

Liquid-gas stratified flow separation with free surface flow simulation

Jesús Muñoz, Jean François Dulhoste y Rafael Santos

Facultad de Ingeniería, Escuela de Mecánica, Departamento de Ciencias Térmicas,
Grupo de Termofluidodinámica, Universidad de Los Andes. Mérida 5101, Venezuela.
jesusm@ula.ve / djean@ula.ve

Abstract

This paper presents a modification of an open channel simulator with rectangular transverse section, adapted to a partially full circular section to study the one-dimensional flow dynamics and its operation as a manifold for liquid-gas separation. The simulator uses the Saint-Venant equations with implicit finite differences scheme, commonly denominated Preissmann's method, and the optimization method known as Levenberg-Marquardt to solve this kind of equation system. The simulator allows the simulation and the determination of the liquid and gas outlet flows with known inlet conditions. The carried out simulations are considered satisfactory, being observed a good stability of the proposed method.

Key words: Manifold, liquid distributor, simulation, open channel, stratified flow.

Simulación de la separación de flujo estratificado de líquido-gas mediante ecuaciones de flujo con superficie libre

Resumen

En este trabajo se adapta un simulador de flujo en canales abiertos con geometría de sección transversal de flujo rectangular a una sección circular parcialmente llena para estudiar en forma dinámica el flujo unidimensional en canales abiertos y su funcionamiento como *manifold* para la separación de líquido-gas. El simulador usa las ecuaciones de Saint-Venant, discretizadas mediante un esquema implícito de diferencias finitas comúnmente denominado método de Preissmann y el método de optimización de Levenberg-Marquardt para la solución del sistema de ecuaciones. El programa permite simular el flujo y determinar los caudales de salida de líquido y de gas con valores de entrada conocidos. Las simulaciones realizadas fueron satisfactorias, observándose una buena estabilidad del método propuesto.

Palabras clave: *Manifold*, distribuidor de líquido, simulación, canal abierto, flujo estratificado.

Introducción

En este trabajo se estudia un *manifold* de separación de líquido-gas con flujo de entrada estratificado, el cual es un colector-distribuidor de líquido y gas con varias "T" de unión conectadas a un tramo de canal principal, en donde el líquido y el gas se reparten en diferentes salidas. Para la fase líquida, las uniones pueden ser tratadas según la dinámica de flujo en canales abiertos, el

tratamiento hidráulico sistemático de la mayoría de las uniones en canales naturales y los hechos por el hombre raramente es considerado, debido principalmente, al gran número de parámetros involucrados y a las complejas características de las uniones [1]. El estudio teórico de este fenómeno permite identificar las variables que en éste intervienen. Para ello se desarrolló un simulador que permite predecir los caudales de salida de líquido y de gas, el cual, también puede ser aplica-

do en sistemas de drenaje de aguas de lluvia, donde se seleccionan posiciones particulares en las que sólo a ciertas fracciones de la máxima descarga se le permiten continuar hacia estaciones de tratamiento [2].

En la industria petrolera nuevas alternativas como los sistemas compactos de separación cilíndricos ciclónicos de gas-líquido, conocidos como *Gas-Liquid Cylindrical Cyclone* (GLCC©1), [7], usan como pre-separador un *manifold* que permite incrementar las ventajas de la posterior separación ciclónica.

El simulador de flujo en canales abiertos desarrollado originalmente [3], fue elaborado para estudiar fenómenos hidráulicos en canales de sección transversal rectangular, flujo subcrítico y baja pendiente, obteniéndose la solución en forma dinámica, de las ecuaciones de Saint-Venant a través de métodos de diferencias finitas con discretización implícita en el tiempo [4] basado en el esquema de Preissmann y además con discretización explícita en el tiempo o método de diferencias finitas explícito [5, 6]. El simulador implícito se modificó para estudiar la evolución temporal y espacial del nivel y el caudal de líquido en un *manifold*, determinar el flujo de líquido y de gas a través de los orificios de descarga, determinar la presión en el interior del *manifold* y considerar condiciones transitorias.

Este trabajo está organizado de la siguiente manera, se presenta la forma general de las ecuaciones de Saint-Venant, las formulaciones para secciones circulares y el esquema de solución, seguidamente aspectos inherentes a las entradas y salidas de líquido, el tratamiento teórico aplicado a la fase gaseosa, los resultados de las simulaciones realizadas, el análisis de los resultados, las conclusiones y finalmente las referencias bibliográficas inherentes a este trabajo.

Modelo Teórico

Para el estudio, se adaptó el simulador de flujo en canales abiertos [3], desarrollado en un esquema de programación que emplea Matlab 5.3[®] y Fortran 6.0[®], en donde se realiza el diseño, los cálculos, y la obtención de resultados gráficos.

Ecuaciones de Saint Venant

Las ecuaciones diferenciales parciales no lineales de Saint-Venant, formuladas en caudal y sección transversal, considerando el término de infiltración [4] son:

Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q. \quad (1)$$

Ecuación de cantidad de movimiento

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/S)}{\partial x} + gS\left(\frac{\partial z}{\partial x} + J\right) = k_q q \left(\frac{Q}{S}\right). \quad (2)$$

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{\partial h}{\partial x} - I, \quad (3)$$

donde t es el tiempo, x la variable espacial en el sentido del flujo, S es la sección transversal, h el nivel relativo al fondo, z la cota absoluta de la superficie, I es la pendiente del fondo, J energía de fricción, Q caudal, funciones de xy t , g gravedad y q la infiltración función del tiempo t . $k_q = 0$ si $q > 0$ y $k_q = 1$ si $q < 0$. Cuando la infiltración es positiva, es perpendicular al flujo y no trae cantidad de movimiento (lluvia por ejemplo). En el caso de manifold no se considera infiltración, por lo tanto $q = 0$. En la Figura 1 se muestra una sección longitudinal de canal.

El término de la energía de fricción, se calculó usando la ecuación de Manning-Strickler y el coeficiente de Strickler [8]:

$$J = \frac{Q|Q|}{K^2 S^2 \left(\frac{S}{P_m}\right)^{4/3}}, \quad (4)$$

donde P_m es el perímetro mojado función de xy t . Para el caso de la sección transversal circular de flujo, se expresa en función de ángulo θ , que se muestra en la Figura 2.

Para secciones circulares el área de la sección transversal es igual a [8]:

$$S = \frac{D_m^2}{8} (\theta - \text{sen}(\theta)). \quad (5)$$

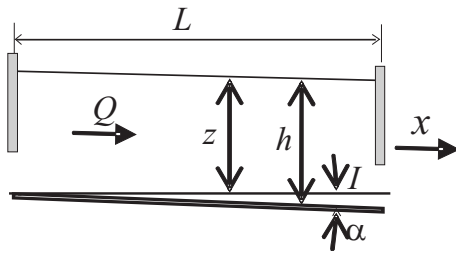


Figura 1. Sección longitudinal de canal abierto.

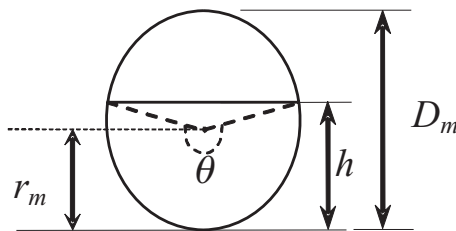


Figura 2 Sección transversal circular.

El perímetro mojado, se pueden obtener mediante la siguiente ecuación [8]:

$$P_m = \frac{\theta D_m}{2}. \tag{6}$$

El ángulo de la sección θ , puede escribirse en función del nivel

$$\theta = 2\arccos\left(1 - 2\frac{h}{D_m}\right). \tag{7}$$

Condiciones de frontera y condiciones iniciales

En régimen fluvial (subcrítico), se debe utilizar una condición de frontera aguas arriba y una condición de frontera aguas abajo de modo que se presentan cuatro posibilidades. Con el propósito de fijar igual a cero el caudal en los extremos del manifold, se selecciona las condiciones de frontera y condiciones iniciales siguientes:

$$Q(x = 0, t) = Q_1(t) \quad Q(x = L, t) = Q_n(t) \tag{8}$$

$$h(x,0) = h(x) \quad y \quad Q(x,0) = Q(x) \quad \forall x \in [0, L]. \tag{9}$$

Método implícito, esquema de Preissmann

La complejidad de las ecuaciones de Saint-Venant y la ausencia de una solución ana-

lítica, plantea el uso de modelos de dimensión finita y métodos numéricos para obtener soluciones aproximadas [9]. De los esquemas de discretización implícita de las ecuaciones de Saint-Venant, el esquema de Preissmann es muy usado en la literatura [4, 5, 10]. El método implícito a diferencia del explícito, aunque su solución es más compleja, la estabilidad no depende de la selección del intervalo de tiempo y tiene la particularidad de producir una solución numéricamente estable con una gran precisión. En cada punto de discretización las ecuaciones de Saint-Venant quedan expresadas en la siguiente forma:

Ecuación de continuidad

$$\frac{S_{i+1}^{j+1} - S_{i+1}^j}{2\Delta t} + \frac{S_i^{j+1} - S_i^j}{2\Delta t} + \left[\theta p \frac{(Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j)}{\Delta x} + (1 - \theta p) \frac{(Q_{i+1}^j - Q_i^j)}{\Delta x} \right] - q = 0 \tag{10}$$

Ecuación dinámica

$$\left[\frac{Q_{i+1}^{j+1} - Q_{i+1}^j}{2\Delta t} + \frac{Q_i^{j+1} - Q_i^j}{2\Delta t} \right] + \left[\frac{\theta p}{\Delta x} \left(\left(\frac{Q^2}{S} \right)_{i+1}^{j+1} - \left(\frac{Q^2}{S} \right)_i^{j+1} \right) + \frac{(1 - \theta p)}{\Delta x} \left(\left(\frac{Q^2}{S} \right)_{i+1}^j - \left(\frac{Q^2}{S} \right)_i^j \right) \right] + \frac{1}{2} g \left[\theta p (S_{i+1}^{j+1} + S_i^{j+1}) + (1 - \theta p) (S_{i+1}^j + S_i^j) \right] \times \left[\frac{\theta p}{\Delta x} (z_{i+1}^{j+1} - z_i^{j+1}) + \frac{(1 - \theta p)}{\Delta x} (z_{i+1}^j - z_i^j) \right] + \frac{1}{2} g \left[\theta p (S_{i+1}^{j+1} J_{i+1}^{j+1} + S_i^{j+1} J_i^{j+1}) + (1 - \theta p) (S_{i+1}^j J_{i+1}^j + S_i^j J_i^j) \right] - \frac{1}{2} k_q q \times \left[\theta p \left(\left(\frac{Q}{S} \right)_{i+1}^{j+1} - \left(\frac{Q}{S} \right)_i^{j+1} \right) + (1 - \theta p) \left(\left(\frac{Q}{S} \right)_{i+1}^j - \left(\frac{Q}{S} \right)_i^j \right) \right] = 0 \tag{11}$$

θp es un coeficiente de ponderación temporal del cual depende el grado de implícitud del esquema [4, 5]. El sistema será incondicionalmente estable si $0,5 < \theta p < 1$. El valor óptimo está alrededor de 0,66 para que el esquema permanezca numéricamente estable y preciso [11]. En las

ecuaciones discretizadas los subíndices $i, i + 1$ son relativos a la variable espacial x o posición, y los superíndices $j, j + 1$ representan la variable tiempo, según esto se tiene:

Discretización de las variables de interés para secciones circulares

$$S_m^n = \left(\frac{D_m^2}{8} \right) [\theta_m^n - \arcsen(\theta_m^n)] \quad (12)$$

$$P_{m_m}^n = \frac{\theta_m^n D_{m_m}}{2} \quad (13)$$

$$\theta_m^n = 2 \arccos \left(1 - 2 \frac{h_m^n}{D_m} \right) \quad (14)$$

$$J_m^n = \frac{Q_m^n |Q_m^n|}{K^2 (S_m^n)^2 \left(\frac{S_m^n}{P_{m_m}^n} \right)^{4/3}}, \quad (15)$$

donde $m = i, i + 1, n = j, j + 1$. Se obtienen cuatro expresiones para cada una de las ecuaciones anteriores según el valor de m y n . Por ejemplo de la Ec. (12) se requieren: $S_{i+1}^j, S_i^j, S_{i+1}^{j+1}, S_i^{j+1}$ los cuales forman parte de las ecuaciones de Saint-Venant. El sistema de ecuaciones discretas implícitas no lineales se resuelve mediante un método de optimización entre los que se encuentra el de Levenberg-Marquardt [11], es un algoritmo conocido de uso general para encontrar el mínimo de la suma de los cuadrados de funciones no lineales, es una variación del método de Newton con el cual la evolución hacia el óptimo es más rápida. La finalización del proceso iterativo ocurre cuando tanto el valor actual como las reducciones relativas obtenidas en la suma de los cuadrados cumplan un valor de tolerancia, el cual determina el error relativo deseado.

Entradas y salidas de líquido

El funcionamiento del simulador requiere la inclusión de las entradas y las ecuaciones que permitan determinar los caudales salientes. Para modelarlas es necesario añadir una condición de frontera interna, en el punto donde ocurre la entrada y/o salida se añade la siguiente ecuación:

$$Q = Q + Ql - Qs, \quad (16)$$

donde Q es el caudal en el punto donde ocurre la entrada lateral y/o salida de fondo, Ql es una entrada lateral y Qs es una salida de fondo.

Cálculo de los caudales de salida en el fondo del manifold

Para determinar los caudales en las salidas del fondo se aplica la ecuación de energía, a cualquier línea de corriente sobre la superficie libre, para relacionar la energía potencial disponible con la velocidad [12], de esta manera se obtiene:

$$\frac{P}{\rho} + gh - \frac{K_{sl} v_{sl}^2}{2} = \frac{v_{sl}^2}{2}, \quad (17)$$

donde P es la presión interna del *manifold*, h es la altura promedio del líquido en una salida, v_{sl} y K_{sl} son la velocidad y el coeficiente de resistencia del líquido en la salida respectivamente.

El coeficiente de resistencia de las salidas con diámetro igual a la tubería principal del *manifold*, fue determinado experimentalmente [7] según la siguiente ecuación:

$$K_{sl1} = 9,6277 \times 10^6 \text{Re}^{-1,3741}. \quad (18)$$

El número de Reynolds en la salida de líquido se calcula con la ecuación:

$$\text{Re} = \frac{v_{sl} D_{sl}}{v_l}, \quad (19)$$

donde D_{sl} es el diámetro de la salida de líquido y v_l es la viscosidad cinemática. Para salidas con diámetros menores que la tubería principal se propone el siguiente parámetro:

$$\beta = \frac{D_{sl}}{D_m}. \quad (20)$$

Se modifica entonces la Ec. (18) obteniéndose la siguiente expresión para considerar relaciones de diámetro $\beta < 1$:

$$K_{sl1} = \frac{9,6277 \times 10^6}{\beta} \text{Re}^{-1,3741}. \quad (21)$$

Para calcular los caudales de líquido en las salidas de fondo, se plantea un procedimiento

iterativo en el cual se asume un valor inicial del coeficiente de resistencia al flujo K_{sl} , que junto con la distribución inicial de nivel permite calcular una velocidad inicial, usando la Ec. (17) se obtiene:

$$v_{sl} = \sqrt{\frac{2gh}{1 + K_{sl}}}. \tag{22}$$

Con esta velocidad se calcula el número de Reynolds y un nuevo coeficiente de resistencia usando la Ec. (21), para calcular una nueva velocidad de salida hasta que se satisface una tolerancia entre la última velocidad calculada y la anterior. Esto se aplica en cada una de las salidas y en cada intervalo de tiempo en el método de Preissmann.

Cálculo de la presión interna del manifold

Para la fase gaseosa se supone gas ideal y un campo de flujo uniforme. El volumen de control de la fase gaseosa se muestra en la Figura 3.

La ecuación de conservación de la masa es igual a:

$$\frac{V_g}{RT} \frac{dP}{dt} + \frac{P}{RT} \sum_{i=1}^{n_{sg}} Q_{sali_{g_i}} - \frac{P}{RT} Q_{TG} = 0, \tag{23}$$

donde P es la presión dentro del manifold, V_g es el volumen ocupado por el gas, R es la constante del gas, T es la temperatura, Q_{TG} es el caudal total de gas que entra al manifold, $Q_{sali_{g_i}}$ es el caudal a través de una salida de gas, n_{sg} es el número de salidas de gas.

Dado que el volumen que ocupa la fase gaseosa varía con el tiempo en función del volumen de líquido, en un instante el volumen es constante y se calcula mediante el complemento del volumen ocupado por el líquido dentro del manifold. Este volumen se determina en cada intervalo de tiempo Δt seleccionado en el método de Preissmann.

$$V_g = V_m - V_l. \tag{24}$$

La configuración del sistema y la presión en los tubos de salida de gas son conocidas. El caudal en una salida de gas $Q_{sali_{g_i}}$ se calcula en función de la presión interna del manifold y de la re-

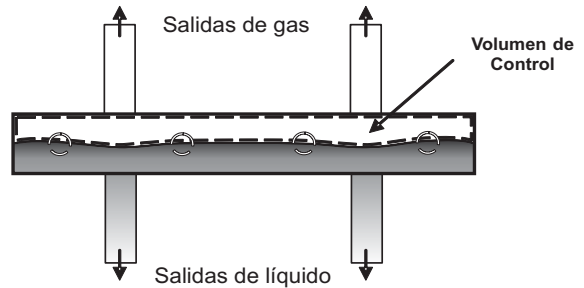


Figura 3. Esquema del manifold.

sistencia al flujo correspondiente. Para esto se aplica un balance de energía desde un punto en el interior del manifold con presión P hasta un punto donde la presión es conocida P_{known} , tal como se muestra en la Figura 4.

De la ecuación de Bernoulli aplicada entre los puntos mostrados en la Figura 4 se tiene:

$$\frac{P}{\gamma_g} - K_{sg_i} \frac{Q_{sg_i}^2}{2gA_{sg_i}^2} - Rh_{sg_i} Q_{sg_i}^2 = \frac{P_{known}}{\gamma_g} + \frac{Q_{sg_i}^2}{2gA_{sg_i}^2}, \tag{25}$$

donde K_{sg_i} es la resistencia, A_{sg_i} es el área del tubo, γ_g es el peso específico del gas y Rh_{sg_i} es el coeficiente de resistencia hidráulica en el tubo de salida de gas. El coeficiente de resistencia hidráulica [12] se puede calcular usando la siguiente ecuación:

$$Rh_{sg_i} = \frac{8f_i L_i}{g\pi^2 D^5}. \tag{26}$$

El coeficiente de fricción correspondiente se calcula suponiendo tubería lisa y usando la ecuación de Blasius.

$$f_i = \frac{0.316}{Re_D^{1/4}}. \tag{27}$$

Sustituyendo la Ec. (26) y manipulándola se obtiene:

$$Q_{sg_i} = \sqrt{\frac{(P - P_{known})RT}{P \left(\frac{8K_{sg_i}}{\pi^2 D_{sg_i}^4} + \frac{8f_i L_i}{\pi^2 D_{sg_i}^5} - \frac{8}{\pi^2 D_{sg_i}^4} \right)}}. \tag{28}$$

Sustituyendo la Ec. (28) en la Ec. (23) y manipulando esta ecuación se obtiene:

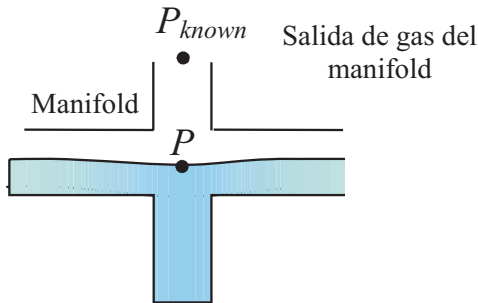


Figura 4 Balance de energía en una salida de gas del manifold.

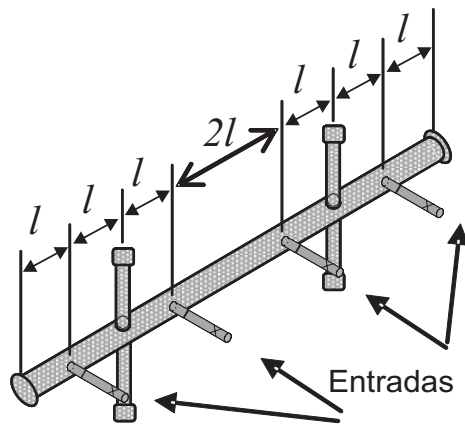


Figura 5 Esquema del manifold.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P}{V_g} Q_{TG} - P \sqrt{\frac{P - P_{known}}{P}} \frac{\sqrt{RT}}{V_g} R_T, \quad (29)$$

donde:

$$R_T = \sum_{i=1}^{n_{sg}} \sqrt{\frac{1}{\frac{8K_{sg_i}}{\pi^2 D_{sg_i}^4} + \frac{8f_i L_i}{\pi^2 D_{sg_i}^5} - \frac{8}{\pi^2 D_{sg_i}^4}}}, \quad (30)$$

R_T es la resistencia total al flujo de salida del sistema. La Ec. (29) es una ecuación diferencial ordinaria de primer orden en la que P es la variable dependiente incógnita y el tiempo t es la variable independiente. Esta ecuación se resuelve dinámicamente en cada intervalo de tiempo Δt usando el método de Runge-Kutta de cuarto orden. Este método iterativo se usa para aproximar la solución de ecuaciones de este tipo con bastante precisión.

Definición de Parámetros de Simulación

Descripción del manifold

El programa permite simular distintos números de entradas y salidas establecidos en una posición y tiempo determinados; en este trabajo se estudió un caso particular con 4 entradas y dos salidas. Tal como se muestra en la Figura 5 la longitud total del manifold es 2438,4 mm; diámetro del manifold $D_m = 76,2$ mm; $l = 304,8$ mm; pendiente $I = 0,0$

Diámetros de las salidas de gas: $D_{sg1} = \left(\frac{2}{3}\right)D_m$; $D_{sg2} = D_{sg1}$. Diámetros de salida de líquido: $D_{sl1} = \left(\frac{2}{3}\right)D_m$; $D_{sl2} = D_{sl1}$ Casos de estudio (I y II) presentados en la Tabla 1; $D_{sl1} = \left(\frac{3}{4}\right)D_m$; $D_{sl2} = D_{sl1}$ Caso (III).

Propiedades

Se utiliza el valor del coeficiente de Strickler igual a $100 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ para simular tubo liso y un valor de $20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ para considerar condiciones equivalentes a un canal natural [13]. Se considera agua en condiciones normales. La densidad del aire se calcula en función de la presión usando la ecuación de estado de gases ideales. Presión en las salidas de los tubos de gas $P_{known} = 101000$ Pa. Coeficiente adimensional de pérdida de carga secundaria para las salidas de gas $K_{sg1} = 2,5$; $K_{sg2} = K_{sg1}$. Longitud de tramo recto más longitud equivalente de pérdidas en los tubos de salida de gas: $L_1 = 1$ m; $L_2 = 1$ m.

Método numérico

Suponiendo una distribución inicial uniforme de líquido, las entradas y salidas de líquido y de gas comienzan 1 minuto después del inicio de las simulaciones, a partir de esta condición. El intervalo de tiempo se toma igual a $\Delta t = 1$ s; el tiempo total de simulación es igual a 5 minutos con un número de nodos = 101. Se toman valores de tolerancia, iguales a $1 \cdot 10^{-4}$ en el simulador y un número total de 100 iteraciones en el método de Runge-Kutta usado para calcular la presión.

Tabla I
Resultados de simulación según el caso

Simulación	Caudales de entrada de líquido (L/s)	Caudal total gas (L/s)	Caudales salientes de líquido (L/s)		Caudales salientes de gas (L/s)		Presión (Pa)
			Q_{sl1}	Q_{sl2}	Q_{sg1}	Q_{sg2}	
Caso I. Efecto de la rugosidad en el flujo de líquido	0,2 0,05 0,05 0,2	78	0,2512	0,2488	39	39	101420,00
			0,2499	0,2501	39	39	101420,00
			0,2500	0,2500	6,5	6,5	101010,06
Caso II. Efecto del caudal de gas que entra al manifold	0,2 0,05 0,05 0,2	13	0,2501	0,2499	39	39	101420,00
	0,10						
	0,35						
Caso III. Efecto de la simetría o asimetría en las entradas de líquido	0,35 0,10	72,8	0,4488	0,4512	13,0	13,0	101050,00
	0,10						
	0,15						
	0,30	72,8	0,4310	0,4690	13,0	13,0	101050,00
	0,35						

Estos valores se mantienen constantes en todas las iteraciones.

Resultados y Discusión

Se presentan los caudales de salida de líquido y de gas, la presión del *manifold* y la evolución espacial y temporal del nivel y el caudal.

En el caso I (Figuras 6-9), se puede observar el descenso en el nivel a partir del valor inicial de equilibrio producto de las salidas de líquido y de la presión. La mayor rugosidad es equivalente a un canal natural. En el caso del tubo principal del *manifold* liso, equivalente a vidrio, se observa una distribución de nivel prácticamente unifor-

me. La evolución espacial y temporal del caudal muestra la existencia de flujos de diferentes magnitudes en función de las entradas y salidas y con direcciones iguales y opuestas, tal como era de esperarse por las condiciones de flujos entrantes y salientes.

En las Figuras 10-13 (caso II), el incremento en el flujo de gas, aumenta la presión interna, lo que produce un descenso en la distribución de nivel de líquido en cada caso. Sin embargo, esta disminución en el nivel no afecta efectivamente los caudales de salida de líquido, ya que, aunque el caudal de salida es directamente proporcional al nivel de líquido disponible en la salida, este caudal también es proporcional a la altura equi-

Caso I. Rugoso

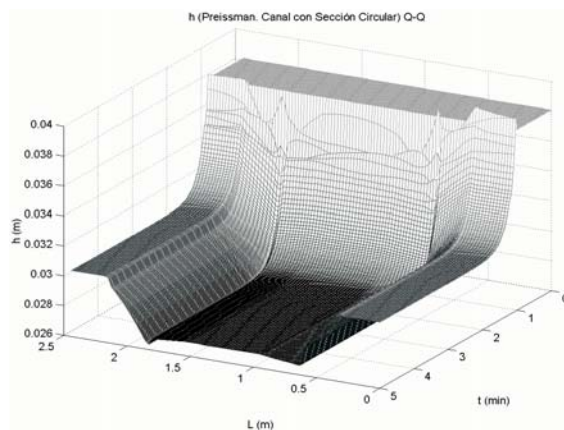


Figura 6. Evolución del nivel.

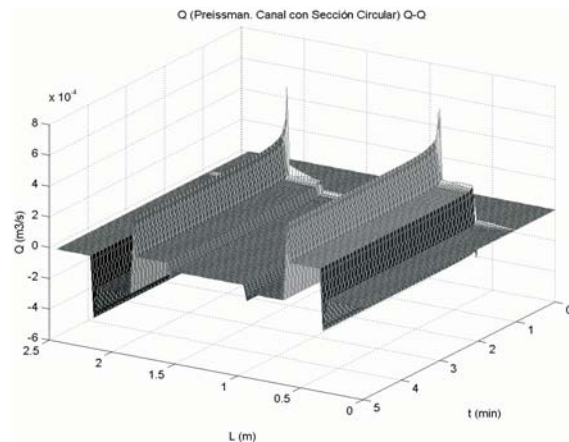


Figura 7. Evolución del caudal.

Caso I. Liso

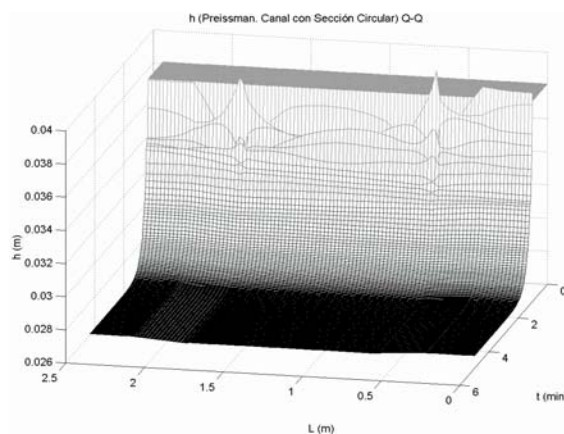


Figura 8. Evolución del nivel.

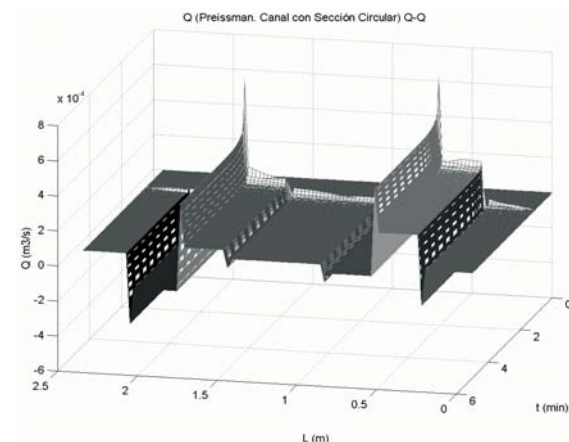


Figura 9. Evolución del caudal.

Caso II. $Q_{Teg} = 13 \text{ L/s}$

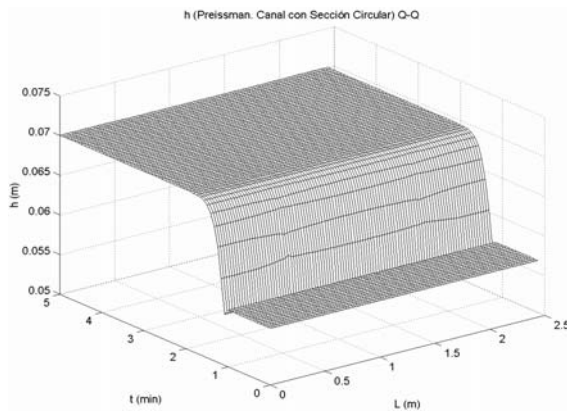


Figura 10. Evolución del nivel.

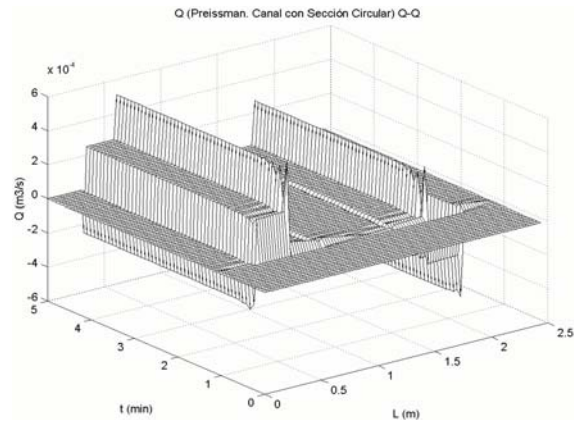


Figura 11. Evolución del caudal.

Caso II. $Q_{Teg} = 78 \text{ L/s}$

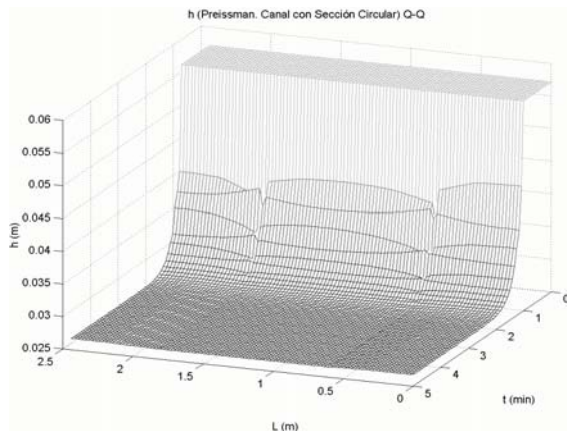


Figura 12. Evolución del nivel.

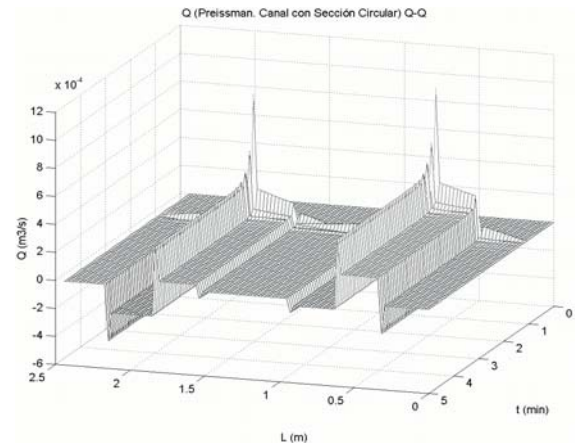


Figura 13. Evolución del caudal.

valente de líquido determinada por la presión de gas, lo cual compensa la disminución en el nivel de líquido real.

En las Figuras 14-17 (caso III), mayor entrada de flujo en la región intermedia provoca incremento en el nivel correspondiente a esta zona.

Con entrada asimétrica se observa mayor nivel de líquido en el extremo correspondiente a mayor entrada de caudal. Se usa en estas simulaciones la mayor rugosidad posible con el propósito de obtener resultados con variaciones graduales de nivel. Los materiales de construcción de un manifold difícilmente alcanzarían la condición de rugosidad simulada en este caso, por lo tanto, se esperaría una distribución de nivel mas

uniforme que no causa un importante efecto de difusión en la fase gaseosa, en caso contrario, se tendrían gradientes de presión dentro del manifold; esto puede justificar la suposición de campo de flujo uniforme para la presión, según como se señaló en el modelo teórico.

Conclusiones

La formulación de las ecuaciones de Saint-Venant basada en el método de Preissmann, la resolución de las mismas para una sección circular y su funcionamiento como manifold resultó satisfactorio. Los resultados presentan buena estabilidad y pueden ser comparados con

Caso III. Simétrico

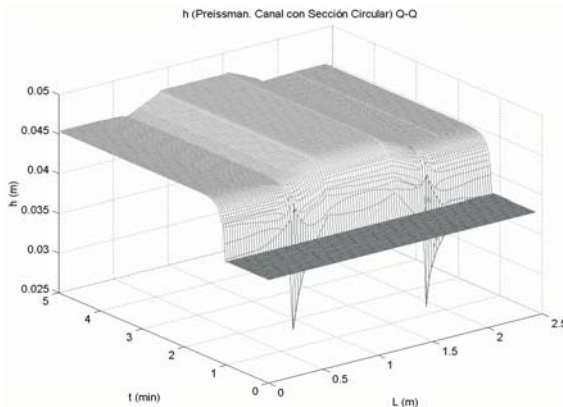


Figura 14. Evolución del nivel.

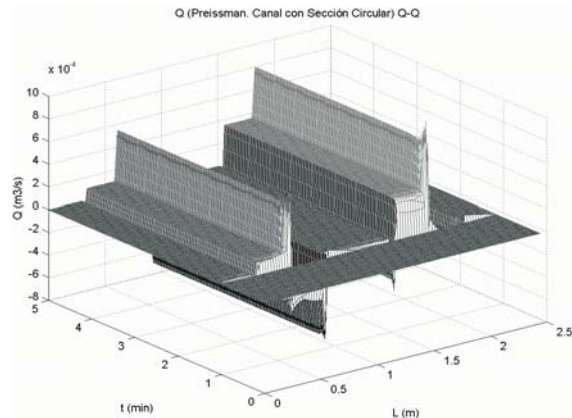


Figura 15. Evolución del caudal.

Caso III. Asimétrico

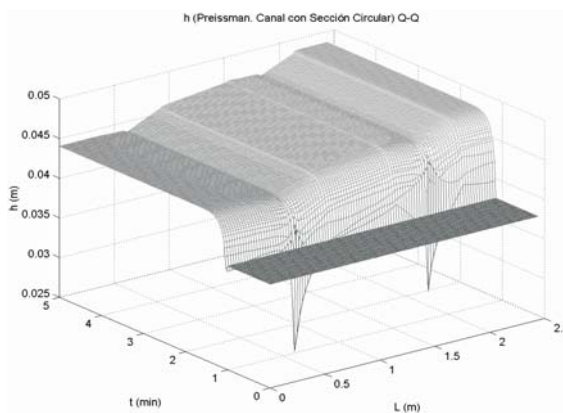


Figura 16. Evolución del nivel.

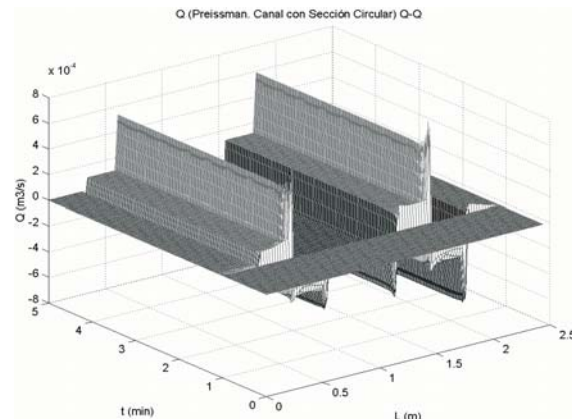


Figura 17. Evolución del caudal.

otros modelos [7]. Por lo tanto se puede concluir que el desarrollo del simulador basado en ecuaciones de superficie libre constituye una buena herramienta para el análisis dinámico. Los resultados permiten observar la influencia de la rugosidad de la superficie sobre la distribución de nivel y la influencia de las condiciones de caudal en las entradas. Se recomienda realizar experimentación para determinar los coeficientes de resistencia de las salidas de fondo de líquido y la validación de los resultados obtenidos. Se recomienda la referencia [8] la cual presenta información básica sobre la dinámica de flujo en canales abiertos.

Referencias Bibliográficas

1. Kumar G.S., Karki K.S., Hager W.H.: "Subcritical junction flow", *Journal of Hydraulic Engineering*, May, pp 447-455. 1997.
2. Oliveto G., Biggiero V., Hager W.H.: "Bottom outlet for sewers", *Journal of Irrigation and drainage Engineering*, Vol 23 (1997), No. 4, May/August, pp 246-252.
3. Dulhoste J.F., Georges D., Besançon G.: "Nonlinear control of open-channel water flow based on collocation control model", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol 130 (2004) No. 3, March, pp 254-266.

4. Malaterre P.O.: "Modelisation, analyse et commande LQG d'un canal d'irrigation", Ph.D. Thesis Laas-Cnrs-Engref-Cemagref, 1994.
5. Cunge J.A., Holly F.M., Verwey A.: "Practical aspects of computational river hydraulics", Pitman ADVANCED Publishing Program, 1980.
6. Strelkoff T.: "Numerical solution of Saint-Venant equation", Journal of Hydraulical Engineering. Division ASCE, Vol. 96 (1970), No. HY1, pp. 223-252.
7. Bustamante, A.: "Design and performance of multiphase distribution manifold", thesis for the degree of Master of Science in the Discipline of Mechanical Engineering, The University of Tulsa, Tulsa, 2003.
8. Chow V.T.: "Hidráulica de Canales Abiertos", McGraw Hill, Santafé de Bogotá, Colombia, 1994.
9. Fletcher C.A.J.: "Computational Galerkin methods", Springer Series in Computational Physics, Springer-Verlag, 1984.
10. Preissmann A.: "Difficultés rencontrées dans le calcul des ondes de translation à front raide", 11ème congrès IAHR, Leningrad, Vol 3 (1965).
11. Liggett J., Cunge J.: "Numerical methods of solution of the unsteady flow equations in unsteady flow in open channels", K. Mahmood et al (Ed.) Water Res. Publ., Fort Collins, CO, USA, 1975.
12. Streeter, V., Wylie, B., Bedford, K.: "Fluid Mechanics", 9th Edition, McGraw Hill, Colombia, 1997.
13. Graf W.H., Altinakar: "Hydraulique Fluviale", Tome I: Ecoulement permanent uniforme et non uniforme. Collection traitée de génie civil. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Presses polytechniques et universitaires Romandes, 1993.

Recibido el 25 de Septiembre de 2006

En forma revisada el 09 de Septiembre de 2007