

# Improved Prediction of Layered – Unstratified Flow Pattern Transition in Liquid Gas Mixtures

ASUAJE Miguel, Dr<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Metropolitana, UNIMET, Venezuela, masuaje@unimet.edu.ve

<sup>2</sup>Universidad Simón Bolívar, USB, Venezuela, asuajem@usb.ve

*Abstract— Although the whole of humanity is converging on the path of an energy transition oriented towards the use of energy sources with a lower environmental impact with a reduction of the carbon footprint as much as possible, the use of hydrocarbons is still essential even for the progress towards the most awaited clean source, hydrogen. While the use of oil is necessary, the mission of technicians must be to make the industry more efficient in order to reduce its impact on the environment as much as possible. The production of heavy crude oils, generally of high viscosity, is a necessary activity. In general, its transport in pipelines includes the handling of several phases. For the correct design of the lines, flow pattern prediction and pressure drop calculation models are used, which have generally been developed for liquids with low viscosity (close to 1 cP). The present work presents a modification to the transition criterion from stratified flow to stratified non-flow based on Kelvin-Helmholtz instability, incorporating new expressions to improve the estimation of friction losses. The evaluation of the friction factors with the correlations of Churchill and Swamme is proposed. The calculated transition lines are compared and validated against the experimental data of Lin, Andritsos and Hanratty for different diameters and viscosities. With the modifications studied, it can be concluded that they improve the prediction of the transition between 1 and 90 (cP), obtaining better results with the modified criteria when compared with experimental values and the values estimated with the unmodified models.*

*Keywords— Viscous Gas-Liquid Flow, Stratified Flow Transition, Kelvin-Helmholtz Instability*

# Mejora en la Predicción de la Transición de Patrón de Flujo Estratificado – No Estratificado en Mezclas Gas Líquido

ASUAJE Miguel, Dr<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup>Universidad Metropolitana, UNIMET, Venezuela, masuaje@unimet.edu.ve

<sup>2</sup>Universidad Simón Bolívar, USB, Venezuela, asuajem@usb.ve

**Abstract—** Aunque la humanidad entera converge en el camino de una transición de energética orientada al uso de fuentes energías de menor impacto ambiental con reducción al máximo posible de la huella de carbono, el uso de los hidrocarburos aún se hace indispensable incluso para el avance hacia la fuente limpia más esperada, el hidrógeno. Mientras el uso del petróleo sea necesario, la misión de los técnicos debe ser hacer más eficiente la industria de forma de reducir al máximo su impacto al medio ambiente. La producción de crudos pesados, generalmente de alta viscosidad, es una actividad necesaria. En general su transporte en tuberías incluye el manejo de varias fases. Para el correcto diseño de las líneas se utilizan modelos de predicción de patrón de flujo y cálculo de caída de presión, que generalmente han sido desarrollados para líquidos de baja viscosidad (cerca a 1 cP). El presente trabajo presenta una modificación al criterio de transición del patrón de flujo estratificado a no flujo estratificado basado en la inestabilidad de Kelvin- Helmholtz incorporando nuevas expresiones para mejorar la estimación de las pérdidas de fricción. Se propone la evaluación de los factores de fricción con las correlaciones de Churchill y Swamme. Las líneas de transición calculadas son comparadas y validadas contra la data experimental de Lin, Andritsos y Hanratty para diferentes diámetros y viscosidades. Con las modificaciones estudiadas, se puede concluir que mejoran la predicción de la transición estratificado no estratificado para mezclas con viscosidades entre 1 y 90 (cP) obteniendo mejores resultados con los criterios modificados al ser comparados con valores experimentales y los valores estimados con los modelos sin modificar.

**Keywords—** Flujo Gas -Líquido Viscoso, Transición Flujo Estratificado, Inestabilidad de Kelvin – Helmholtz

## I. INTRODUCCIÓN

Una de las áreas prioritarias del desarrollo de la industria petrolera es la optimización de los diferentes procesos asociados a la producción de crudo. La producción de crudo conlleva de una u otra forma la presencia de mezclas gas-líquido a través de tuberías. Así, el análisis del comportamiento hidrodinámico de las mezclas multifásicas en tuberías se ha convertido en uno de los renglones más estudiados en los últimos 50 años. Este campo de la mecánica de fluidos se ha desarrollado desde principio de siglo XX obedeciendo al crecimiento de las industrias nuclear y del combustible fósil. Es así como se ha planteado la necesidad de conocer cómo se comportan las mezclas multifásicas en conductos cerrados para diferentes condiciones de presión, temperatura, viscosidad y otras propiedades determinantes en el transporte.

La mayoría de los estudios desarrollados a la fecha son de carácter empírico o experimental. De los resultados de estas

investigaciones se reportan mapas y correlaciones para la predicción de patrones de flujo, caída de presión y otros parámetros, como el estudio del *hold up* o fracción de líquido a lo largo de la línea de fluido. El carácter experimental de estos estudios limita considerablemente la aplicación de los resultados debido a que las condiciones de laboratorio se alejan de las condiciones existentes en campo.

El caso particular del análisis de la transición de flujo estratificado no estratificado es de gran interés para la predicción de los patrones de flujo. En el estudio de esta frontera se han planteado diversas teorías que tratan de modelar la estabilidad del flujo estratificado y las condiciones de perturbación que producen su transformación a flujo intermitente o anular.

El presente trabajo introduce modificaciones en la consideración del efecto de la viscosidad del líquido en los criterios de estabilidad de Kelvin-Helmholtz para el flujo estratificado, buscando mejorar la predicción de esta frontera. Se analiza el efecto de la viscosidad (mayores a 1 (cP)) en la transición de flujo estratificado no estratificado, comparando con datos experimentales reportados en la literatura.

## II. FLUJO BIFÁSICO

En el estudio del flujo multifásico se usan las ecuaciones fundamentales de la mecánica de fluidos, con la particularidad de que se incrementan en número, función del número de fases en estudio [1]. Sin embargo, las ecuaciones resultan insuficientes ya que las variables de las que depende el flujo de dos o más se incrementan en mayor cantidad que el número de ecuaciones. Es por esto por lo que su estudio se hace complejo y requiere de la mayor información posible a la hora de determinar las caídas de presión y los patrones de flujo en las tuberías.

Las técnicas para analizar el flujo de mezclas bifásicas se pueden agrupar en tres grandes grupos a saber: modelos homogéneos, correlaciones y métodos mecanísticos. Los modelos homogéneos simplemente consideran a el flujo multifásico como un pseudo fluido monofásico de propiedades y características estimadas como un promedio ponderado en función de la proporción de las fases.

Las correlaciones, se basan en el procesamiento y ajuste de las variables involucradas en el flujo de fluidos y que buscan obtener el menor número de ecuaciones con un mínimo de desarrollo teórico. El desarrollar correlaciones tiene que ver con un ejercicio matemático y estadístico de una forma más

avanzada. Este tipo de análisis se puede relacionar con el análisis dimensional o la agrupación de variables determinante en un grupo o unidad lógica de descripción del fenómeno. Una de las ventajas de las correlaciones es que son fáciles de utilizar. Sin embargo, su aplicación produce resultados satisfactorios solo en los límites de experimentación para los cuales fueron desarrolladas por lo que puede reportar grandes errores fuera de la frontera de experimentación.

Los modelos mecánicos o analíticos, se desarrollan a partir de un análisis simplificado de las fuerzas, los campos de presión y velocidades que intervienen en la formación de los patrones de flujo y su relación con la caída de presión. Por esto son considerados más exactos y de una mejor aplicación en la mayoría de los casos de laboratorio e industriales.

Para intentar abordar el estudio del flujo simultáneo de dos o más fases, el primer paso es la determinación de los patrones de flujo. Es decir, determinar el cómo se arreglan las fases dentro de la tubería (Fig. 1).

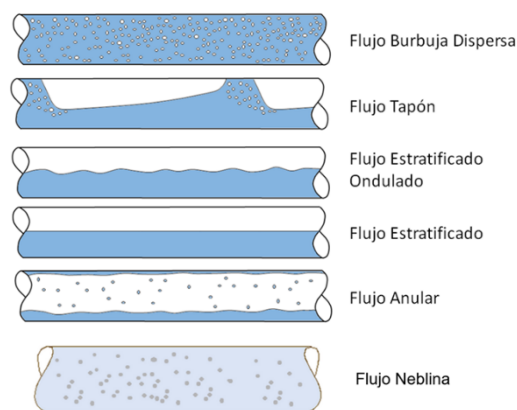


Fig. 1 Patrones de Flujo en Tuberías Horizontales

La tecnología del flujo multifásico en tuberías ha dado grandes cambios a lo largo de su desarrollo.

Uno de los primeros trabajos en la clasificación de los patrones de flujo se encuentra [2], donde se propone un mapa de patrones de flujo basado en los datos experimentales obtenidos por Jenkis (1947), Gazley (1949), Alves (1954) y Kosterin (1949) para mezclas aire agua y datos obtenidos en sistema de gas condensado a través de tuberías de 8 y 10 pulgadas. Posteriormente, se continúan experimentos, orientados al desarrollo de correlaciones capaces de predecir la caída de presión en las líneas de transporte.

Usando una aproximación mecánica, Referencia [3], desarrollan ecuaciones para describir el flujo estratificado en mezclas gas líquido en tuberías horizontales. Incorporan en sus ecuaciones el desarrollo geométrico para una mejor evaluación del diámetro hidráulico de cada fase de fluido. Con estos valores son calculados los números de Reynolds, basados en la velocidad real del fluido y no en las velocidades superficiales. Para su solución proponen la aplicación de un método iterativo. Adicionalmente, proponen un mapa de patrones de flujo basado

en observaciones experimentales. Además, incorporan el efecto del régimen de flujo (laminar o turbulento) en la tubería estudiando los casos de flujo laminar de líquido y turbulento de gas y flujo turbulento-turbulento en ambas fases. Para la consideración del flujo laminar en la fase líquida, toma como solución del perfil de velocidades la expresada por un flujo de Hagen-Poiseuille, mientras que para el caso de flujo turbulento calcula la distribución de velocidades por medio de una expresión empírica. El aporte fundamental de este modelo es que considera el efecto de los esfuerzos de corte en la interfaz, lo que permite una mejor estimación de la caída de presión a lo largo de la tubería.

Posteriormente, Referencia [4], publican un estudio comparativo de la efectividad de las correlaciones y ecuaciones mayormente utilizadas para la predicción de los patrones de flujo, fracción de líquido y caída de presión. Entre los trabajos referenciados por el autor se encuentran: Alves (1954), Huntintong (1955), Hoogendoorn (1959), Al-Sheik (1970), entre otros. Presentan correlaciones basadas en el trabajo desarrollado por Govier y Aziz (1972), evaluando las transiciones de forma experimental.

Referencia [5], consideran la presencia de perturbaciones (ondulaciones) en la interfaz entre el gas y el líquido en flujo anular. Este tipo de perturbaciones se debe fundamentalmente a las grandes velocidades del gas. La forma ondulada en la interfaz produce un incremento en el arrastre del líquido (incremento del esfuerzo de corte interfacial). Este trabajo presenta una correlación netamente experimental para determinar el nivel de líquido y el esfuerzo en la interfaz, en función de las variables controladas (diámetro, caudales, entre otros), dándole especial atención al efecto gravitatorio.

Quizás uno de los trabajos más influyente en el desarrollo de la tecnología multifásica, es la publicación de Referencia [6]. Los autores proponen un modelo mecánico con criterios de transición bien definidos para mezclas gas líquido en tuberías horizontales y poca inclinación. Para el desarrollo de su modelo parten de la definición de flujo estratificado, considerándolo como el patrón de equilibrio a partir del cual desarrollan las ecuaciones y establecen las condiciones de transición. Toman en cuenta el efecto de los esfuerzos de corte y los esfuerzos interfaciales por medio de la expresión de Blassius. Como parámetro determinante en el desarrollo de las transiciones, mencionan la aparición de las ondas en la interfaz. La estabilidad y comportamiento de estas ondas se modela con la teoría de estabilidad de Kelvin-Helmholtz no viscosa. Este análisis determina las condiciones necesarias para la aparición y desarrollo de las perturbaciones que darán el origen de la transición entre patrones de flujo, en primera instancia al flujo intermitente y posteriormente al flujo anular. Como observación principal establecen que el nivel del líquido en la tubería es el parámetro que determina el patrón de flujo que se va a desarrollar como consecuencia de la aparición y crecimiento de las ondas. Otro de los parámetros observados es el crecimiento del puente de líquido (su formación y ruptura).

Como un refinamiento del trabajo presentado en Ref. [6], en Referencia [7], se presenta un modelo corregido para la predicción de los patrones de flujo en tuberías rugosas.

En Ref. [8], enfocan su trabajo al estudio del flujo tapón. El modelo se basa tomando la unidad de tapón donde se representa el tapón como una bolsa de gas encerrada por una película de líquido como consecuencia del gradiente de presiones producido por la acción gravitatoria. Para predecir el tamaño y frecuencia del tapón, realizan un análisis de conservación de masa a lo largo de la unidad de estudio, considerando la variación de la velocidad y no la velocidad del tapón, así como las condiciones geométricas descriptivas del problema, como longitud de la burbuja de gas y la de líquido, altura de líquido fuera del tapón, entre otras.

En Referencia [9], realizan un trabajo netamente experimental analizando mezclas de aire y agua en tuberías de 4,55 (cm) y flujo máxicos de 500 (Kg/h) y 5000 (Kg/h) para aire y agua respectivamente. Plantean en su trabajo, la evolución de los patrones como consecuencia de la variación de los caudales de líquido, y definen trece tipos de patrones, donde consideran los arreglos intermedios. Los resultados incluyen una serie de mapas para todo el rango de inclinación de la tubería.

Continuando en la elaboración de experimentos, en Referencia [10], realizan pruebas en tuberías horizontales y verticales con flujo ascendente. Recalcan, la importancia de los patrones de flujo en el estudio del comportamiento de mezclas en tuberías. En sus trabajos, evalúan los criterios de transición propuestos por Taitel y Dukler (1976) [6] y Madhane (1973) [4], llegando a la conclusión de que las transiciones más importantes a estudiar son las de flujo anular y la de flujo estratificado a intermitente. Presenta un mapa de patrones de flujo en función de variables que involucran las velocidades superficiales de las fases y un parámetro adimensional que considera el efecto de las propiedades y condiciones geométricas del problema. Cabe destacar que este parámetro varía de transición en transición, lo cual es lógico de pensar ya que en cada frontera el efecto de las propiedades es diferente. Una de las conclusiones de los investigadores es que la gravedad es poco influyente para pequeños ángulos de inclinación en flujo ascendente, por lo que el mapa de patrones de flujo para tuberías horizontales presenta una buena aproximación a la predicción.

Las Referencias [11] y [12], recolectan datos para el estudio del flujo bifásico ascendente y descendente. Por otra parte, aplican mejoras a los modelos mecanísticos propuestos anteriormente. En ambos estudios emplean probetas de conductancia y osciloscopio para la determinación de los patrones de flujo. Así determinan, contradiciendo lo obtenido por Weisman, que las pequeñas desviaciones en ángulos de la horizontal modifican considerablemente las transiciones de los patrones de flujo. Como uno de los principales mecanismos que afectan la transición de los patrones es el efecto gravitatorio actuando sobre la capa de líquido. Esto se ve reflejado en que la formación de ondas en la fase líquida (para flujo descendente) se producen de forma natural y no como consecuencia de las

altas velocidades de gas. En el caso de flujo ascendente si se encuentran grandes modificaciones por el efecto de que hay que vencer las fuerzas gravitatorias. Evalúan la interacción de las burbujas de gas con la fase líquida, concluyendo que es de gran importancia para el arreglo de las fases. Esta relación viene dada por el efecto de la fuerza de flotación y de sustentación del gas en el líquido. De igual forma, los investigadores observan que el efecto de coalescencia de las burbujas en la parte superior de la tubería en ciertos ángulos de inclinación, factor que determina la formación del tapón.

Referencia [13], buscando establecer relaciones únicas para la predicción de los patrones de flujo, escribe las condiciones de transición considerando todo el rango de inclinación. Así, presenta un estudio donde unifica los modelos que predicen la transición de los patrones de flujo en estado estacionario. Este modelo incorpora el efecto de las propiedades del fluido, diámetros de tubería y ángulo de inclinación. Los mecanismos de transición para cada frontera son:

- | Fronteras de Transición | Patrón                           | Mecanismo   |
|-------------------------|----------------------------------|---|
| A                       | Estratificado a no estratificado | Inestabilidad de Kelvin-Helmholtz                     |
| B                       | Intermitente a anular            | $h/D \geq 0,35$ y la condición A                      |
| C                       | Estratificado liso a ondulado    | Interacciones viento-onda de Jeffreys                 |
| D                       | Intermitente a burbuja dispersa  | Fluctuaciones turbulentas versus fuerzas de flotación |

El flujo Burbuja Disperso aparece generalmente a altas velocidades de líquido. Este patrón de flujo frecuentemente es designado por flujo burbuja o espuma. La diferencia entre espuma y burbuja disperso no es claramente visible. El flujo burbuja es observado en todo el rango de inclinación, mientras que el flujo espuma solo se observa en tuberías ascendentes. La condición para la formación de la espuma es dos básicamente y tienen que ver con la velocidad de desplazamiento de la burbuja (Burbuja de Taylor) y el valor del ángulo de inclinación de la tubería. Este último debe ser tal que no permita la migración y coalescencia de las burbujas al tope de la tubería.

Para modelar las transiciones desde el flujo estratificado, parten del patrón de flujo estratificado de equilibrio y se basan en la formación de ondas asociadas con inestabilidades de Kelvin-Helmholtz. Estas ondas de amplitud finita tienden a desarrollarse y crecer por efecto de aceleración del gas en la parte superior. Establecen que los efectos principales que intervienen en esta transición son los viscosos y gravitatorios, así como también la cantidad de líquido en el sistema, asumiendo la relación  $h/d$ , como un parámetro de importancia para explicar la transición ( $h$ : altura de líquido y  $d$ : diámetro interno del conducto). Por otra parte, las fuerzas turbulentas originadas por las altas velocidades del gas y el bajo nivel de líquido propician la aparición de flujo anular [13]. Mención separada merece este patrón de flujo del que aún se discute su fenomenología [14].

En Referencia [15], evalúan la influencia de los diversos parámetros en las transiciones de los patrones de flujo

experimentando en tuberías de 2,54 (cm) y 9,53 (cm) de diámetro. Realizan una descripción de los mecanismos de transición involucrados. Para la transición de flujo estratificado a flujo Tapón y flujo Anular, observan dos fenómenos principalmente. Uno es el mojado de la pared superior por ondas de líquido de gran amplitud y el otro es por el desprendimiento de gotas de líquido que se van depositando o pegando en la parte superior de la tubería. Este último mecanismo está vinculado a altos valores de la velocidad de gas en la tubería. Un aporte relevante es el análisis de la variación del diámetro sobre los mecanismos anteriormente descritos. Como principal conclusión, establecen que el mapa propuesto por Madhane es bastante aceptable.

En Referencia [16], analizan el efecto sobre el patrón de flujo estratificado de la longitud de la tubería y la viscosidad del fluido. Establecen que la longitud de la tubería de descarga y la viscosidad del líquido pueden tener inferencia en el comportamiento aguas arriba, en la sección de visualización.

En el trabajo presentado en Referencia [17], estudian la influencia de las Ondas Interfaciales en Flujo Estratificado Gas-Líquido para flujos bajos de gas y líquido en tuberías horizontales. El método más ampliamente utilizado para la predicción de caída de presión y altura de líquido (Hold up) es el propuesto por Taitel- Dukler (1976).

En trabajos previos, los autores, definen dos tipos de ondas en la interface que son:

a.- Ondas regulares bidimensionales.

b.- Ondas de amplitud larga e irregulares asociadas con inestabilidades de Kelvin-Helmholtz.

Ellos consideran que a pesar de que los trabajos de Taitel y Dukler realizan una buena aproximación, pueden ser mejorados si se incorpora la influencia de las ondas en el cálculo de los esfuerzos en la interface. Así, consiguen (de forma experimental) que el factor de fricción en la interfaz es proporcional a la velocidad del gas e independiente al diámetro de la tubería. Además, el incremento de la velocidad del gas es el responsable de la aparición de las ondas. Los autores concluyen, que el efecto de la viscosidad y la velocidad del líquido son secundarios para el rango de viscosidades estudiadas. (0 - 80cP) en diámetros 2,54 (cm) y 9,53 (cm). Concluyen que la diferencia entre el valor de coeficiente de fricción en la interface y el coeficiente del gas es debida a la formación de ondas.

En [18], estudian las transiciones de los patrones de flujo en mezclas de aceite y aire en tuberías horizontales y ligeramente inclinadas. Proponen la utilización de la correlación de Chen (1979) [Zarko Olijic,1981] para el cálculo de factores de fricción en la condición de equilibrio utilizada en el modelo de Taitel y Duckler (1976). De este trabajo concluyen que la modificación propicia mejores resultados en la predicción de patrones de flujo.

Posteriormente, en [19], consideran la estabilidad, en estado estacionario, del flujo anular en co-corriente o contracorriente. Realizan una formulación transitoria basada en el modelo de dos fluidos, obteniendo inestabilidades de Kelvin-

Helmholtz, en su análisis. En este trabajo los autores se basan en el análisis de las ecuaciones de cantidad de movimiento y hacen referencia, al igual que Spedding (1996), a los trabajos publicados anteriormente por Cheremissinoff, Davis y Kowaleski. Logran obtener una correlación que ajusta en mejor forma los esfuerzos de corte en la interface. Además, incluyen una modificación a la correlación de Cheremissinoff, la cual se considera más sólida por tomar en cuenta la distribución de velocidades en la fase líquida provocadas por el arrastre consecuencia de la velocidad del gas.

Buscando una nueva orientación para la interpretación de los mecanismos que intervienen en las transiciones, [20], establece un modelo que explica la formación del tapón sustentado en la formación de un resalto hidráulico con suficiente energía para tocar el tope superior de la tubería. Con el apoyo de la teoría de flujo en represas y superficie libre, establece las condiciones necesarias para la formación de un tapón estable. Posteriormente, realizan estudios del flujo tapón y sus transiciones en tuberías horizontales de grandes diámetros, trabajando con tuberías de 30 (cm) de diámetro. Producen un mapa de patrones de flujo y comparan sus resultados con correlaciones y mapas existentes.

### III. TRANSICIÓN ESTRATIFICADO NO ESTRATIFICADO

Los modelos mecanísticos, que tratan de predecir la formación u aparición de los patrones de flujo en líneas de transporte de mezclas multifásicas, se basan en la simplificación de las ecuaciones de continuidad y movimiento tratando de representar los fenómenos físicos existentes, reduciendo la complejidad numérica del problema. Para el estudio de la transición de flujo estratificado no estratificado uno de los modelos considerados es el criterio de estabilidad de Kelvin-Helmholtz. Este criterio, analiza el comportamiento y desarrollo de las perturbaciones que aparecen en la interfaz de flujo de diferentes densidades. Así, existen dos criterios de estabilidad de Kelvin-Helmholtz, el viscoso y no viscoso, cuya diferencia principal se encuentra en el manejo de las fuerzas que involucran los esfuerzos de corte existentes en ambas fases. El desarrollo matemático detallado del criterio de Kelvin-Helmholtz viscoso, y su caso particular para flujo no viscoso se encuentran en [21].

#### A.- *Modificación del cálculo del factor de fricción.*

Como parte del presente trabajo de grado, se planteó la posibilidad de refinar los modelos para la predicción de la frontera para flujo estratificado no estratificado en mezclas bifásicas. Estas mejoras buscan disminuir el rango de incertidumbre de los modelos a la hora de la predicción de los patrones de flujo. En este particular, los modelos de estabilidad de Kelvin-Helmholtz utilizan correlaciones tipo Blassius para la determinación de los factores de fricción de cada fase con las paredes mientras que el factor de fricción interfacial toma valores de acuerdo con las condiciones de flujo de la fase gaseosa. Las correlaciones tipo Blassius divergen al modificar

las condiciones de flujo en la línea [22]. Por esto se propone la modificación del cálculo de los factores de fricción. Un trabajo similar fue en [18], quienes reportan mejoras obtenidas en el modelo de Taitel & Dukler (1976) al evaluar los factores de fricción por medio de la correlación de Chen (1984). Sus resultados son validados con datos experimentales obtenidos para líquidos viscosos de 7 (cP).

Para la evaluación del factor de fricción, diversos experimentadores analizando resultados de ensayos realizados en diversos tipos de tuberías, han derivado correlaciones que permiten predecir su valor. Ejemplo de estos trabajos son los Colebrook y White, quienes derivaron la expresión:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} + \frac{\epsilon}{3.71 D} \right) \quad (1)$$

A pesar de ser considerada la expresión principal para el cálculo de factores de fricción, la correlación de Colebrook es de estructura matemática implícita, lo que complica su aplicación. Para ello, se han desarrollado recursos gráficos como el Diagrama de Moddy o expresiones explícitas como las propuestas por Churchill, (2), (3) y (4) las cuales funcionan para régimen laminar y turbulento, o la correlación de Swamme (5), la cual es suficientemente precisa y resulta de aplicación más sencilla [23].

Churchill:

$$f = 8 \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{3/2}} \right]^{1/12} \quad (2)$$

Donde:

$$A = \left[ 2.457 \ln \left( \frac{1}{\left( \frac{7}{Re} \right)^{0.9} + \frac{0.27\epsilon}{D}} \right) \right]^{16} \quad (3)$$

$$B = \left[ \frac{37530}{Re} \right]^{16} \quad (4)$$

Swamme:

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log \left( \frac{\epsilon}{3.7 D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (5)$$

El cálculo del factor de fricción, con las nuevas expresiones, afecta básicamente los términos que involucran los esfuerzos de corte. Por lo tanto, solo influyen en la ecuación de estabilidad de Kelvin-Helmholtz viscoso. Sin embargo, la ecuación de equilibrio de flujo estratificado utilizada en los modelos de estabilidad (Kelvin-Helmholtz) estudiados requiere conocer los efectos de las fuerzas producidas por corte. Por ello esta modificación influye indirectamente en los modelos, viscoso y no viscoso. Es importante destacar, que para el criterio de estabilidad de Kelvin-Helmholtz viscoso, es necesario evaluar las derivadas de los factores de fricción

respecto a las velocidades superficiales y el “hold up” líquido en la tubería. Este desarrollo matemático es presentado en [21].

## IV. RESULTADOS

### A.- Modificación de Churchill

Para la validación de los criterios de transición modificados, en el cual se calculan los factores de fricción por la correlación de Churchill (2), (3) y (4), se presentan mapas de patrones de flujo con puntos experimentales de los investigadores ya mencionados.

En la Fig. 2, se observa claramente que el modelo VKH modificado (línea verde), presenta la mejor cota, para la transición estratificado no estratificado, sobre todo en la zona de velocidad de gas menores a 1 (m/s), donde los criterios no viscosos (IKH), no modificado y modificado, sobrestiman la transición. A pesar de esta diferencia, se puede observar que el modelo no viscoso, modificado por Churchill se encuentra más cercano a la frontera experimental, reportando resultados satisfactorios para velocidades superficiales de gas mayores a 15 (m/s).

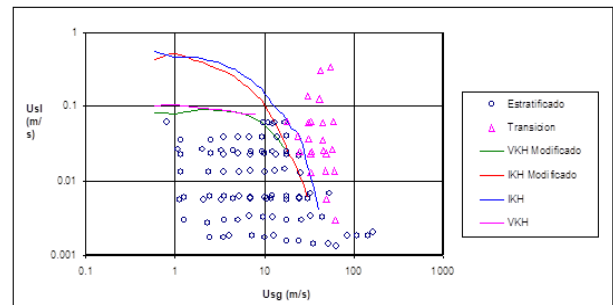


Fig. 2 Transición Estratificado- No Estratificado. Modelos convencionales y modificados. Datos experimentales Lin y Andritsos. Mezcla Agua-Aire. Tubería horizontal D=0,0254(m)

En la Fig. 3, se observa el mismo fenómeno explicado para la Fig. N°2. La diferencia se encuentra en el diámetro utilizado en los experimentos. En este caso, se ratifica el mejor ajuste del VKH modificado. Sin embargo, se observa que las líneas trazadas con los criterios de estabilidad modificados irrumpen en la zona de flujo anular. Comparando en este caso contra los criterios no viscosos, el IKH modificado sigue siendo mejor opción para predicción en altas velocidades de gas.



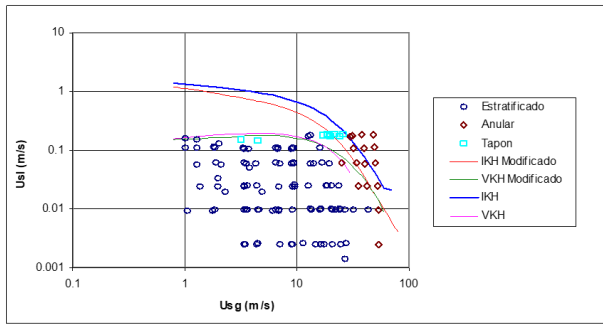


Fig. 3 Transición Estratificado- No Estratificado. Modelos convencionales y modificados. Datos experimentales Lin y Andritsos. Mezcla Agua-Aire. Tubería horizontal D=0,0953(m)

Para analizar el efecto de la viscosidad sobre los criterios de transición, en la Fig. 4, se muestran datos para viscosidad de líquido de 16 (cP). En este mapa, se presentan resultados similares a los obtenidos con aire y agua ya mostrados en las figuras anteriores. Como era de esperarse los valores de velocidad superficial de líquido para el punto de la transición han disminuido. Al igual que en casos anteriores, el criterio IKH presenta mejores resultados al ser modificado. Por otra parte, los modelos VKH, presentan resultados similares, donde para altas velocidades de gas la mejor aproximación es dada por VKH tradicional. Similar a la Fig. 2, el efecto de ser una tubería de diámetro pequeño, influencia notoriamente en el comportamiento de la estabilidad.

No obstante, en la Fig. 5, se observa que la mejor predicción es reportada por el modelo viscoso modificado, donde la línea bordea casi a plenitud los puntos experimentales. Es de pensar entonces, como se mencionó anteriormente, que el parámetro que promueve la inestabilidad en este caso es el diámetro, desplazando a la viscosidad del líquido a un segundo plano. Esta observación concuerda perfectamente con lo reportado en [15].

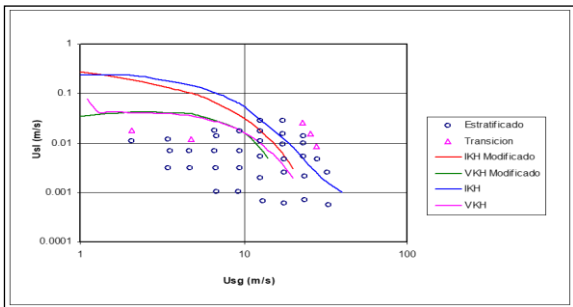


Fig. 4 Transición Estratificado- No Estratificado. Modelos convencionales y modificados. Datos experimentales Lin y Andritsos. Mezcla Glicerina-Aire. Tubería horizontal D=0,0254(m),  $\mu_L = 16$  (cP)

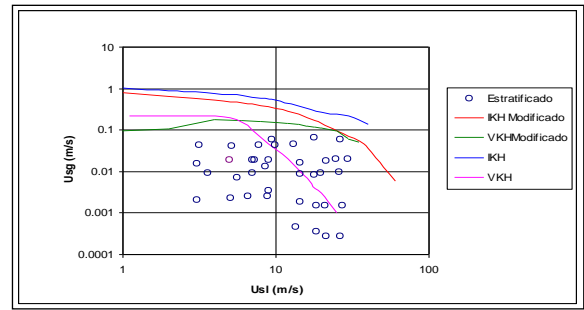


Fig. 5 Transición Estratificado- No Estratificado. Modelos convencionales y modificados. Datos experimentales Lin y Andritsos. Mezcla Glicerina-Aire. Tubería horizontal D=0,0953 (m),  $\mu_L = 12$  (cP)

Para viscosidades de 70 y 80 (cP), la Fig. 6 y la Fig. 7, ratifican los resultados ya presentados. En diámetros pequeños los modelos modificados sub predicen la zona de flujo estratificado.

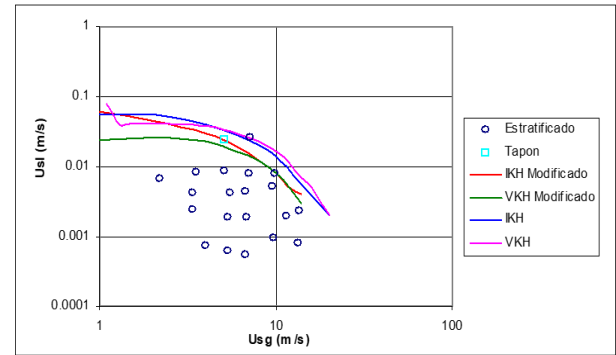


Fig. 6 Transición Estratificado- No Estratificado. Modelos convencionales y modificados. Datos experimentales Lin y Andritsos. Mezcla Glicerina-Aire. Tubería horizontal D=0,0254 (m),  $\mu_L = 70$  (cP)

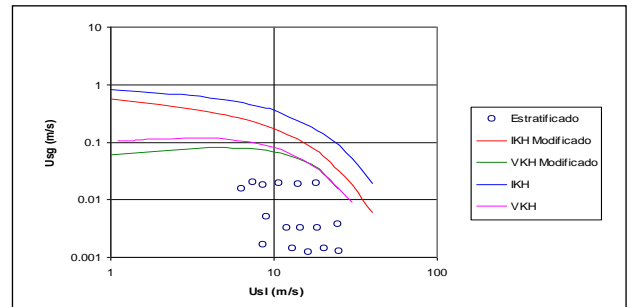


Fig. 7 Transición Estratificado- No Estratificado. Modelos convencionales y modificados. Datos experimentales Lin y Andritsos. Mezcla Glicerina-Aire. Tubería horizontal D=0,0953 (m),  $\mu_L = 80$  (cP)

### B.- Modificación de Swamme

A fin de comparar el efecto del empleo de diferentes correlaciones para el cálculo de los factores de fricción, sobre los criterios de estabilidad, se presentan en Fig. 8, Fig. 9 y Fig. 10, los criterios de estabilidad modificados por la correlación de Swamme [23]. Para esta modificación se obtiene una mejor

aproximación para la predicción de la frontera incluso para pequeños diámetros.

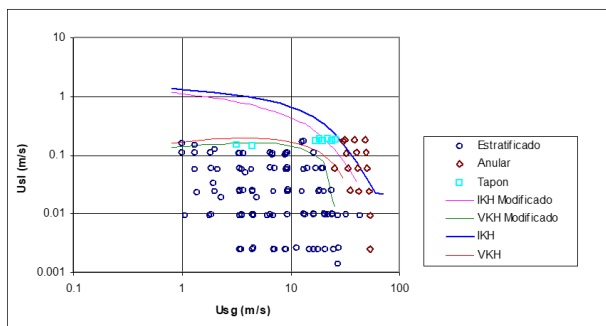


Fig. 8 Transición Estratificado- No Estratificado. Modelos convencionales y modificados por correlación de Swamme. Datos experimentales Lin y Andritsos. Mezcla Agua-Aire. Tubería horizontal  $D=0,0953$  (m)

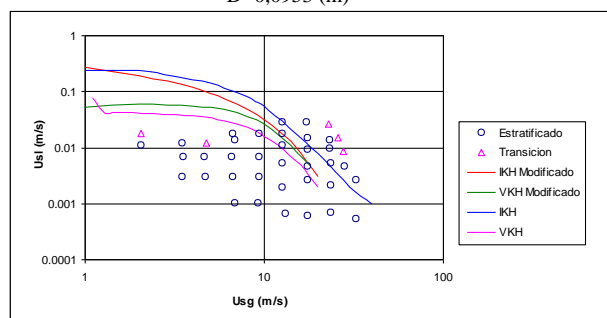


Fig. 9 Transición Estratificado- No Estratificado. Modelos convencionales y modificados por correlación de Swamme. Datos experimentales Lin y Andritsos. Mezcla Glicerina-Aire. Tubería horizontal  $D=0,0254$  (m),  $\mu_L = 16$  (cP)

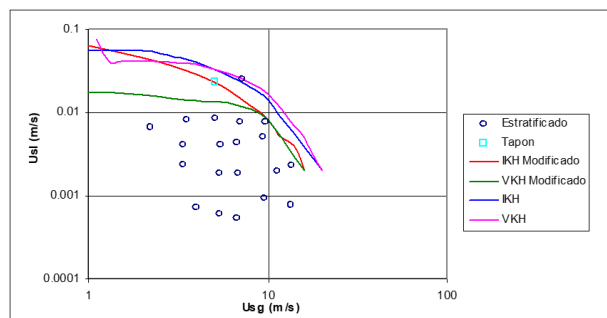


Fig. 10 Transición Estratificado- No Estratificado. Modelos convencionales y modificados por correlación de Swamme. Datos experimentales Lin y Andritsos. Mezcla Glicerina-Aire. Tubería horizontal  $D=0,0254$ (m),  $\mu_L = 70$  (cP)

#### IV. CONCLUSIONES

Con base a los resultados presentados, se concluye y recomienda lo siguiente:

1.- Para los líquidos de baja viscosidad estudiados, los modelos tradicionales sobre predicen la frontera de transición obteniéndose una mejor aproximación con los modelos modificados.

2.- Para diámetros pequeños (0.0254 (m)), los criterios de transición modificados evaluados sub predicen la línea, dando mejores resultados a diámetros mayores (0.0953 (m)).

3.- Los criterios modificados, permiten la incorporación de los efectos de la rugosidad de la tubería, por lo que puede ser aplicados a casos prácticos.

4.- A pesar de que la desviación existente entre los valores de los coeficientes de fricción, calculado por las diferentes correlaciones no sobrepasa el 5%, se pueden observar cambios considerables en los criterios de transición.

5.- Se recomienda evaluar los criterios modificados con valores de viscosidad superiores a los analizados en este trabajo. Con esto se puede validar su aplicación en un espectro mayor.

6.- Se sugiere evaluar, el efecto de los diferentes términos involucrados en el cálculo de los criterios, sobre para VKH, de manera de observar los valores responsables de las discrepancias en los resultados.

7.- A pesar de que solo se presentan aplicación de los modelos para tubería horizontal, estos pueden ser utilizados para tuberías ligeramente inclinadas, pero se recomienda su validación con datos experimentales para esta condición de operación.

#### REFERENCIAS

- [1] Wallis G., One Dimensional Two-phase Flow, (1ra. Edición) Pág. 3-13. Mc Graw Hill, New York (1969)
- [2] Baker O., Simultaneous Flow of Oil and Gas, The Oil Gas Journal, Pág.185-195, (1954)
- [3] Agrawal S. S., Gregory G. A., Govier G. W., An analysis of horizontal stratified two-phase flow in pipes. The Canadian Journal of Chemical Engineering, First published: June 1973 <https://doi.org/10.1002/cjce.5450510303>
- [4] Madhane J. M. Gregory G. A. Aziz K., A Flow Pattern Map for Gas-Liquid Flow in Horizontal Pipes, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 1, Pág.537-553, (1974)
- [5] William H. Henstock, Thomas J. Hanratty, The interfacial drag and the height of the wall layer in annular flows, Volume22, Issue6, Pages 990-1000 First published: November 1976 <https://doi.org/10.1002/aic.690220607>
- [6] Tailtel Y. Dukler A. E., A Model for Predicting Flow Regimen Transitions in Horizontal and near Horizontal Gas Liquid Flow, AIChE Journal , Vol. 22, N° 1, Pág.47-55, (1976)
- [7] Tailtel Y., Brief Communication Flow Pattern Transitions in Rough Pipes, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 3, Pág. 597-601, (1977)
- [8] M. K. Nicholson, K. Aziz, G. A. Gregory, Intermittent two-phase flow in horizontal pipes: Predictive models, Volume56, Issue6, Pages 653-663 First published: December 1978 <https://doi.org/10.1002/cjce.5450560601>
- [9] Spedding P. L. Van Thanh Nguyen., Regimen Maps for Air Water Two Phase Flow, Chemical Engineering Science, Vol. 55, Pág.779-793, (1979)
- [10] Weisman J. Ducan D. Gibson J. Crawford T., Effects of fluid properties and pipe diameter on two-phase Flow Patterns in horizontal lines, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 5, Pág.437-462, (1979)
- [11] Barnea D., Shoham O. y Tailtel Y., Flow Pattern Transitions for Downward Inclined Two Phase; Horizontal to Vertical, Chemical Engineering Science, Pág.735-740, (1981)
- [12] Barnea D. Luniski Y. Tailtel Y., Flow Pattern in Horizontal and Vertical Two Phase Flow in Small Diameter Pipes, The Canadian Journal of Chemical Engineering, Vol. 61, Pág.617-620, (1983)
- [13] D. Barnea, A unified model for predicting flow-pattern transitions for the whole range of pipe inclinations, International Journal of Multiphase Flow, Volume 13, Issue 1, 1987, Pages 1-12, [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(87\)90002-4](https://doi.org/10.1016/0301-9322(87)90002-4).



- [14] Tong L. S., Tang Y. S., Boiling Heat Transfer and Two-phase Flow, (2da. Edición) Pág. 161-169. Taylor & Francis, Washington, D. C. (1997)
- [15] P.Y. Lin, T.J. Hanratty, Effect of pipe diameter on flow patterns for air-water flow in horizontal pipes, International Journal of Multiphase Flow, Volume 13, Issue 4, 1987, Pages 549-563, [https://doi.org/10.1016/0301-9322\(87\)90021-8](https://doi.org/10.1016/0301-9322(87)90021-8).
- [16] Tailtel Y. Dukler A. E., Effect of Pipe Length on The Transition Boundaries for High-Viscosity Liquids, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 13, N° 4, Pág.577-581, (1986)
- [17] Andritos N. Williams L. Hanratty T. J., Effect of Liquid Viscosity om The Stratified-Slug Transition Boundaries in Horizontal Pipe Flow, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 15, N° 6, Pág.877-892, (1988)
- [18] Kokal S., Stanilav J., An Experimental Study of Two-phase Flow in Slightly Inclined Pipes. Flow Patterns, Chemical Engineering Science, Vol. 44, N° 3, Pág. 665-679, (1989)
- [19] Barnea D. y Tailtel Y., Transient-Formulation Modes and Stability of Steady-State Anullar Flow, Chemical Engineering Science, Vol. 44, N° 2, Pág.325-332, (1989)
- [20] Jepson W. P. Taylor R. E., Slug Flow and its Transitions in Large Diameter Horizontal Pipes, International Journal of Multiphase Flow, Vol. 19 N°3 , Pág.411-420, (1993)
- [21] Asuaje M. (1999). Transición estratificado – no estratificado en flujo gas – líquido viscoso en tubería horizontal. Trabajo de grado. Universidad Simón Bolívar. Caracas.
- [22] Spedding P. L. Hand N. P., Prediction in stratified-liquid co-current flow in horizontal pipelines, International Journal Heat and mass Transfer, Vol. 40, N° 8, Pág.1923-1935, (1997)
- [23] Méndez M, Tuberías a Presión, (1ra. Edición) Pág. 2.1-2.20. Publicaciones UCAB, Caracas (1995)