

# Cavitación en los sistemas de bombeo

## Cavitation in pumping systems

**Adonay Moisés Varela Muñoz<sup>1</sup>,**  
**María Flor Stella Monroy González<sup>2</sup>**

### **Resumen**

---

Con el presente artículo se quieren dar a conocer los fundamentos relacionados con el fenómeno de cavitación en los sistemas de bombeo aplicados en la industria, para entender por qué el rendimiento de una bomba, las vibraciones en las tuberías y el ruido en el sistema son una consecuencia del anterior fenómeno.

**Palabras clave:** *fluido, cavitación, bombas hidráulicas, golpe de ariete, sistemas de bombeo.*

### **Abstract**

---

With this article we want to present the fundamentals related to the phenomenon of cavitation in the pumping systems used in the industry to understand why the performance of a pump vibration in the pipes and the noise in the system are a consequence the above phenomenon, in which different fluids can be transported and the geometry of the pipes is associated with cavitation.

**Key words:** *fluid, cavitation, hydraulic pumps, water hammer.*

---

1 Ingeniero mecánico UNAL. Especialista en Pedagogía y Docencia Universitaria, USB. Docente ET-ITC Bogotá. Correo electrónico: admvarela@gmail.com.

2 Ingeniera química FUA. Especialista en Docencia Universitaria, UIS. Profesora investigadora Grupo de Estudios Ambientales (GEA) ET-ITC Bogotá. Correo electrónico: stellamon1961@gmail.com.

---

## 1. Introducción

Un fluido es un conjunto de partículas que se mantienen unidas entre sí por fuerzas cohesivas débiles y las paredes de un recipiente; el término engloba a los líquidos y los gases. En el cambio de forma de un fluido, la posición que toman sus moléculas varía bajo la acción de una fuerza aplicada. Los líquidos toman la forma del recipiente que los contienen, manteniendo su propio volumen, mientras que los gases carecen tanto de volumen como de forma propias.

Las moléculas no cohesionadas se deslizan en los líquidos, y se mueven con libertad en los gases. La cavitación es un fenómeno que se produce en un fluido que circula a través de una tubería, accesorio o máquina hidráulica siempre que la presión en algún punto o zona de corriente descienda hasta un valor cercano a la presión de saturación del fluido.

### Desarrollo del tema

Todos los líquidos tienden a evaporarse o vaporizarse. Esto se debe a que en la superficie libre del líquido existe un movimiento continuo de moléculas hacia el exterior. Algunas de las moléculas regresan al líquido, lo que origina un intercambio molecular entre el líquido y la superficie libre. Si el espacio sobre la superficie del líquido se encuentra confinado, el número de moléculas aumenta hasta que se restablezca el equilibrio entre el régimen de moléculas que salen del líquido con el régimen de moléculas que retornan a este. Las moléculas que retornan al líquido crean una presión que se conoce como la presión parcial de vapor. Las moléculas que salen o abandonan el líquido dan origen a la presión de vapor, que está en función del régimen con que abandonan la superficie. Cuando las dos presiones anteriores son iguales, el gas que se encuentra sobre la superficie del líquido está saturado de vapor y a la presión correspondiente se le denomina presión de saturación. Al aumentar la temperatura, el ré-

gimen con que escapan las moléculas de la superficie del líquido aumenta, haciendo que la presión de vapor se incremente.

Si la presión total del gas que se encuentra sobre el líquido –que corresponde a la presión parcial de vapor y a la presión parcial de otros gases sobre la superficie del líquido– resulta menor que la presión de saturación, las moléculas escapan del líquido muy rápidamente, dando lugar a la ebullición.

Para el agua, la presión de saturación es de 1,0133 bares, con una temperatura de 100 °C. La presión de saturación es la presión total de la atmósfera al nivel del mar; cuando el agua se encuentre a esta presión y temperatura, esta entrará en ebullición. Sin embargo, si la presión externa a la que se encuentra sometido un líquido es menor, la ebullición comienza a una presión menor que la de saturación, es decir, a menor temperatura. De acuerdo con lo anterior, se puede hacer hervir el agua a temperatura ambiente, reduciendo la presión hasta que alcance el valor de la presión de saturación para la temperatura ambiente. Si dicha temperatura fuera de 10 °C, el valor correspondiente de la presión de saturación sería de 0,01227 bares.

Cuando un líquido contiene gases disueltos, ocurren efectos parecidos a los de la ebullición. Si la presión del líquido se reduce lo suficiente, los gases disueltos se liberan en forma de burbujas, pero se requiere una presión menor para liberar los gases disueltos que para hacerlo hervir. Un incremento subsecuente de la presión puede hacer que las burbujas, sean de vapor o de otros gases, se colapsen; en este caso, se producen fuerzas de impacto de gran magnitud. Este fenómeno se conoce con el nombre de cavitación y tiene serias consecuencias en las turbomáquinas.

La cavitación es entonces un fenómeno que se produce en un fluido que circula a través de una tubería, accesorio o máquina hidráulica, siempre

que la presión en algún punto o zona de corriente descienda hasta un valor cercano a la presión de saturación del fluido.

Por ejemplo, si se bombea agua a una temperatura de 50 °C con una presión de 0,1 bar, se presenta el fenómeno porque la temperatura de saturación a esta presión es de 46 °C.

En este caso, el fluido entra en ebullición, se forman burbujas o 'cavidades' de vapor, las cuales al entrar en contacto con zonas de mayor presión –como las debidas a Venturi, contracciones de la tubería o con los cambios causados por la geometría de la máquina hidráulica– producen fuertes condensaciones que atacan el material, sometiéndolo a la fatiga y posterior daño.

## 2. Características de la cavitación

En las bombas, la cavitación ocurre en la sección en donde el líquido se acelera hacia el impulsor. Los efectos inmediatos son la pérdida de la eficiencia y erosión del impulsor.

La cavitación está asociada con el tipo de bomba: a mayor velocidad específica, mayor es este riesgo. Se relaciona también con el diseño y montaje de la tubería de succión: a mayor altura de elevación estática, puntos altos de la tubería, juntas descentradas, reductores concéntricos en la entrada de la bomba, se incrementa la formación de

bolsas de aire. Y si el caudal de trabajo es mayor que el diseñado, todo esto hará que mayor sea el riesgo de cavitación en un sistema de bombeo.

Los síntomas del fenómeno se manifiestan en la generación de ruidos, en vibraciones en la tubería y en el desgaste de los alabes. Para minimizar los efectos de la cavitación, deben tenerse en cuenta las siguientes recomendaciones, además de las dadas por los fabricantes de las turbomáquinas:

1. Evitar un excesivo número de codos y de tramos rectos en la tubería de succión, así como su adecuada instalación; en este caso, la alineación de la tubería es muy importante.
2. Instalar válvulas cheque para mantener la tubería de succión llena de líquido, particularmente si su viscosidad no es elevada.
3. Mantenimiento de la tubería de succión para verificar la ausencia de obstrucciones y su montaje adecuado.
4. Utilizar reductores excéntricos en la entrada de la bomba.
5. Uso de materiales adecuados para la tubería.
6. Siempre que sea posible, elegir el diámetro de succión mayor que el de la tubería de descarga.
7. Se recomienda el uso de respiraderos en la tubería de succión si los puntos altos son inevitables.

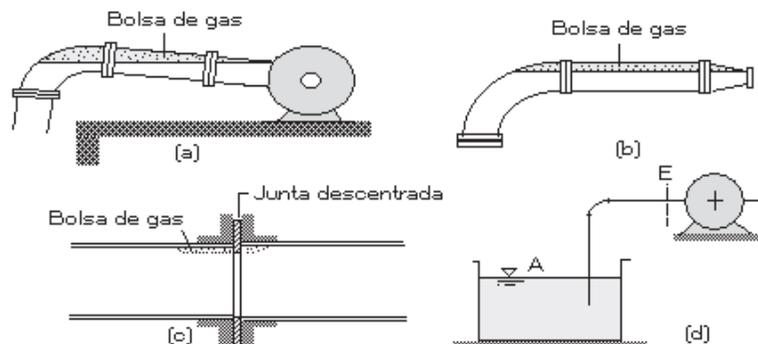


Figura 1. Riesgos de cavitación

Estas limitaciones restringen la energía disponible en el tramo de succión de la bomba.

### 3. Análisis de la energía disponible en la tubería de succión

Estableciendo la ecuación de Bernoulli entre A y E en presiones absolutas (figura 1 d), se tiene:

$$p_E/\gamma = p_A/\gamma - z_E - V_E^2/2g - H_A^T \quad (1)$$

La presión  $p_E/\gamma$  puede ser menor que  $p_A/\gamma$  al existir tres términos negativos, y puede llegar a cero, pero no por debajo de este valor, ya que una presión absoluta no puede ser negativa.

Cuando  $p_E/\gamma$  es cero, se tiene la altura teórica de aspiración que depende de la altura sobre el nivel del mar en donde se instalaría la bomba.

Si  $p_E/\gamma$  es aproximadamente igual a  $p_s/\gamma$ , en donde  $p_s$  es la presión de saturación del vapor, existe riesgo de cavitación.

Esta limitación conduce al concepto de la energía disponible en la entrada de la bomba o de la *cabeza neta de succión positiva disponible*  $NPSH_d$  (Net Positive Suction Head), la cual permite garantizar el flujo del líquido hacia el interior de la bomba.

La altura total de energía en E con respecto a la entrada de la bomba es:

$$H_E = p_E/\gamma + V_E^2/2g$$

Para evitar la cavitación, debe cumplirse que  $p_E/\gamma > p_s/\gamma$ , y se define la cabeza neta de succión disponible mediante la ecuación

$$NPSH_d = (p_E - p_s)/\gamma + V_E^2/2g \quad (1)$$

Otra expresión para  $NPSH_d$  se deduce estableciendo la ecuación de Bernoulli entre

A y E en presiones absolutas y tomando como referencia la base del tanque de succión; en este caso se llega a

$$p_E/\gamma + V_E^2/2g = p_A/\gamma + (z_A - z_E) - H_A^T \quad (2)$$

Restando  $p_s/\gamma$  en ambos miembros de la ecuación (2) y designando por  $H_s = (z_E - z_A)$  se tendrá:

$$NPSH_d = (p_A - p_s)/\gamma - H_s - H_A^T \quad (3)$$

En términos generales, se puede definir la cabeza neta de succión disponible como la diferencia entre la presión de estancamiento absoluta en la entrada de la bomba y la presión de saturación del fluido.

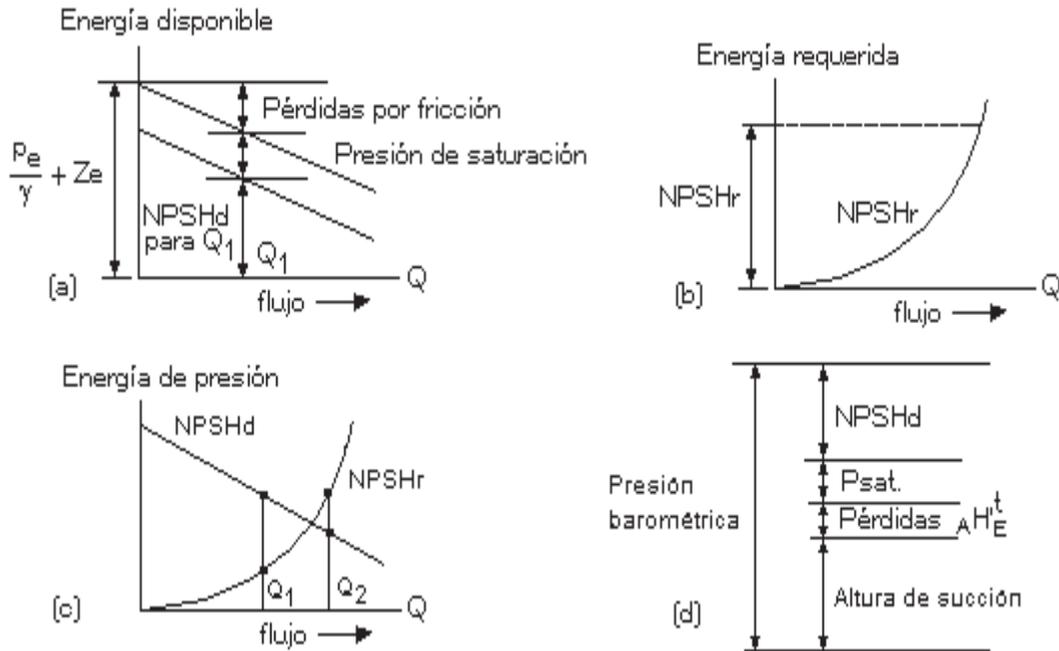
La *cabeza neta de succión requerida*  $NPSH_r$  (o 'energía requerida') es una característica de la bomba que varía principalmente con la velocidad de rotación y con la viscosidad del fluido por bombear; este es un indicador de la caída de presión en el interior de la bomba, y es un dato que debe suministrar el fabricante, quien generalmente lo evalúa en el laboratorio.

La cabeza neta de succión requerida da el margen necesario para cubrir las pérdidas internas de la bomba, cuya curva de fricción es de forma exponencial (figura 2b).

La superposición de las curvas de la cabeza neta de succión disponible y de la cabeza neta de succión requerida define la zona de seguridad para una condición particular de flujo (figura 2c).

La cavitación se evita si la cabeza neta de succión disponible es mayor que la cabeza neta de succión requerida. Cualquier condición de flujo, como por ejemplo  $Q_2$  en la figura 2c, aumenta este riesgo indeseable en un sistema de flujo.

Una representación gráfica es la mostrada en la figura 2d.



**Figura 2.** Influencia de la cavitación en un sistema de bombeo

La caída de presión en el interior de la bomba  $\Delta H$  se relaciona con la altura efectiva suministrada mediante el 'coeficiente de cavitación'  $\sigma$  dado por

$$\sigma = \text{NPSH}_r / H_m = \Delta H / H_m = [(p_A - p_s) / \gamma - {}_A H_{TE}^t - H_{s\text{-min}}] / H_m \quad (4)$$

Stepanoff propone para agua a 4 °C una estimación de  $\sigma$  mediante la ecuación

$$\sigma = 2,14 \times 10^{-4} N_s^{4/3}$$

en donde  $N_s$  es la velocidad específica dada por

$$N_s = \frac{3.65n\sqrt{Q}}{H_m^{3/4}} \quad (5)$$

$n$  [r. p. m.];  $Q$  [m<sup>3</sup>/s];  $H_m$  [m]

El caudal en la entrada de la bomba está limitado por el riesgo de cavitación, de tal manera que su valor máximo y la velocidad máxima del fluido en el tramo de succión pueden calcularse mediante la siguientes expresiones que se obtienen a partir de la ecuación de Bernoulli expresada en presiones absolutas entre el nivel del líquido en

el tanque de succión (punto A) y el punto E en la entrada de la bomba (figura1d), en la que se hace  $p_E / \gamma = p_s / \gamma$  como la presión mínima para que no ocurra la cavitación.

En estas ecuaciones, el signo positivo se utiliza para el caso de la bomba 'en carga' y el signo negativo para el caso de la bomba 'en aspiración':  $\lambda_{TE}$  es el coeficiente total de pérdidas en la tubería de succión.

$$Q_{\text{máx}} = \sqrt{\frac{\left[ \frac{P_a - P_s}{\gamma} \pm H_s \right] \pi^2 g D_E^4}{8(\lambda_{TE} + 1)}} \quad (6)$$

$$V_{\text{máx}} = \sqrt{\frac{\left[ \frac{P_a - P_s}{\gamma} \pm H_s \right] 2g}{\lambda_{TE} + 1}} \quad (7)$$

#### 4. Altura máxima de instalación de la bomba

Una bomba puede instalarse hasta una altura máxima en relación con la superficie libre del tanque de succión, sin correr el riesgo de cavitación, de acuerdo con el uso de la siguiente expresión que se obtiene estableciendo la ecuación de Bernoulli entre A y E (figura 2d) en presiones absolutas:

$$p_E / \gamma = p_A / \gamma + (z_A - z_E) - H_A^T - V_E^2 / 2g$$

En el interior de la bomba, la altura de presión  $p_E / \gamma$  disminuye hasta un cierto valor  $p_x / \gamma$  de tal manera que  $p_x / \gamma = p_E / \gamma - \Delta H$ .

Por lo tanto,  $p_E / \gamma = p_x / \gamma + \Delta H$  y reemplazando en la expresión anterior, se obtiene:

$$p_x / \gamma = p_A / \gamma + (z_A - z_E) - H_A^T - V_E^2 / 2g - \Delta H$$

Si la presión  $p_x / \gamma$  se hace igual a la presión de saturación  $p_s / \gamma$ , y designando por  $H_s = z_A - z_E$

La altura máxima de instalación está dada por

$$H_{\max} = (p_A - p_s) / \gamma - V_E^2 / 2g - H_A^T - \Delta H \quad (8)$$

#### 5. Conclusión

La vibración y el ruido de las tuberías en los sistemas de bombeo, las pérdidas de eficiencia y el daño en el impulsor de la bomba, entre otros, son los efectos producidos por el fenómeno de cavitación. Por tanto, es indispensable controlar las variables de los diferentes fluidos que se pueden transportar y evitar en lo posible la alteración en la configuración geométrica de los sistemas de bombeo.

#### 6. Referencias

- Massey Bernard Standfor. *Mecánica de fluidos*. Editorial C.E.C.S.A.
- Mataix Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Editorial Harla.
- Karassik Igor, Carter Roy. *Bombas centrífugas*. Editorial C.E.C.S.A.
- Frank M. White. *Fluid mechanics*. Editorial McGraw-Hill.

