérmica.

Los nuevos retos que enfrenta el estudio de flujos bifásicos no son muy diferentes de los planteados hasta el momento, pues lograr mayor precisión y simplicidad en los cálculos sigue siendo la premisa de trabajo.

Aunque hoy en día existe una gran cantidad de correlaciones disponibles para el análisis del flujo bifásico, la gran mayoría se encuentra restringida a condiciones operacionales muy puntuales. Estas restricciones tienen su origen en las condiciones bajo las cuales se llevaron a cabo las pruebas experimentales para su desarrollo.

De la amplia variedad de modelos de cálculo existentes, la gran mayoría tienen su origen en el análisis de situaciones para la industria de la refrigeración, y en algunos casos para la industria del petróleo; sin embargo, el análisis puntual del flujo de vapor saturado carece de estudios detallados.

Es y ha sido factible realizar adaptaciones y/o ajustes a las correlaciones existentes, tanto experimentales como matemáticas, para caracterizar el flujo bifásico de diferentes fluidos (aire-agua, aire-refrigerante, agua-gas, aceite-gas, entre otros).

Se evidenciaron resultados previos de las correlaciones existentes para determinar la caída de presión, el coeficiente de transferencia de calor y las herramientas numéricas para su cálculo, abriendo una ventana para el estudio y modelado del flujo de vapor en líneas de transporte para el proceso de inyección como recobro térmico.

BIBLIOGRAFÍA

- COLLIER, J. y THOME, J. “Convective boiling and condensation”. 3ed. New York: Oxford Science Publications, 1996. 596p.
- FORE, L.; WITTE, L. Y MCQUILLEN, J. “Heat transfer to two-phase slug flows under reduced-gravity conditions”. En: *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 23, No. 2. (1997); p 301-311.
- HETSRONI, G.; HU, B.; YI, J.; MOSYAK, A.; YARIN, L. y ZISKIND, G. “Heat transfer in intermittent air-water flows: Part I Horizontal tube”. En: *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 24, No. 2. (1998); p 165-188.
- HETSRONI, G.; HU, B.; YI, J.; MOSYAK, A.; YARIN, L. y ZISKIND, G. “Heat transfer in intermittent air-water flows: Part II Upward inclined tube”. En: *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 24, No. 2. (1998); p 189-212.
- BOISSIEUX, X.; HEIKAL, M. y JOHNS, R. “Two-phase heat transfer coefficients of three HFC refrigerants inside a horizontal smooth tube, part II: condensation”. En: *International Journal of Refrigeration*. Vol. 23. (2000); p 345-352.
- BADIE, G.; HALE, C.; LAWRENCE, C. y HEWITT, G. “Pressure gradient and holdup in horizontal two-phase gas-liquid flows with low liquid loading”. En: *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 26. (2000); p 1525-1543.
- CAVALLINI, A.; DEL COL, D.; DORETTI, L.; LONGO, G. y ROSSETTO, L. “Heat transfer and pressure drop during condensation of refrigerants inside horizontal enhanced tubes”. En: *International Journal of Refrigeration*. Vol. 23. (2000); p 4-25.
- CAVALLINI, A.; CENSI, G.; DEL COL, D.; DORETTI, L.; LONGO, G. y ROSSETTO, L. “Experimental investigation on condensation heat transfer and pressure drop of new HFC refrigerants (R134a, R125, R32, R410A, R236ea) in a horizontal smooth tube”. En: *International Journal of Refrigeration*. Vol. 24. (2001); p 73-87.
- SMIT, F.; THOME, J. y MEYER, J. “Heat transfer coefficients during condensation of the zeotropic refrigerant mixture HCFC-22/HCFC-142b”. En: *Journal of Heat transfer*. Vol. 124. (Diciembre, 2002); p 1137-1146.
- CAVALLINI, A.; CENSI, G.; DEL COL, D.; DORETTI, L.; LONGO, G.; ROSSETTO, L. y ZILIO, C. “Condensation inside and outside smooth and enhanced tubes: A review of recent research”. En: *International Journal of Refrigeration*. Vol. 26. (2003); p 373-392.
- HETSRONI, G.; MEWES, D.; ENKE, C.; GUREVICH, M.; MOSIYAC, A. y ROSEMBLIT, R. “Heat transfer to two-phase flow in inclined tubes”. En: *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 29. (2003); p 173-193.
- INFANTE, C.; NEWELL, T.; CHATO, J. y NAN, X. “R404A condensing under forced flow conditions inside smooth, microfin and cross-hatched horizontal tubes”. En: *International Journal of Refrigeration*. Vol. 26. (2003); p 433-441.

13. JUNG, D.; KIM, C.; HWANG, S. y KIM, K. "Condensation heat transfer coefficients of R22, R407C, and R410A on a horizontal plain, low fin, and turbo-C tubes". En: *International Journal of Refrigeration*. Vol. 26. (2003); p 485-491.
14. JUNG, D.; SONG, K.; CHO, Y. y KIM, S. "Flow condensation heat transfer coefficients of pure refrigerants". En: *International Journal of Refrigeration*. Vol. 26. (2003); p 4-11.
15. JUNG, D.; SONG, K.; KIM, K. y AN, K. "Condensation heat transfer coefficients of halogenated binary refrigerant mixtures on a smooth tube". En: *International Journal of Refrigeration*. Vol. 26. (2003); p 795-799.
16. JUNG, D.; CHO, Y. y PARK, K. "Flow condensation heat transfer coefficients of R22, R134a, R407C, and R410A inside plain and microfin tubes". En: *International Journal of Refrigeration*. Vol. 27. (2004); p 25-32.
17. JUNG, D.; CHAE, S.; BAE, D. y OHO, S. "Condensation heat transfer coefficients of flammable refrigerants". En: *International Journal of Refrigeration*. Vol. 27. (2004); p 314-317.
18. EL HAJAL, J.; THOME, J. y CAVALLINI, A. "Condensation in horizontal tubes, part 1: Two-phase flow pattern map". En: *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 46. (2003); p 314-317.
19. CAVALLINI, A.; DEL COL, D.; LONGO, G. y ROSSETTO, L. "Condensation heat transfer with refrigerants". En: *Proceedings of Two-Phase Flow Modelling and Experimentation Conference, ETS, Pisa*. Vol. 1 (1999) p. 71-88.
20. CAVALLINI, A.; DEL COL, D.; LONGO, G. y ROSSETTO, L. "Experimental investigation on condensation heat transfer and pressure drop of new HFC refrigerants (R134a, R125, R32, R410A, R236ea) in a horizontal tube". En: *International Journal of Refrigeration*. Vol. 24 (2001); 73-87.
21. EL HAJAL, J.; THOME, J. y CAVALLINI, A. "Condensation in horizontal tubes, part 2: new heat transfer model based on flow regimes". En: *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 46. (2003); p 3365-3387.
22. GARCÍA, F.; SEGURA, J.; MORÁN, D. y GARCÍA, R. "Transferencia de calor en flujo bifásico gas-líquido parte I: pozos y tuberías horizontales". En *Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.* Vol. 19, N° 3. (2004); p 83-99.
23. GARCÍA, F.; SEGURA, J.; MORÁN, D. y GARCÍA, R. "Transferencia de calor en flujo bifásico gas-líquido parte II: Tuberías verticales". En *Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V.* Vol. 19, N° 3. (2004); p 100-112.
24. DEL COL, D.; CAVALLINI, A. y THOME, J. "Condensation of Zeotropic Mixtures in Horizontal Tubes: New Simplified Heat Transfer Model Based on Flow Regimes". En: *Journal of Heat Transfer*. Vol.127 (2005); 221-230.
25. CAVALLINI, A., DEL COL, D., DORETTI, L., LONGO, G. A., AND ROSSETTO, L. "Condensation of R-22 and R-407C Inside a Horizontal Tube," *Proc. of 20th Int. Congress of Refrigeration, IIR/IIF, France*. (1999).
26. CAVALLINI, A., CENSI, G., DEL COL, D., DORETTI, L., LONGO, G. A., ROSSETTO, L., AND ZILIO C. "Analysis and Prediction of Condensation Heat Transfer of the Zeotropic Mixture R-125/236ea". *Proc. of the ASME Heat Transfer Division, ASME, New York, HTD-Vol. 366-4, (2000) p103-110*.
27. GARCÍA, F.; GARCÍA, R. y JOSEPH, D. "Composite power law holdup correlations in horizontal pipes". En: *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 31. (2005); p 1276-1303.
28. MÉDÉRIC, B.; LAVIEILLE, P. y MISCEVIC, M. "Void fraction invariance properties of condensation flow inside a capillary glass tube". En: *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 31 (2005); p 1049-1058.
29. ROZENBLIT, M.; GUREVICH, M.; LENGEL, Y. y HETSRONI, G. "Flow patterns and heat transfer in vertical upward air-water flow with surfactant". En: *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 32. (2006); p 889-901
30. WALSH, E.; MUZYCHKA, Y.; WALSH, P.; EGAN, V. y PUNCH, J. "Pressure drop in two phase slug/bubble flows in mini scale capillaries". En: *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 35. (2009); p 879-884.

31. GARCÍA, F. y HAOULO, M. Estudio experimental de patrones de flujo bifásico aire-agua en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas. En: *Información Tecnológica*. Vol. 20, N° 3. (2009); p 3-12.
32. FORE, L.; BEUS, S. y BAUER, R. “Interfacial friction in gas-liquid annular flow: analogies to full and transition roughness”. En: *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 26. (2000); p 1755-1769.
33. TRAN, T.; CHYU, M.; WAMBSGANSS, M. y FRANCE, D. “Two-phase pressure drop of refrigerants during flow boiling in small channels: an experimental investigation and correlation development”. En: *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 26. (2000); p 1739-1754.
34. BILICKI, Z.; GIOT, M. y KWIDZINSKI, M. “Fundamentals of two-phase flow by the method of irreversible thermodynamics”. En: *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 28. (2002); p 1983-2005.
35. KAWAHARA, A.; CHUNG, P. y KAWAJI, M. “Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel”. En: *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 28 (2002); p 1411-1435.
36. YU, W.; FRANCE, D.; WAMBSGANSS, M. y HULL, J. “Investigation of two-phase flow pattern, void fraction and pressure drop in a microchannel”. En: *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 28 (2002); p 927-941.
37. KIM, N.; CHO, J.; KIM, J. y YOUN, B. “Condensation heat transfer of R-22 and R-410A in flat aluminum multi-channel tubes with or without micro-fins”. En: *International Journal of Refrigeration*. Vol. 26 (2003); 830-839.
38. WILSON, M.; NEWELL, T.; CHATO, J. y INFANTE, C. “Refrigerant charge, pressure drop, and condensation heat transfer in flattened tubes”. En: *International Journal of Refrigeration*. Vol. 26 (2003); 442-451.
39. COLEMAN, J.; y GARIMELLA, S. “Two-phase flow regimes in round, square and rectangular tubes during condensation of refrigerant R134a”. En: *International Journal of Refrigeration*. Vol. 26. (2003); p 117-128.
40. HAN, D.; LEE, K.; y KIM, Y. “Experiments on the characteristics of evaporation of R410A in brazed plate heat exchangers with different geometric configurations”. En: *Applied Thermal Engineering*. Vol. 23. (2003); p 1209-1225.
41. BELGHAZI, M.; BONTEMPS, A.; y MARVILLET, C. “Experimental study and modelling of heat transfer during condensation of pure fluid and binary mixture on a bundle of horizontal finned tubes”. En: *International Journal of Refrigeration*. Vol. 26. (2003); p 214-223.
42. MUÑOZ, Samuel. Desarrollo y ajuste de un modelo analítico de estimulación con vapor. Bucaramanga, 2003. Trabajo de grado (Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos). Universidad Industrial de Santander. 157p.
43. GARCÍA, E.; OSORIO, J. y CORTES, M. “Modelamiento matemático de flujo bifásico: efecto de la velocidad de la onda de presión sobre la magnitud y distribución de presiones”. En: *Dyna*. N°154 (2008); 47-58.
44. KUO, W.; LIE, Y.; HSIEH, H. Y LIN, T. “Condensation heat transfer and pressure drop of refrigerant R-410A flow in a vertical plate heat exchanger”. En: *International Journal of Heat and Mass Transfer*. N°48. (2005); p 5205-5220.
45. JOHNSON, G.; BERTELSEN, A. y NOSSEN, J. “An experimental investigation of roll waves in high pressure two-phase inclined pipe flows”. En: *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 35. (2009); p 924-932.
46. KADRI, U.; MUDDE, R.; OLIEMANS, R.; BONIZZU, M. y ANDREUSSI, P. “Prediction of the transition from stratified to slug flow or roll-waves in gas-liquid horizontal pipes”. En: *Int. J. Multiphase Flow*. Vol. 35. (2009); p 1001-1010.
47. MURZYN, F. y CHANSON, H. “Two-phase flow measurements in turbulent hydraulic jumps”. En: *Chemical Engineering Research And Design*. Vol. 87. (2009); p 789-797.
48. RAMEY, H. “Wellbore Heat Transmission”. *J. of Petroleum Technology* N°225 (1962); p.427-435.
49. WILLHITE, G. “Over-all Heat Transfer Coefficients in Steam and Hot Water Injection Wells”. En: *J. of Petroleum Technology*. (1967); p.607-615.

50. CAWKWELL, M. y CHARLES, M. "Pressures, Temperatures Predicted for Two-Phase Pipelines". En: Oil & Gas J. N°83 (1985) p.101-107.
51. BARUA, S. "Computation of Heat Transfer in Wellbores With Single and Dual Completions". En: SPE 22868 (1991); p.487-502.
52. HASAN, A. y KABIR, C. "Heat Transfer During Two- Phase Flow in Wellbores: Part I-Formation Temperature". En: SPE 22866 (1991); p. 469-478.
53. ALVES, I., ALHANATI, F. y SHOHAM, O." A Unified Model for Predicting Flowing Temperature Distribution in Wellbores and Pipelines". En: Production Engineering SPE 20632 (1992); p. 363-367.
54. BRUCE, C. y FREDERICK, E. "Electrical Heating with Horizontal Wells, the Heat Transfer Problem". En: SPE 37117 (1996); p. 685-698.
55. HUGHMARK, G. "Holdup and Heat Transfer in Horizontal Slug Gas Liquid Flow". En: Chem. Engineering Science N°20 (1965); 1007-1010.
56. KAGO, T., SARUWATARI, T., KASHIMA, M., MOROOKA, S. y KATO, Y. "Heat Transfer in horizontal Plug and Slug Flow for Gas-Liquid and Gas-Slurry Systems". En: J. Chem. Eng. Jpn. N°19 (1986); p. 125-131.
57. DESHPANDE, S., BISHOP, A. y KARANDIKAR, B. "Heat Transfer to Air-Water Plug-Slug Flow in Horizontal Pipes". En: Ind. Eng. Chem. Res. N°30 (1991); p. 2172-2180.
58. MANABE, R. "A Comprehensive Mechanistic Heat Transfer Model and High Pressure Flow Pattern Validation for Inclined Two-Phase Flow". Ph.D. Dissertation, The University of Tulsa. 2001.
59. BOYER, C. y LEMONNIER, H. "Design of a flow metering process for two-phase dispersed flows". En: Int. J. Multiphase Flow. Vol. 22, N°4. (1996); p 713-732.
60. SHIN, S. y KIM, M. "An experimental study of condensation heat transfer inside a mini-channel with a new measurement technique". En: Int. J. Multiphase Flow. Vol. 30 (2004); p 311-325.
61. SPIELMAN, P. "Correlation of resistivity with liquid water fraction in two-phase flow". En: Thirty-First Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California. (2006).
62. PANDAY, P. "Two-dimensional turbulent film condensation of vapours flowing inside a vertical tube and between parallel plates: a numerical approach". En: International Journal of Refrigeration. Vol. 26 (2003); 492-503.
63. SPARROW, E.; ABRAHAM, J. y CHEVALIER, P. "A DOS-Enhanced Numerical Simulation of Heat Transfer and Fluid Flow Through an Array of Offset Fins With Conjugate Heating in the Bounding Solid". En: Journal of Heat Transfer. Vol.127 (2005); 27-33.
64. WEMMENHOVE, R.; LUPPES, R.; LOOTS, E. y VELDMAN, A. "Modeling two-phase flow with offshore applications". En: 24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Halkidiki, Greece. (2005).
65. FUENTES, D.; CHACÓN, J. y Gélvez O. Estrategias de cálculo de intercambiadores de calor por medio del método de los volúmenes finitos. Parte 1: Desarrollo de la formulación.
66. KUMAMOTO, Y.; ITOI, R.; TANAKA, T. y HAZAMA, Y. "Modeling and numerical analysis of the two-phase geothermal Reservoir at Ogiri". En: Thirty-fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California. (2009).
67. MAHENDRA, V. y ARELLANO, V. "Steam flow simulation in a pipeline". En: Thirty-fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California. (2010).

Fecha de recepción: Marzo del 2010

Fecha de aceptación: Mayo de 2010