



Estudios de Flujo Cavitante en Geometría Venturi

M Navarrete

Laboratorio de Pruebas No Destructivas, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM
Av. Universidad 300, C. U., Distrito Federal 04510, México
mnm@pumas.iingen.unam.mx

JL Naude de la Llave y F. Méndez-Lavielle

Laboratorio de Termofluidos, Facultad de Ingeniería, UNAM
Av. Universidad 300, C. U., Distrito Federal 04510, México
jorge_naude@hotmail.com

M Villagrán-Muniz, EV Mejía-Uriarte

CCADET, Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM
Av. Universidad 300, C. U., Distrito Federal 04510, México
mayo.villagran@ccadet.unam.mx

RESUMEN

Un tubo Venturi bajo régimen de cavitación es un dispositivo de control de flujo que, por lo general se utiliza para entregar un caudal másico constante. El dispositivo hace uso del concepto de flujo crítico en donde se requiere una constricción en el conducto, la presión de entrada y las mediciones de temperatura y propiedades termodinámicas para el cálculo de flujo de masa de gases y vapores. En este trabajo se reporta un estudio experimental para detectar los cambios de régimen de flujo y medir sus características distintivas como son: formación de estructuras de turbulencia (gas-vapor-liquido), ruido, jets pulsados, emisión acústica, ondas de choque, y emisión de luz. Para lo anterior, se varían las condiciones de gasto a la entrada del dispositivo Venturi. Para adquirir las señales de ruido se colocan sensores piezoeléctricos, para determinar las estructuras se adquiere video rápido mediante una cámara Phantom v9.1 a 40,000 fps y se emplea un fotomultiplicador para la adquisición de los pulsos de luz. El Venturi se prueba en un circuito hidráulico en donde se hace circular 1,2 Propanediol con una bomba centrífuga de 5 HP con control de velocidad. El 1,2 Propanediol es un glicol con una densidad de 1.038 gr/cm^3 , viscosidad de $60 \text{ cP}\cdot\text{s}$ y presión de vapor de 0.07 mmHg a 20°C . Como resultado se obtienen patrones de cavitación en función de la potencia de la bomba y un gráfico de distribución de las condiciones del Venturi en función del coeficiente de cavitación.

PALABRAS CLAVE: Venturi cavitante, cavitación hidrodinámica, luminiscencia por colapso de burbujas.

1 INTRODUCCIÓN

Desde los años sesenta los Venturis cavitantes se han utilizado para mantener la velocidad de flujo en forma estable, precisa y repetible en aplicaciones tales como naves espaciales, misiles, láseres de alta energía, procesos químicos corrosivos, entre otros. Este fenómeno se basa en el estrangulamiento del flujo a través de una restricción; en donde al aumentar la caída de presión ya no se tiene un aumento en el flujo másico. Es decir, se tiene un flujo estrangulado. Esta condición de flujo máximo limitado se conoce como flujo estrangulado (ahogamiento ó choked flow) [1-2]. Por otro lado, la cavitación para muchos ingenieros implica un fenómeno de erosión. Sin embargo, la pérdida de material superficial en estos dispositivos rara vez ocurre, debido a que el tiempo de vida útil a la exposición de dicho fenómeno es corto.

Actualmente, hay muchas aplicaciones industriales y aeroespaciales en donde la vida útil de estos dispositivos es larga debido a que su uso cotidiano es muy breve.

El desarrollo de la cavitación en un flujo está caracterizado por un cambio de fase de líquido a vapor *localizado*, por lo regular a temperatura constante a diferencia de la ebullición que se realiza a presión constante. La cavitación no aparece tan pronto como la presión del líquido desciende por debajo de la presión de vapor, debido a que la tensión superficial ocasiona un retraso en el inicio de la cavitación a partir de las microburbujas inmersas en el líquido que fluye. Las regiones de depresión local solo existen como consecuencia de la acción dinámica del movimiento: la conversión de la presión en energía cinética. Las consecuencias de la cavitación son generalmente: pérdida de material en las superficies limítrofes, ruido, vibraciones, pérdidas y alteraciones de las propiedades hidrodinámicas [9-11].

Venturi en régimen de flujo crítico. En la Figura 1 se muestran las características esenciales de un Venturi para trabajar en régimen crítico: tiene una sección de entrada; un área mínima o garganta; y una sección divergente o difusiva. Cuando líquidos cerca de la saturación o súper enfriados entran a dicho dispositivo y cambian la fase, entran en condición de flujo estrangulado. Los medidores de flujo basados en este principio son usados en el campo de la energía nuclear [2]. Cualquier reducción de la presión aguas abajo no permite ningún incremento en el caudal másico y se dice que el dispositivo esta ahogado o estrangulado [3]. El flujo a través de la garganta en condiciones críticas es por tanto independiente de la presión aguas abajo y aumenta linealmente con la presión aguas arriba. La norma ASME describe dos geometrías para el Venturi: uno con garganta toroide y otro con garganta paralela. En el primer diseño la entrada de la curva continua a través de la garganta hasta que se encuentra con el difusor, el área mínima, se alcanza en una sola sección, un único plano en donde se produce el ahogamiento. En el segundo diseño, se tiene una garganta cilíndrica paralela entre la entrada de la curva y el difusor, aquí el plano de choque se mueve en la sección paralela generando fluctuaciones en el flujo. Aunque el primer diseño es mejor, el segundo es fácil de manufacturar. En este trabajo reportan experimentos realizados en donde se varían las condiciones de entrada a la garganta de un Venturi con el objeto de obtener correlaciones entre la formación de estructuras gas-líquido (burbujas, nubes de burbujas, jets, etc.), ruido, emisión de luz y ondas de choque producidos por la cavitación.

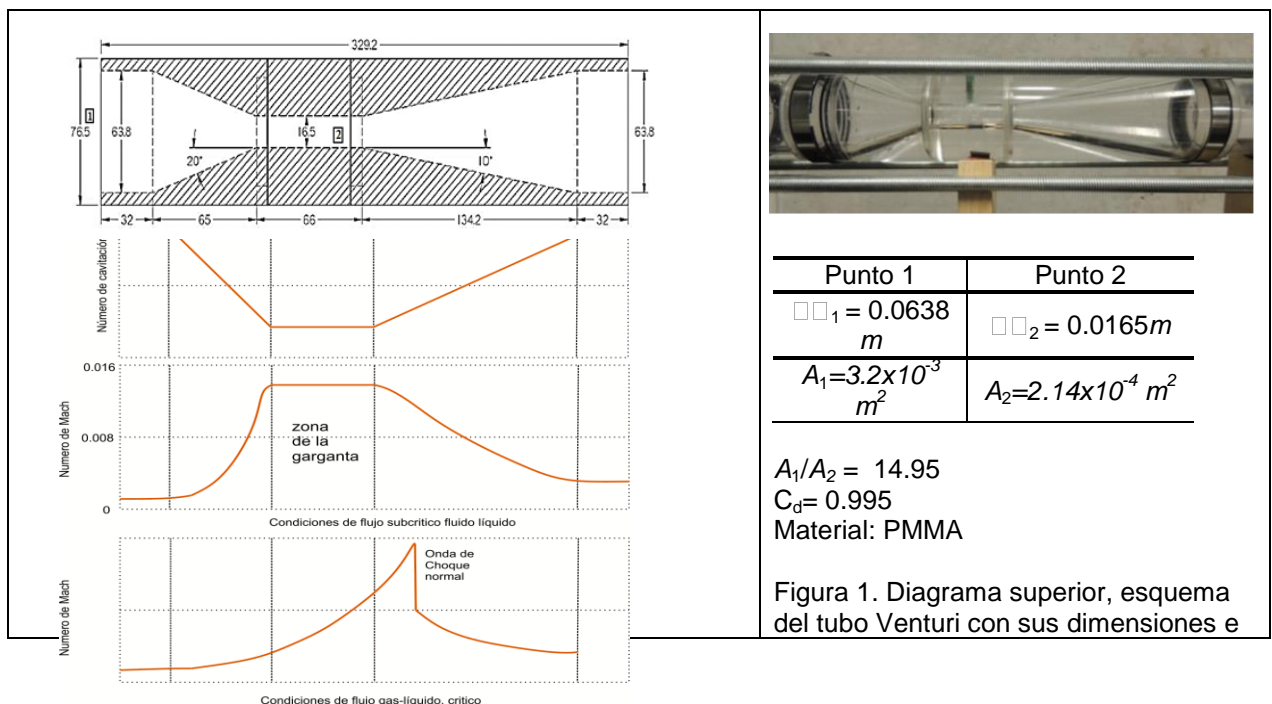




	imagen a la derecha. a) σ vs longitud del Venturi, b) y c) número de Mach a lo largo de la longitud del Venturi para las condiciones de flujo subcrítico y crítico respectivamente.
--	--

1.1 Número de cavitación

El desarrollo de la cavitación en un fluido en movimiento está caracterizado por el crecimiento continuo de estructuras de gas-vapor que se van formando, un parámetro que nos indica dicho proceso es el número de cavitación, σ . La interface vapor-liquido se presenta en varias formas y frecuentemente se usa para clasificar también la cavitación [4, 7]. Si solo se toma en cuenta la caída de presión local en el líquido la cavitación se presenta en dos formas: a) *cavitación vaporosa*; las burbujas de vapor del líquido se forman si la presión en el líquido cae por debajo de la presión de su vapor, y b) *cavitación gaseosa*; las burbujas se forman cuando la presión cae debajo de la presión de vapor de equilibrio del gas disuelto en el líquido. Así, σ se define como:

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\frac{1}{2} \rho v_T^2} \quad (1)$$

donde: σ = número de cavitación
 p_0 = presión del sistema
 p_v = presión de vapor
 $\frac{1}{2} \rho v_T^2$ = presión dinámica

y la variación de éste parámetro lo usaremos como indicador característico de las condiciones de flujo a través del Venturi.

2 ARREGLO EXPERIMENTAL, instrumentación y procedimiento

Para el seguimiento del proceso de cavitación que se desarrolla en un tubo Venturi se emplea 1,2 propanodiol como líquido a fluir dentro de un circuito hidráulico con recirculación controlada, la Figura 2 es un diagrama esquemático del circuito hidráulico. El circuito incluye: una bomba centrífuga de 5 HP con el impulsor modificado, tubo Venturi, una válvula de regulación de gasto, tinaco de almacenamiento con sistema de enfriamiento y tinaco de almacenamiento auxiliar (no se dibuja). En la Tabla 1 se proporcionan las propiedades fisicoquímicas del líquido en condiciones estándar. El tubo Venturi fue diseñado, manufacturado en material PMMA (transmitancia en el visible del 45%) y ensamblado de acuerdo al diagrama que se tiene en la Figura 2, en dicha figura también se anexan las curvas para condiciones de flujo subcrítico y crítico en función del número de Mach.

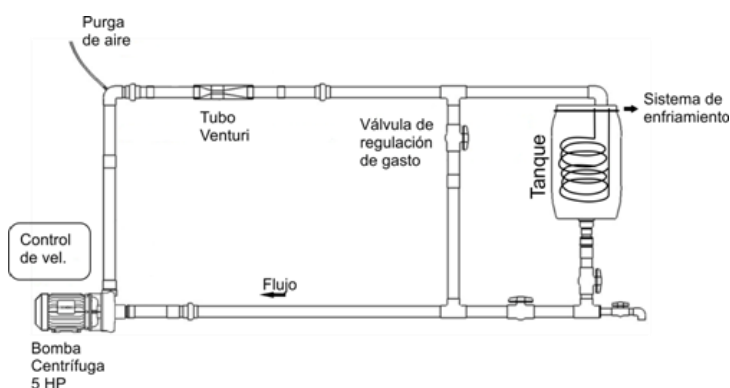


Figura 2. Esquema del circuito hidráulico que sirve como banco de pruebas para el tubo Venturi en régimen cavitante.

Tabla 1. Propiedades físicas del 1,2 Propanediol

Propiedad	Valor
Fórmula química	$C_3H_8O_2$
Punto de ebullición	187.6°C @ 1 atm
Punto de fusión	-60°C @ 1 atm
Temperatura de ignición	107 °C
Presión de vapor	
20 °C	0.08 mm Hg
25 °C	0.13 mm Hg
Peso molecular	76.10 g/mol
Viscosidad, 20 °C	48.60 mPas
60 °C	08.42 mPas
Densidad a 20°C	1036.2 Kg/m ³

Instrumentación. Se cuenta con un variador de frecuencia de tipo incremental Yaskawa J1000 que se emplea para el control de velocidad rotacional de la bomba de 5 HP. Un fotomultiplicador (Hamamatsu Photonics; R5783-04) se orienta y se fija para detectar la luminiscencia en la parte divergente del dispositivo Venturi. Un sensor de fuerza dinámico (PCB Piezotronics, ICP 200B05) y un piezoeléctrico centrado en 5 MHz (Olimpus, V310-SU) se fijan en la garganta para adquirir el ruido acústico y la fuerza producidos durante la cavitación. Las señales son capturadas con un osciloscopio digital (Lecroy LC584AM, 1GHz). También, se adquiere Video de alta velocidad usando una cámara Phantom v.1 en un intervalo de 25,000-40,000 cuadros por segundo (cps).

Procedimiento experimental. Se llena el circuito con el líquido en condiciones ambientales y se recircula durante 20 minutos para eliminar el exceso de aire disuelto en él, en esta condición la bomba trabaja al 20% de su capacidad. Subsecuentemente, se activa el sistema de enfriamiento y se deja actuar, hasta que el líquido alcanza una temperatura de 18°C. Luego, se activa el sistema de detección ya sea para la detección de luminiscencia o para la adquisición de video. Las pruebas se realizan en función del gasto controlado mediante la regulación de la velocidad radial de la bomba.

3 Caracterización del venturi

Para alcanzar la cavitación destructiva, es decir la cavitación luminiscente es menester que cierta cantidad de aire se encuentre en el interior de las burbujas. En el circuito hidráulico implementado, el proceso para producir las burbujas gaseosas de tamaño micrométrico se realiza en el impulsor de la bomba. Así, el flujo a la salida del impulsor es una mezcla casi homogénea de líquido y burbujas, las burbujas están llenas de aire, vapor de líquido y de nanogotas de líquido [5]. Obviamente, para que suceda lo descrito anteriormente, la salida del impulsor fue modificada [6]. La caracterización de Venturi se realizó usando agua normal como

liquido de trabajo. En la Tabla 1 se indican los índices de cavitación calculados a partir de los datos experimentales para el impulsor y el Venturi en función de la temperatura que alcanzó el líquido durante la prueba. Figura 3 muestra la variación del número de cavitación en el Venturi en función de la potencia de la bomba usando como liquido de trabajo 1,2 propanediol.

Tabla 1. Caracterización del Venturi e Impulsor usando como líquido de trabajo: agua en condiciones normales.

T [°C]	ρ_{H_2O} [Kg/m ³]	$P_{V_{H_2O}}$ [Pa]	σ Impulsor	σ Venturi
20	998.29	2339	1.31	0.104
30	995.71	4247	1.26	0.103
40	992.25	7384	1.19	0.102
50	988.02	12352	1.06	0.100
60	983.13	19946	0.87	0.097
70	977.63	31201	0.58	0.092
80	971.60	47414	0.15	0.085

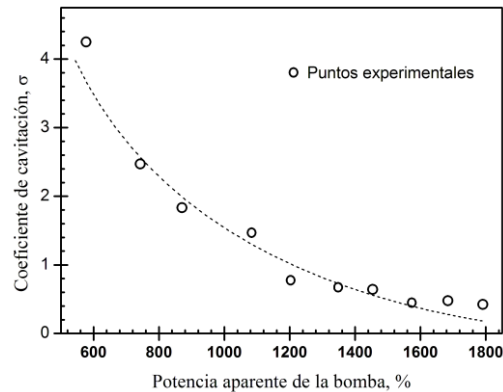


Figura 3. Coeficiente de cavitación vs. potencia aparente de la bomba. Líquido 1,2 propanediol.

El comportamiento del índice de cavitación del impulsor muestra que la temperatura máxima recomendable para trabajar con agua son 70 °C, ya que a una mayor temperatura se tiene la cavitación destructiva. El máximo índice de cavitación que se obtiene en el tubo Venturi es de ~ 0.1. De acuerdo a la referencia [7], en el circuito hidráulico en el tubo Venturi se tiene cavitación en tránsito y activa, en el impulsor solo se tiene cavitación estable. Lo anterior significa la formación de ondas de choque y emisión de luz solo se alcanza a la salida del tubo Venturi.

4 CORRIDAS EXPERIMENTALES

En la Tabla 2 se resumen las corridas experimentales indicando el archivo, el archivo de video (cuadros/s, tiempo de adquisición), el porcentaje de carga a la boba, la corriente suministrada a la bomba, la velocidad promedio en la sección divergente V_d medida a partir del análisis de los videos usando el programa Pcc V2 de Phantom Inc., velocidad promedio en la garganta del Venturi calculada a partir de la velocidad promedio alcanzada en la sección divergente y finalmente el gasto a la salida del circuito. En la Figura 4 se grafica la corriente consumida por la bomba vs su potencia aparente en %, con una flecha se indica el punto donde se presenta el estrangulamiento del flujo.

Tabla 2. Características y archivos de experimentación.

Archivo	cps/□s	%	I (A)	V _d (m/s)	V _g (m/s)	Q l/s
25-01	25000/ 40	10	2.3	8.54	33	
30-01	30000/33	20	3.8	16.85	7.4	2.08
30-02	30075/33□	30	6.3	20.06		
35-01	35087/29	30	6.3	20.37		
40-01	40000/25	35	7.5	28.60	19.2	4.08
40-02	40000/25	35	7.5	26.30		
40-03	40000/25	36	9.0	11.40		
40-04	40000/25	38	9.3	13.60		5,03
40-05	40000/25	38	9.3	10.60		
40-06	40000/25	39	9.0	10.40		
40-07	40000/25	39	8.9	11.60		4.73
40-08	40000/25	40	9.25	Dos		5.03
40-09	40000/25	41	10	Dos		
40-10	40000/25	41	9.44	Dos		
40-11	40000/25	42	9.95	Dos		
39-01	39215/25	47	11	Dos		

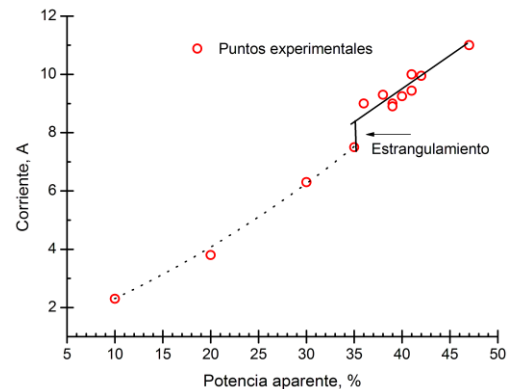


Figura 4. Comportamiento de la corriente consumida por la bomba vs la potencia aparente, la flecha indica el punto donde se detecta el estrangulamiento del flujo.

Las siguiente serie imágenes, Figura 5, son una selección representativa de las estructuras gas-vapor-líquido que forman durante la cavitación en geometría Venturi variando el porcentaje de la potencia de la bomba (indicado en título de cada imagen). Estas imágenes claramente muestran un incremento en el volumen de vapor al aumentar la caída de presión producida por el aumento de la velocidad del flujo. Aquí, se registra la formación de una nube oscilante a la salida de la garganta del Venturi. Se presentan las muy conocidas inestabilidades de Kelvin-Helmholtz que se desarrollan en la interfaces y se convierten en remolinos a lo largo del eje x [7]. Como se sabe, la presión es menor en el centro de los remolinos que en las capas externas; esto da lugar a la evaporación. Primero, se recircula el líquido para que se desgasifique a una potencia de entre 10 y 20 %, la mayoría de las burbujas de aire de tamaño milimétrico que se introducen al sistema se eliminan, no hay cavitación visible. Al 30% se observa el desarrollo de gradientes de velocidad. La velocidad del fluido en el centro es mayor que en las capas circundantes. La cavitación por formación de capa de mezclado es evidente; se forma de un plano de cortante por discontinuidad en la velocidad. La implosión de las burbujas se nota en un plano axial a 48 mm de la garganta, en donde emergen patrones

filamentosos aperiódicamente, después de este plano el flujo se vuelve rotacional y turbulento. La velocidad de las burbujas en la pared es de aproximadamente 6.8 m/s y en el centro es de 14 m/s. Al 35% la implosión de los filamentos de burbujas se nota en un plano axial a 29 mm de la salida de la garganta, la velocidad media en el centro es de ~ 28 m/s, y en la periferia de ~ 13 m/s. Del porcentaje 36 al 42 se observa una diferencia de densidades en el eje horizontal, cuando la nube se acumula e implota hay emisión de ondas de choque, y la onda se refleja al encontrar un cambio de densidad, al regresar interactúa con la nube que se está formando y la destruye dejando una zona limpia de burbujas.

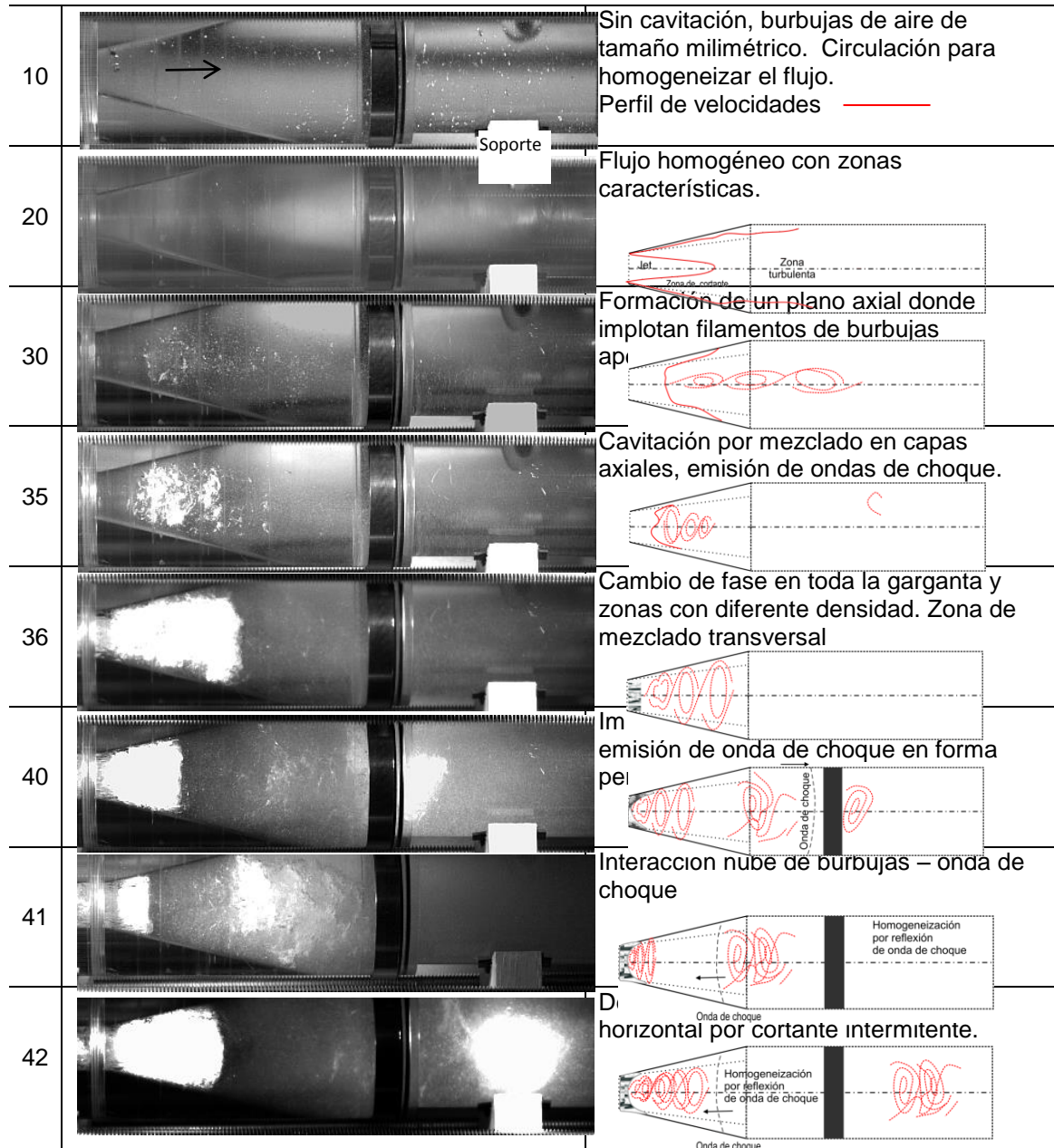


Figura 5. Imágenes seleccionadas del flujo en geometría Venturi. La primera columna indica el porcentaje de potencia aplicado por la bomba, la segunda columna es una imagen representativa del flujo correspondiente a ese estado de cavitación y tercera columna es un esquema para ayudar a interpretar la imagen. Cada imagen tiene un tiempo de adquisición promedio de 25 μ s.

Por falta de espacio no se incluyen las señales de emisión acústica ni de emisión de luz. El ancho de banda de la emisión de ruido se encuentra en el intervalo de 10 – 40 kHz. Los pulsos de luz tienen un ancho promedio de 10-50 ns.

5 resultados

Las condiciones para la cavitación fueron controladas por las diferencias de presión localizada en la sección de entrada del Venturi y la presión de vapor del fluido [7]. Lo anterior se realizó mediante el control de la velocidad radial de una bomba centrífuga que 5 HP. El número de cavitación se calculó a partir de las mediciones de la velocidad del líquido y la fórmula descrita en la sección 1.1. El flujo se ahoga en la sección de la garganta del Venturi a una potencia de la bomba de entre 35-38%. En éste estado hay emisión de ondas de choque y emisión de luz. La onda de choque emitida en el colapso de la nube de burbujas es un proceso cooperativo que se observa perfectamente en los videos adquiridos a partir del 36 % de la potencia suministrada. La formación de la capa en donde se van ordenando los filamentos de burbujas se debe a dos flujos encontrados con diferente circulación y velocidad, prueba de ello se muestra en la fotografía de la Figura 6. Observe como se alinean las líneas de flujo que quedan marcadas en la superficie del Venturi.



Flujo

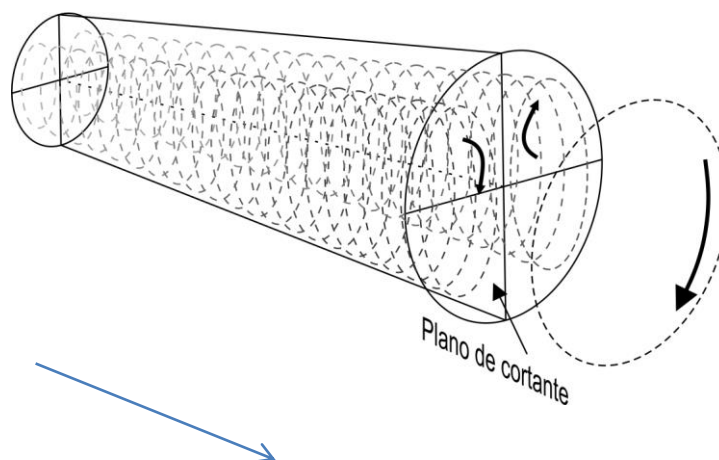


Figura 6. Imagen de las líneas de flujo en geometría Venturi a $\alpha < 0.2$ con su esquema correspondiente.



6 conclusiones

Se tiene circuito hidráulico donde se realizan pruebas para el estudio de la cavitación en geometría Venturi. Con uso de las visualizaciones de alta velocidad, se examinaron vórtices a diferente coeficiente de cavitación que se varía en función de la potencia suministrada al circuito hidráulico. Lo anterior, se realiza mediante el control de la potencia suministrada a una bomba centrífuga con impulsor modificado, la cual a su vez modifica el gasto del fluido. La originalidad del presente trabajo consiste en la caracterización de las estructuras que se forman cuando el coeficiente de cavitación es menor a 0.1. Bajo este régimen se producen fenómenos cooperativos y de almacenamiento de energía. Al alcanzar un cierto umbral esta energía es disipada en forma de ondas de choque, mientras que la emisión de luz es un fenómeno local que se observa fuera de la geometría Venturi, en la zona de la tubería en donde la presión se restablece.

7 agradecimientos

Este trabajo se patrocinó por varios proyectos: UNAM-DGAPA-PAPIIT (IN10512 y IN115712); Proyecto interno del Instituto de Ingeniería (3130); Proyecto conjunto Instituto de Ingeniería-Facultad de Ingeniería, UNAM (1135 y IISGBAS-114-2013).

REFERENCIAS

- [1] ASME MFC-7M, Measurement of Gas Flow by Means of Critical Flow Venturi Nozzles. New York: American Society of Mechanical Engineers 1987.
- [2] Sonic flow through orifices, nozzles and venturis, available at <http://www.optimal-systems.demon.co.uk/flow-orifice.htm>, © 1999 Optimal Systems Limited.
- [3] Reshetnikov, A.V., *et al.* An experimental unit for investigating the discharge of a flashing liquid through short channels at variable back pressures. Fluid Mechanics-Soviet Research 1987; 16(5):61–65.
- [4] Amini, y I. Owen, The use of critical flow Venturi nozzles with saturated wet steam, Flow Meas. Instrument 1995; 6(1): 41-47.
- [5] Godinez FA, Navarrete M, Sánchez-Ake C, Mejía-Uriarte EV, Villagrán-Muñiz M. Spectroscopic and thermodynamic features of conical bubble luminescence. Ultrasonics Sonochemistry 2012; 19:668-81.
- [6] Carrillo OE, Galindo G, García I. Tesis: Reproducción de cavitación hidrodinámica luminiscente para limpieza de agua a nivel terciario. Facultad de Ingeniería, UNAM 2012.
- [7] Lecoffre Y. Cavitation, Bubble Trackers. A. A. Balkema, 1999.



- [8] Aeschlimann V., Prothin S., Barre S., Djeridi H. High speed visualizations of the cavitating vortices of 2D mixing layer. *European Journal of Mechanics* 2012; 31:171-180.

- [9] Naude J., Méndez F., Velasco A., Navarrete M. Elastic stresses in an encapsulated gas bubble. Aceptada en *Mechanic Research Communications*, 09 Mayo 2014.

- [10] Godínez FA., Navarrete M. Influence of liquid density on the parametric shape instability of sonoluminescence bubbles in water and sulfuric acid. *Physical Review E* 2011;84: 016312(10).

- [11] Navarrete M., Sánchez C., Godínez F. A., Mejía-Urriarte E. V., Villagrán-Muniz M. Luminescence features from conical bubble collapse in 1, 2 propanediol and its perturbation adding sulfuric acid. *Journal of Physics: Conference series* 2011; 274:012095-18.