

Study of the Behavior of Liquid-Liquid Flow in the Coefficient of Energy Loss in Sudden Expansions and Contractions

ASUAJE Miguel, Dr¹ ; ARBEJ Miguel, MSc² 

Universidad Metropolitana, UNIMET, Venezuela,

Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre Sede Barquisimeto

masuaje@unimet.edu.ve, miguelarbej1979@gmail.com

Abstract– One of the challenges in the transportation of highly viscous crude oil is to guarantee the flow of crude oil to be shipped, in addition to complying with operating standards through the pipeline sections and their corresponding accessories. Today, pipeline design focuses on ensuring that energy losses are minimized and flow is optimal. These designs are often based on correlations that have not been developed for raw-water biphasic flows, which are not reported very often in the literature. The present research seeks to predict the fluid dynamic behavior, as well as the energy losses of these two-phase water-viscous crude flows through sudden expansions and contractions.

The coefficients of energy loss "K" in a sudden expansion and contraction were studied for the two-phase liquid-liquid flows with different types of oil: API 30.7 – Water and API 16, varying the water cuts from 0%, 25%, 50%, 75% and 100%. The results obtained for the single-phase water flow were compared with theoretical values. It was determined that the "K" coefficients are dependent on the mixing viscosity and therefore on the volumetric fraction of the dispersed phase both in expansions and in sudden contractions for all the biphasic flows analyzed. It was observed that the transition zone in a sudden expansion increases as the mixing density of the two-phase flows analyzed decreases, and it was also corroborated that the mathematical model of Idel'Chik (1966) underestimates the energy loss coefficients for viscous two-phase flows.

Keywords: *Coefficient of Losses, Contractions, Expansions, Biphasic Flow, Oil-Water*

Estudio del Comportamiento del Flujo Líquido – Líquido en el Coeficiente de Pérdida de Energía en Expansiones y Contracciones Súbitas

ASUAJE Miguel, Dr¹ ; ARBEJ Miguel, MSc² 

Universidad Metropolitana, UNIMET, Venezuela,

Universidad Nacional Experimental Politécnica Antonio José de Sucre Sede Barquisimeto

masuaje@unimet.edu.ve, miguelarbej1979@gmail.com

Abstract– Uno de los desafíos en el transporte de crudo altamente viscoso, es el de garantizar el flujo de crudo a ser enviado, además de cumplir con los estándares de operación a través de las secciones de tuberías y sus accesorios correspondientes. En la actualidad, el diseño de oleoductos se enfoca en garantizar que las pérdidas de energía sean minimizadas y que el flujo sea óptimo. Estos diseños se basan muchas veces en correlaciones que no han sido desarrolladas para flujos bifásicos crudo – agua, los cuales no se reportan muy a menudo en la literatura. La presente investigación busca predecir el comportamiento fluido dinámico, así como las pérdidas de energía de estos flujos bifásicos agua - crudos viscosos a través de expansiones y contracciones súbitas.

Se estudiaron los coeficientes de pérdida de energía “K” en una expansión y contracción súbita para los flujos bifásicos líquido – líquido con diferentes tipos de petróleo: API 30,7 – Agua y API 16, variando los cortes de agua de 0%, 25%, 50%, 75% y 100%. Se compararon los resultados obtenidos para el flujo monofásico agua con valores teóricos. Se determinó que los coeficientes “K” son dependientes de la viscosidad de mezcla y por ende de la fracción volumétrica de la fase dispersa tanto en expansiones como en contracciones súbitas para todos los flujos bifásicos analizados. Se observó que la zona de transición en una expansión súbita se incrementa en la medida que disminuye la densidad de mezcla de los flujos bifásicos analizados, así mismo se corroboró que el modelo matemático de Idel’Chik (1966) subestima los coeficientes de pérdida de energía para flujos bifásicos viscosos.

Keywords: Coeficiente de Pérdidas, Contracciones, Expansiones, Flujo Bifásico, Crudo-Agua

I. INTRODUCCIÓN

El flujo de líquidos a través de expansiones y contracciones súbitas tiene lugar en múltiples aplicaciones de la ingeniería tales como intercambiadores de calor, viscosímetros de tubo capilar, flujo de refrigerantes y en la industria petrolera en general. En este orden de ideas, los perfiles axiales de presión en estos accesorios son ampliamente conocidos para los flujos monofásicos entre la región de separación y de reinserción de la corriente, en contraste a lo señalado en la Referencia [1], donde se señala que existe poco conocimiento de dichos perfiles para los flujos bifásicos.

El flujo de líquidos inmiscibles en tuberías puede adoptar diferentes patrones de flujo y esto último desempeña un rol fundamental en las pérdidas de energía. El presente estudio se enfoca en el análisis de una expansión / contracción súbita cuya geometría está conformada por una tubería de 2 (inch) pulgadas

de diámetro nominal y 1.050 (mm) de longitud conectada en serie (y en su eje central) con una tubería de 1 (inch) pulgada de diámetro nominal y 800 (mm) de longitud (ambas tuberías schedule 40), empleando como fluidos de trabajo flujos bifásicos crudo – agua, para lo cual se consideró un patrón de flujo disperso para la fase secundaria. Se definirán los coeficientes de pérdida de energía “K” así como los perfiles de presión a lo largo de dicho accesorio. Para todos los flujos bifásicos crudo – agua se utilizaron cortes o fracciones de agua (WC por sus siglas en inglés, *Water Cut*) de 0%, 25%, 50%, 75% y 100% tomando en cuenta el punto de inversión de fase para los crudos en estudio, a saber: API 30,7 “Lagomar” como del API 16 “Merey” (ambos crudos venezolanos). Para modelar la fase continua y la fase dispersa; para todos los flujos bifásicos analizados se utilizó un tamaño de partícula dispersa de 40 (μm) y un flujo isotérmico a 15,55 ($^{\circ}\text{C}$).

II. ANTECEDENTES

Tomando como flujo monofásico de agua, la Referencia [2] desarrolló un modelo matemático para describir el comportamiento de los coeficientes de pérdida de energía “K” tanto en expansiones como en contracciones súbitas, que es ampliamente conocido en las aplicaciones industriales.

Igualmente, se han realizado diversas publicaciones sobre flujos bifásicos líquido – líquido a través de estos accesorios. Hwang y Pal (1997) citados en [1] estudiaron de forma experimental el flujo de aceite – agua en expansiones y contracciones súbitas concluyendo que los coeficientes de pérdidas de energía para las emulsiones son independientes de la concentración y su tipo.

También citados en [1], Tapucu, Teyssedou, Troche y Merilo (1989) indicaron que las emulsiones pueden ser tratadas como fluidos pseudo – homogéneos con propiedades promediadas si las partículas dispersas de la emulsión son pequeñas y se encuentran bien distribuidas, por lo cual la caída de presión por el flujo de una emulsión a través de una expansión o contracción súbita se debe calcular de la misma forma que para un flujo monofásico.

En la Referencia [1] emplearon como fluidos para su investigación aceite Bayol – 35, con una densidad de 780 (kg/m^3) y una viscosidad dinámica de 0,00272 (Pa.s) a 25 ($^{\circ}\text{C}$) y agua, con una densidad de 998,2 (kg/m^3) y una viscosidad dinámica de 0,00103 (Pa.s) a 25 ($^{\circ}\text{C}$) con fracciones volumétricas de crudo de: 0, 0,2144, 0,3886, 0,6035, 0,6457,

0,6950, 0,8042 y 0,9728; concluyendo que los coeficientes de pérdida de energía en una expansión súbita son independientes de la velocidad del fluido, mientras que la caída de presión aumenta al incrementarse el flujo másico de entrada. Adicionalmente señalaron que la viscosidad tiene un efecto despreciable en la caída de presión a través de estos elementos.

En [3] señalaron que la longitud de la separación aguas arriba en los planos de contracción se incrementan con números de Reynolds de 104, mientras que para números de Reynolds mayores esta disminuye.

En Referencia [4] estudiaron experimentalmente la caída de presión de flujos bifásicos a través de contracciones súbitas empleando mezclas de aire y líquidos como agua, glicerina acuosa, solución de nitrato de calcio y refrigerante R12 concluyendo que, a diferencia del flujo monofásico, el flujo bifásico no se contrae detrás del borde de transición.

Otro estudio, Ref. [5], evaluaron numéricamente el comportamiento del flujo las expansiones y contracciones súbitas en una geometría conformada por una tubería de 40 (mm) de diámetro y 40 (mm) de longitud unida en serie a una tubería de 20 (mm) de diámetro y 60 (mm) de longitud, empleando para ello el software Fluent®. En su estudio, concluyen que las expansiones súbitas generan una mayor cantidad de remolinos que las contracciones súbitas; además señalan que en las contracciones súbitas la vena contracta se forma en el punto de la contracción y el efecto de la viscosidad es despreciable en la caída de presión a través de esta. La caída de presión se incrementa con las altas velocidades de entrada del fluido y por ende con altos flujos másicos.

Referente a la vena contracta, Ref. [1], concluyeron que para los flujos monofásicos y bifásicos ésta se establece siempre a una distancia de 0,5 diámetros después de la sección de contracción y depende ligeramente de la concentración y velocidad del fluido. En la Fig. 1 se muestra el esquema teórico de las regiones presentes en una expansión y contracción súbita indicado por Ref. [1].

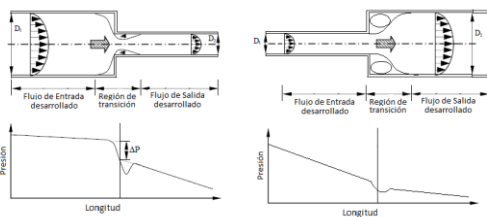


Fig. 1 Regiones en una Contracción Súbita (izquierda) y Expansión Súbita (derecha) [1].

III. SIMULACIÓN

Dominio de Estudio

Un accesorio común encontrado en sistemas de tuberías son las expansiones y contracciones súbitas. El esquema de este

accesorio para la presente investigación puede observarse en la Fig. 2.

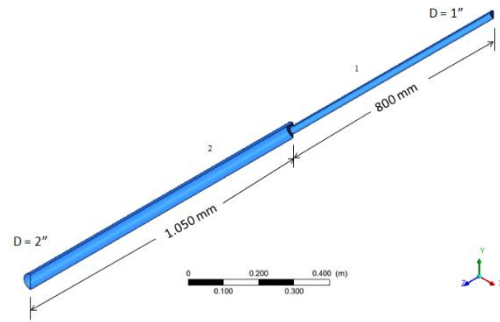


Fig. 2 Geometría del Dominio en Estudio de una Expansión y Contracción Súbita

El coeficiente de pérdida de energía “K” puede ser calculado al efectuar un balance de energía entre los puntos 1 y 2 (Fig. 2) aplicando la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{p_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{\bar{v}_1^2}{2g} - K \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + Z_2 + \frac{\bar{v}_2^2}{2g} \quad (1)$$

$$K = \frac{\left(\frac{P_1 - P_2}{\gamma}\right) + \left(\frac{\bar{v}_1^2 - \bar{v}_2^2}{2g}\right)}{\frac{\bar{v}_1^2}{2g}} \quad (2)$$

Donde: p es la presión (Pa), γ es el peso específico (New/m³), Z la altura, \bar{v} la velocidad promedio (m/s), g la aceleración de gravedad (m/s²).

En este sentido y puesto que se efectuará el análisis con flujos bifásicos siguiendo un modelo homogéneo, el peso específico, γ_m , y la densidad, ρ_m , de los mismos serán calculados a partir de las siguientes correlaciones:

$$\gamma_m = g \sum \beta_i \rho_i \quad (3)$$

$$\rho_m = \sum \beta_i \rho_i \quad (4)$$

Donde β_i representa la fracción volumétrica de la fase i y ρ_i la densidad (kg/m³).

La referencia [6] citó a Hewitt et al. (1997) quien señaló que la viscosidad de mezcla puede ser estimada a partir de la ecuación clásica de Einstein para flujo de burbujas pequeñas, con diámetros menores a 1 (mm) suspendidas en líquido cuando se conoce el punto de inversión de fase del flujo:

$$\mu_m = \mu_c (1 + 2,5\beta_d) \quad (5)$$

Donde: μ_m , representa la viscosidad e la mezcla, μ_c la viscosidad de la fase continua y β_d la fracción volumétrica de la fase dispersa.

El número de Reynolds de mezcla, R_m , se determinará a partir de la siguiente correlación:

$$R_m = \frac{v D \rho_m}{\mu_m} \quad (6)$$

D representa el diámetro de la Tubería.

Propiedades de los Fluidos

En la presente investigación se utilizaron cuatro fluidos de trabajo para efectuar las simulaciones. Se consideraron los flujos multifásicos homogéneos crudo – agua, siendo simulada la fase primaria como un fluido continuo y la fase secundaria como una fase dispersa. Las propiedades de los fluidos se muestran en la Tabla I.

TABLA I
PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS A 15,55 (°C)

Fluido	Tensión Superficial (N/m)	Gravedad Especifica (-)	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad Dinámica (Pa.s)	Tensión Interfacial Crudo - Agua (N/m)
Agua	0,07275	1,0000	997,00	0,001135	-
API 30,7 [10,11]	0,03111	0,8724	875,29	0,018748	0,0186
API 16 [11]	0,03488	0,9593	958,37	1,172566	0,0244

Adicionalmente, las condiciones de contorno para las simulaciones tanto de la expansión como de la contracción súbita se muestran en la tabla II. La tabla III, presenta los diferentes casos simulados.

TABLA II
CONDICIONES DE BORDE

Contracción		Expansión	
Velocidad de Entrada (m/s)	Presión de Salida (Pa _g)	Velocidad de Entrada (m/s)	Presión de Salida (Pa _g)
0,154	0,00	0,600	0,00
0,308	0,00	1,200	0,00
0,616	0,00	2,400	0,00
1,155	0,00	4,500	0,00

TABLA III
CASOS DE ESTUDIO

Flujo	Corte de Agua [%]	Fase Dispersa / Fase Continua
Monofásico		
Agua	-	-
API 30,7 "Lagomar"	-	-
API 16 "Merrey"	-	-
Bifásico		
Agua - API 30,7 "Lagomar"	25	W/O
	50	W/O
	75	O/W
Agua - API 16 "Merrey"	25	W/O
	50	O/W
	75	O/W

Donde W, representa al agua (del inglés: *Water*) y la, O, representa el crudo (del Inglés: *Oil*).

En todos los casos se estableció un flujo en régimen permanente, homogéneo e incompresible. El régimen de flujo (Laminar / Turbulento) son simulados al emplear el modelo matemático de clausura *Shear Stress Transport* (SST por sus siglas en inglés) con funciones estándar de pared. La pared se consideró con una condición de no deslizamiento y con una

rugosidad de $4,6 \times 10^{-5}$ (m). Se efectuaron 72 simulaciones para todos los flujos en total. La herramienta utilizada fue el software CFX®.

Convergencia y Análisis del Mallado

Para la discretización del término de advección, se empleó el método *upwin*. El criterio de convergencia empleado sobre el valor de los residuos de las variables calculadas (masa, componentes de la velocidad, energía cinética de turbulencia, energía turbulenta de disipación y fracción volumétrica) fue el error de Raíz Media Cuadrada (RMS por sus siglas en inglés) con un valor de 1×10^{-4} y los imbalances con un valor de 1×10^{-2} . Se estableció un número máximo de 300 iteraciones por cada punto estudiado. Estos parámetros son considerados adecuados para producir resultados acertados.

El procedimiento para la elaboración del mallado se describe a continuación. Se consideraron cuatro mallas diferentes para determinar el coeficiente de pérdida de energía "K" con agua como fluido de trabajo empleando elementos tetraédricos y hexaédricos no estructurados y estructurados respectivamente para una expansión / contracción súbita (Fig. 3) [7], con la finalidad de analizar la desviación realtiva en su valor.

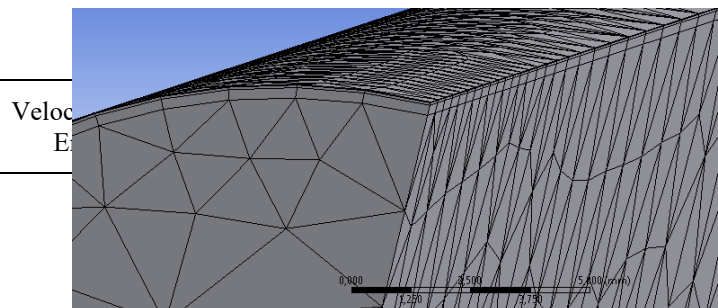


Fig. 3: Detalle de los Elementos de Mallado Empleados en la Geometría.

Después de la tercera malla se observa que los coeficientes "K" para una expansión / contracción súbita presentan un error relativo de 0,63% y 0,87% respectivamente (Tabla IV), correspondiendo dicho resultado a una malla de 608.260 elementos. La Fig. 4, muestra el comportamiento de los coeficientes de pérdidas en función de la malla.

TABLA IV
ESTUDIO DE INDEPENDENCIA DEL MALLADO

No. Elementos	"K" Contracción	Error Relativo (%)	"K" Expansión	Error Relativo (%)
246.384	0,6722	-	0,9570	-
404.496	0,6267	6,77	0,9213	3,73
608.260	0,5950	5,06	0,8595	6,70
1.478.853	0,5898	0,87	0,8649	0,63

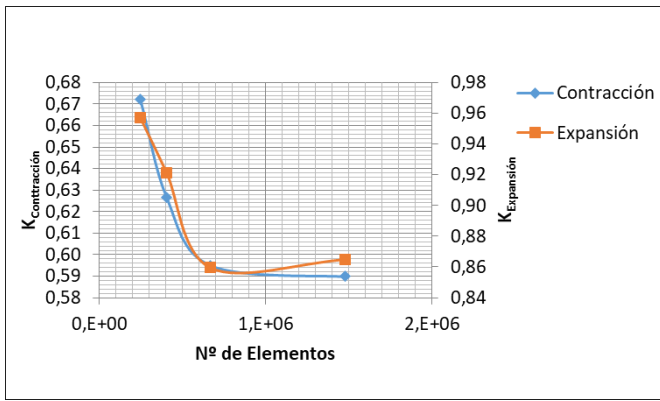


Fig. 4: Independencia del Mallado

Para la malla obtenida se evidenció que el resultado del parámetro y^+ (variable adimensional de la distancia de la pared al primer nodo, el cual permite juzgar la calidad del mallado cerca a la pared de la geometría y los resultados del modelo en la capa límite) se encuentra en un rango entre 0 y 11 (Fig. 5), lo cual sugiere que el resultado es apropiado dado que para el modelo de turbulencia de SST este valor puede encontrarse entre 0 y 200, y cuando este parámetro se encuentra en valores cercanos a 1 el modelo está usando su mayor potencial y produciendo resultados adecuados.

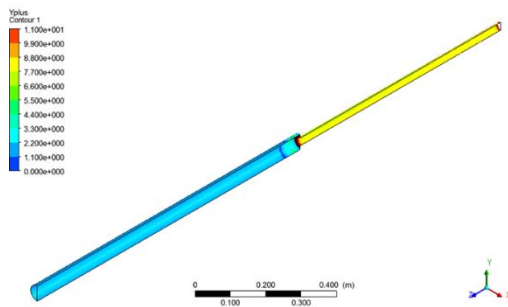


Fig. 5: Resultados y^+ para Simulación Flujo Monofásico Agua en una Expansión / Contracción Súbita.

IV. RESULTADOS

Calibración y Ajustes de Resultados. Planos de Medición

En [8] señaló que un factor fundamental para la validación de la caída de presión entre el modelo CFD y las ecuaciones empíricas, son los puntos de medición que tomó el experimentador en Ref. [2] para la elaboración de sus correlaciones, los cuales se desconocen como indicó la referencia [9]. Por tal razón se motiva a realizar una calibración del modelo CFD (por el inglés: *Computational Fluid Dynamics*) para así determinar los puntos de medición aguas arriba y aguas abajo del codo con los cuales se ajusta la caída de presión a la de las correlaciones presentadas en [2]. Para ello en [8], se implementó la siguiente metodología: para determinar el punto aguas arriba, se buscó el plano para el cual el perfil de velocidad se encuentra completamente desarrollado y no

presenta variación hasta la distancia inmediatamente anterior a la que se exhibe una deformación del perfil debido a los efectos causados por la expansión; y para determinar el punto aguas abajo se busca el plano en donde el delta presión es exactamente igual al determinado con la ecuación reportada en [2]. (metodología realizada para la simulación de agua).

Con base en la descripción anterior se encuentran los planos de medición correspondientes a 0,2 (m) y 0,01 (m) aguas arriba y aguas abajo del codo respectivamente (Fig. 6).

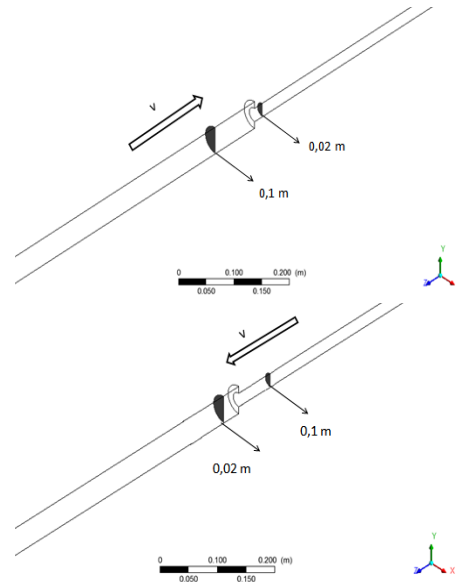


Fig. 6: Planos de medición de presión en Simulación con Agua, en la Expansión / Contracción Súbita.

El resultado de la calibración se representa en Fig. 7, en el cual se muestran los valores de $\Delta H / \Delta H_{max}$ utilizando agua como fluido de trabajo donde (ΔH_{max} corresponde a la caída de presión máxima del modelo de Dinámica de Fluidos Computacional, DFC en español y CFD en inglés).

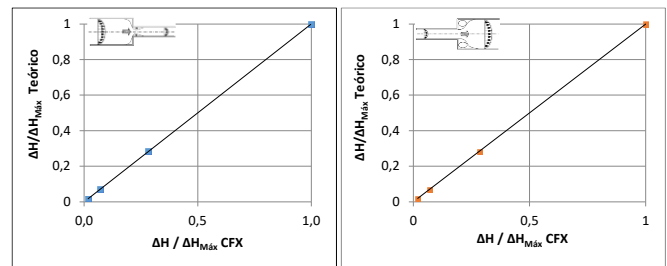


Fig. 7: Comparación de los Coeficientes "K" Teórico y DFC para el Flujo Monofásico Agua en: Contracción Súbita (izquierda) y Expansión Súbita (derecha).

La Referencia [8] señaló que la anterior calibración permitirá identificar la influencia del flujo multifásico sobre la caída de presión dada por las correlaciones de la referencia [2],

con lo cual es posible encontrar una correlación que permita determinar la pérdida de presión en los accesorios de su investigación, o un factor que modifique las correlaciones [2], y realice una corrección al valor del coeficiente de pérdida para este tipo de accesorios cuando se tiene un flujo multifásico crudo-agua.

Resultados. Expansión

En las Fig. 8 y Fig. 9, se evidencia que la correlación experimental, subestima los valores de caída de energía para todos los escenarios simulados en una expansión súbita. En el caso de los flujos bifásicos API 30,7 “Lagomar” - Agua, se observa que los resultados de la correlación y los obtenidos con el modelo numérico se asemejan en la medida que se incrementa el porcentaje de corte de agua de los mismos, obteniendo resultados muy similares para el caso donde se tiene un corte de agua de 75% y el agua corresponde a la fase continua (O/W). Para los flujos bifásicos con crudo API 16 “Merrey” - Agua se visualiza este comportamiento en los casos donde el agua corresponde a la fase continua (O/W), pero para los casos de 0% y 25% de corte de agua (crudo como fase continua) se evidencia la mayor discrepancia entre los valores de la correlación empírica y los resultados de la simulación. Esto se debe a que para estos casos la correlación de IdelChik [2] usa la viscosidad de mezcla determinada para una emulsión, la cual es muy similar a la del agua, obteniendo caídas de presión bajas, mientras que el modelo DFC permite considerar otros términos de interacción entre las fases, obteniendo resultados más reales. Adicionalmente, es importante mencionar que el cálculo del número de Reynolds usado para esta correlación puede presentar un error debido a que actualmente no existe una definición apropiada para este parámetro adimensional en flujos multifásico, y en este caso se ha determinado con base a las propiedades de mezcla del flujo.

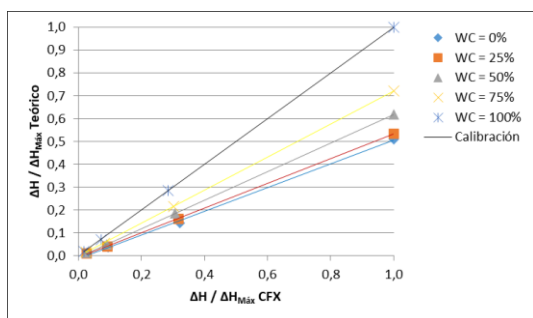


Fig. 8: $\Delta H / \Delta H_{Máx}$ Teórico vs DFC para los Flujos Bifásicos API 30,7 “Lagomar” – Agua en una Expansión Súbita

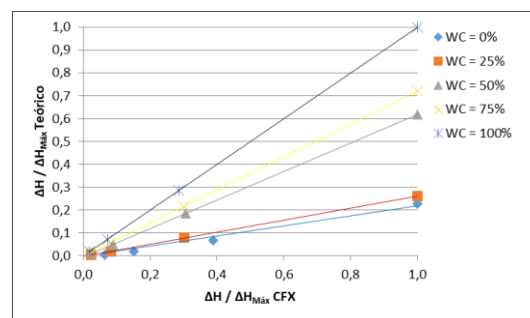


Fig. 9: $\Delta H / \Delta H_{Máx}$ Teórico vs DFC para los Flujos Bifásicos API 16 “Merrey” – Agua en una Expansión Súbita

Siguiendo este orden de ideas, al graficar los coeficientes de pérdida de energía “K” calculados a través de la ecuación (2) vs el número de Reynolds de mezcla calculado a partir de la ecuación (6) para cada flujo se hace evidente que la viscosidad de mezcla de la dispersión afecta significativamente al coeficiente de pérdida de energía en la medida que se incrementa el corte de agua de la dispersión hasta alcanzar el punto de inversión de fase (Fig. 10 y Fig. 11) punto en el cual dichos coeficientes se aproximan a los del agua.

Esta diferencia entre los resultados obtenidos en la presente investigación con los presentados en Referencia [1] se deben a que la viscosidad del aceite empleado por este último es muy cercana a la del agua; mientras que los utilizados en la presente investigación son mayores en varios órdenes de magnitud que los de dicho fluido, por lo cual el efecto del incremento de la viscosidad de mezcla por la inversión de fase son importantes en la presente investigación y despreciables en el trabajo de la Referencia [1].

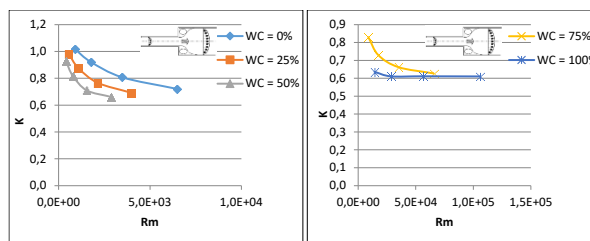


Fig. 10: Coeficientes “K” vs Reynolds de Mezcla para los Flujos Bifásicos API 30,7 “Lagomar” – Agua en una Expansión Súbita

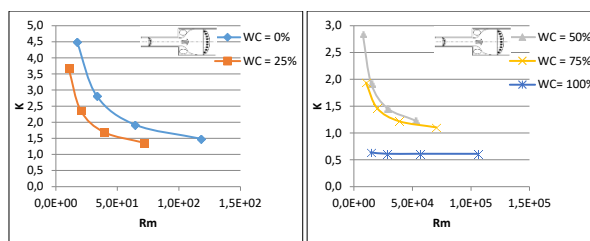


Fig. 11: Coeficientes “K” vs Reynolds de Mezcla para los Flujos Bifásicos API 16 “Merrey” – Agua en una Expansión Súbita

Por otra parte en las Fig. 12 y Fig. 13 se presenta la evolución del perfil de presión a lo largo del accesorio, consistente con lo esperado y reportado ampliamente en la literatura. A mayor corte de agua, menor resulta la caída de presión en la expansión. La máxima caída de presión para todos estos flujos se presenta al inicio de la expansión súbita ($x = 0$ (m)) con una recuperación parcial de presión a 0,2 (m) aguas abajo.

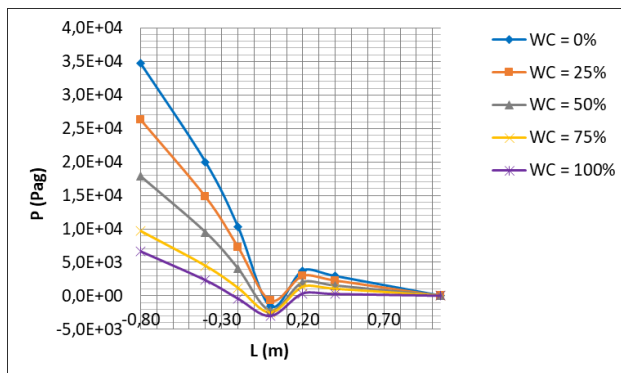


Fig. 12: Perfiles de Presión para los Flujos Bifásicos API 30,7 “Lagomar” – Agua en una Expansión Súbita

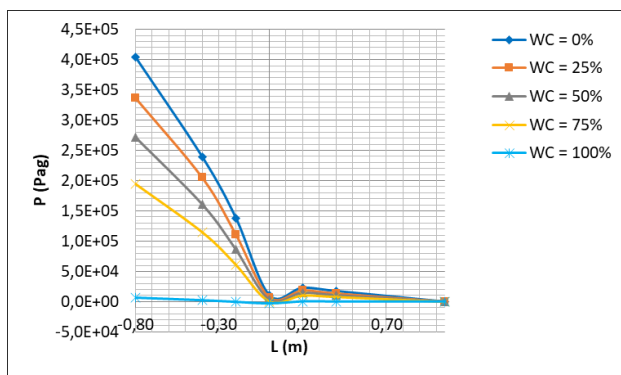


Fig. 13: Perfiles de Presión para los Flujos Bifásicos API 16 “Merrey” – Agua en una Expansión Súbita

En la Fig. 14 se muestra el efecto de la variación del corte de agua sobre los perfiles de velocidad para los flujos bifásicos analizados (con una velocidad de 4,5 (m/s) para cada caso representado). En la Fig. 15 se evidencia como se incrementa la zona de transición en la medida que se incrementa el corte de agua del flujo para los flujos bifásicos API 16 “Merrey” – Agua, mientras que para los flujos bifásicos API 30,7 “Lagomar” – Agua no se evidencia una variación significativa de dicha zona.

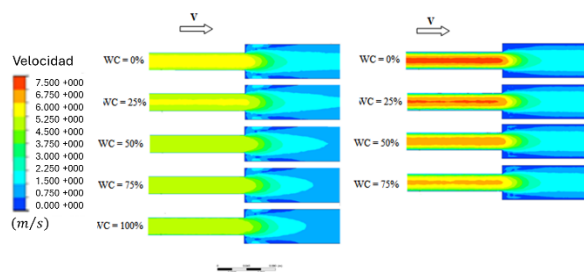


Fig. 14: Perfiles de Velocidad para los Flujos Bifásicos API 30,7 – Agua (izquierda) y API 16 – Agua (derecha) en una Expansión Súbita para una velocidad de 4,5 m/s.

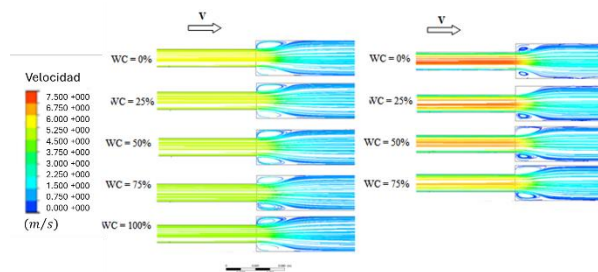


Fig. 15: Líneas de corriente para los Flujos Bifásicos API 30,7 – Agua (izquierda) y API 16 – Agua (derecha) en una Expansión Súbita para una velocidad de 4,5 (m/s).

Resultados. Contracción

De acuerdo a la Fig. 16 y Fig.17, se evidencia que la correlación de Idel’Chik [2], subestima los valores de caída de energía para todos los escenarios simulados en una contracción súbita. En el caso de los flujos bifásicos API 30,7 “Lagomar” - Agua, se observa que los resultados de la correlación de Idel’Chik [2] y los obtenidos con el modelo DFC se asemejan en la medida que se incrementa el porcentaje de corte de agua de los mismos, obteniendo resultados muy similares para el caso donde se tiene un corte de agua de 75% y el agua corresponde a la fase continua (O/W). Para los flujos bifásicos API 16 “Merrey” - Agua se visualiza este comportamiento en los casos donde el agua corresponde a la fase continua (O/W), pero para los casos de 0% y 25% de corte de agua (crudo como fase continua) se evidencia la mayor discrepancia entre los valores de la correlación empírica y el modelo DFC. Esto se debe a que para estos casos la correlación de IdelChik usa la viscosidad de mezcla determinada para una emulsión, la cual es muy similar a la del agua, obteniendo caídas de presión bajas, mientras que el modelo DFC permite considerar otros términos de interacción entre las fases, obteniendo resultados más reales. Adicionalmente, es importante mencionar que el cálculo del número de Reynolds usado para esta correlación puede presentar un error debido a que actualmente no existe una definición única para este parámetro adimensional en flujos multifásico. En este caso se ha determinado con base a las propiedades de mezcla del flujo.

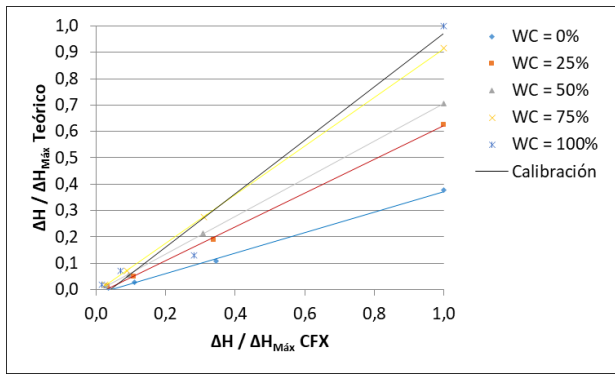


Fig. 16: $\Delta H / \Delta H_{Máx}$ Teórico vs DFC para los Flujos Bifásicos API 30,7 "Lagomar" – Agua en una Contracción Súbita

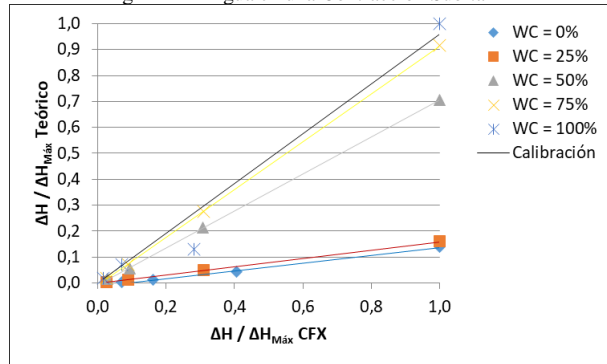


Fig. 17: $\Delta H / \Delta H_{Máx}$ Teórico vs DFC para los Flujos Bifásicos API 16 "Merrey" – Agua en una Contracción Súbita

Siguiendo este orden de ideas, al gráficar los coeficientes de pérdida de energía "K" calculados a través de la ecuación (2) vs el número de Reynolds de mezcla calculado a partir de la ecuación (6) para cada flujo se hace evidente que la viscosidad de mezcla de la dispersión afecta significativamente al coeficiente de pérdida de energía en la medida que se incrementa el corte de agua de la dispersión hasta alcanzar el punto de inversión de fase (Fig. 18 y Fig. 19) punto en el cual dichos coeficientes se aproximan a los del agua.

Esta diferencia entre los resultados obtenidos en la presente investigación con los presentados en [10] se deben a que la viscosidad del aceite empleado por este último es muy cercana a la del agua; mientras que los utilizados en la presente investigación son mayores en varios ordenes de magnitud que los de dicho fluido, por lo cual el efecto del incremento de la viscosidad de mezcla por la inversión de fase son importantes en la presente investigación y despreciables en [10].

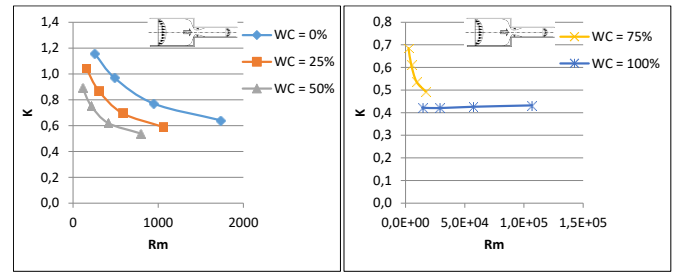


Fig. 18: Coeficientes "K" vs Reynolds de Mezcla para los Flujos Bifásicos API 30,7 "Lagomar" – Agua en una Contracción Súbita

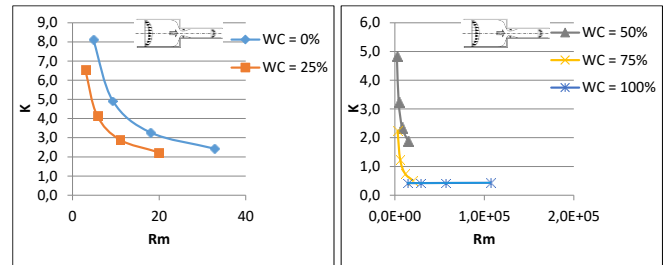


Fig. 19: Coeficientes "K" vs Reynolds de Mezcla para los Flujos Bifásicos API 16 "Merrey" – Agua en una Contracción Súbita

La Fig. 20 y Fig. 21, muestran que existe una caída de presión constante por el efecto de la rugosidad de las paredes de la tubería antes de llegar a la contracción súbita, punto en el cual la caída de presión se incrementa por el efecto del aumento de la velocidad como consecuencia de la reducción de la sección transversal de la tubería. Para el crudo de mayor viscosidad la caída de presión se incrementa en un orden de magnitud, y como esperado a menor corte de agua, mayor es la energía requerida para su movimiento.

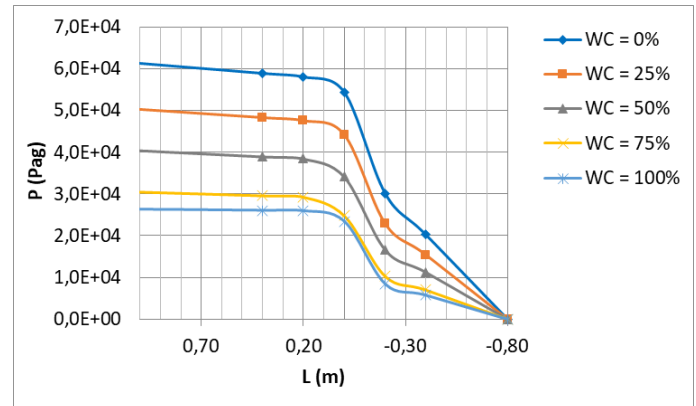


Fig. 20: Perfiles de Presión para los Flujos Bifásicos API 30,7 "Lagomar" – Agua en una Contracción Súbita

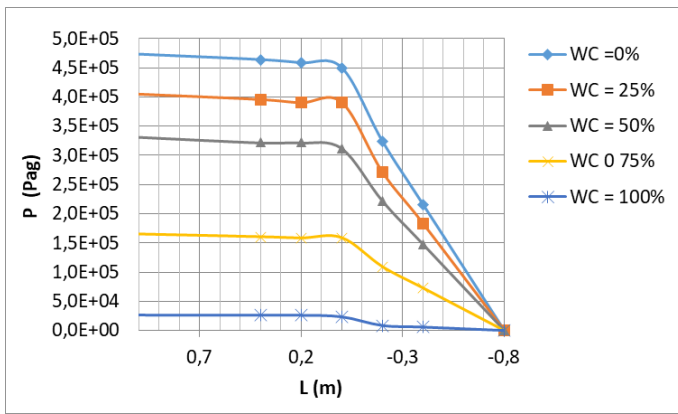


Fig. 21: Perfiles de Presión para los Flujos Bifásicos API 16 “Merrey” – Agua en una Contracción Súbita

En la Fig. 22 se observa como disminuye el cono de velocidad a medida que se incrementa el corte de agua en los flujos bifásicos API 30,7 “Lagomar” – Agua y API 16 “Merrey” – Agua, mientras que en la Fig. 23 no se evidencia una reducción o ampliación en la zona de transición.

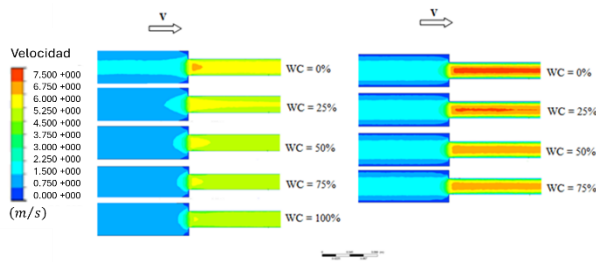


Fig. 22: Perfiles de Velocidad para los Flujos Bifásicos API 30,7 – Agua (izquierda) y API 16 – Agua (derecha) en una Contracción Súbita para una velocidad de 4,5 (m/s).

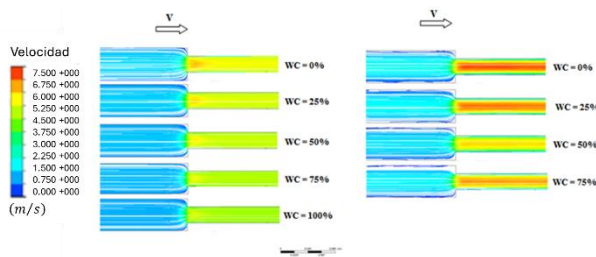


Fig. 23: Líneas de corriente para los Flujos Bifásicos API 30,7 – Agua (izquierda) y API 16 – Agua (derecha) en una Contracción Súbita para una velocidad de 4,5 (m/s).

CONCLUSIONES

- 1.- Los coeficientes de pérdida de energía “K” tanto en expansiones como en contracciones súbitas para los flujos bifásicos líquido – líquido analizados son influenciados por el incremento de la viscosidad de mezcla así como por la disminución de la densidad de mezcla.
- 2.- Para las velocidades de flujos analizados, se constató que los coeficientes de pérdida de energía “K” son un 43% mayores en

una contracción súbita que en una expansión súbita para todos los flujos bifásicos API 16 “Merrey” – Agua; mientras que para los flujos bifásicos API 30.7 “Lagomar” – Agua los coeficientes “K” son mayores en un 27% en las expansiones súbitas que en las contracciones súbitas.

3.- En la expansión súbita se observó una caída de presión abrupta en los perfiles de presión para todos los flujos bifásicos analizados el cual alcanza su máximo valor al inicio de esta ($x = 0$ (m)) con una recuperación parcial de presión a 0,2 (m) después de la expansión.

4.- Los perfiles de presión en una contracción súbita muestran una disminución gradual de este parámetro para todos los flujos bifásicos líquido – líquido analizados hasta alcanzar el inicio de la misma ($x = 0$ (m)) observándose una caída de presión abrupta después de este punto.

5.- En todos los perfiles de presión analizados se evidencia que la viscosidad de la mezcla afecta su comportamiento (contrario como señalo la Referencia [5]).

6.- A medida que se reduce el corte de agua para los flujos bifásicos API 16 – Agua, se evidencia un incremento en la región de transición de la expansión súbita, sin embargo este efecto no se observa para los flujos bifásicos API 30,7 – Agua.

7.- En la contracción súbita se observa el efecto del corte de agua en el desarrollo de la zona de transición por efecto de la viscosidad de los flujos bifásicos analizados.

8.- En los casos analizados para los flujos bifásicos líquido – líquido en una contracción súbita, API 16, no se observó la presencia de la vena contracta.

9.- Se constató que la correlación de Idel’Chik [2] no ofrece una aproximación confiable para flujos con viscosidades elevadas ya que subestima el valor de las caídas de presión.

10.- Para los flujos bifásicos líquido – líquido con una viscosidad del crudo cercana a la del agua se pueden emplear los resultados señalados en la Referencias [1] y [2], pero a medida que se incrementa dicha viscosidad estas correlaciones no ofrecerían una buena aproximación.

REFERENCIAS

- [1] Roul, M; Sahoo, L. 2012. CFD Modeling of Pressure Drop Caused by Two-Phase Flow of Oil/Water Emulsions Through Sudden Expansions. International Journal of Engineering Research and Applications. Vol. 2, 6 pp.1047-1054. ISSN: 2248-9622.
- [2] Idel’Chik. 1966. Handbook of Hydraulic Resistance: Coefficients of Local Resistance and of Friction. Moska – Leningrad.
- [3] Behbahani, T; Dahaghin, A y Behbahani, Z. 2014. Modeling of Flow Through Sudden Contraction in a Crude Oil Pipe Line Using Finite Element Methods. Petroleum & Coal 56(4) pp 359-362. ISSN 1337-7027.
- [4] J. Schmidt, L. Friedel, Two-phase pressure drop across sudden contractions in duct areas, International Journal of Multiphase Flow, Volume 23, Issue 2, 1997, Pages 283-299, [https://doi.org/10.1016/S0301-9322\(96\)00056-0](https://doi.org/10.1016/S0301-9322(96)00056-0).
- [5] Satish, G; Kumar, K; Prasad, V; Pasha, Sk. 2013. Comparison of Flow Analysis of a Sudden and Gradual Change of Pipe Diameter Using Fluent Software. International Journal of Research in Engineering and Technology. ISSN: 2319-1163. Volume: 02 Issue: 12. pp 41 – 45
- [6] Elseth Geir. 2001. An Experimental Study of Oil / Water Flow in Horizontal Pipes. Thesis The Norwegian University of Science and Technology (NTNU). Norwegian.

- [7] Celik, I., Roache, P., Freitas, C., Coleman, H., Raad, P. "Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization," *Journal of Fluids Engineering*, vol. 130, p. 07800, 2008.
- [8] Farfán, A. 2016. Estudio del comportamiento del flujo bifásico líquido-líquido en codos de tuberías mediante técnicas de mecánica de fluidos computacional. Tesis Universidad de Los Andes. Bogota – Colombia.
- [9] Arbej, M. 2014. Estudio del Comportamiento del Flujo Bifásico Líquido – Líquido en uniones de Tuberías tipo Yee empleando Técnicas de Dinámica de Fluidos Computacional. Tesis UNEXPO. Caracas – Venezuela.
- [10] Roul, M; Sahoo, L. 2012. CFD Modeling of Pressure Drop Due to Flow of Oil/Water Emulsions Through Sudden Contraction. *International Journal of Engineering Research and Applications*. Vol. 3, 5 pp.677-682. ISSN: 2231-5381.