

Dinámica de las burbujas de cavitación en fluidos amoniacales trasegados con bombas centrífugas

Jorge Luis Reyes-Cruz
Gerardo Ruiz-Chavarría
Roilber Lambert-Sánchez
Alberto Turro-Breff
Enrique Torres-Tamayo
Sergio Hernández Zapata

Resumen

Con el fin de obtener el comportamiento dinámico de la presión de formación de las burbujas y de su movimiento al inducir el fenómeno de la cavitación en bombas centrífugas, se experimentó con agua y licor amoniacal a dos concentraciones de amoníaco (27 % y 34 %). El comportamiento dinámico de las burbujas se solucionó numéricamente con la aplicación de la ecuación de Rayleigh-Plesset, por medio de los radios de las burbujas y el tiempo de crecimiento de estas. Se concluye que cuando se induce la cavitación, la presión de formación de las burbujas a 22 °C es de $10,135.10^3$ Pa para el agua; de $45,468.10^3$ Pa para el licor amoniacal al 27 % de concentración y de $69,951.10^3$ Pa para una concentración de 34 %. Los radios alcanzados por las burbujas en el licor amoniacal son del orden de 30 a 120 veces su radio inicial, mientras que para las burbujas formadas en el agua son del orden de 15 veces solamente.

Palabras clave: bombas centrífugas; cavitación; formación de burbujas; patrones de flujo; licor amoniacal.

Cavitation bubble dynamics in ammoniacal fluids transferred by centrifugal pumps

Abstract

An experiment with water and ammoniacal liquor at 27% and 34% concentrations of ammonia was carried out in order to determine the pressure dynamics during the formation of bubbles and their movement when causing cavitations in centrifugal pumps. The dynamics of bubbles was calculated numerically by applying the Rayleigh-Plesset equation using the bubble radius and the bubble build-up time. It is concluded that the pressure to form the bubbles at 22 °C is 10,135.103 Pa for water and 45,468.103 Pa for the ammoniacal liquor at a concentration of 34 %. The radius of the bubbles found in ammoniacal liquor is in the range of 30 to 120 times the original bubble radius while the bubbles formed in water are only in the range of 15 times the original radius value.

Keywords: centrifugal pumps; cavitation; bubble formation; flow patterns; ammoniacal liquor.

1. INTRODUCCIÓN

Durante el trasiego de un fluido por una bomba centrífuga, a través de una instalación hidráulica, como es el caso del agua y los licores amoniacaes utilizados en la producción de níquel en Moa, no son observadas las peculiaridades de la circulación de estos fluidos por las tuberías, generalmente metálicas, que se acoplan a estas bombas. Para poder visualizar y evaluar las presiones de formación y el comportamiento dinámico de las burbujas durante la ocurrencia del fenómeno de cavitación se requerirían tuberías transparentes.

El fenómeno de la cavitación implica la formación y presencia de burbujas debido al cambio de fase de la sustancia desde su estado líquido al estado de vapor (González 1983; Pérez 2004; Reyes 2010 y Brennen 2011). En los líquidos es posible obtener una presión muy baja debido al movimiento del fluido; cuando se forman burbujas de vapor que se dirigen a regiones de mayor presión, estas burbujas rompen con intensidad suficiente e implosionan en el interior de las bombas, provocando daños estructurales graves e irreversibles en sus partes, además de provocar una disminución en la eficiencia y la potencia de la bomba.

Como consecuencia de la formación, crecimiento e implosión de las burbujas puede producirse erosión y desprendimiento en el material de los álabes del impelente. Según Lauterborn (1998), el origen de la formación de burbujas de cavitación puede ser provocada por variación de presión (hidrodinámica o acústica) o por deposición de energía (óptica o partículas elementales, protón o ruptura del líquido). Cuando se forma una burbuja dentro de la cual puede haber gas, vapor o una combinación de ambos, a una temperatura constante, la evolución de la burbuja hasta su colapso puede ocurrir más o menos rápido en función de la propiedad del fluido que la origina.

Dopazo (2008) plantea la unión indisoluble entre cavitación y formación de burbujas, puntualizando la dificultad que existe para obtener la medida detallada y el diagnóstico de sistemas cavitantes debido a las pequeñas escalas espaciales y temporales involucradas.

Durante el fenómeno de la cavitación en las bombas centrífugas se presentan cavidades en el fluido. Se da un proceso dinámico, el cual consta de crecimiento, decrecimiento y colapso, donde la presión sufre variaciones rápidas y el tamaño de la burbuja varía de forma constante (Ramírez, Jácome y Giraldo 2013), siguiendo una trayectoria descrita por la ecuación de Rayleigh-Plesset (RP). El crecimiento y colapso de burbujas es asimétrico, lo que prueba que su evolución se realiza de forma no lineal.

La evolución de burbujas, en función del tiempo durante el crecimiento, no es brusca si se compara con el de colapso. Durante el colapso las burbujas logran alcanzar velocidades sónicas que en el agua, a 20 °C, es aproximadamente 1 500 m/s. La evolución desarrollada por las burbujas depende de algunas variables como el tamaño inicial, tamaño alcanzado, volúmenes de gases disueltos, densidad o viscosidad, entre otras.

La característica principal que manifiesta la evolución de las burbujas es el tamaño alcanzado por las mismas en el flujo y el tiempo de vida de estas, las cuales pueden presentar cambios experimentales en la presión a nivel local y en las fluctuaciones de las variables termodinámicas. Principalmente las oscilaciones son debidas a procesos de carácter irreversible, asociados al cambio de fase que se presenta nuevamente en el flujo, en este estadio de gas a líquido en que la variación de parámetros (como la presión y la energía) presentan saltos, al igual que en la interfase de la burbuja.

1.2 Comportamiento de la presión durante la formación de burbujas en licor amoniacal

La cavitación en bombas centrífugas ha sido tratada en varias investigaciones en las que se ha estudiado el comportamiento transitorio de la cavitación cuando se modifican las condiciones de operación, llámese cierre o apertura de la válvula de impulsión, o bien arranque o parada de la bomba. En este sentido se destacan los estudios realizados por Tanaka y Tsukamoto (1999a, 1999b, 1999c), los cuales demuestran que las fluctuaciones de presión y caudal están causadas por una oscilación de la dinámica de la cavitación en su interior, que al variar el flujo de manera súbita, estas fluctuaciones producen la separación del flujo del líquido y la formación de burbujas que colapsan entre sí, proporcionando inestabilidades al fluido. En estas investigaciones no se precisan los radios y tiempos de duración de las burbujas formadas durante la cavitación y no se determinan las velocidades que alcanzan estas.

El daño por cavitación en las bombas centrífugas se produce por la aparición de las ondas de choque durante el colapso de las burbujas que implosionan a determinadas velocidades, siendo altas durante los intervalos en que el radio de las burbujas se acerca a los máximos locales de presión. La velocidad del fluido alrededor de la burbuja toma valores, incluso de Mach 2, según Ferziger y Perić (2002); esto ocurre alrededor de los primeros mínimos locales. Para valores menores a este la velocidad supersónica no se alcanza y no se produce el colapso de las burbujas ni la onda de choque como resultado de este.

En la industria química y en algunos procesos metalúrgicos se emplean bombas centrífugas para trasegar sustancias o fluidos a las diferentes etapas del proceso. Durante la lixiviación del carbonato amoniacal para la obtención del níquel, mediante la tecnología CARON, el fluido que contiene los licores amoniacaes a diferentes concentraciones es manejado desde su vertimiento hasta la salida del fluido; estos licores amoniacaes, por sus características físico-químicas, exhiben un escenario muy favorable para la ocurrencia de la cavitación en las bombas centrífugas.

El licor amoniacal es una mezcla de agua y amoníaco con presencia de sólidos disueltos y en suspensión. Se trasiega a temperaturas que van desde 20 °C hasta 94 °C. Según el principio de Gibbs, esta mezcla de dos sustancias en estado de saturación puede presentarse como una función de dos variables: la temperatura de saturación y la concentración, a las cuales corresponde un único valor de presión de saturación, varían de acuerdo con las concentraciones. Por ejemplo, la presión de saturación para el agua a 20 °C es 4 240 Pa, mientras que para una mezcla de amoníaco-agua, que contiene una concentración de 27 % de soluciones de amoníaco, es de 87 400 Pa (Conde 2004).

La presión de saturación para el agua a 24,20 °C es de $2,468 \cdot 10^3$ Pa; para el licor amoniacal, con una concentración de 27 % de solución de amoníaco, la presión de saturación es $45,6 \cdot 10^3$ Pa a 22,15 °C; para licor amoniacal, a una concentración de 34 % de solución de amoníaco, la presión de saturación es 69,505 Pa a 22,15 °C (Reyes *et al.* 2015).

Estos valores significan que cuando se produce la cavitación en las bombas centrífugas que trasiegan fluidos, como el agua, la presión de saturación es inferior a cuando se trasiega licor amoniacal, por lo que la formación de burbujas en el licor amoniacal ocurre de forma más rápida que en el agua.

Relacionado con la concentración del licor amoniacal, a mayor concentración del producto volátil (amoníaco) existe mayor probabilidad de ocurrencia de cavitación y formación de burbujas de mayor radio.

Para la determinación de la formación de burbujas en una sustancia existen modelos de cavitación, los cuales parten de la relación existente entre el crecimiento de una burbuja típica en el fluido y la evolución del tamaño de las burbujas que se formen. En la región donde la presión en el interior de la burbuja (p_b) se iguala a la presión de vapor del fluido (p_v) la burbuja alcanza el radio máximo, ocurriendo el colapso de la misma. Ramírez, Jácome y Giraldo (2013) plantean que las oscilaciones en el radio permiten evidenciar el efecto de un campo de presión dependiente del tiempo, que sería un indicio de la influencia de la presión sobre la frontera de la burbuja

y lo soluciona matemáticamente mediante el método de elementos finitos (MEF).

Desde el punto de vista dinámico, las burbujas de cavitación experimentan un comportamiento típico de formación y colapso (Torres 2010). Esta descripción dinámica aparece representada en la Figura 1. El crecimiento y colapso de burbujas es asimétrico, lo que supone que su evolución se realiza de forma no lineal.

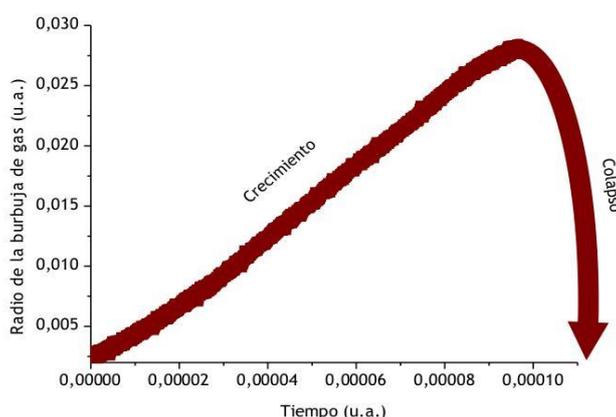


Figura **iError! No hay texto con el estilo especificado en el documento..** Dinámica de las burbujas de cavitación. Fuente: Torres (2010).

En la Figura 1 se observa que la velocidad de formación y colapso de la burbuja en el fluido aumenta, provocando una disminución de presión que genera burbujas en la interfase, caracterizada por una velocidad de implosión mayor que la velocidad de crecimiento de la burbuja.

La evolución de las burbujas en función del tiempo durante el crecimiento no es brusco, si se compara con el tiempo de colapso (Barnes & Rieckhoff 1968); durante el colapso las burbujas logran alcanzar sobre una superficie velocidades sónicas de aproximadamente 1 500 m/s para el agua a 20 °C. La evolución de las burbujas depende de variables como el tamaño inicial, tamaño máximo, volúmenes de gases disueltos, la densidad o viscosidad, entre otras.

La característica principal que manifiesta la evolución de una burbuja es el tamaño alcanzado dentro del flujo y el tiempo de vida de estas. Esta característica puede ser obtenida experimentalmente. Las presiones del fluido a la entrada y a la salida de la voluta han sido ya obtenidas (Reyes 2015) observando que este valor permanece por debajo de la presión de saturación, por lo que las burbujas formadas no experimentan un nuevo cambio de fase de vapor a líquido dentro de la bomba; se supone que se mantienen hasta salir de la arista de los álabes y de la bomba.

El fenómeno de la cavitación es un tema de alerta en las investigaciones, lo cual ha generado rápidos desarrollos en la mecánica de los fluidos, más aún por el progreso simultáneo de las computadoras y de métodos experimentales. Sin embargo, dada la complejidad del fenómeno todavía no es posible tener una teoría bien consolidada que describa en gran detalle cada aspecto de la cavitación, principalmente por la cantidad de fenómenos involucrados, como cambios de fase, cambios abruptos en las variables termodinámicas, condiciones que favorecen o desfavorecen el desarrollo de cavidades.

Para describir el fenómeno de la cavitación, debido a la influencia de la caída de presión a nivel local, se asume que los cambios en la dinámica de la burbuja se presentan esencialmente en los tiempos de vida y en la máxima dimensión alcanzada por el radio de las burbujas que pudieran describir la ocurrencia o no de la cavitación.

En la literatura consultada no se reportan datos sobre las presiones de formación de las burbujas y el movimiento de estas cuando se produce la cavitación a partir de las propiedades termodinámicas para el licor amoniacal al 27 % y 34 % de concentración de amoníaco. Por tal motivo es necesario estudiar las características de la cavitación y la incidencia de la presión de saturación del licor amoniacal en la formación de burbujas, así como el comportamiento de la variación de sus radios y el tiempo de duración de estas.

Esta investigación tuvo el objetivo de evaluar experimentalmente el comportamiento de la presión de formación de las burbujas y su movimiento para el agua y para el licor amoniacal a 27 % y 34 % de concentración de amoníaco, así obtener los patrones de flujo para el agua en la instalación cuando se induce el fenómeno de la cavitación en la bomba centrífuga.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo del experimento (Reyes 2010) se realizó en la instalación de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), la cual cumple con las normas establecidas para este tipo de ensayos (NTC 4990 y el Código ASME, *Performance Test Code, Centrifugal Pumps* 8.2. -1965).

2.1. Características de la instalación

Se empleó un circuito hidráulico de tuberías transparentes de acrílico de 0,021 m de diámetro, con el objetivo de visualizar el flujo del fluido y las formaciones de burbujas de vapor producido por la cavitación. El comportamiento de las presiones fue tratada a través del procesamiento

digital de señales emitidas por transductores piezoeléctricos y su registro con una tarjeta de adquisición de datos de cuatro canales de 14 bits de resolución y una frecuencia de muestreo de 200 Hz; se utilizaron cuatro captores del tipo P-51 (psi de presión): uno en las tuberías de succión, dos en la entrada y salida de la voluta y el otro en la tubería de descarga.

La alimentación de los circuitos eléctricos utilizados se realizó con una fuente tipo GW INSTER, con un voltaje de 10 volt y 0,1 A de intensidad, para la amplificación y filtrado de las señales emitidas a los captores se utilizó el equipo Stanford Research Systems, modelo SR 630, con una ganancia de 20 Hz. El esquema del circuito hidráulico y la ubicación de los captores piezoeléctrico es el utilizado y representado en el esquema de la instalación descrita por Reyes y colaboradores (2015).

2.2. Características de los captores piezoeléctricos utilizados en la inducción de la cavitación

Los ensayos se realizaron midiendo simultáneamente la presión en cuatro puntos donde se ubicaron los captores piezoeléctricos. El caudal del flujo fue regulado en la instalación mediante el estrangulamiento gradualmente por una válvula de globo conectada en la succión que conduce el flujo a la bomba; este caudal se registró con un medidor de flujo volumétrico de la marca GPI, del tipo turbina, con lectura digital.

El almacenamiento de los datos obtenidos en los ensayos emitidos por los captores de presión de las variables de salida se realizó mediante la interface de la tarjeta de adquisición de datos conectada al ordenador y almacenado en un archivo de la PC. El comportamiento de las señales de presión fueron procesadas a través del programa scilab-5.1.1; es posible obtener el comportamiento gráfico de la señal periódica emitida por los captores de piezoeléctricos durante la caída de la presión producto de la cavitación, así como la visualización del movimiento de las burbujas tomadas con una cámara rápida de 500 cuadros por segundo, mostrado ambos procesos en el monitor de la PC.

2.3. Dedución de la ecuación de Rayleigh-Plesset

Una herramienta importante para el estudio de cavitación es la ecuación de Rayleigh-Plesset, considerado el primer acercamiento al estudio de dinámica de la burbuja realizado por Rayleigh en 1917. Según Rayleigh (1917), Plesset (1949) y Leighton (2007), es una ecuación diferencial ordinaria que gobierna la mecánica de una burbuja de gas inmersa en un líquido infinito, donde utiliza algunas ideas básicas para deducir una ecuación para el tamaño R de una burbuja esférica; en la ecuación de Rayleigh no fueron contemplados algunos elementos, tales como: la tensión de la superficie y

la viscosidad, obteniendo el modelo simplificado de pulsaciones de las burbujas. Esta ecuación permite determinar el tiempo típico para el colapso de las burbujas en el orden de 10^{-6} s, apreciando además que durante el colapso de la burbuja se alcanzan velocidades altas.

La ecuación de Rayleigh–Plesset se deriva de las ecuaciones de Navier-Stokes donde se asume simetría esférica de las burbujas, esta fue obtenida por primera vez por John Strutt, según Rayleigh, en 1917, sin efectos de viscosidad ni tensión superficial. Fue usada por primera vez en el estudio de burbujas viajeras en fenómenos de cavitación por Plesset en 1949 (Brennen 2011, 2013).

En las burbujas formadas en la sustancia en estado gaseoso pudieran existir fragmentos de gases disueltos, como el nitrógeno y oxígeno, los cuales no son considerados restos del vapor a la presión constante, asumiendo que estos gases disueltos siguen otras conductas. Si se asume que el proceso se desarrolla a temperatura constante, entonces la presión de la burbuja P_b se determina por:

$$P_b = P_v + P_g 0 \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 \quad (1)$$

Siendo: P_v la presión de vapor, $P_g 0$ la presión del gas de referencia cuando rebasa el radio inicial R_0 , R es el radio de la burbuja.

Si se considera que el fluido alrededor de la burbuja es completamente simétrica, basada en la ley de conservación de masa, la velocidad inducida $u(r)$ por el movimiento de una burbuja de radio R_0 y velocidad de la interfaz U , resultando que: $u(r) = U \times (R_0/r)^3$.

Por consiguiente la energía cinética del flujo es dada por un volumen íntegro alrededor del espacio entero:

$$\frac{1}{2} \int_R^\alpha u^3 4\pi r^2 dr = 2\pi\rho U^2 R^3 \quad (2)$$

Esta energía cinética viene del trabajo realizado de la burbuja para cambiar su tamaño de un radio inicial R_0 a uno presente R ; este trabajo se refiere a la presión de la superficie de la burbuja (P_l) y la presión del líquido fuera de la burbuja es (P_a), donde la ecuación toma la forma de:

$$\int_{R_0}^R (P_l - P_a) 4\pi r^2 dr = 2\pi\rho U^2 R^3 \quad (3)$$

Si la longitud típica para las variaciones de presión es grande, comparado con el tamaño de la burbuja, se puede realizar la integral de la ecuación precedente, llegando al resultado siguiente:

$$(P_l - P_a) \frac{4}{3} (R^3 - R_0^3) = 2\pi\rho U^2 R^3 \quad (4)$$

Para despejar el término que contiene R_0 al lado izquierdo, tomamos la derivada con respecto a R , donde $U = dR/dt$ y el $dU^2/dr = 2 d^2R/dt^2$. Esto conduce a la ecuación simplificada de Rayleigh-Plesset:

$$\rho \left[R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \right] = (P_l - P_\alpha) \quad (5)$$

El término P_l incluye la presión de vapor y la presión asociada con la presión de gases disueltos.

2.4. Solución numérica del comportamiento de las burbujas durante la cavitación para el licor amoniacal aplicando la ecuación de Rayleigh-Plesset

La ecuación que describe la pulsación de una burbuja esférica en un medio infinito es aplicada a las características del fluido asumiendo como hipótesis que:

- La burbuja permanece esférica en todo momento.
- La densidad del fluido circundante es mucho mayor que la del gas.
- El contenido del gas dentro de la burbuja permanece constante.
- No actúan fuerzas de cuerpo.
- El fluido es incompresible.

Si se consideran los parámetros que pueden caracterizar la capilaridad del fluido, entonces podemos agregar otras contribuciones teniendo en cuenta la densidad, viscosidad y tensión superficial; la ecuación de Rayleigh-Plesset toma la forma de la ecuación (6) (Leighton 2007).

$$\rho \left[R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \right] = P_b - P_\alpha - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu}{R} \frac{dR}{dt} \quad (6)$$

Esta es una ecuación no lineal que gobierna el tamaño de burbujas en el líquido, donde: R es el radio de la burbuja, ρ es la densidad del líquido, σ es la tensión superficial, μ es la viscosidad dinámica, P_b es la presión del gas dentro de la burbuja y el P_α es la presión del líquido alrededor de la burbuja.

Si sustituimos la ecuación (1), representada por la ecuación de la burbuja P_b en la ecuación (6), obtenemos la ecuación parametrizada para el fluido, que adopta la forma final:

$$\rho \left[R \frac{d^2R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 \right] = P_v + P_{go} \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - P_\alpha - \frac{2\sigma}{R} - \frac{4\mu}{R} \frac{dR}{dt} \quad (7)$$

Esta ecuación se ajusta a las características del fluido, teniendo una dependencia fundamental de la presión de vapor del fluido (P_v), de la presión del gas (P_{go}) y de los demás parámetros que caracterizan al fluido.

Para darle solución numérica a la ecuación parametrizada para el fluido (7) se utilizó el método para ecuaciones diferenciales con paso variable Runge-Kutta de cuarto orden y escogiendo un paso variable de tal manera que el cociente $\frac{\Delta R}{R}$ siempre sea menor de 0,02; donde la variable de paso se reduce cuando la variación de radio R alcanza su máxima dimensión en función del tiempo, suministrándole los datos de campos de presión y con los resultados del programa escrito en Fortran, el cual toma en cuenta las variaciones que se producen cuando el radio de la burbuja cambia describiendo una trayectoria no lineal.

Los experimentos se realizaron para el agua y el licor amoniacal a dos concentraciones de amoníaco (27 % y 34 %), donde el modelo de cavitación en el flujo se consideró la presión del fluido igual a su presión de saturación. La curva de saturación se aplicó para una temperatura fija, en el cual su valor es marcado por la presión de saturación, siendo esta la presión de formación de las burbujas cuando se induce la cavitación, que para el licor amoniacal al 27 % ocurre a partir de la disminución de la presión en la entrada del impulsor de $59,7 \cdot 10^3$ Pa a $45,468 \cdot 10^3$ Pa a la temperatura de 22,15 °C, para una concentración de 34 % ocurre cuando la presión desciende de $89,995 \cdot 10^3$ Pa a $69,951 \cdot 10^3$ Pa a la temperatura de 22,15 °C y para una concentración de 38 % la presión disminuye hasta $87,248 \cdot 10^3$ Pa. De esta manera quedan establecidos los valores límites de presión de vapor para diferentes concentraciones, estos valores aparecen representado en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de la presión de vapor experimentales (Fuente: Reyes e investigadores 2015)

No	Valores de presión de vapor	Unidad	% de concentración de amoníaco a 22 °C
3	45 468	(Pa)	27
4	69 951	(Pa)	34

Las presiones iniciales del gas para el agua es de 11 700 Pa y para el licor amoniacal es de 7 500 Pa, este valor es invariable para las diferentes concentraciones, para valores menores de presión del gas indefinen la solución de la ecuación. Al programa se le ingresan los datos contenidos en la Tabla 2, donde a través de procesos iterativos se obtienen el resultado del tiempo de evolución de la burbuja (t), el radio de la burbuja (R) y las derivadas del radio de la burbuja (R') de la ecuación parametrizada (7).

Tabla 2. Datos de entrada al programa correspondiente a los fluidos del agua y el licor amoniacal a diferentes concentraciones

No	Número de iteraciones	Presión de saturación (Pv, Pa)	Presión inicial del gas (Po, Pa)	Densidad (ρ , kg/m ³)	Tensión Superficial (σ , N/m)	Viscosidad Dinámica (μ , Pa.s)	Tipo de fluido
1	20 000	10 135	11 700	998	0,0727	0,000798	Agua
2	20 000	45 468	7 500	870	0,0055	0,0013	LA 27 %
3	20 000	69 951	7 500	870	0,0055	0,0013	LA 34 %

LA= Licor amoniacal

Los patrones de flujo para el agua y los ensayos en la instalación experimental se realizaron para los mismos fluidos e idénticas concentraciones (27 % y 34 %). Las regulaciones de los flujos se realizaron mediante la válvula de estrangulación en la succión, las cuales, al regular los flujos, producen cambios en los caudales y el movimiento de las burbujas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Comportamiento de la presión de formación de las burbujas y su movimiento

La solución de la ecuación de Rayleigh-Plesset parametrizada para el fluido permitió evaluar el comportamiento de la presión, el radio de la burbuja y su tiempo de duración, a partir de la presión de saturación; para ello se toma el tamaño inicial $R_0 = 1 \times 10^{-5} \text{ m} = 10 \text{ } \mu\text{m}$ y el $dR/dt = 0$. El resultado obtenido en la gráfica de la Figura 2 describe el comportamiento de las burbujas para los fluidos de agua y licor amoniacal a concentraciones de 27 % y 34 %, en el que las curvas experimentan una trayectoria del radio de las burbujas desde su formación, crecimiento y colapso, en función del tiempo de duración de las burbujas. Los resultados numéricos se ilustran seguidamente:

	Radio de la burbuja	Tiempo de implosión
Agua	$2,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}$	de $2 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ a $1,6 \cdot 10^{-4} \text{ s}$
Licor a 27 %	$6 \cdot 10^{-5} \text{ m}$	$2 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ a $2,5 \cdot 10^{-5} \text{ s}$
Licor a 34 %	$1,0 \cdot 10^{-4} \text{ m}$	$2,0 \cdot 10^{-5} \text{ s}$ a $6,0 \cdot 10^{-5} \text{ s}$

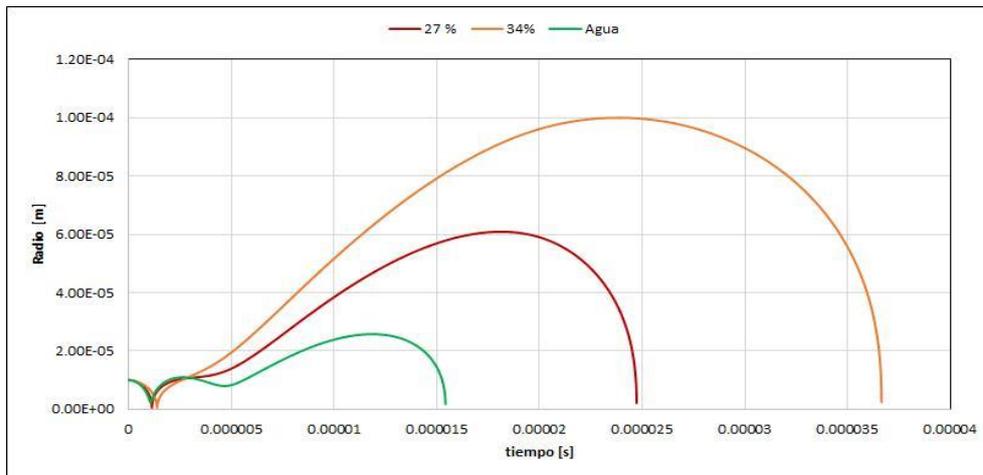


Figura 2. Evolución del radio de la burbuja para un medio estático.

La evolución del tiempo de duración de las burbujas y el radio de las burbujas es menor en el agua que para el licor amoniacal a las concentraciones estudiadas. Este comportamiento de las gráficas representadas con la solución de la ecuación de Rayleigh- Plesset es válido en un medio estático, cuando la presión de los fluidos se encuentra en el límite de la presión de saturación, donde el cambio de fase ocurre de manera casi instantánea.

El comportamiento gráfico de las curvas que representan la soluciones de la ecuación de Rayleigh- Plesset del agua y el licor amoniacal a la concentraciones de 27 % y 34 %, para un medio dinámico (Figura 3), donde las curvas experimentan una trayectoria creciente desde su formación y crecimiento de las burbujas, sin que se produzca la implosión de estas. En estos tiempos las burbujas no implosionan y logran alcanzar la salida del impelente y de la voluta de la bomba, formando un oscilador de burbujas en la tubería de descarga; donde para el agua la burbuja tiene un radio de $2,8 \cdot 10^{-5}$ m, para licor amoniacal a 27 % de concentración de amoníaco el radio de la burbuja es de $6 \cdot 10^{-5}$ m, y para licor amoniacal a 34 % de concentración de amoníaco el radio de la burbuja es de $1,0 \cdot 10^{-4}$ m.

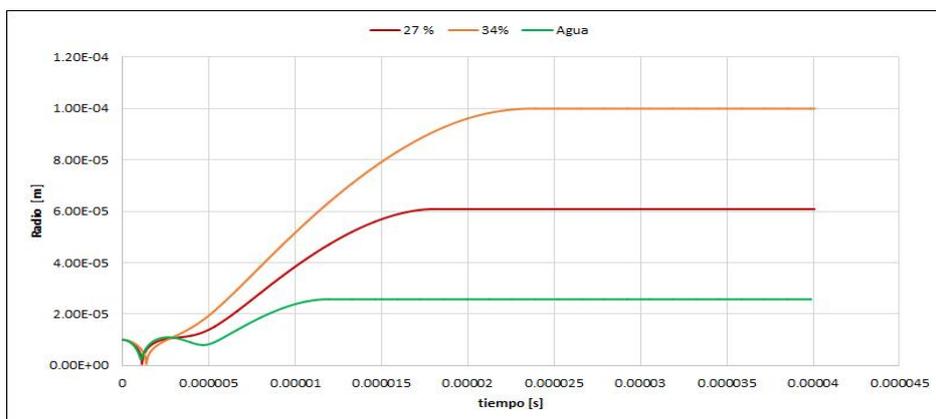


Figura 3. Evolución del radio de la burbuja para un medio dinámico.

El comportamiento gráfico de las velocidades de formación y crecimiento de las burbujas aparecen representadas en la Figura 4, donde la velocidad de formación de la burbuja se corresponde con la primera derivada del radio en función del tiempo; las burbujas experimentan un tiempo de duración que va desde $2,5 \cdot 10^{-5}$ s hasta $6 \cdot 10^{-5}$ s, en este tiempo la burbuja implosiona antes de alcanzar la salida del impelente.

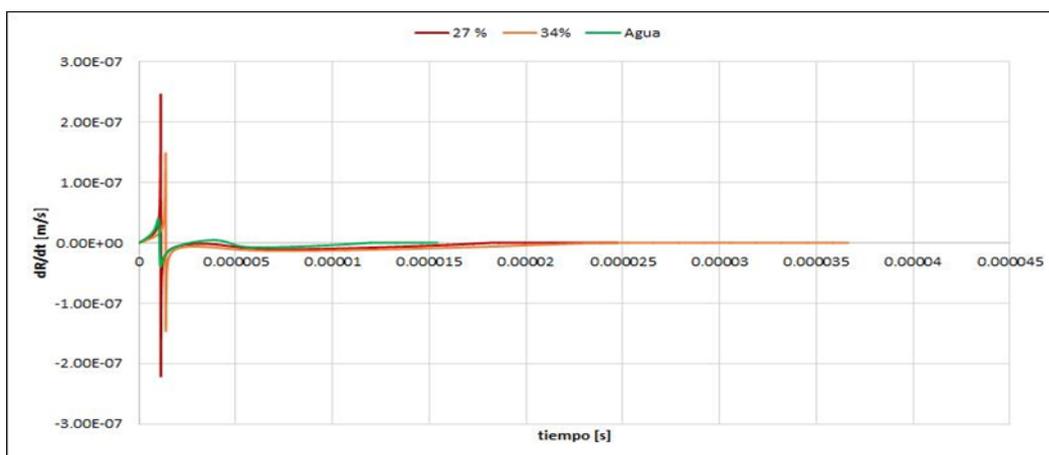


Figura 4. Velocidad del radio de la burbuja.

Las burbujas que se producen en el licor amoniacal alcanzan menores velocidades que las que se forman en el agua, debido a que tienen mayores radios. Cuando en el licor amoniacal se producen burbujas, la formación de estas tendrá menor velocidad en la medida que aumenta su radio y estas velocidades serán siempre menores que cuando se forman en el agua. La velocidad de formación de las burbujas es de $2,5 \cdot 10^{-7}$ m/s para el agua en su máximo local, mientras que va desde $0,3 \cdot 10^{-7}$ m/s para el licor amoniacal al 34 % de concentración hasta $1,5 \cdot 10^{-7}$ m/s en el licor amoniacal a 27 % de concentración de amoníaco.

El resultado de las velocidades de crecimiento de las burbujas evidencia que cuando estas alcanzan un radio pequeño su velocidad es máxima y produce

su implosión en la superficie sólida del álabe de impelente, de manera que no se forma el oscilador de burbujas en la tubería de descarga.

3.2. Patrones de flujo

Se observa el comportamiento del fluido (agua y la formación del oscilador en la salida de la voluta de la bomba y en la tubería de impulsión o descarga producida por la cavitación, así como la formación de los patrones de flujo (Figura 5).

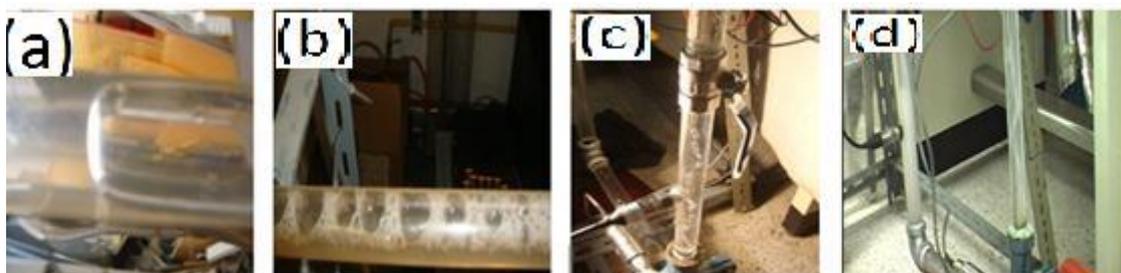


Figura 5. Patrones de flujo durante la ocurrencia de la cavitación. a) Flujo intermitente; (b) Flujo burbuja; (c) flujo intermitente en forma de un oscilador; (d) Flujo revuelto turbulento.

En el flujo intermitente (a) aparecen burbujas largas con forma de pistón o bala, con un diámetro casi igual al diámetro de la tubería. Cuando el flujo es de burbuja (b) ocurren entre los espacios vacíos de menor presión. En el tercer patrón (c) el flujo es intermitente en forma de un oscilador en dirección de su movimiento alternativo. El patrón (d) es generado en las diferentes secciones de la instalación al someterse el fluido a regulación.

Las características de las tuberías utilizadas en el experimento permitieron visualizar de manera clara el comportamiento del fluido al circular por la tubería de descarga durante la cavitación. Mediante la utilización de una cámara rápida de 500 cuadros/segundo fue posible captar este comportamiento como aparece en las imágenes de la Figura 6.

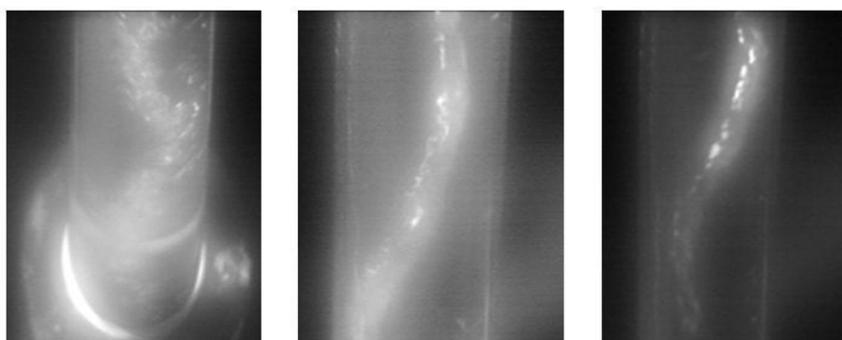


Figura 6. Secuencia de imagen del fluido en la tubería de descarga de la instalación y el oscilador que forman las burbujas durante la cavitación para regulaciones del fluido de 75 %, 50 % y 25 % (de izquierda a derecha).

En la Figura 6 se presenta la secuencia de imagen del fluido en la salida de la bomba y el comportamiento de las burbujas en el fluido en la tubería de descarga durante la cavitación, observando el oscilador formando por las burbujas al variar el caudal a través de la abertura de la válvula de regulación al 75 %, 50 % y al 25 % que, además, se hace más estable y definido con la regulación menor del caudal.

Las oscilaciones generadas por las formaciones de burbujas están asociadas al proceso dinámico y a las colisiones de las burbujas en el fluido con otras burbujas o pequeñas partículas presentes, así como a los cambios bruscos producidos en las variables termodinámicas de la burbuja.

Para el licor amoniacal, a concentraciones de 27 % y 34 %, no fueron observados estos patrones por la coloración oscura de este fluido, pero si fueron visualizadas y medidas por los captosres piezoeléctricos las caídas de presiones cuando ocurría la cavitación en el interior de la bomba centrífuga.

A partir de los experimentos, las mediciones realizadas, el procesamiento de las informaciones y los resultados obtenidos, se deduce que para evaluar la evolución de las burbujas formadas por la cavitación, la presión de saturación es la presión a la cual comienza la formación de burbujas, obteniendo que:

- Para valores de presión del gas menores de 11 700 Pa en el agua y de 7 500 Pa en el licor amoniacal a diferentes concentraciones no se forman las burbujas y no es posible obtener resultado aplicando la ecuación parametrizada, ya que el comportamiento no lineal que proyecta la función no converge para presiones menores.
- Para los valores iniciales del tiempo, en el inicio de la curva, hay un comportamiento decreciente al igualarse la presión del fluido a la presión de saturación, la ecuación comienza a tomar valores buscando convergencia del método y a partir de esta su comportamiento es creciente hasta alcanzar el radio máximo de la burbuja, luego comienza a decrecer hasta desaparecer del valor de su radio, ocurriendo la implosión.
- El tiempo de duración de las burbujas es proporcional a la concentración del licor amoniacal; para una concentración de 27 % el tiempo de duración es menor que para una concentración del 34 %.
- Cuando se produce la cavitación, la velocidad de crecimiento de las burbujas aumenta con la concentración del licor amoniacal y es menor para las burbujas formadas en el agua.

- En los ensayos realizados en la instalación se encontró que los patrones de flujo coinciden con la dirección y sentido del flujo, observándose que cuando se hace intensa la cavitación, el patrón intermitente predomina en la tubería de impulsión vertical, mientras que los patrones de flujo de burbujas y revuelto turbulento predominan en la tubería de succión e impulsión de forma horizontal y aparecen indistintamente, dependiendo de la regulación del caudal a través de la válvula de regulación de flujo. El patrón revuelto turbulento aparece siempre que el caudal se regule a valores muy pequeños (25 % de regulación).
- Cuando se experimenta con agua las burbujas formadas en un sistema dinámico no implosionan y logran salir del álabe, del impelente y de la voluta de la bomba y son las que forman el oscilador que aparece representado en la tubería de descarga de la instalación reflejada en la Figura 6.

4. CONCLUSIONES

- La presión de formación de las burbujas a 22 °C, cuando se induce la cavitación para el agua, es igual a $10,135 \cdot 10^3$ Pa para el licor amoniacal al 27 % de concentración $45,468 \cdot 10^3$ Pa y de $69,951 \cdot 10^3$ Pa para una concentración de 34 %.
- Los radios alcanzados por las burbujas en el licor amoniacal son del orden de 30 a 120 veces el radio inicial, en un tiempo de duración de formación de las burbujas de $0,5 \cdot 10^{-5}$ s para 27 % de concentración y $1,5 \cdot 10^{-5}$ s para 34 % de la misma. Para las burbujas formadas en el agua el radio es del orden de 15 veces el radio inicial, en un tiempo de duración de formación de las burbujas de $0,2 \cdot 10^{-5}$ s.
- Se logra visualizar, para las burbujas formadas en el agua, los cuatro patrones de flujo: intermitente, de burbuja, oscilador y revuelto turbulento; predominando el oscilador en flujos verticales y el de burbuja y revuelto turbulento en las tuberías horizontales.

5. REFERENCIAS

- BARNES, P. A. & RIECKHOFF, K. E. 1968: Laser induced underwater sparks. *Applied Physics Letters* 13(8): 282-284.
- BRENNEN, C. E. 2011: *Hidrodynamics of Pumps*. Cambridge University Press.
- BRENNEN, C. E. 2013: *Cavitation and bubble dynamics*. Cambridge University Press.
- CONDE, M. R. 2004: Thermophysical Properties of $\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}$ Solutions for the Industrial Design of Absorption Refrigeration Equipment. *Revista Engineering* 1-34 p.

- DOPAZO, G. C. 2008: *¿Cavitar o no cavitar? La inevitable ubicuidad de las burbujas*. Real Academia de España. Universidad de Zaragoza. Madrid. 50 p.
- GONZÁLEZ, V. 1983: *Hidráulica, bombas y compresores*. Pueblo y Educación, Ciudad de La Habana.
- FERZIGER, F. H. & PERÍC, M. 2002: *Computational Methods for Fluid Dynamic*. 3ra edition. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. 423 p.
- REYES, J. L. 2010: Un experimento de enseñanza e investigación de la cavitación en bombas centrífugas. *Asociación Americana de Profesores de Física* 4(1): 2-18.
- REYES, J. L.; RUIZ, G.; TORRES, E.; LAMBERT, R. & MATOS, M. 2015: Presión de saturación del licor amoniacal y su relación con el fenómeno de cavitación en bombas centrífugas. *Minería y Geología* 31(1): 111-129.
- RAMÍREZ, R. G.; JÁCOME, M. & GIRALDO, A. J. 2013: Solución de la ecuación de Rayleigh-Plesset por medio del método del elemento finito. *Ingeniería y Ciencia* 9(17): 147-162.
- PÉREZ, B. R. 2004: Cavitación y materiales de construcción en las Bombas Centrífugas. *Minería y Geología* 20(3-4): 114-118.
- LEIGHTON, T. G. 2007: *Derivation of the Rayleigh-Plesset equation in terms of volume*. Institute of Sound and Vibration Research. University of Southampton.
- LAUTERBORN, W. 1998: Termo cavitación y algunas aplicaciones. En: XIX Verano de la Investigación Científica de la Academia Mexicana de Ciencia. Instituto Nacional de Astrofísica y Electrónica. México.
- RAYLEIGH, L. 1917: On the pressure developed in a liquid during the collapse of a spherical cavity. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science* 34(200): 94-98.
- PLESSET, M. S. 1949: The dynamics of cavitation bubbles. *Journal of applied mechanics* 16: 277-282.
- TANAKA, T. & TSUKAMOTO, H. 1999a: Transient behavior of a cavitating centrifugal pump at rapid change in operating conditions—Part 1: Transient phenomena at opening/closure of discharge valve. *Journal of fluids engineering* 121(4): 841-849.
- TANAKA, T. & TSUKAMOTO, H. 1999b: Transient behavior of a cavitating centrifugal pump at rapid change in operating conditions—Part 2: Transient phenomena at pump startup/shutdown. *Journal of fluids engineering* 121(4): 850-856.
- TANAKA, T. & TSUKAMOTO, H. 1999c: Transient behavior of a cavitating centrifugal pump at rapid change in operating conditions—Part 3: Classifications of transient phenomena. *Journal of fluids engineering* 121(4): 857-865.

TORRES, S. 2010: *Generación de burbujas de cavitación con láser continuo para la formación de microagujeros en películas metálicas delgadas*. Tesis doctoral.

Jorge Luis Reyes-Cruz, jreyes@ismm.edu.cu
Ms. C. Instituto Superior Minero Metalúrgico

Gerardo Ruiz-Chavarría, gruiz@unam.mx
Doctor en Ciencias. Universidad Nacional Autónoma de México, México

Roilber Lambert-Sánchez, rlamberts@ismm.edu.cu
Máster en Ciencias. Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Holguín, Cuba

Alberto Turro-Breff, aturrob@cug.co.cu
Doctor en Ciencias. Centro Universitario de Guantánamo, Cuba

Enrique Torres-Tamayo, enrique.torres@utc.edu.ec
Doctor en Ciencias. Universidad Técnica de Cotopaxi, Ecuador

Sergio Hernández Zapata, shernandezzapata@yahoo.com.mx
Universidad Nacional Autónoma de México, México