

EVALUACIÓN DE MODELOS HOMOGÉNEOS, DE CORRELACIÓN Y MECANICISTAS EN LA PREDICCIÓN DEL GRADIENTE DE PRESIÓN DE FLUJO DE GAS Y DE LÍQUIDO EN TUBERÍAS VERTICALES

ANNABELLA CRAVINO¹, AL DUBAN PÉREZ¹, FRANCISCO GARCÍA¹, JANNETH GARCÍA²

¹Universidad Central de Venezuela, Escuela de Ingeniería Mecánica, Apartado 48222, Los Chaguáramos 1041-A, Caracas, Venezuela. e-mail: francisco.garcia@ucv.ve

²Universidad Simón Bolívar, Departamento de Termodinámica y Fenómenos de Transferencia, Caracas 1080, Venezuela.

Recibido: mayo de 2008

Recibido en forma final revisado: mayo de 2009

RESUMEN

En este trabajo se evalúa el desempeño de cuatro modelos mecanicistas, nueve modelos homogéneos y diecisiete correlaciones utilizados comúnmente en la predicción del gradiente de presión de flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías verticales. El gradiente de presión predicho por cada uno de los modelos es comparado con el gradiente de presión experimental de una base de datos de flujo bifásico reportada en la literatura especializada. Se presentan estimaciones del error del gradiente de presión medido versus el predicho por cada modelo junto con su desviación estándar. La base de datos incluye setenta y cuatro puntos experimentales de flujo aire-agua en tuberías verticales con un intervalo variado de condiciones de operación y diversos patrones de flujo. En la evaluación, nueve de los modelos estudiados obtienen errores absolutos promedio menores al 25%.

Palabras clave: Gradiente de presión, Flujo bifásico, Modelos mecanicistas, Correlaciones empíricas, Modelos homogéneos.

EVALUATION OF HOMOGENEOUS, CORRELATION AND MECHANISTIC MODELS IN THE PRESSURE GRADIENT PREDICTION OF GAS-LIQUID FLOW IN VERTICAL PIPES

RESUMEN

In this work the performance of four mechanistic models, nine homogeneous models, and seventeen correlations commonly used in the pressure gradient prediction of two-phase gas-liquid flow in vertical pipes is evaluated. The predicted pressure gradient for each model is compared with the experimental pressure gradient of a two-phase flow database reported in the specialized literature. Error estimates for the predicted versus measured pressure gradient together with standard deviation for each model are presented. The database includes seventy four experimental points for air-water flow in vertical pipes with a varied range of operational conditions and diverse flow patterns. In the evaluation, nine of the studied models obtain average absolute errors less than 25%.

Keywords: Pressure gradient, Two-phase flow, Mechanistic models, Empirical correlations, Homogeneous models.

INTRODUCCIÓN

El estudio del flujo simultáneo de gas y de líquido a través de un conducto es una de las combinaciones de flujo bifásico más complejas que existen. Esto es debido esencialmente a la gran diversidad de configuraciones relacionadas con la distribución espacial de ambas fases en la tubería y a la compresibilidad de la fase gaseosa. Estas configuraciones

espaciales son conocidas como patrones de flujo.

Durante los últimos 30 años se han realizado un gran número de investigaciones en el campo del flujo bifásico motivadas principalmente por la necesidad de tener diseños confiables. Por consiguiente, es indispensable determinar parámetros, tales como el gradiente de presión, la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento “liquid holdup”

y el patrón de flujo existente durante el flujo bifásico de gas y líquido en tuberías, a fin de diseñar correctamente los equipos que operen con este flujo.

Debido a la gran cantidad de variables relacionadas con el flujo bifásico y a la complejidad de los fenómenos físicos asociados, se han desarrollado modelos simplificados, tales como los modelos homogéneos, las correlaciones empíricas y los modelos mecanicistas, entre otros, para resolver los problemas relacionados a este tipo de flujo.

En los modelos de flujo homogéneo el flujo bifásico es supuesto como un fluido pseudo homogéneo, con una velocidad y propiedades físicas promedio de la mezcla. Entre los modelos homogéneos se cuenta el modelo de Wallis (1969).

Las correlaciones empíricas han sido la herramienta de uso común en la solución de problemas asociados al flujo bifásico. Las correlaciones ofrecen un método eficaz para evaluar características asociadas con este flujo; tanto es así que algunas correlaciones desarrolladas en la década de los años 40 todavía son una herramienta de cálculo usada en la industria petrolera mundial, incluso en modernos paquetes de simulación. Entre las correlaciones empíricas se encuentran las desarrolladas por Lockhart & Martinelli (1949); Dukler *et al.* (1964) y Beggs & Brill (1973), entre otras.

Los modelos mecanicistas, por su parte, intentan modelar matemáticamente la física del fenómeno en estudio aplicando principios fundamentales, como el de conservación de la masa, de cantidad de movimiento lineal y de energía, a volúmenes de control que por lo general consideran promedios espaciales y temporales de las propiedades y velocidades de los fluidos. Entre los modelos mecanicistas se destacan los desarrollados por Ansari *et al.* (1994) y Gómez *et al.* (2000).

En la actualidad, muchos de estos modelos forman parte de diferentes simuladores comerciales; por lo tanto, se hace necesario un criterio que indique bajo qué condiciones de operación o tipo de flujo es conveniente utilizar algún tipo de modelo, específicamente en el caso del flujo bifásico, vertical y ascendente. Algunos estudios similares, pero enfocados a flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías horizontales (García, 2004; García *et al.* 2007), han demostrado que ciertos modelos mecanicistas presentan errores porcentuales absolutos promedio muy elevados, en algunos casos superiores al 100%, en situaciones donde modelos homogéneos tienen una precisión bastante buena. Sin embargo, en flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías verticales el desempeño de los modelos mecanicistas mejora significativamente (Cravino & Pérez, 2007).

El propósito de este trabajo es evaluar el desempeño de diferentes modelos presentes en la literatura para determinar la caída de presión de flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías verticales frente a datos experimentales distintos a

los que fueron desarrollados y/o evaluados.

MODELOS PARA CALCULAR EL GRADIENTE DE PRESIÓN

Los primeros modelos, para el cálculo del gradiente de presión para flujo vertical de dos fases, surgen alrededor de 1950 y se distinguen por haber sido desarrollados de manera muy limitada, es decir, se restringían a ciertos diámetros de tubería y a ciertos intervalos de las propiedades de los fluidos, tales como la densidad o la viscosidad. En general, estos modelos se caracterizan por asumir que el flujo es homogéneo y, por tanto, se le asignan propiedades promedio a la mezcla.

En general, en los modelos homogéneos el gradiente de presión total viene dado por la suma del gradiente de presión debido a la fricción, a los cambios de energía cinética y a los cambios de energía potencial, como se muestra en la ecuación (1):

$$\left(\frac{dp}{dz}\right)_{tot} = \left(\frac{dp}{dz}\right)_f + \left(\frac{dp}{dz}\right)_a + \left(\frac{dp}{dz}\right)_g \quad (1)$$

Luego de la aparición de los modelos homogéneos, el estudio del flujo bifásico evolucionó significativamente entre los años 60, 70 y mediados de los 80. Se comenzó a considerar la mezcla como no homogénea y se reconoció que existe una diferencia apreciable entre las velocidades de las fases. Lo cual conforma las características esenciales de las denominadas correlaciones empíricas generalizadas o modelos de correlación como también se les conoce (Alarcón, 1998).

A finales de los 80 y en la década de los 90, para el modelado del flujo multifásico se desarrollaron los denominados modelos mecanicistas. En estos se trata de modelar matemáticamente la física del fenómeno en estudio aplicando los principios de conservación de masa, de cantidad de movimiento lineal y de energía a volúmenes de control, en los cuales generalmente se consideran promedios espaciales y temporales de las propiedades de los fluidos y de las velocidades de cada fase.

Muchos de los modelos seleccionados en este trabajo desprecian el gradiente de presión debido a los cambios de energía cinética. Asimismo, algunos modelos y correlaciones fueron desarrollados exclusivamente para flujo horizontal, por lo que solamente sugieren un método para calcular el gradiente de presión debido a la fricción. A estos últimos se les agregó el gradiente de presión debido a los cambios de energía potencial según Ouyang & Aziz (1999), pero respetando sus definiciones particulares de densidad de mezcla o de fracción de líquido con deslizamiento.

Para el cálculo del factor de fricción de Moody, en régimen

laminar, se empleó la ecuación clásica de Darcy; mientras que en régimen turbulento se utilizó la ecuación de Zigrang & Silvester (1985), a menos que el autor del modelo o correlación sugiriera específicamente alguna otra:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\varepsilon/D_i}{3,7} - \frac{4,518}{\text{Re}} \log \left[\frac{6,9}{\text{Re}} + \left[\frac{\varepsilon/D_i}{3,7} \right]^{1,11} \right] \right] \quad (2)$$

Modelos homogéneos seleccionados

La mayoría de los modelos homogéneos consideran el flujo como una mezcla en donde las fases se mueven a la misma velocidad a través de tuberías de diámetros específicos y no consideran la presencia de patrones de flujo. Algunos si toman en cuenta el deslizamiento entre las fases; por consiguiente, estos modelos proponen una correlación para determinar la fracción de líquido con deslizamiento. En la tabla 1 se presentan los nueve modelos homogéneos seleccionados para su evaluación.

Tabla 1. Modelos homogéneos seleccionados y sus respectivos acrónimos.

Modelos Homogéneos	Acrónimo
Wallis (1969)	<i>MHW</i>
Mc Adams <i>et al.</i> (1942)	<i>MHMc</i>
Poettman & Carpenter (1952)	<i>CPC</i>
Cicchitti (1960)	<i>MHC</i>
Baxendell & Thomas (1961)	<i>CBT</i>
Fancher & Brown (1963)	<i>CFB</i>
Oliemans (1976)	<i>COL</i>
Beattie & Whalley (1982)	<i>CBW</i>
Ouyang & Aziz (1998)	<i>MHO</i>

Modelos de correlación seleccionados

Los modelos de correlación son aquellos en los que sus autores proponen una serie de ajustes de datos experimentales para correlacionar una variable determinada. Las correlaciones pueden considerar tanto el deslizamiento entre las fases como la existencia de patrones de flujo; por tanto, requieren de métodos para determinar el patrón de flujo presente. Una vez que se ha determinado el patrón de flujo correspondiente a unas condiciones dadas, se determina la correlación apropiada para el cálculo del factor de fricción como la fracción volumétrica de líquido con deslizamiento, las cuales, generalmente, son distintas dependiendo del patrón. En la tabla 2 se presentan las diecisiete correlaciones empíricas seleccionadas para su evaluación.

Tabla 2. Correlaciones empíricas seleccionadas y sus respectivos acrónimos.

Correlaciones Empíricas	Acrónimo
Lockhart & Martinelli (1949)	<i>CLM</i>
Reid <i>et al.</i> (1957)	<i>CRE</i>
Hoogendorn (1959)	<i>CHO</i>
Griffith & Wallis (1961)	<i>CGW</i>
Duns & Ros (1963)	<i>CDR</i>
Dukler <i>et al.</i> (1964)	<i>CDU</i>
Hagedorn & Brown (1965)	<i>CHB</i>
Eaton <i>et al.</i> (1967)	<i>CEA</i>
Orkiszewski (1967)	<i>COR</i>
Aziz <i>et al.</i> (1972)	<i>CAZ</i>
Beggs & Brill (1973)	<i>CBB</i>
Griffith <i>et al.</i> (1973)	<i>CGR</i>
Chierici <i>et al.</i> (1974)	<i>CCHi</i>
Kadambi (1981)	<i>CKA</i>
Müller & Heck (1986)	<i>CMH</i>
Chen <i>et al.</i> (2002)	<i>CCH</i>
García <i>et al.</i> (2007)	<i>CGA</i>

Modelos mecanicistas seleccionados

Los modelos mecanicistas tratan de determinar y modelar matemáticamente la física del fenómeno en estudio. Un postulado fundamental en el modelado mecanicista del flujo bifásico a través de una tubería, es la existencia de varias configuraciones espaciales de las fases o patrones de flujo. El primer objetivo en los modelos mecanicistas es determinar el patrón de flujo existente para unas condiciones dadas. Posteriormente, se formulan modelos hidrodinámicos separados para cada uno de los posibles patrones de flujo. En la tabla 3 se presentan los cuatro modelos mecanicistas seleccionados para su evaluación.

Tabla 3. Modelos mecanicistas seleccionados y sus respectivos acrónimos.

Modelos Mecanicistas	Acrónimo
Ansari <i>et al.</i> (1994)	<i>MAN</i>
Gómez <i>et al.</i> (2000)	<i>MGO</i>
Ouyang (1999)	<i>MMO</i>
Taitel & Barnea (1990)	<i>MMB</i>

BASE DE DATOS EXPERIMENTALES

Para la evaluación de los modelos, se procesó una base de datos para flujo de gas y líquido en tuberías verticales, utilizando como fuente los datos experimentales para flujo de aire y agua, en tuberías verticales lisas reportados por Govier & Leigh (1958) y Brown *et al.* (1960). Se procesó una base de datos de setenta y cuatro experimentos contra los cuales se corrieron los 30 modelos seleccionados. En la tabla 4 se muestra un resumen de la base de datos utilizada.

Tabla 4. Resumen de los datos experimentales.

Fuente	Puntos	Fluidos	Usg [m/s]	Usl* [m/s]	Di [m]	ε [m]	FP
Govier & Leigh (1958)	11	Aire-Agua	0,600-8,110	0,259 - 0,266	0,0160	0	SL
	11		0,419-8,404		0,0260		FR
	13		0,489-9,836		0,0381		RI
	11		0,524-4,560		0,0635		AN
Brown <i>et al.</i> (1960)	28	Aire-Agua	0,432-8,842	0,265	0,0381	0	SL
							FR
							RI

* Valores aproximadamente constantes, según los respectivos autores.

DESEMPEÑO DE LOS MODELOS SELECCIONADOS

Para comparar los gradientes de presión predichos por los modelos y correlaciones con los gradientes de presión experimentales, se emplean los siguientes diez parámetros estadísticos comúnmente utilizados (Gregory & Fogarasi, 1985; Xiao *et al.* 1990; García *et al.* 2003; García, 2004):

Error porcentual promedio E_1 :

$$E_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_i \quad (3)$$

Error porcentual absoluto promedio E_2 :

$$E_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |r_i| \quad (4)$$

Desviación porcentual estándar E_3 :

$$E_3 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (r_i - E_1)^2} \quad (5)$$

Raíz del promedio del error porcentual al cuadrado E_4 :

$$E_4 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (r_i)^2} \quad (6)$$

Error promedio E_5 :

$$E_5 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i \quad (7)$$

Error absoluto promedio E_6 :

$$E_6 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i| \quad (8)$$

Desviación estándar E_7 :

$$E_7 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_i - E_5)^2} \quad (9)$$

Raíz del promedio del error al cuadrado E_8 :

$$E_8 = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_i)^2} \quad (10)$$

donde:

$$r_i = \left[\frac{dp/dx_{pred} - dp/dx_{exp}}{dp/dx_{exp}} \right] 100, \quad e_i = dp/dx_{pred} - dp/dx_{exp}, \quad y \quad n$$

es el número de datos experimentales.

El error porcentual promedio E_1 es una medida de la concordancia entre los valores calculados y experimentales e indica en promedio, el grado de sobrepredicción (valores positivos) o subpredicción (valores negativos) de los valores calculados con respecto a los experimentales. Similarmente, el error porcentual absoluto promedio E_2 es una medida de la concordancia entre los valores calculados y experimentales. Sin embargo, los errores positivos y negativos no se cancelan entre sí. Por esta razón, el error porcentual absoluto promedio es considerado un parámetro clave para evaluar la capacidad de predicción de un conjunto de modelos y correlaciones. La desviación estándar del error porcentual promedio E_3 indica el grado de dispersión de los errores con respecto al promedio. La raíz cuadrada del promedio del error porcentual al cuadrado (root mean square percent error) E_4 indica el grado de dispersión entre los valores calculados y los valores experimentales. Los parámetros estadísticos E_5 , E_6 , E_7 y E_8 son similares a E_1 , E_2 , E_3 y E_4 ; la diferencia es que no están basados en el error relativo del gradiente de presión experimental.

La jerarquización de los modelos y correlaciones se realiza en función del error porcentual absoluto promedio E_2 . Los resultados de la evaluación se presentan en la tabla 5, donde también se incluyen los demás parámetros estadísticos (E_1 - E_8).

Tabla 5. Comparación de la precisión de los 30 modelos o correlaciones de diferentes autores contra los 74 datos experimentales.

Modelo o Correlación	Parámetros Estadísticos							
	E_1 [%]	E_2 [%]	E_3 [%]	E_4 [%]	E_5 [Pa/m]	E_6 [Pa/m]	E_7 [Pa/m]	E_8 [Pa/m]
<i>CGR</i>	4,4	14,0	18,0	18,5	120,8	435,2	558,3	571,3
<i>MGO</i>	9,1	16,5	20,7	22,6	268,5	514,7	632,7	688,0
<i>CLM</i>	16,2	17,6	17,8	24,2	483,3	538,3	531,8	720,8
<i>MMO</i>	3,5	18,1	24,4	24,6	108,1	583,9	775,8	783,4
<i>MTB</i>	15,2	18,6	21,3	23,8	483,2	592,2	653,5	739,0
<i>CGA</i>	11,8	21,2	25,2	27,9	342,6	678,1	837,9	906,1
<i>CBB</i>	11,4	22,1	27,1	29,4	378,5	707,5	846,0	927,9
<i>CHB</i>	-0,1	22,5	27,9	27,9	-42,5	760,9	964,8	965,7
<i>CAZ</i>	-1,4	24,6	29,8	29,8	7,7	740,6	875,1	875,1
<i>CEA</i>	16,0	25,1	30,8	34,8	547,8	823,8	994,7	1.137,4
<i>CDR</i>	-10,1	25,6	28,3	30,1	-290,3	783,3	872,6	920,2
<i>CDU</i>	-25,8	27,0	18,2	31,7	-858,2	893,5	622,5	1.064,9
<i>MAN</i>	1,8	28,2	32,5	32,5	99,7	895,3	1.043,0	1.047,8
<i>CGW</i>	-25,8	29,4	25,9	33,3	-810,9	927,9	807,1	1.041,6
<i>COR</i>	7,0	36,4	58,4	58,8	284,9	1.251,2	2.151,1	2.170,2
<i>CCHi</i>	39,1	39,2	37,0	54,0	1.161,8	1.165,2	1.045,5	1.568,9
<i>COL</i>	-37,9	39,4	21,8	43,9	-1.178,8	1.226,5	658,1	1.357,1
<i>MHC</i>	-43,1	43,7	15,7	46,2	-1.376,2	1.394,3	508,3	1.475,9
<i>CCH</i>	-43,1	44,8	21,5	48,4	-1.378,5	1.424,6	656,0	1.535,2
<i>CMH</i>	-47,1	47,7	16,1	50,1	-1.499,6	1.517,3	510,3	1.593,7
<i>MHMc</i>	-47,8	48,3	16,5	50,8	-1.516,0	1.534,0	516,3	1.611,3
<i>MHO</i>	48,6	48,6	23,4	54,2	1.473,2	1.473,2	574,2	1.590,5
<i>CBW</i>	-48,4	49,0	16,9	51,5	-1.534,6	1.552,7	526,0	1.632,2
<i>CRE</i>	-49,3	49,9	17,1	52,5	-1.561,0	1.578,7	525,6	1.657,2
<i>MHW</i>	-50,8	51,4	17,7	54,1	-1.609,9	1.627,4	548,1	1.711,0
<i>CHO</i>	55,6	56,3	38,4	67,9	1.799,6	1.825,7	1.211,9	2.179,8
<i>CKA</i>	67,1	75,8	65,5	90,9	1.801,1	2.193,3	1.781,4	2.454,0
<i>CFB</i>	315,5	332,3	694,2	763,4	10.815,9	11.443,2	25.742,7	27.951,3
<i>CBT</i>	1.052,4	1.062,1	2.218,4	1.458,5	36.265,3	36.618,1	83.191,6	90.851,7
<i>CPC</i>	1.088,7	1.097,6	2.263,2	2.514,7	37.420,1	37.741,8	84.815,9	92.807,2

En la evaluación general frente a toda la base de datos, se observa que la correlación de Griffith *et al.* (1973) presenta el mejor desempeño en la predicción del gradiente de presión con un error absoluto promedio de 14,0 %, seguido del modelo de Gómez *et al.* (2000) con un error absoluto promedio de 16,5%. El mejor tercer desempeño lo obtiene la correlación de Lockhart & Martinelli (1949) con un error de 17,6%. Los peores desempeños los obtienen las correlaciones de Baxendell & Thomas (1961) y Poettman & Carpenter (1952) con más de 1000 % de error absoluto promedio.

La distribución de los resultados de los diez modelos con el mejor desempeño se presenta en la figura 1. En esta gráfica, los ejes *x* e *y* corresponden al gradiente de presión experimental y calculado, respectivamente; en Pa/m, la recta de 45 grados representa la igualdad entre dichos gradientes y las líneas continuas a ambos lados corresponden a una variación de $\pm 25\%$.

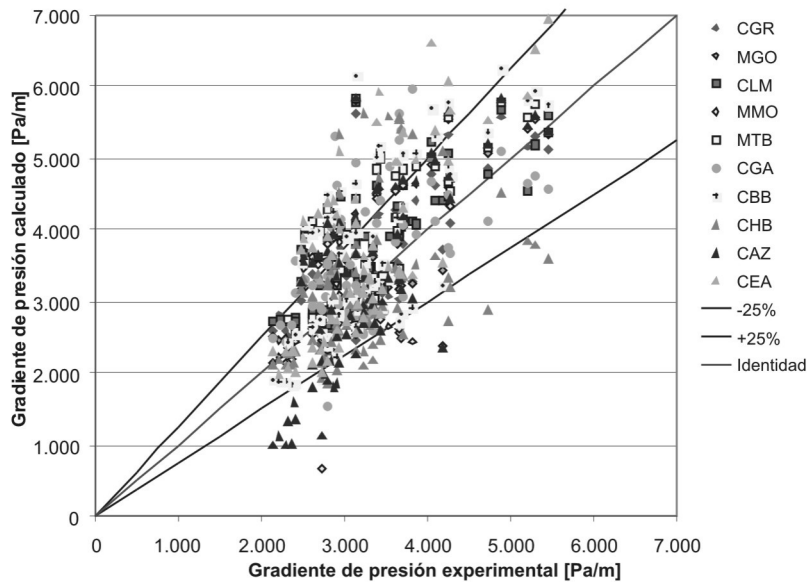


Figura 1. Gradiente de presión calculado vs. experimental de los 10 modelos o correlaciones con mejor desempeño para toda la base de datos experimentales.

CONCLUSIONES

Se evaluó el desempeño de cuatro modelos mecanicistas, nueve modelos homogéneos y diecisiete correlaciones empíricas para el cálculo de la caída de presión para flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías verticales. La evaluación se realizó comparando los resultados obtenidos por los diferentes modelos frente a datos experimentales reportados en la literatura especializada.

La correlación de Griffith *et al.* (1973) obtuvo el mejor desempeño con un error absoluto promedio de 14% seguido del modelo mecanicista de Gómez *et al.* (2000), con un error absoluto promedio de 16,5%. Es importante destacar que aunque el modelo mecanicista de Gómez *et al.* (2000), considera la configuración espacial de las fases y aplica modelos hidrodinámicos para cada patrón de flujo, la correlación de Griffith *et al.* (1973) obtuvo mejor desempeño en el intervalo de operación estudiado. Al analizar los primeros diez modelos con mejor desempeño, con errores menores al 25,1%, se observa que tres de los cuatro modelos mecanicistas están incluidos (Taitel & Barnea, 1990; Ouyang & Aziz, 1999; Gómez *et al.* 2000).

Aunque la correlación de Lockhart & Martinelli (1949) fue desarrollada para flujo horizontal, obtuvo el tercer mejor desempeño con un error absoluto promedio de 17,6%. De los 30 modelos estudiados 14 presentan errores absolutos promedio inferiores al 30% (Lockhart & Martinelli, 1949; Dukler *et al.* 1964; Beggs & Brill, 1973; Ansari *et al.* 1994; Gómez *et al.* 2000; Ouyang & Aziz, 1999; Griffith & Wallis, 1961; Duns & Ros, 1963; Hagedorn & Brow, 1965; Eaton

et al. 1967; Aziz *et al.* 1972; Griffith *et al.* 1973; García *et al.* 2007; Taitel & Barnea, 1990).

Los errores obtenidos por las correlaciones de Baxendell & Thomas (1961) y Poettman & Carpenter (1952), pudieran ser debido a una sobreestimación del gradiente de presión por fricción como consecuencia de las curvas de ajustes desarrolladas por Cravino & Pérez (2007) para su evaluación.

NOMENCLATURA

- a : Aceleración.
- AN: Flujo tipo Anular.
- D_i : Diámetro interno de la tubería (m).
- dP/dz : Gradiente de presión en la dirección z (Pa/m).
- e : Error (Pa/m).
- E_1 : Error porcentual promedio (%).
- E_2 : Error porcentual absoluto promedio (%).
- E_3 : Desviación estándar del error porcentual promedio (%).
- E_4 : Raíz cuadrada del promedio del error porcentual al cuadrado (%).
- E_5 : Error promedio (Pa/m).
- E_6 : Error absoluto promedio (Pa/m).
- E_7 : Desviación estándar del error promedio (Pa/m).
- E_8 : Raíz cuadrada del promedio del error al cuadrado (Pa/m).
- exp : Experimental.
- f : Factor de fricción de Moody (-), fricción.
- FP: Patrón de Flujo.
- FR: Flujo tipo Espumoso.
- G : Gravedad.

n: Número de experimentos.
 r: Error relativo (-).
 pre: Predicho.
 Re: Número de Reynolds (-).
 RI: Flujo tipo Ondulado.
 SL: Flujo tipo Tapón.
 tot: Total.
 U_{sg}: Velocidad superficial del gas (m/s).
 U_{sl}: Velocidad superficial del líquido (m/s).
 ε: Rugosidad superficial de la tubería (m).

AGRADECIMIENTO

Los autores del presente trabajo agradecen al CDCH-UCV por el apoyo económico otorgado a través de los Proyectos de investigación Nros. 08.00.5653.2007 y 08.00.6245.2008.

REFERENCIAS

- ALARCÓN, G. (1998). Flujo de dos fases. Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica, ULA, Venezuela, p. 475.
- ANSARI, A., SYLVESTER, N., SARICA, C., SHOHAM, O., BRILL, J. (1994). A comprehensive mechanistic model for upward two-phase flow in wellbores. SPE Production & Facilities J. 9, pp. 142-152.
- AZIZ, K., GOVIER, G. W., FOGARASI, M. (1972). Pressure drop in wells producing oil and gas. Journal of Canadian Pet. Tech., pp. 38-48.
- BAXENDELL, P. B., THOMAS, R. (1961). The calculation of pressure gradients in high-rate flowing wells. Journal of Pet. Tech., pp. 1023-1028.
- BEATTIE, D., WHALLEY, P. D. (1982). A simple two-phase frictional pressure drop calculation method. Int. J. Multiphase Flow 8, pp. 83-87.
- BEGGS, H., BRILL, J. (1973). A study of two-phase flow in inclined pipes. J. Pet. Tech. 25, pp. 607-617.
- BROWN, R., SULLIVAN, G. A., GOVIER, G. W. (1960). The upward vertical flow of air-water mixtures: III. Effect of gas phase density on flow pattern, holdup and pressure drop. The Canadian Journal of Chemical Engineering, pp. 62-66.
- CHEN, I., YANG, K., WANG, C. (2002). An empirical correlation for two-phase frictional performance in small diameter tubes. Int. Journal of Heat Mass Transfer 45, pp. 3667-3671.
- CHIERICI, G. L., CIUCCI, G. M., CLOCCHI, G. S. (1974). Two-phase flow in oil wells, prediction of pressure drop. Journal of Pet. Tech., SPE 4316-PA.
- CICCHITTI, A., LOMBARDI, C., SILVESTRI, M., SOLDAINI, G., ZAVATTAREUI, R. (1960). Two-phase cooling experiments-pressure drop, heat transfer and burnout measurements. Energi Nucl 7, pp. 407-425.
- CRAVINO, A., PÉREZ, A. (2007). Evaluación de modelos homogéneos, de correlación y mecanicistas en la predicción de la caída de presión de flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías verticales. Trabajo Esp. de Grado Ing. Mecánico, Universidad Central de Venezuela, Caracas, p. 223.
- DUKLER, A. E., WICKS III, M., CLEVELAND, R. (1964). Frictional pressure drop in two-phase flow: A. A comparison of existing correlations for pressure loss and holdup y B. An approach through similarity analysis. AIChE Journal 10, pp. 38-51.
- DUNS, H., ROS, N. C. J. (1963). Vertical flow of gas and liquid mixtures in wells. Proceedings of the 6th World Petroleum Congress, pp. 451-465.
- EATON, B., ANDREWS, D., KNOWLES, C., SILBERBERG, I., BROWN, K. (1967). The prediction of flow patterns, liquid holdup and pressure losses occurring during continuous two-phase flow in horizontal pipelines. J. Pet. Tech., pp. 815-828.
- FANCHER, G. H., BROW, K. E. (1963). Prediction of pressure gradients for multiphase flow in tubing. SPE Journal, pp. 59-69.
- GARCÍA, F. (2004). Factor de fricción para flujo bifásico de gas y de líquido en tuberías horizontales para régimen laminar y turbulento. Tesis Doctoral, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela, p. 133.
- GARCÍA, F., GARCÍA, J. M., GARCÍA, R., JOSEPH, D. (2007). Friction factor improved correlations for laminar and turbulent gas-liquid flow in horizontal pipelines. International Journal of Multiphase Flow 33(12), pp. 1320-1336.
- GARCÍA, F., GARCÍA, R., PADRINO, J. C., MATA, C., TRALLERO, J., JOSEPH, D. (2003). Power law and composite power law friction factor correlations for laminar and turbulent gas-liquid flow in horizontal pipelines. Int. Journal Multiphase Flow 29(10), pp. 1605-1624.

- GÓMEZ, L., SHOHAM, O., SCHIMDT, Z., CHOKSHI R., NORTHUG, T. (2000). Unified mechanistic model for steady-state two-phase flow: horizontal to vertical upward flow. *SPE Journal* 5, pp. 339-350.
- GOVIER, G. W., LEIGH, W. (1958). The upward vertical flow of air-water mixtures: II. Effect of tubing diameter on flow pattern, holdup and pressure drop. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, pp. 195-202.
- GREGORY, G., FOGARASI, M. (1985). A critical evaluation of multiphase gas-liquid pipeline calculation methods. 2nd Int. Conf. on Multiphase Flows, London, pp. 93-108.
- GRIFFITH, P. Y WALLIS, G. B. (1961). Two-phase slug flow. *Journal of Heat Transfer* 83, pp. 307-320.
- GRIFFITH, P., LAU, C. W., HON, P. C., PEARSON, J. F. (1973). Two-phase pressure drop in inclined and vertical pipes. Tech. Report No. 80063-81, Heat Transfer Laboratory, Dept. of M.E., MIT, Cambridge, Mass.
- HAGENDORN, A. R., BROW, K. E. (1965). Experimental study of pressure gradients occurring during continuous two-phase flow in small diameter vertical conduits. *Journal of Pet. Tech.*, pp. 475-484.
- HOOGENDORN, C. (1959). Gas-liquid flow in horizontal pipes. *Chem. Eng. Sci.* 9, pp. 205-217.
- KADAMBI, V. (1981). Void fraction and pressure drop in two-phase stratified flow. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 59, pp. 584-589.
- LOCKHART, R., MARTINELLI, R. (1949). Proposed correlation of data for isothermal two-phase two component flow in pipes. *Chem. Eng. Prog.* 45, pp. 39-48.
- MCADAMS, W., WOODS, W., HEROMAN, L. (1942). Vaporisation inside horizontal tubes. *Trans. ASME* 64, pp. 193-200.
- MÜLLER, H., HECK, K. (1986). A simple friction pressure drop correlation for two-phase flow in pipes. *Chem. Eng. Process* 20, pp. 297-308.
- OLIEMANS, R. (1976). Two-phase flow in gas-transmission pipelines. ASME paper 76-Pet-25, presented at Pet. Div. ASME Meeting, Mexico.
- ORKISZEWSKI, J. (1967). Predicting two-phase pressure drops in vertical pipes. *Journal of Pet. Tech.*, pp. 829-838.
- OUYANG, L., AZIZ, K. (1999). A mechanistic model for gas-liquid flow in pipes with radial influx or outflux. SPE 56525, Annual Technical Conference and Exhibition, Houston.
- OUYANG, L. (1998). Single phase and multiphase fluid flow in horizontal wells. Phd Thesis. Department of Petroleum Engineering. School of Earth Sciences. Stanford University. Stanford, California, EUA, p. 248.
- POETTMAN, F. H., CARPENTER, P. G. (1952). The multiphase flow of gas, oil and water through vertical flow strings with application to the design of gas-lift installations. *Drilling and production practice API*, pp. 257-317.
- REID, R., REYNOLDS, A., DIGLIO, A., SPIEWAK, I., KLIPSTEIN D. (1957). Two-phase pressure drops in large-diameter pipes. *AIChE J.* 3, pp. 321-324.
- TAITEL, Y., BARNEA, D. (1990). Two-phase slug flow. *Advances in Heat Transfer* 20, pp. 83-132.
- WALLIS, G. B. (1969). One-dimensional two-phase flow. McGraw-Hill Book Co. Inc., New York City, p. 409.
- XIAO, J., SHOHAM, O., BRILL, J. (1990). A comprehensive mechanistic model for two-phase flow in pipelines. In *The 65th SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, New Orleans, LA. Paper SPE 20631: 67-180. September 23-26.
- ZIGRANG, D., SYLVESTER, N. (1985). A review of explicit friction factor equations. *J. of Energy Resources Technology* 107, pp. 280-283.