

Desarrollo de Nuevas Correlaciones para Flujo Anular

Berna¹, A. Escrivá¹, J.L. Muñoz-Cobo¹ & Luis E. Herranz²

¹Instituto de Ingeniería Energética
Universidad Politécnica de Valencia

Camino de Vera 14, 46022 Valencia (Spain)

Tel.: +34 963879245, Fax: +34 963877639, Email: aescriva@ign.upv.es

²Unit of Nuclear Safety Research

Division of Nuclear Fission, CIEMAT

Avda. Complutense 22, 28040 Madrid (Spain)

Tel.: +34 913466219, Fax: +34 913466233, Email: luisen.herranz@ciemat.es

Resumen – *El presente trabajo explora la extensa literatura existente y propone nuevas correlaciones para el estudio del flujo anular. El interés de este trabajo se centra, por una parte, en la recopilación de la dispersa y abundante información existente y, por otra parte, en el desarrollo de nuevas correlaciones para la determinación de las principales magnitudes que caracterizan al flujo anular a partir de datos experimentales encontrados en la literatura abierta.*

1. INTRODUCCIÓN

Los flujos bifásicos gas-líquido, y en particular el flujo anular, se encuentran en multitud de aplicaciones: industrias del petróleo, químicas, nuclear, etcétera. En los reactores PWR el flujo bifásico se da en los generadores de vapor durante el funcionamiento normal y en el propio reactor fuera de las condiciones normales, incluyendo secuencias de accidentes. Mientras que en los reactores BWR se produce en el núcleo durante el funcionamiento normal.

Por ello, el flujo anular puede desempeñar un papel importante en el funcionamiento, seguridad y coste en las centrales LWR. Consecuentemente, se han realizado un gran número de publicaciones centrándose en su estudio desde los años 40 hasta el momento presente. En particular, este documento se centra en la revisión y análisis de las características principales de la película de líquido, analizando el proceso de extracción de gotas, en concreto la determinación de su cantidad y tamaño.

El flujo anular se caracteriza por un núcleo de gas que fluye a través del centro del tubo y por una parte del líquido, de la que una parte fluye como una película delgada sobre la pared del tubo, mientras que la otra parte se encuentra en forma de gotitas líquidas arrastradas por el gas. Aunque inicialmente sólo existe el núcleo de gas (sin gotas arrastradas) y la delgada película líquida, de forma que cuando la diferencia de velocidad entre las fases gaseosa y líquida aumenta una serie de ondas comienzan a aparecer en la interfase de gas-líquido. Cuando esta diferencia es lo suficientemente alta, una parte del líquido es arrastrado por la corriente gaseosa en forma de gotas desde la superficie de la película. El punto en el que comienza este fenómeno de arrastre se denomina inicio de arrastre y su velocidad asociada es la velocidad de inicio de arrastre. Estas gotas arrastradas tienen una gran importancia ya que contribuyen significativamente a la transferencia de calor y masa.

Esta revisión presenta y analiza la mayor parte de la extensa literatura existente sobre el anular flujo, centrándose específicamente en el análisis de los principales fenómenos que intervienen. En particular, el documento se centra en el estudio de la película líquida y de la interfase de gas-líquido, presentando las principales características de ambas y analizando el proceso de extracción de gotas, el proceso de arrastre. El

interés de este trabajo es, en primer lugar, revelar la dispersión existente en la abundante información disponible, presentando las lagunas de conocimiento que aún existe en flujo anular. En segundo lugar, se pretende tener en el mismo documento un resumen de las diversas expresiones recopiladas en la literatura. Culminándose el presente trabajo con el análisis de diferentes series de valores experimentales encontrados en la literatura abierta, presentando un nuevo conjunto de correlaciones para su ajuste.

2. CARACTERIZACIÓN DE LAS ONDAS DE LA INTERFASE GAS-LÍQUIDO

Una caracterización adecuada de las ondas en la interfase gas-líquido es importante para el estudio de los procesos de arrastre, así en la Fig.1 se presentan de forma esquemática sus variables más importantes.

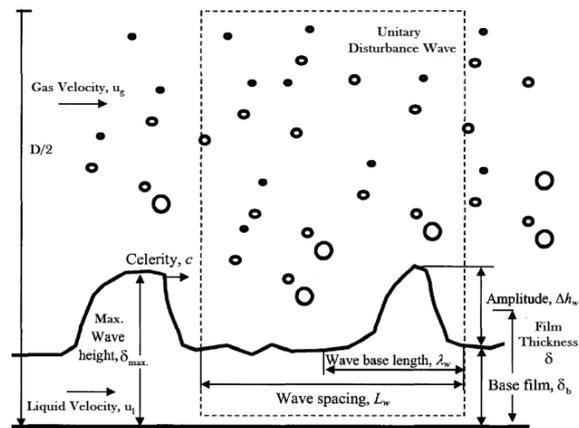


Figura 1. Visión Esquemática de una Onda.

2.1. Espesor de la Lámina Líquida

Espesor de lámina película líquida es la distancia desde la pared de la tubería hasta una altura media de las ondas producidas en la interfase gas-líquido. En la bibliografía existen multitud de correlaciones para su estimación, de entre ellas se pueden citar las expresiones de Henstock y Hanratty¹, esta correlación diferencia entre flujos verticales ascendentes y horizontales, siendo respectivamente:

$$\frac{\delta}{D} = \frac{6.59F}{(1+1400F)^{0.5}} \quad (1)$$

$$\frac{\delta}{D} = \frac{6.59F}{(1+850F)^{0.5}} \quad (2)$$

donde el parámetro F viene dado por

$$F = \frac{\gamma(\text{Re}_{lf})}{\text{Re}_g^{0.9}} \frac{\mu_l}{\mu_g} \frac{\rho_g^{0.5}}{\rho_l^{0.5}} \quad (3)$$

$$\gamma(\text{Re}_{lf}) = \left[(0.707\text{Re}_{lf}^{0.5})^{2.5} + (0.0379\text{Re}_{lf}^{0.9})^{2.5} \right]^{0.4}$$

siendo Re_{lf} el número de Reynolds de la lámina líquida.

Otra correlación obtenida a partir del balance entre la fuerza cortante interfacial y la fuerza de fricción con la pared que actúan sobre el líquido es la propuesta por Okawa². Esta viene dada por:

$$\delta = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\bar{f}_w \rho_l}{\bar{f}_{gl} \rho_g}} \frac{J_{lf}}{J_g} D \quad (4)$$

siendo f_w la fricción con la pared, f_{gi} la fricción interfacial. Todas las expresiones están en función de las velocidades superficiales tanto del líquido como del gas.

2.2. Celeridad de la Onda

La celeridad es la velocidad a la que se desplaza la onda sobre la superficie de la interfase gas-líquido. Para estimar su valor se pueden emplear diversas expresiones. Como la correlación de Kumar³:

$$c = \frac{\psi \cdot J_g + J_l}{1 + \psi} \quad (5)$$

donde ψ se puede obtener a partir de la siguiente correlación empírica,

$$\psi = 5.5 \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l} \left(\frac{Re_l}{Re_g} \right)^{0.25}} \quad (6)$$

Unas expresiones recientes y que diferencian diferentes orientaciones de la tubería son las propuestas por Al-Sarkhi⁴:

$$\begin{aligned} \frac{c}{J_l} &= 2.379 \cdot X^{-0.9} \\ \frac{c}{J_l} &= 2.323 \cdot X^{-0.94} \\ \frac{c}{J_l} &= 1.942 \cdot X^{-0.91} \end{aligned} \quad (7)$$

para tuberías horizontales, entre 10-20° y entre 45 y 90°. Siendo X el número de Lockhart-Martinelli.

2.3. Frecuencia de la Onda

La frecuencia es el número de veces que se produce una onda por unidad de tiempo. Para estimar su valor se suele emplear el número de Strouhal. Cabe citar la correlación propuesta por Azzopardi³:

$$St_l = 0.25 X^{-1.2} \quad (8)$$

3. INICIO DE ARRANQUE DE GOTAS

El proceso de arranque de gotas tiene lugar en la interfase gas-líquido, en él se tiene un equilibrio dinámico con intercambio continuo de masa, momento y energía entre la película de líquido y la corriente de gas. Pero para bajas velocidades relativas entre las fases líquida y gaseosa se tiene una interfase lisa, a medida que esta diferencia en la velocidad aumenta, la interfase se cubre con ondas, a partir de un cierto punto parte del líquido es arrastrado por la fase de gaseosa, el llamado "onset of entrainment". Para los fluidos de baja viscosidad, como el agua, el mecanismo dominante de arrastre de líquido es la rotura de la cresta de la ola (roll wave), Fig. 2.

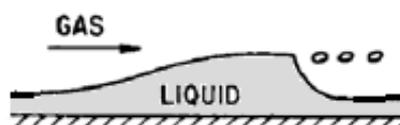


Figura 2. Mecanismo de Rotura de la Cresta de la Ola.

La condición fundamental para el arrastre de gotas tenga lugar depende por tanto del líquido y del gas, Fig. 3. Así, por una parte se tienen un valor mínimo de velocidad del líquido por debajo de la cual el arrastre no es posible, expresado habitualmente en función del número de Reynolds, Re_{ffOE} . De la misma forma, para determinar las condiciones del gas por debajo de las cuales no se tiene el proceso de arrastre, se tiene la velocidad de inicio de arrastre, $u_{g,min}$.

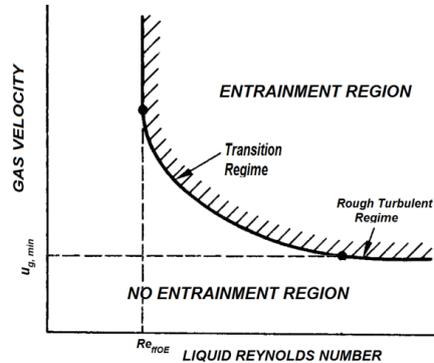


Figura 3. Límites de las Regiones con y sin Arrastre de Gotas.

3.1. Número de Reynolds del Líquido

El valor de Re_{ffOE} no se ha establecido firmemente. Sin embargo, resultados de diversas investigaciones para líquidos de baja viscosidad sugieren que su valor en el inicio del arrastre de gotas está en el intervalo de 2 para los flujos verticales descendentes, mientras que para flujos horizontales y verticales ascendentes la aparición del arrastre se tiene entre 100 y 400 aproximadamente, Tbl. 1.

Tabla 1. Valores del Número de Reynolds para el Inicio del Arrastre de Gotas

Autor	Ishii y Grolmes	Abolfadl	Okawa	Nigmatulin	Andreussi	Azzopardi
Re_{ffOE}	160	268	320	180	94	80

Otros autores proponen expresiones para la determinación del Re_{ffOE} . Por ejemplo, se tienen las expresiones de Owen⁵ y de Sawant⁶, estas se expresan respectivamente:

$$Re_{ffOE} = \exp\left(5.8405 + 0.4249 \frac{\mu_g}{\mu_l} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g}\right)^{0.5}\right) \quad (9)$$

$$Re_{ffOE} = 13N_\mu^{-0.5} \quad (10)$$

siendo N_μ el número de viscosidad⁵.

3.2. Velocidad de Inicio de Arrastre de Gotas

La forma habitual de presentar el valor de la velocidad del gas a partir de la que se tiene el arrastre de gotas es diferenciando dos regiones. La primera es aquella en la que el líquido se encuentra en régimen turbulento, para el que la velocidad del gas requerida para el inicio del proceso de arrastre será menor. La segunda es la transición entre el régimen laminar y el turbulento, velocidad de inicio de arrastre decreciente hasta alcanzarse el régimen turbulento. Destacar el modelo de Ishii y Grolmes⁷, este modelo introduce también el número de viscosidad, con el que se tienen en cuenta las propiedades de los fluidos de trabajo, las expresiones serían las siguientes:

$$\frac{\mu_l J_g}{\sigma} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \geq 11.78 N_\mu^{0.8} Re_{ff}^{-1/3} \quad \text{para } N_\mu \leq \frac{1}{15}; Re_{ffOE} \leq Re_{ff} \leq 1635 \quad (11)$$

$$\frac{\mu_l J_g}{\sigma} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} \geq 1.35 Re_{ff}^{-1/3} \quad \text{para } N_\mu > \frac{1}{15}; Re_{ffOE} \leq Re_{ff} \leq 1635$$

$$|J_g| > \frac{\sigma}{\mu_l} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \times N_\mu^{0.8} \quad \text{para } N_\mu \leq \frac{1}{15}; Re_{ff} > 1635 \quad (12)$$

$$|J_g| > \frac{\sigma}{\mu_l} \sqrt{\frac{\rho_l}{\rho_g}} \times 0.1146 \quad \text{para } N_\mu > \frac{1}{15}; Re_{ff} > 1635$$

4. TAMAÑOS DE LAS GOTAS

En términos generales, existen dos vías para estimar los tamaños de las gotas arrastradas por la corriente gaseosa, por una parte, las expresiones basadas en el número Weber crítico y, por otra, las correlaciones empíricas de flujo anular.

4.1. El Número de Weber Crítico

El máximo tamaño de gota estable en el interior de una corriente gaseosa viene determinado un número de Weber crítico, We_{crit} . Para líquidos de baja viscosidad, que es el caso del agua, todas las observaciones experimentales dan el siguiente rango de valores $5 < We_{crit} < 20$. De entre las diferentes expresiones citaremos por su simplicidad la de Epstein⁸, esta viene dada por:

$$We_{crit} = \frac{\rho_g u_g^2 \phi_{d,max}}{\sigma} = cte \quad (6 \text{ or } 12) \quad (13)$$

Existen multitud de expresiones más complejas pero con una forma similar a esta, como por ejemplo las de Pilch, Guildenbecher, Gelfand y Schmehl. Todas ellas tienen en cuenta los efectos de las fuerzas viscosas a través del número de Ohnesorge

$$We_{crit} = We_{crit,0} (1 + aOh^b) \quad (14)$$

donde $We_{crit,0}$ es el valor crítico del número de weber cuando $Oh \rightarrow 0$ (habitualmente 11-13), los coeficientes a y b toman valores entre 1-1.8 y 0.74-1.64, respectivamente. Si bien los resultados que proporcionan todas ellas son bastante similares a los que proporciona la expresión de Epstein, por lo que en una primera aproximación sería suficiente con esta.

4.2. Correlaciones Empíricas para Flujo Anular

Las correlaciones empíricas obtenidas para flujo anular han sido ampliamente utilizadas, existiendo una considerable cantidad de ellas. Suelen venir dadas en función de diferentes números adimensionales, fundamentalmente el Reynolds y el Weber, conteniendo algunas de ellas correcciones mediante cocientes de propiedades entre las fases gaseosa y líquida. A continuación se presentan las propuestas por Kataoka⁹ y por Kocamustafaogullari¹⁰ respectivamente:

$$\frac{\phi_{vm}}{D} = 0.028 \cdot We_g^{-1} Re_l^{-1/6} Re_g^{2/3} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{-1/3} \left(\frac{\mu_g}{\mu_l} \right)^{2/3} \quad (15)$$

$$\frac{\phi_{max}}{D} = 2.609 \cdot C_W^{-4/15} We_g^{-3/5} \left(\frac{Re_g^4}{Re_l} \right)^{1/15} \left(\frac{\rho_g \mu_g}{\rho_l \mu_l} \right)^{4/15} \quad (16)$$

5. VELOCIDADES DE LAS GOTAS

El número de Stokes es un parámetro muy importante cuando se pretende estudiar la dinámica de partículas que están suspendidas en un fluido. Aplicando la aproximación de la solución de retraso constante para la ecuación de movimiento de la gota, "constant lag solution", se puede obtener la siguiente expresión¹¹:

$$S_R = \frac{u_d}{u_g} \approx \frac{1}{1 + Stk} \quad (17)$$

estando definido el número de Stokes de la forma siguiente

$$Stk = \frac{\tau_d}{\tau_g} = \frac{\rho_d \phi_d^2 u_g}{18 \mu_g D} \quad (18)$$

En la bibliografía también existen diversos trabajos experimentales, como son los de Fore¹² y Azzopardi¹³, dando ambos unas velocidades para las gotas en los entornos del 80% de la velocidad del gas.

6. MASA TOTAL DE LAS GOTAS

La determinación de la masa total de gotas arrastradas es un parámetro clave para modelar el flujo anular. Para ello en el presente trabajo nos centraremos en la determinación de la fracción de gotas retenidas (E), esta magnitud se define como el cociente entre el flujo másico de las gotas arrastradas y el flujo másico total de líquido.

$$E = \frac{W_{re}}{W_l} \quad (19)$$

Una gran cantidad de trabajos se han centrado en la determinación de esta magnitud en las últimas décadas, de entre las diferentes expresiones halladas en la bibliografía a continuación se presentan algunas de ellas, concretamente las expresiones de Ishii y Mishima³ y Zhang¹⁴:

$$E = \tanh(7.25 \cdot 10^{-7} We_g^{1.25} Re_l^{0.25}) \quad (20)$$

$$\frac{E}{1-E} = 0.003 We_g^{1.8} Fr_g^{-0.92} Re_l^{0.7} Re_g^{-1.24} \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)^{0.38} \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^{0.97} \quad (21)$$

6. DESARROLLO DE LAS NUEVAS CORRELACIONES

Esta sección está dedicada a presentar los estudios realizados para determinar las características más importantes del flujo anular, en particular, nos hemos concentrado en la determinación del espesor de la película, celeridad y frecuencia de las ondas, tamaño y masa de las gotas arrastradas. En particular, en el presente trabajo, se han analizado las siguientes series de datos experimentales: de Schubring¹⁵, Alamu¹⁶, Mantilla³, Tatterson¹⁷, Cousins y Hewitt¹⁷, Paras y Karabelas¹⁸, Al-Sarkhi¹⁹ y Fore^{9,11}.

6.1. Espesor Medio de la Capa de Líquido

A partir de los datos experimentales se han hecho los correspondientes ajustes con el fin de correlacionar el espesor de la capa de líquido con las propiedades físicas y las condiciones bajo las cuales los experimentos se han llevado a cabo. En particular, hemos tomado como variables para el ajuste de los números adimensionales correspondientes, con el fin de obtener relaciones más generales. Así, la expresión obtenida ha sido:

$$\frac{\delta}{D} = 7.165 \cdot Re_g^{-1.07} Re_l^{0.48} \left(\frac{Fr_g}{Fr_l} \right)^{0.24} \quad (22)$$

La nueva correlación junto con los datos experimentales se muestran en la Fig. 4. Se tiene un ajuste razonable para todos los datos experimentales, colapsando casi la totalidad de estos entre las líneas de error de $\pm 25\%$, con un valor para el coeficiente de correlación de Pearson de $R^2 = 0.902$.

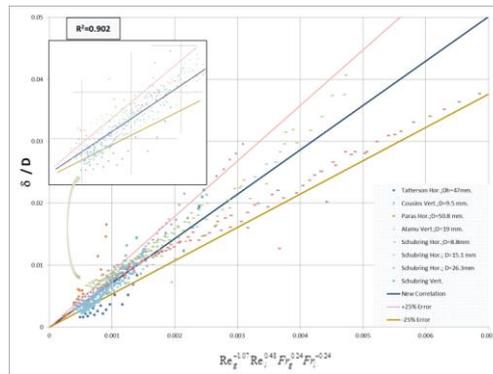


Figura 4. Representación de los Valores Experimentales y de la Nueva Correlación para el Espesor de la Lámina Líquida.

6.2. Celeridad de la Onda

Realizando un procedimiento similar para la celeridad de la onda al presentado en el apartado anterior, se ha obtenido la correlación que se presenta a continuación:

$$\frac{c}{\sqrt{\rho_g J_g + \sqrt{\rho_l J_l}} \sqrt{\rho_g + \sqrt{\rho_l}}} = Re_g^{-0.38} Re_l^{0.16} C_W^{-0.13} \quad (23)$$

siendo C_W un factor que tiene en cuenta el efecto de la tensión superficial en el proceso de disipación del flujo a través de la onda⁵.

En este caso se presenta en la Fig.5 la comparación entre los resultados experimentales y la nueva correlación. Para la celeridad se tiene un valor de $R^2 = 0.885$.

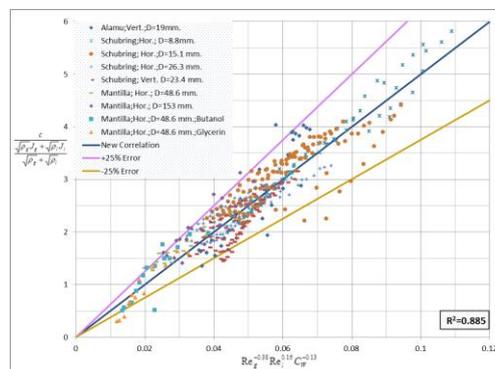


Figura 5. Representación de los Valores Experimentales y de la Nueva Correlación para la Celeridad de la Onda.

6.3. Frecuencia de la Onda

La nueva correlación obtenida a través del ajuste de los datos experimentales es:

$$St_{gl} = Re_g^{0.53} Re_l^{-0.48} Eo^{0.27} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.14} C_W^{0.68} \quad (24)$$

siendo Eo el número de Eötvös y St_{gl} el número de Strouhal del gas-líquido, definido como,

$$St_{gl} = \frac{vD}{\sqrt{J_g \cdot J_l}} \quad (25)$$

Para la frecuencia de la onda se tiene un peor ajuste, pero aun así se mejora los de otras correlaciones encontradas en la bibliografía. Los valores experimentales se colapsan entre las líneas de error del $\pm 50\%$, Fig. 6, con un valor de $R^2 = 0.683$.

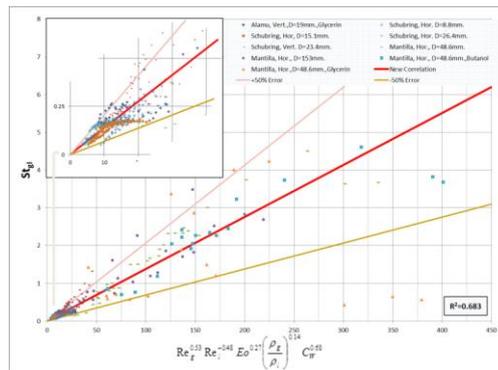


Figura 6. Representación de los Valores Experimentales y de la Nueva Correlación para la Frecuencia de la Onda.

6.4. Tamaños de las Gotas Arrastradas

Tras el análisis de los datos experimentales se ha detectado que las medidas se agrupan en dos grupos principales, por un lado, están los datos de flujo horizontal y, por otro, los datos de los flujos verticales. Por consiguiente, se han propuesto dos nuevas correlaciones para flujos horizontales y verticales ascendentes, respectivamente:

$$\frac{\phi_{vm}}{D} = 2.634 \cdot We_g^{-0.23} Re_g^{-0.54} Re_l^{0.13} \quad (26)$$

$$\frac{\phi_{vm}}{D} = 0.11 \cdot We_g^{-0.68} Re_g^{0.33} Re_l^{0.11} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{0.31} \quad (27)$$

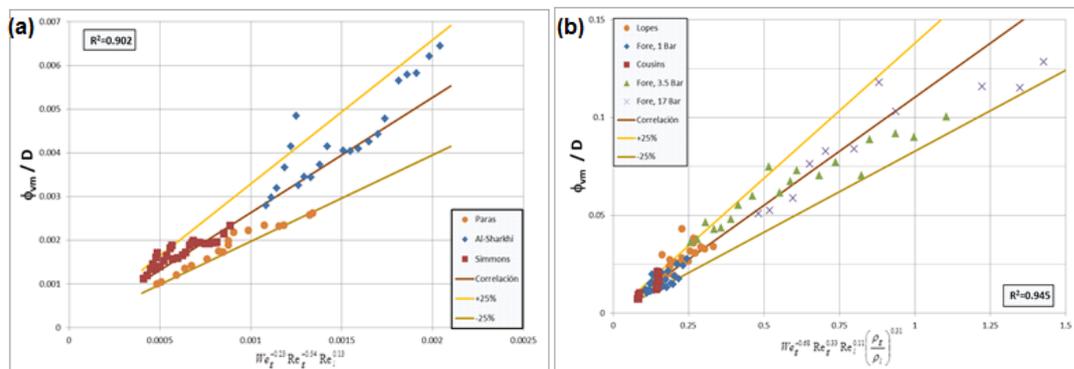


Figura 7. Representación de los Valores Experimentales y de la Nueva Correlación para los tamaños de gota: (a) flujo horizontal; (b) flujo vertical ascendente.

En este caso se presenta en la Fig.7 la comparación entre los resultados experimentales y las nuevas correlaciones. En dicha figura se aprecia que los datos experimentales quedan comprendidos entre las líneas de error del $\pm 25\%$, con unos valores para el coeficiente de correlación de Pearson de 0.902 y 0.945 para los flujos horizontal y vertical ascendente respectivamente.

6.5. Masa Total de las Gotas Retenidas

Para la fracción de gotas retenidas se han realizado diferentes ajustes de las series experimentales, proponiéndose la siguiente expresión:

$$\frac{E}{1-E} = 5.51 \times 10^{-7} \cdot We_g^{2.68} Re_g^{-2.62} Re_l^{0.34} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l}\right)^{-0.37} \left(\frac{\mu_g}{\mu_l}\right)^{-3.71} C_w^{4.24} \quad (28)$$

Para esta magnitud se tiene un peor ajuste, pero aun así se mejoran los resultados de las correlaciones encontradas en la bibliografía. Los valores experimentales se colapsan entre las líneas de error del $\pm 50\%$, Fig. 8, con un valor de $R^2 = 0.666$.

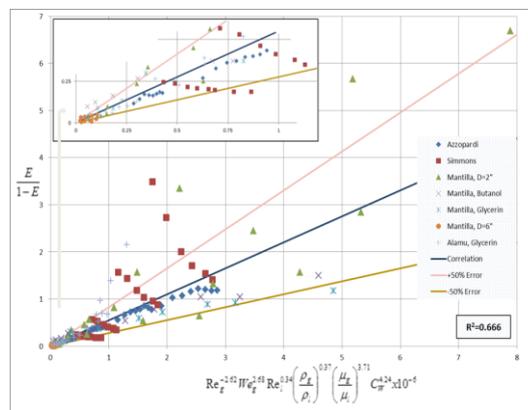


Figura 8. Representación de los Valores Experimentales y de la Nueva Correlación para la fracción de Gotas Retenidas.

7. COMPARACIÓN DE LAS CORRELACIONES CON LOS DATOS EXPERIMENTALES

Esta sección se dedica a comparar las distintas correlaciones desarrolladas para flujo anular, incluidas las nuevas correlaciones desarrolladas en el presente trabajo, con los valores experimentales encontrados en la literatura abierta para las principales variables que caracterizan dicho flujo.

7.1. Espesor Medio de la Capa de Líquido

En las Figuras 9 y 10 se presentan, a modo de ejemplo, la comparación de dos series experimentales del espesor medio de la capa de líquido con los valores obtenidos mediante las diferentes correlaciones y con la nueva correlación desarrollada en este trabajo, en ellas se aprecia que esta última es la que presenta unos mejores resultados. Si bien esto no sucede así para todas las series, si lo es en la mayoría de las situaciones, por lo que se está en disposición de afirmar que dicha correlación mejora a las anteriores para las serie experimentales estudiadas.

Por otra parte y en referencia a las tendencias del espesor de la película líquida decir que como se ve en las figuras este disminuye al aumentar la velocidad superficial del gas, si bien esta disminución se hace más pequeña para velocidades altas del gas. El

espesor de la película líquida también aumenta con la velocidad superficial del líquido, aunque para velocidades superficiales altas el espesor se mantiene casi constante.

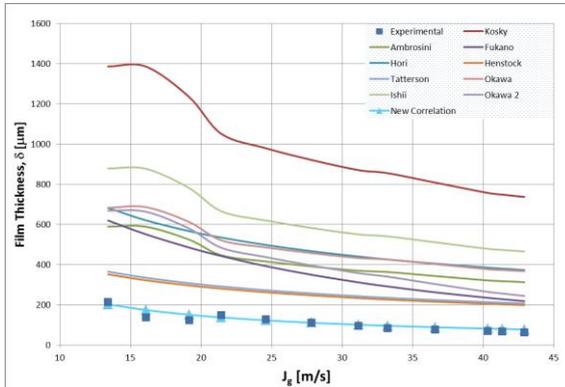


Fig. 9. Comparación del Espesor de Lámina Líquida vs. Velocidad Superficial del Gas para los datos de Alamu (Flujo Vertical Ascendente, $D=0.019$ m, $P=1.4$ bar & T ambiente, $J_l = 0.05$ m/s, Aire-Agua-Glicerina).

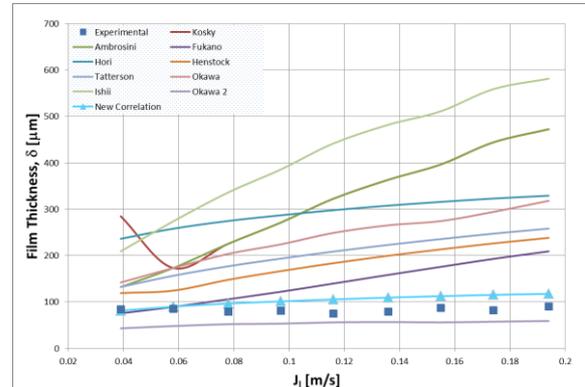


Fig. 10. Comparación del Espesor de Lámina Líquida vs. Velocidad Superficial del Líquido para los datos de Schubring (Flujo Vertical Ascendente, $D=0.0234$ m, P & T ambiente, $J_g \cong 71$ m/s).

7.2. Celeridad de la Onda

En las Figuras 11 y 12 se presentan, a modo de ejemplo, la comparación de dos series experimentales de la celeridad de la onda con los valores obtenidos mediante las diferentes correlaciones y con la nueva correlación desarrollada en este trabajo, en ellas se aprecia que esta última es la que presenta unos mejores resultados. Si bien para algunos casos puntuales no es la que más se aproxima a los resultados experimentales tomando en consideración la totalidad de estos sí que es la que mejor los reproduce.

En cuanto a las tendencias de la celeridad de la onda decir que esta aumenta al aumentar la velocidad superficial del gas, a pesar de este aumento es más pequeño para velocidades altas del gas. También aumenta con la disminución de la velocidad superficial del líquido, aunque este incremento es menos acusado.

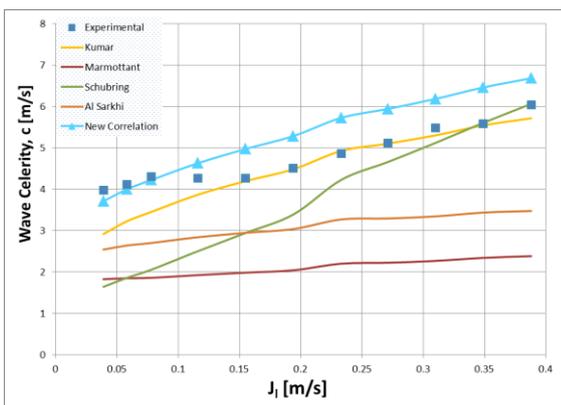


Fig. 11. Comparación de la Celeridad vs. Velocidad Superficial del Líquido para los datos de Schubring (Flujo Vertical Ascendente, $D=0.0234$ m, P & T ambiente, Aire-Agua, $J_g \cong 56-60$ m/s).

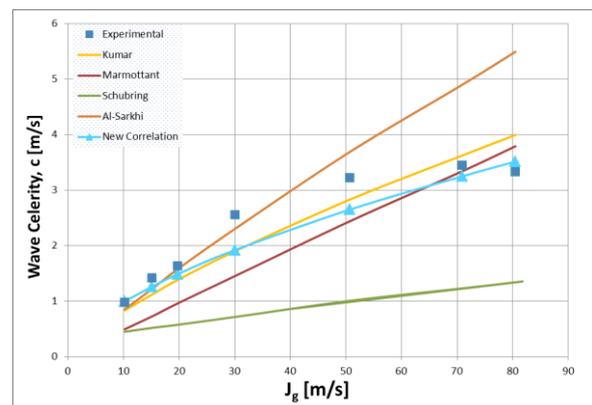


Fig. 12. Comparación de la Celeridad vs. Velocidad Superficial del Gas para los datos de Mantilla's data (Flujo Horizontal, $D=0.0486$ m, $P=2$ bares, T ambiente, Aire-Agua-Butanol, $J_l = 0.018$ m/s).

7.3. Frecuencia de la Onda

En las Figuras 13 y 14 se presentan, a modo de ejemplo, la comparación de dos series experimentales de la frecuencia de la onda con los valores obtenidos mediante las diferentes correlaciones y con la nueva correlación desarrollada en este trabajo, en ellas se aprecia que esta última es la que presenta unos mejores resultados.

En cuanto a las tendencias experimentales decir que la frecuencia de la onda está fuertemente influenciada por la velocidad superficial de gas, aunque el aumento de la frecuencia con la velocidad del gas se hace más pequeño para altas velocidades. La frecuencia también está fuertemente influenciada por la velocidad superficial de líquido, teniéndose un incremento de esta variable con la velocidad superficial del líquido, aunque para altas velocidades superficiales del gas se mantiene prácticamente constante.

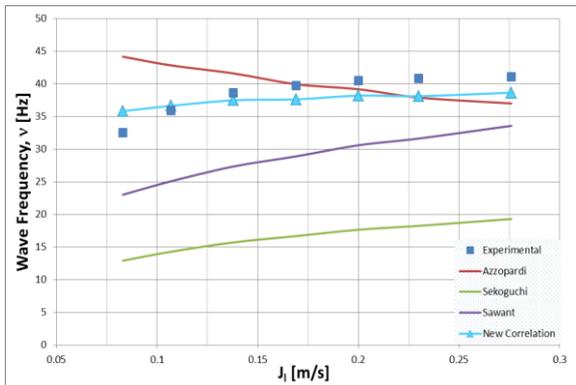


Fig. 13. Comparación de la Frecuencia vs. Velocidad Superficial del Líquido para los datos de Schubring (Flujo Horizontal, $D=0.0263$ m, P & T ambiente, $J_g \cong 66$ m/s).

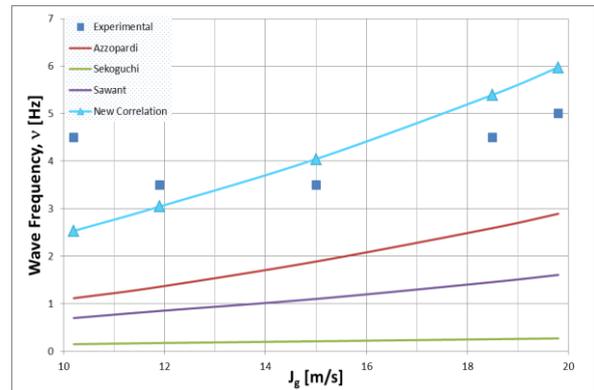


Fig. 14. Comparación de la Frecuencia vs. Velocidad Superficial del Gas para los datos de Mantilla (Flujo Horizontal, $D=0.153$ m, P & T ambiente, $J_l = 0.018$ m/s).

7.4. Tamaños de las Gotas Arrastradas

En las Figuras 15 y 16 se presentan, a modo de ejemplo, la comparación de dos series experimentales de los tamaños medios de gota con los valores obtenidos mediante las diferentes correlaciones y con la nueva correlación desarrollada en este trabajo, en ellas se aprecia que esta última es la que presenta unos mejores resultados.

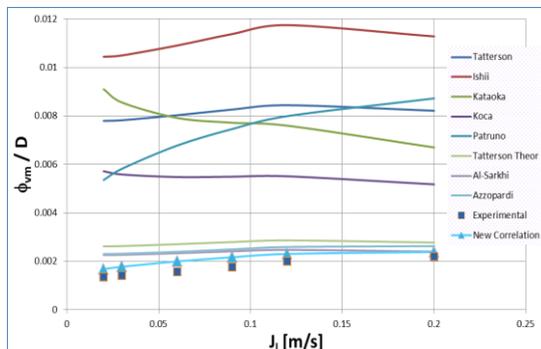


Fig. 15. Comparación del Tamaño Medio de las Gotas para los datos de Paras (Flujo Horizontal, $D=0.0953$ m, P & T ambiente, $J_g \cong 50$ m/s).

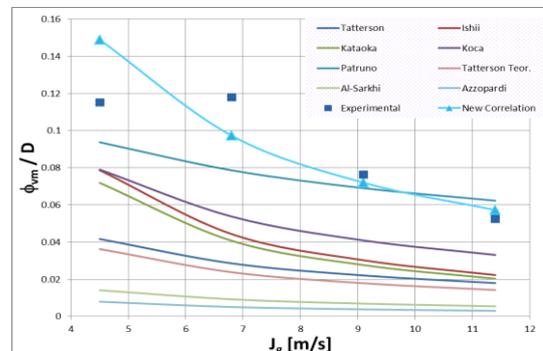


Fig. 16. Comparación del Tamaño Medio de las Gotas para los datos de Fore (Flujo Vertical Ascendente, $D=0.00967$ m, $P \cong 17$ bares & $T \cong 38$ °C, $J_l \cong 0.06$ m/s).

La principal conclusión que se puede extraer a partir de las correlaciones es que los tamaños de las gotas son inversamente proporcionales a la velocidad del gas. En cuanto a la velocidad superficial del líquido, no hay una tendencia clara, en algunos casos se produce un aumento del tamaño de las gotas con dicha velocidad, mientras que en otros se tiene una disminución.

7.5. Masa Total de las Gotas Retenidas

La fracción de gotas retenidas, E , es la forma más adecuada para estimar la cantidad de agua arrastrada en forma de gotas en la corriente de gas. Esta magnitud muestra una tendencia, que es común en casi todos los trabajos que se han encontrado en la literatura abierta, se produce su aumento tanto con la velocidad del gas como del líquido. Si bien se ve principalmente influenciada por la velocidad del gas.

En las Figuras 17 y 18 se presentan, a modo de ejemplo, la comparación de dos series experimentales de la fracción de gotas retenidas con los valores obtenidos mediante las diferentes correlaciones y con la nueva correlación desarrollada en este trabajo, en ellas se aprecia que esta última es la que presenta unos mejores resultados.

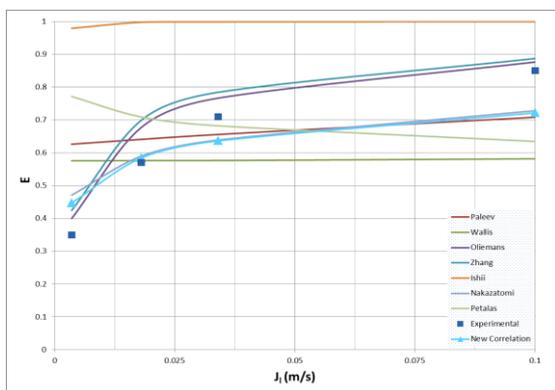


Fig. 17. Comparación de la Fracción de Gotas Retenidas para los datos de Mantilla (Flujo Horizontal, $D=0.0486$ m, $P=2$ bar, T ambiente, $J_g=70$ m/s).

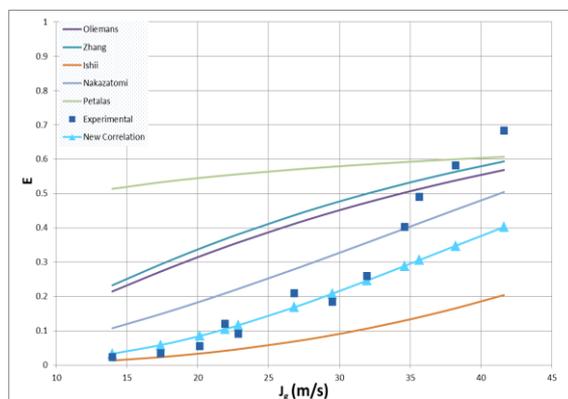


Fig. 18. Comparación de la Fracción de Gotas Retenidas para los datos de Alamu (Flujo Vertical Ascendente, Aire-Agua-Glicerina, $D=0.019$ m, $P=1.4$ bar, T ambiente, $J_g=0.15$ m/s).

8. CONCLUSIONES

Una caracterización en profundidad de la interfase líquido-gas y de las fases líquida y gaseosa son obligatorias para una comprensión completa del flujo anular. Por ello, en este documento se ha llevado a cabo una revisión de todos estos fenómenos, junto con una recopilación y análisis de los datos encontrados en la literatura abierta para las variables clave que definen dichas fases.

La principal contribución de este trabajo es el desarrollo de nuevas correlaciones que mejoran las estimaciones hechas por las diferentes correlaciones encontradas en la bibliografía de las principales variables que determinan el flujo anular.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo recibido por el plan de I+D REMODERN ENE2010-21368-C02-01/CON.

REFERENCIAS

1. Henstock W.H. & Hanratty T.J. **"The interfacial drag and the height of the wall layer in annular flows"**. AIChE Journal Vol.22 N.6, pp. 990-1000 (1976).
2. Okawa T., Kitahara T., Yoshida K., Matsumoto T. & Kataoka I. **"New Entrainment rate Correlation in Annular Two-Phase Flow Applicable to Wide Range of Flow Condition"**. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 45, pp. 87-98 (2002).
3. Mantilla I. **"Mechanistic Modeling of Liquid Entrainment in Gas in Horizontal Pipes"**. PhD. Thesis University of Tulsa (2008).
4. Al-Sarkhi A., Sarica C. & Magrini K. **"Inclination Effects of Wave Characteristics in Annular Gas-Liquid Flows"**. AIChE Journal, Vol. 58, pp. 1018-1029 (2012).
5. Owen D.G. & Hewitt G.F. **"An Improved Annular Two-Phase Flow Model"**. Proceedings of the 3rd International Conference on Multiphase Flow, the Hague, the Netherlands (1987).
6. Sawant P., Ishii M. & Mori M. **"Prediction of Amount of Entrained Droplets in Vertical Annular Two-phase Flow"**. International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 30, p. 715-728. (2009).
7. Ishii M. & Grolmes M.A. **"Inception Criteria for Droplet Entrainment in Two-Phase Concurrent Film Flow"**. AIChE Journal, Vol. 21 p. 308-318 (1975).
8. Epstein M. **"Theory of scrubbing of volatile fission product vapour containing gas jet in a water pool"**. ANS Winter Meeting November 11-16 1990, Washington DC, p.p. 21-32 (1990).
9. Fore L.B, Ibrahim B.B. & Beus S.G. **"Visual measurements of droplets size in gas-liquid annular flow"**. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 28, pp. 1895-1910 (2002).
10. Kocamustafaogullari G., Smits S.R. & Razi J. **"Maximum and mean droplet sizes in annular two-phase flow"**. International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 37, pp. 955-965. (1994).
11. Crowe C.T. **"Multiphase Flow Handbook (Mechanical Engineering)"**. CRC Press, Taylor&Francis Group (2006).
12. Fore L. B. & Dukler A. E. **"The distribution of drop size and velocity in gas-liquid annular flow"**. Int. J. Multiphase Flow 21, pp. 137-149 (1995).
13. Azzopardi B. J. **"Drops in annular two-phase flow"**. International Journal of Heat Multiphase Flow, Vol. 23, pp. 1-53 (1997).
14. Zhang H-Q & Sarica C. **"Low Liquid Loading Gas/Liquid Pipe Flow"**. Journal of Natural Science and Engineering, Vol. 3, pp. 413-422 (2011).
15. Schubring D. **"Behavior interrelationships in annular flow"**. PhD. Thesis University of Wisconsin-Madison (2009).
16. Alamu M. B. **"Investigation of Periodic Structures in Gas-Liquid Flow"**. PhD. Thesis University of Nottingham (2010).
17. Tatterson D.F., Dallman J.C. & Hanratty T.J. **"Drop sizes in annular gas-liquid flows"** AIChE Journal. Vol. 23, pp. 68-76 (1977).
18. Paras, S.V. & Karabelas A.J. **"Properties of the Liquid Layer in Horizontal Annular Flow"**. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 17, No 4, pp. 439-454. (1991).
19. Al-Sarkhi A. & Hanratty T.J. **"Effect of pipe diameter on the drop size in a horizontal annular gas-liquid flow"**. International Journal of Multiphase Flow, Vol. 28, pp. 1617-1629 (2002).