

Presión de saturación del licor amoniacal y su relación con el fenómeno de la cavitación en bombas centrífugas

Jorge Luis Reyes-Cruz
Gerardo Ruiz-Chavarría
Enrique Torres-Tamayo
Roilber Lambert-Sánchez
Manuel Matos-Elias

Resumen

Se experimentó con mezclas agua-amoniaco con el fin de obtener los valores numéricos de la presión de vapor y establecer una relación entre la caída de presión y la formación de burbujas asociadas al fenómeno de la cavitación en bombas centrífugas que trasiegan licor amoniacal, en el cual están presentes sólidos disueltos y en suspensión. La experimentación se llevó a cabo en dos etapas en las que se obtuvo la presión de saturación del licor amoniacal y la caída de presión cuando se induce la cavitación en una bomba centrífuga. Se concluye que la presión de formación de burbujas durante el trasiego del licor amoniacal a una concentración de 27 % es de $45,6 \cdot 10^3$ Pa a 22,15 °C de temperatura de saturación. Estos valores constituyen los límites inferiores de presión para que se produzca la cavitación a las regulaciones del 75 % del fluido de licor amoniacal en las bombas centrífugas que trasiegan este tipo de fluido.

Palabras clave: presión de vapor; amoniaco; cavitación, bombas centrífugas, fluidos trifásicos.

Ammoniacal liquor saturation pressure and its relation with cavitation in centrifugal pumps

Abstract

The experiment was carried out using water and ammonia liquor in order to obtain numerical values of the steam pressure and establish a connection between the pressure drop and bubble formation associated with cavitation in the centrifugal pumps operated for the transfer of ammoniacal liquor containing dissolved and suspended solids. The experiment was developed in two stages in which the saturation pressure of the ammoniacal liquor and the pressure drop were obtained when cavitation was induced to occur in a centrifugal pump. It was concluded that the pressure when bubbles are formed during the transfer of ammoniacal liquor at a concentration of 27 % and a saturation temperature of 22,15 °C is $45,6 \cdot 10^3$ Pa. This is the minimum pressure threshold for the cavitation to occur in the centrifugal pump with the ammoniacal liquor set at 75% of volume flow.

Keywords: steam pressure; ammonia; cavitation; centrifugal pumps; three-phase fluids.

1. INTRODUCCIÓN

En una de las etapas del proceso metalúrgico de la empresa productora de níquel y cobalto Comandante Ernesto Che Guevara de Moa se transportan licores amoniacaes (mezcla sólido-líquido-gas), que por sus propiedades hacen complejo su traslado. Estos licores amoniacaes contienen gases de alta solubilidad y de fácil desprendimiento del líquido, lo que incide en los parámetros del flujo trifásico (Turro 2002).

Para el trasiego de estos licores se utilizan bombas centrífugas que con frecuencia son afectadas por la cavitación, fenómeno que implica la formación y presencia de burbujas debido al cambio de fase de la sustancia desde su estado líquido al estado de vapor. La formación de burbujas se produce en los álabes de los impelentes de las bombas centrífugas, provocado por la disminución de la presión dinámica por debajo de la presión de vapor o de saturación del líquido en movimiento. Cuando la presión vuelve a aumentar se produce la implosión de las burbujas generando ondas de choque que pueden dañar las bombas, provocar el desprendimiento de materiales en la superficie de los impelentes y con ello la pérdida de eficiencia del sistema (Reyes 2010).

Según González (1983), Ramos (1994), Pérez (2004), Cisnero (2007) y Brenne (2011) para estudiar la cavitación en bombas centrífugas es necesario conocer la presión de vapor o presión de saturación del fluido a trasegar, lo que evidencia la interrelación existente entre cavitación y presión de saturación.

La selección de la presión de vapor en función de la temperatura para fluidos trifásicos, fundamentalmente cuando se trata de mezclas de agua-amoniaco a diferentes concentraciones del último, se realiza mediante diagramas, o por métodos de estimación basados en ecuaciones empíricas. Ambas vías son imprecisas para las mezclas que se bombean en el proceso de producción de níquel, ya que las mismas poseen concentraciones específicas del licor amoniaco y en ellas están presentes sólidos disueltos y en suspensión.

Según Romero (2006), el principal inconveniente de determinar las propiedades termodinámicas de sustancias como el agua, el amoniaco y las mezclas de amoniaco y agua (tomando los valores de la presión de vapor de tablas y gráficos), es que estos valores difieren de los obtenidos experimentalmente para mezclas de diferentes concentraciones.

En la literatura se trata la presión de saturación del agua y el amoniaco como sustancias puras, y de la mezcla agua-amoniaco en función de la temperatura. Rincón & Francisco (2002) obtuvieron el gráfico que

describe el comportamiento de la presión de saturación en función de la temperatura para el agua (Figura 1), donde se observa el incremento de la primera en función de la segunda, en correspondencia con los datos tabulados de presión de saturación o de vapor del agua.

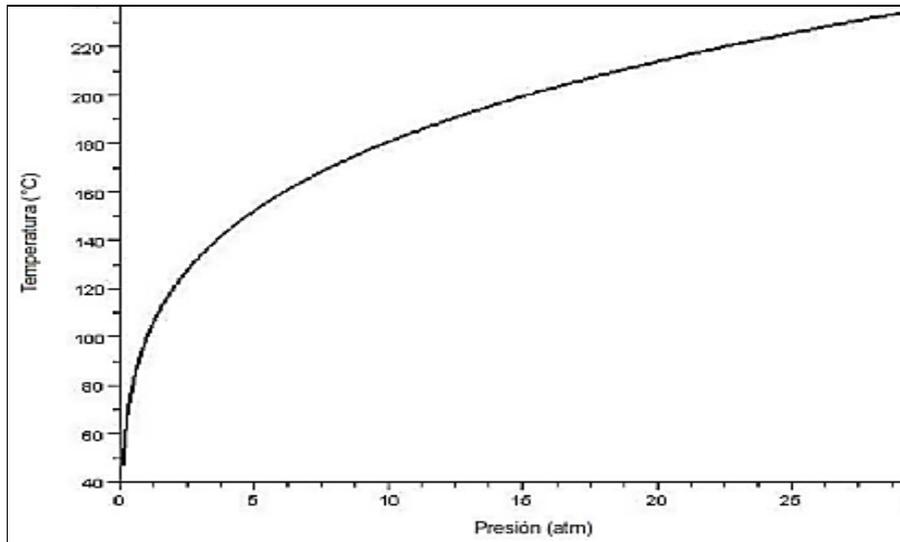


Figura 1. Curva de saturación líquido-vapor del agua (Fuente: Rincón & Francisco 2002).

Conde (2004) presentó resultados de propiedades termodinámicas de mezclas de amoníaco y agua, tales como curvas de saturación, entalpía, tensión superficial, viscosidad y otras para mezclas de amoníaco-agua; su objetivo era evaluar el comportamiento de estas propiedades para la utilización de la mezcla amoníaco-agua como refrigerante en el diseño de instalaciones industriales de refrigeración por absorción mediante la utilización de compresores.

Si bien el trabajo de Conde antes citado se acercó a las condiciones de trabajo existentes en el sistema de bombeo de licores amoniacaes en la planta de producción de níquel de Moa, hay que tener en cuenta que el licor amoniacal utilizado en el proceso de lixiviación es un fluido trifásico cuya transportación se realiza en varias etapas mediante bombas centrífugas.

En la literatura y los trabajos precedentes consultados no se reportan datos sobre las propiedades termodinámicas de licor amoniacal, por lo que se diseñaron experimentos para conocer la presión de vapor del licor amoniacal a diferentes concentraciones de amoníaco.

Esta investigación tuvo el propósito de obtener de forma experimental:

1. La curva de saturación del agua con la finalidad de validar los resultados experimentales y comprobar la calibración de los instrumentos utilizados;
2. Las curvas de saturación del licor amoniacal a diferentes concentraciones del NH_3 ;
3. La inducción de la cavitación en la instalación de bombas centrífugas

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo del experimento se llevó a cabo en dos etapas. En la primera se obtuvieron las curvas de saturación de mezclas de licor amoniacal a diferentes concentraciones de amoníaco, utilizando para ello un dispositivo construido con esta finalidad. En la segunda etapa se indujo el fenómeno de la cavitación en bombas centrífugas en una instalación experimental existente en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

2.1. Obtención de las curvas de saturación

Con el objetivo de reducir el consumo de energía eléctrica los experimentos se realizaron calentando el licor amoniacal con energía solar. Para ello se utilizó un colector solar construido y descrito por Villamil (2011). Este colector solar emplea la óptica de no enfoque para calentar un tubo de 0,0254 m de diámetro y 1,380 L de capacidad volumétrica. Este tipo de colector es estático, el cual no necesita una orientación solar continua, llegando a funcionar con un mínimo de ajuste en su posición, alcanzando un alto factor de concentración de los rayos solares por la forma geométrica de su superficie reflectora (Figura 2). La curva de la lámina reflectora del colector se realiza de forma tal que todos los rayos que inciden en la superficie del colector con ángulos entre 0° y 15° , con respecto al eje del colector, se proyecten sobre la superficie del tubo que contiene la mezcla.

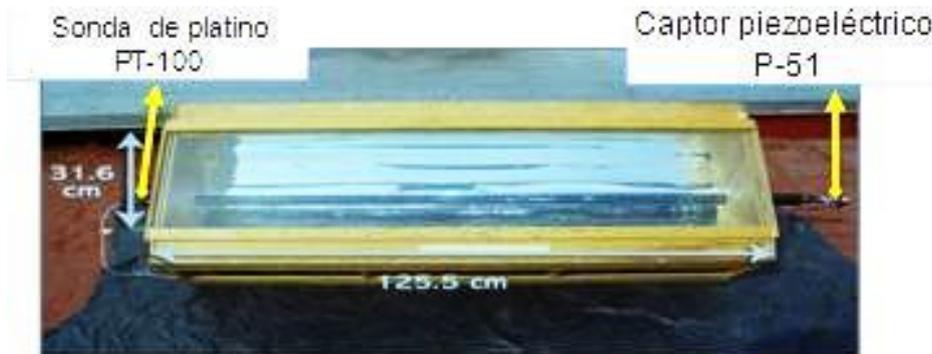


Figura 2. Concentrador solar de óptica de no enfoque utilizado para el calentamiento del licor amoniacal.

La determinación de las curvas de saturación se hizo colocando la sustancia dentro un recipiente sellado. Para obtener experimentalmente las curvas de saturación de la mezcla de licor amoniacal fue necesario disponer de sensores que permitieran medir simultáneamente la presión y la temperatura, así como de un sistema de adquisición de datos por computadora para almacenar las mediciones de estas variables; estos sensores están integrados por un captor piezoeléctrico de presión (P-51) y una sonda de temperatura (PT-100), conectados a ambos extremos del tubo ubicado en la zona central en el colector solar.

El captor piezoeléctrico (P-51) utiliza como señal de salida una corriente eléctrica que oscila entre 5 mA y 20 mA, que es proporcional a la presión, mientras que para la PT-100 utiliza una resistencia eléctrica, que varía linealmente de 100 Ω a 0 $^{\circ}\text{C}$ hasta 138 Ω a 100 $^{\circ}\text{C}$ para la medición de las propiedades termométricas. Para el control de las informaciones provenientes de los sensores se utilizó una tarjeta de adquisición de datos comercial del tipo NI-USB-6009, de cuatro canales de entradas analógicas y con una resolución de 14 bits, conectada por medio de un puerto USB al ordenador, el cual permite comunicar las señales obtenidas a través de los sensores a la computadora mediante softwares profesionales que permiten visualizar en pantalla estas señales para almacenarla y para su posterior análisis.

La tarjeta de adquisición de datos se seleccionó de acuerdo con la cantidad de señales o canales a transmitir y el número posibles de datos a recepcionar en función de su frecuencia de muestreo, de forma tal que garantizara un funcionamiento óptimo y buena calidad de los datos a procesar.

Los datos se guardaron en el procesador para estos ensayos utilizando dos canales de los cuatro existentes en la tarjeta de adquisición de datos de 14 bits de resolución.

El número posible de datos N para muestra de ensayos de fluidos, según Ramón (1989), está relacionado con la frecuencia de muestreo f , y el tiempo total de adquisición (t), representado por medio de la ecuación 1.

$$N = t \times f; \quad (1)$$

Durante los ajuste iniciales de los dispositivos en el experimento se seleccionó el tiempo total de adquisición (t) a razón de 180 s a 240 s, ya que en la variable temperatura no se producían cambios significativos en instante de tiempos menores.

Las frecuencias iniciales detectadas en los experimentos fueron hasta de 100 Hz, valor al que se observaban los cambios que se producían en las variables de presión y de temperatura. Para determinar la frecuencia de muestreo se utilizó el criterio del teorema de Nyquist, el cual plantea que la frecuencia mínima de muestreo debe ser, por lo menos, el doble de la frecuencia máxima detectada, de tal forma que la señal pueda ser monitoreada en esos intervalos de tiempo seleccionados, utilizando la tasa de muestreo de 200 Hz, con número posible de datos a utilizar de 18 000.

Para evaluar los datos del comportamiento de las variables de temperatura y presión del colector en la computadora y programar la aplicación de la tarjeta de adquisición de datos se empleó el software *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabView)* de la *National Instruments Corporate*, que funciona mediante un modelo de flujo de datos que puede crear diagramas que ejecuten múltiples operaciones de señales en paralelo.

Los captore piezoeléctricos utilizados requieren para su funcionamiento de circuitos electrónicos adicionales que conviertan las magnitudes físicas en señales eléctricas de voltaje y que pueda ser interpretado por un sistema de control.

Para el registro de la temperatura se utilizó un divisor de tensiones, que consiste en un circuito eléctrico que reparte las resistencias conectadas en serie, en este caso se conectó una resistencia eléctrica de 126 Ω en serie con la sonda de temperatura PT-100 y se le aplicó una tensión de entrada de 5,0 V (Figura 3), donde la tensión de salida (V_{out}) se obtiene por la expresión de la ecuación 2 del resultado de aplicación de la ley de Ohm para una conexión de este tipo:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1+R_2} * V_{in} \quad (2)$$

Donde:

V_{in} : Tensión de alimentación de 5,0 V;

R_1 : Resistencia eléctrica de 126 Ω ;

R_2 : Resistencia de sonda de temperatura PT-100 (100 Ω).

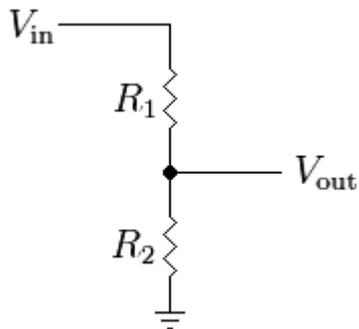


Figura 3. Circuito eléctrico del divisor de tensiones utilizado en la sonda de platino PT-100.

La tensión de salida con la aplicación de la ecuación 3 al circuito es de 2,2 V. El circuito eléctrico adicional para el sensor de presión P-51 (Figura 4) es alimentado con un voltaje de entrada de 5,0 V y se intercala una resistencia eléctrica de 100 Ω ; esto tiene como resultado voltajes de salidas de 0,5 V a 2,2 V, valores que son enviados directamente a la tarjeta de adquisición de datos.

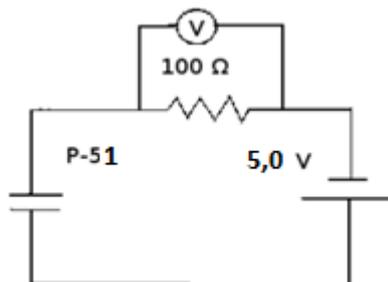


Figura 4. Circuito utilizado en el captor piezoeléctrico P-51.

2.2. Calibración de los transductores de presión y temperatura

El transductor o sensor ideal sería aquel en que la relación entre magnitud de entrada y la magnitud de salida fuese proporcional y de respuesta instantánea e idéntica para todos los elementos de un mismo tipo, sin embargo, la respuesta real de los transductores nunca es del todo lineal, sino que tiene rango limitado de validez ya que suele estar afectado por perturbaciones del entorno exterior y tienen un cierto retardo.

La calibración se realiza con el fin de tener un parámetro de exactitud y precisión en las mediciones de la presión y la temperatura realizada

durante los experimentos, además, verificar si el dispositivo experimental cumple con las especificaciones del fabricante. La calibración de estos instrumentos está determinada por el conjunto de valores de la relación entre la variable de entrada (del proceso) y la variable de salida (medición), manteniéndose constantes las restantes condiciones. Por lo tanto, al modificar las condiciones experimentales la curva de calibración puede llegar a ser diferente (Doebelin 1980).

La calibración para el captor PT-100 se hizo colocando a este en un recipiente con agua, la que se calienta con una hornilla eléctrica; la temperatura se mide con un termómetro de mercurio, mientras que el voltaje se mide con un multímetro. Los datos obtenidos durante las mediciones para la calibración se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Calibración del PT-100

No	Temperatura [°C]	Voltaje [V]
1	3	2,524
2	20	2,614
3	25	2,631
4	34	2,657
5	40	2,683
6	50	2,723
7	60	2,783
8	80	2,848
9	97	2,903

A partir de los datos de la Tabla 1 se realizó el procesamiento de la información, realizando una regresión lineal de la función que une todos los puntos; se obtuvo la denominada curva de calibración, representada en el gráfico de la Figura 5.

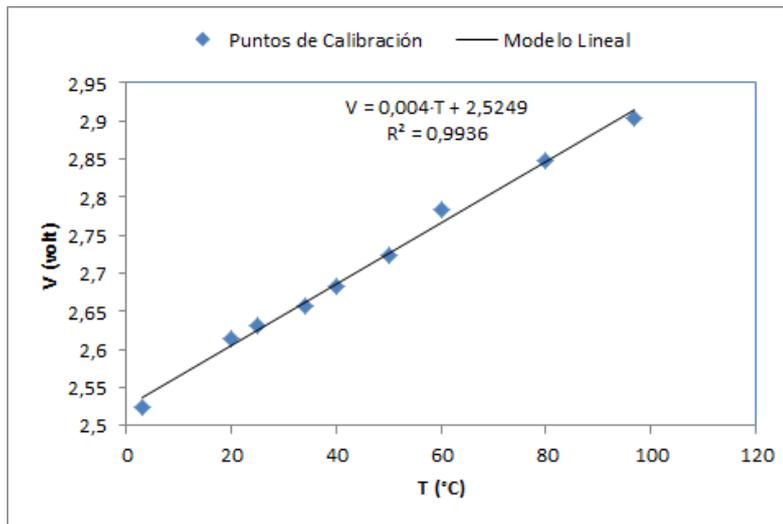


Figura 5. Curva de calibración para el sensor PT-100.

Con los puntos de calibración se establece la ecuación de trabajo (3) para el sensor PT-100, que relaciona el voltaje V y la temperatura T.

$$T = \frac{V - 2,5249}{0,004} ; (°C) \tag{3}$$

La calibración del captor piezoeléctrico P-5I se hizo conectándolo a un recipiente lleno de aire, donde la presión varió agregando gas con un compresor, luego se midió este aumento de la presión con un manómetro de aguja, al variar la presión se producen cambios en el voltaje que pasa por el circuito eléctrico adicional para el P-51. A partir de los datos contenidos en la Tabla 2 se realizó el procesamiento de la información.

Tabla 2. Datos de la calibración del P-51

No	Presión [psi]	Voltaje [V]
1	2,03	0,58
2	3,09	0,60
3	4,33	0,61
4	7,78	0,66
5	9,64	0,69
6	10,88	0,71
7	12,92	0,742
8	14,89	0,768
9	16,80	0,796

El procesamiento de la información se hizo realizando una regresión lineal de la función que une los puntos de calibración, y se obtuvo la ecuación de trabajo representada por la función contenida en la Figura 6 para este sensor que relaciona el voltaje V y la presión P.

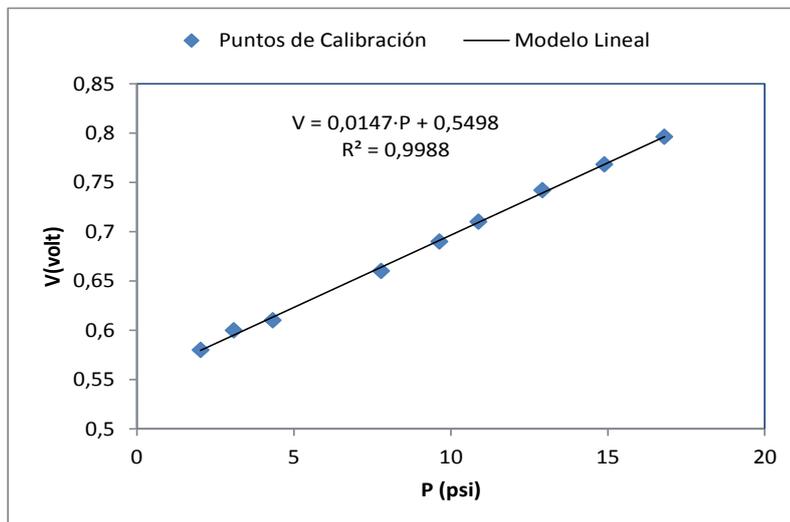


Figura 6. Curva de calibración para el sensor P-51.

Realizando una regresión lineal de los valores de presión y voltaje se obtiene la ecuación de ajuste (4) que relaciona ambos parámetros.

$$P = \frac{V - 0,5498}{0,0147} ; (psi) \quad (4)$$

2.3. Inducción de la cavitación en bombas centrífugas

En la instalación hidráulica se puede provocar el fenómeno de la cavitación al reducir el flujo a la entrada de la bomba, ya sea por medio de la disminución del nivel de fluido contenido en depósito de succión o por el estrangulamiento de la válvula que conduce el fluido a la bomba; esta última se empleó en la realización del experimento.

2.4. Características de los captosres piezoeléctricos utilizados

Los ensayos para la inducción de la cavitación se realizaron midiendo simultáneamente la presión en cuatro puntos donde se ubicaron los captosres piezoeléctricos (Figura 7); se utilizaron dos captosres del tipo P-51 (psi de presión), uno en las tuberías de succión y otro en la tubería de descarga, semejante a los utilizados en el estudio de curvas de saturación.

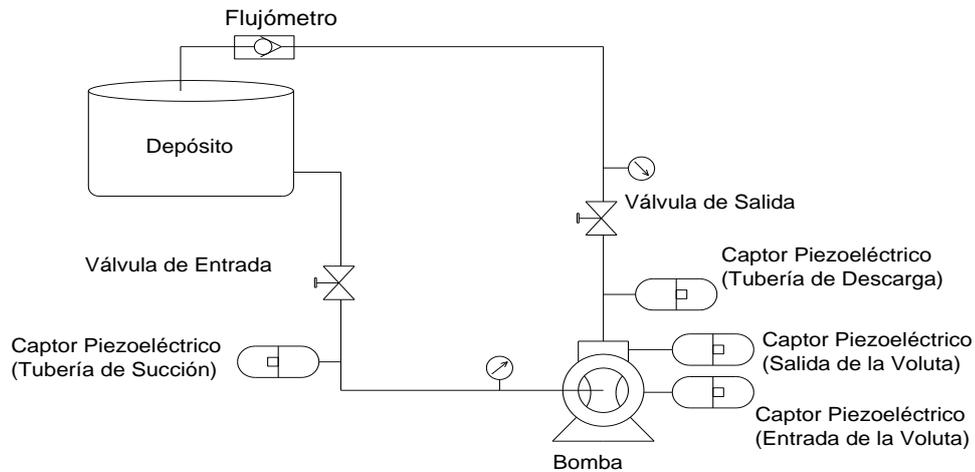


Figura 7. Representación de las posiciones de los captores piezoeléctricos y componentes en el esquema de la instalación.

La toma de presión a la entrada y a la salida de la voluta en la bomba centrífuga se hizo mediante dos captores piezoeléctricos cuyas presiones máximas de operación son del tipo P-50 y P-150 (psi de presión), respectivamente, representado en la Figura 8; estos dispositivos tienen integrada una etapa de amplificación y las señales emiten un voltaje proporcional a la presión. Según Rojas (2004), con las mediciones de las presiones en estos puntos es posible determinar la presencia de cavitación.

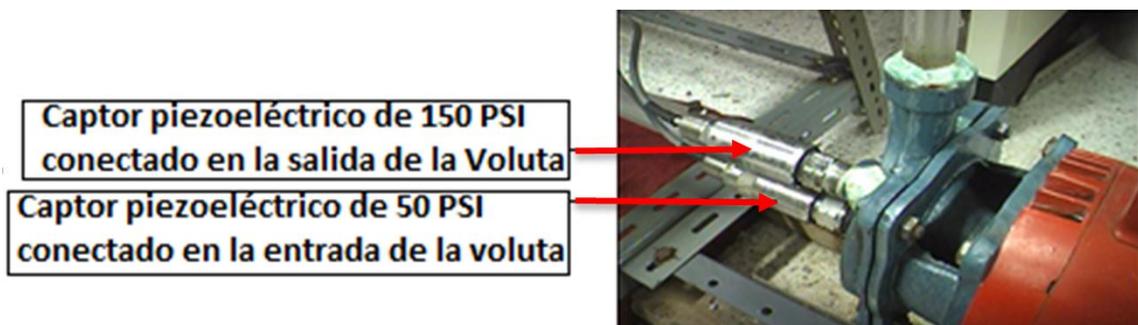


Figura 8. Captore piezoeléctricos ubicados a la entrada y salida de la voluta de la bomba en la instalación experimental.

Las señales emitidas por los captore piezoeléctricos fueron registradas en la tarjeta de adquisición de datos de cuatro canales, con las mismas características a la utilizada en la obtención de la curva de saturación y de esta al procesador, mediante el empleo de un script desarrollado en el programa computacional SCILAB 5.2.

La regulación del flujo en la instalación se realizó mediante la válvula de entrada en la tubería de succión; estos valores de caudal se registraron mediante un medidor de flujo volumétrico de la marca GPI del tipo turbina (flujómetro digital).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Curvas de saturación

En la Tabla 3 se presentan datos de experimentos del estado de saturación para agua y el licor amoniacal con concentraciones de amoníaco de 27 % y 34 %.

Tabla 3. Resumen de los resultados experimentales

No. Exp.	Experimento con agua		Experimento con licor amoniacal a 27 % de NH ₃		Experimento con licor amoniacal a 34 % de NH ₃	
	Presión [Pa]	Temp. [°C]	Presión [Pa]	Temp. [° C]	Presión [Pa]	Temp. [° C]
1	2,468·10 ³	24,20	45,468 ·10 ³	22,15	69,505·10 ³	22,72
2	3,455·10 ³	35,70	69,951·10 ³	30,50	89,995·10 ³	28,84
3	7,036·10 ³	45,00	87,248·10 ³	39,42	12,320·10 ⁴	35,00
4	31,915·10 ³	67,50	99,875·10 ³	43,31	18,118·10 ⁴	47,13
5	42,544·10 ³	71,00	12,465·10 ⁴	48,14	20,964·10 ⁴	51,45
6	43,258·10 ³	73,90	14,657·10 ⁴	51,30	27,581·10 ⁴	59,58
7	59,642·10 ³	80,10	18,162·10 ⁴	58,43	32,692·10 ⁴	64,98
8	61,457·10 ³	85,20	22,383·10 ⁴	63,54	36,700·10 ⁴	68,22
9	73,220·10 ³	96,00	22,892·10 ⁴	64,26	44,161·10 ⁴	73,91

Empleando los datos obtenidos en el experimento se obtuvieron las curvas de saturación para el agua y para las mezclas de agua-amoníaco, para concentraciones de amoníaco de 27 % y 34 %, respectivamente.

3.2. Inducción de la cavitación

Para inducir la cavitación se realizó una regulación de la válvula de bola (disminución del orificio que controla la salida del flujo) que alimenta a la bomba centrífuga. Los valores que se utilizaron fueron: aperturas de 0 % (válvula cerrada), 25 %, 50 %, 75 % y 100 % (válvula abierta), estos valores definen el área en el punto de ensanchamiento más restringido del curso del flujo. Los datos presión y caudal, para una mezcla de licor amoniacal del 27 %, se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Presiones registradas en dos puntos interiores de la bomba centrífuga, gasto y la abertura de la válvula de regulación

Caudal [m ³ /s]	Presión a la entrada en la voluta Canal 0 [Pa]	Presión a la salida en la voluta Canal 2 [Pa]	Posición de la palanca reguladora de la válvula de globo
0.0	$13,3 \cdot 10^4$	$10,9 \cdot 10^4$	Cerrado el sistema
$3,92 \cdot 10^{-4}$	$87,3 \cdot 10^3$	$80,1 \cdot 10^3$	Abierta 100 %
$3,36 \cdot 10^{-4}$	$59,7 \cdot 10^3$	$45,6 \cdot 10^3$	Abierta 75 %
$2,75 \cdot 10^{-4}$	$7,58 \cdot 10^3$	$12,1 \cdot 10^3$	Abierta 50 %
$7,57 \cdot 10^{-5}$	$14,3 \cdot 10^3$	$19,8 \cdot 10^3$	Abierta 25 %
0,0	$-4,55 \cdot 10^3$	$-1,38 \cdot 10^3$	Cerrada la entrada

Los datos registrados por el captor piezoeléctrico ubicado a la salida del impulsor muestran que cuando se regula la válvula de succión ocurre una caída de presión de $80,1 \cdot 10^3$ Pa a $45,6 \cdot 10^3$ Pa, valor que se encuentra por debajo de la presión que hay en la entrada del impulsor de $59,7 \cdot 10^3$ Pa. Con estas caídas de presión se producen sacudidas o vibraciones perceptibles en las tuberías y en la estructura de la instalación, cavitando la bomba con dichos valores de presión.

La presión en la salida del impulsor cae por debajo de la presión de vapor a dicha temperatura, obteniéndose una mezcla de líquido y burbujas en la tubería de impulsión. En la tubería de salida se forma una hilera de burbujas cuyo movimiento es oscilatorio, lo cual es un indicio de la aparición de cavitación. Los cambios del caudal de forma abrupta suceden porque el volumen específico del vapor es mayor que el volumen específico del líquido y, al estar las dos fases presentes, el caudal suministrado por la bomba disminuye drásticamente.

3.3. Caídas de presión en el interior de una bomba centrífuga

El comportamiento de la presión en función del tiempo al realizar regulaciones en la abertura de la válvula de entrada se muestra en la Figura 9; las líneas representan las señales emitidas por los cuatro captosres ubicados en distintas partes de la instalación (Figura 6), siendo más significativa las variaciones en el interior de la bomba, lo que se

refleja en los cambios que experimenta la caída de presión de las señales representadas en la línea de color negra en la entrada y la azul en la salida de la voluta.

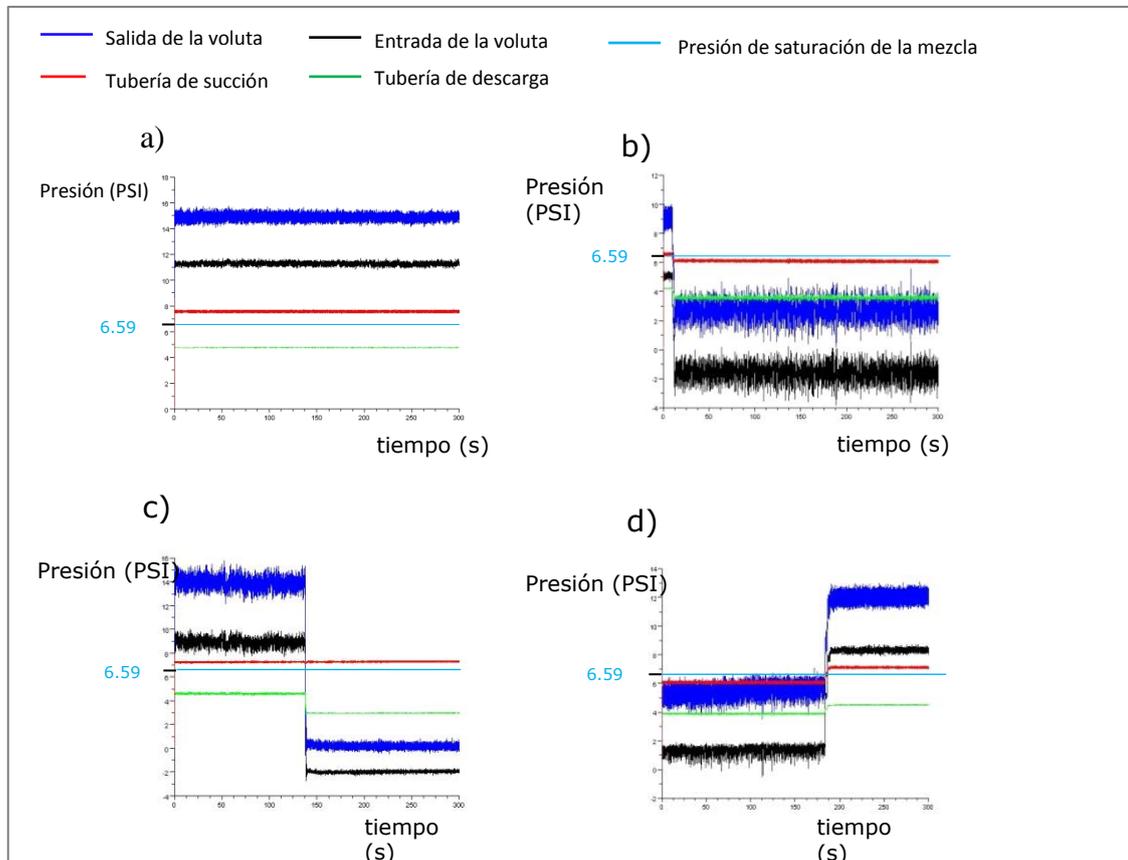


Figura 9. Señales obtenidas por los captore de presión para diferentes posiciones de la válvula de entrada. a) 100 %, b) 75 %, c) 50 %, d) 25 % para el licor amoniacal al 27 %.

Para una abertura del 100 % de la válvula (Figura 9a) se observa el comportamiento estable de las presiones, indicando la ausencia de cavitación, siendo la presión a la salida de la voluta representada por la señal de color azul mayor que la presión de saturación de la mezcla. Al cerrar la válvula hasta un 75 % (Figura 9b) y un 50 % (Figura 9c) las presiones a la entrada y salida de la voluta caen abruptamente, siendo en estos casos la presión a la salida de la voluta menor que la presión de saturación de la mezcla, produciéndose así la cavitación. Para el caso de la estrangulación de la válvula hasta el 25 % (Figura 9d) se obtiene un ascenso de las presiones, que alcanzan valores mayores que la presión de saturación, dejando la bomba de cavitación.

4. DISCUSIÓN

A partir de los experimentos, las mediciones realizadas, el procesamiento de la información y los resultados se deduce que:

1. Los datos obtenidos con agua muestran que el colector solar con captosres piezoeléctricos acoplados en los extremos funciona adecuadamente, lo que evidencia que la curva de saturación obtenida de forma experimental presenta un comportamiento semejante a la Figura 1, obtenida por Rincón & Francisco (2002), y concuerda con el trabajo de Conde (2004), representada en la Figura 10. La diferencia entre ambas radica en que en la curva obtenida experimentalmente la transferencia de calor es menor debido a la presencia del aire en el tubo.

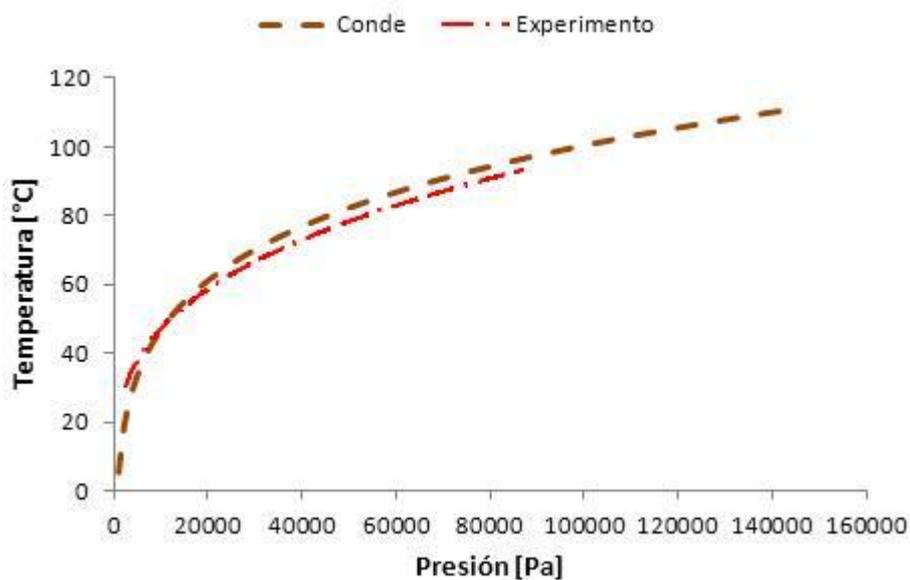


Figura 10. Curvas de saturación del agua para la calibración de los instrumentos.

2. Las curvas de saturación para diferentes concentraciones de amoníaco en el licor amoniacal difieren de las obtenidas en los diagramas de mezcla de amoníaco-agua y a las de Conde (2004), representadas en la Figura 11. Las curvas de saturación experimentales para concentraciones de 27 % y 34 % presentan más altos valores de temperatura a una misma presión que las curvas de saturación de Conde (2004), lo cual permite relacionar la presión de saturación del licor amoniacal con las concentraciones. Ello se fundamenta en que cuando existen las dos fases (líquido y vapor saturado) en el licor amoniacal ocurre que para mayores concentraciones de amoníaco la temperatura de saturación se hace menor.

Este comportamiento guarda relación, además, con las propiedades termofísicas, químicas y termodinámicas del licor amoniacal y con la presencia de partículas de sólidos disueltos y en suspensión, formado por

una mezcla de tres sustancias que clasifica al licor amoniacal como un fluido trifásico.

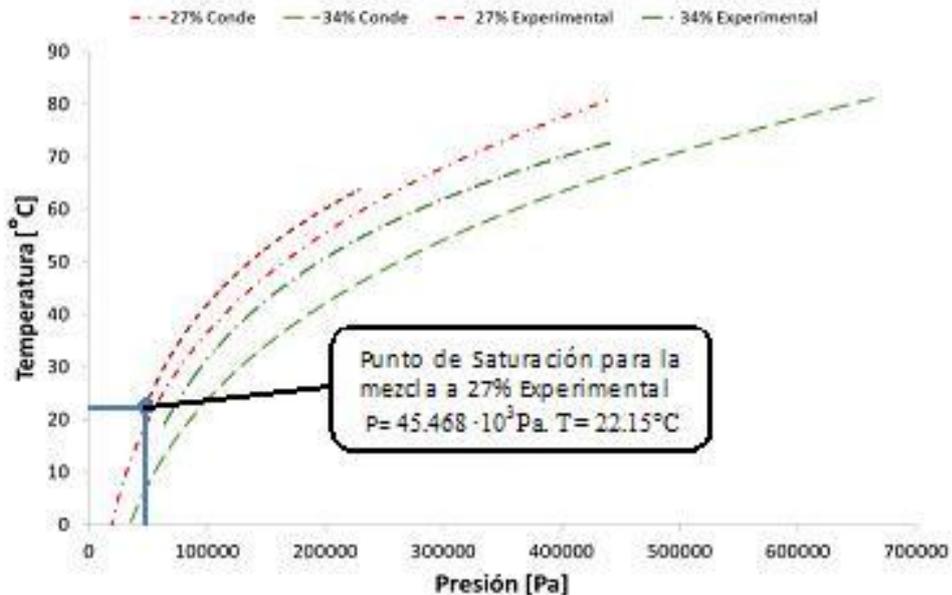


Figura 11. Curvas de saturación experimentales para licor amoniacal y obtenidas por Conde (2004) para mezcla amoníaco-agua a concentraciones de 27 % y 34 % de NH_3 .

3. Durante los ensayos se obtuvo el comportamiento de la presión a la entrada y a la salida de la voluta de la bomba centrífuga a partir de las señales emitidas por los captore piezoeléctricos, lo que permitió comparar estos valores con la presión de saturación del licor amoniacal al 27 %, induciendo la cavitación cuando se realizan regulaciones al caudal desde 100 % hasta el 75 % y desde 75 % hasta el 50 %, obteniendo, además, el punto de saturación para la mezcla del licor amoniacal a 27 % para las curvas de saturación (Figura 11).

5. CONCLUSIONES

1. La presión de saturación del licor amoniacal muestra un comportamiento creciente en función de la temperatura. Para concentración del 27 % los valores se incrementan de $45,468 \cdot 10^3$ Pa hasta $22,892 \cdot 10^4$ Pa cuando la temperatura pasa de $22,15$ °C a $64,26$ °C y para una concentración de 34 % la presión pasa de $69,505 \cdot 10^3$ Pa hasta $44,161 \cdot 10^4$ Pa, cuando la temperatura se incrementa de $22,72$ °C a $73,91$ °C, lo que permite establecer una relación entre la concentración de amoníaco y las variables temperatura y presión.

2. La presión de formación de burbujas durante el trasiego del licor amoniacal a una concentración de 27 % de amoníaco es de $45,6 \cdot 10^3$ Pa, a temperatura de saturación de 22,15 °C. Estos valores establecen los límites inferiores de presión a las regulaciones del 75 % del fluido de licor amoniacal para que ocurra el fenómeno de la cavitación en las bombas centrífugas

6. REFERENCIAS

- BRENNE, C. E. 2011: *Hidrodynamics of Pumps*. Cambridge University Press. California Institute of Technology.
- CISNERO, H. B. 2007: Cavitación, un ataque al corazón de las Bombas Centrífugas. [en línea] Consultado: 28 marzo 2007. Disponible en: <http://www.mch.cl/documentos/pdf/cavita.pdf>.
- CONDE, M. 2004: Thermophysical Properties of NH₃ + H₂O Solutions for the Industrial Design of Absorption Refrigeration Equipment. *Revista ENGINEERING*. 1-34 p.
- DOEBELIN, E. 1980: *Diseño y aplicación de sistema de medición*. Diana, México.
- GONZÁLEZ, V. 1983: *Hidráulica, bombas y compresores*. Pueblo y Educación, La Habana.
- RODRÍGUEZ, J. F. 2010: *Diseño de un ciclo de amoníaco agua en la estación de compresión de Tivissa*. Querol Aragón, E (Tutor). Tesis de grado. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas. 77 p.
- TURRO, A. 2002: *Estudio del hidrotransporte de las colas en el proceso carbonato amoniacal*. Leonel Garcell Puyans, Arístides Legrá Lobaina, Raúl Izquierdo Pupo (Tutores) Tesis doctoral. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. 100 p.
- PÉREZ, R. 2004: Cavitación y materiales de construcción en las bombas centrífugas. *Minería y Geología* 20(3-4): 114-118.
- RAMÓN, P. A. 1989: *Transductores y acondicionamiento de señal*. Marcombo.
- RAMOS, N. 1994: *Bombas, ventiladores y compresores*. Editora ISPJAE, La Habana.
- ROMERO, G. M. 2006: *Análisis termodinámico de ciclo de refrigeración por absorción amoníaco-agua*. Raúl Lugo Leiter (Asesor). Tesis de maestría. Instituto Politécnico Nacional. México D.F.
- ROJAS, L. D. 2004: Identificación difusa de accionamiento de bombas centrífugas para el transporte eficiente de pulpa laterítica. *Minería y Geología* 20(3-4): 87-98.

- 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.
- RINCÓN, E. A. & FRANCISCO, O. A. 2002: A New Troughlike Nonimaging Solar Concentrator. *Energy engineering Journal* 124(1): 51-55.
- VILLAMIL, P. 2011: *Proceso de transferencia de calor en un concentrador solar*. Gerardo Ruiz Chavarría (Tutor). Tesis de grado. Universidad Nacional Autónoma de México. 74 p.

Jorge Luis Reyes-Cruz jreyes@ismm.edu.cu

Profesor Auxiliar. Máster en Ciencias en Electromecánica
Departamento de Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico

Gerardo Ruiz-Chavarría gruiz@unam.mx

Profesor Titular A. Doctor en Ciencias Técnicas
Facultad de Física. Universidad Nacional Autónoma de México, DF, México

Enrique Torres-Tamayo torrest@ismm.edu.cu

Profesor Titular. Doctor en Ciencias Técnicas
Departamento de Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico

Roilber Lambert-Sánchez rlamberts@ismm.edu.cu

Profesor Asistente. Máster en Ciencias en Informática
Departamento de Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico

Manuel Matos-Elias mfmatos@ismm.edu.cu

Profesor Auxiliar. Máster en Ciencias en Electromecánica
Departamento de Mecánica. Instituto Superior Minero Metalúrgico