

Cavitación

Un ataque al corazón de las Bombas Centrifugas.

Introducción.

La cavitación es un fenómeno muy común, pero es el menos comprendido de todos los problemas de bombeo. Tiene distintos significados para diferentes personas. Algunos la definen como el ruido de golpeteo o traqueteo que se produce en una bomba. Otros la llaman “patinaje” debido a que la presión de la bomba decrece y el caudal se torna errático. Cuando se produce cavitación, la bomba no solamente no cumple con su servicio básico de bombear un líquido sino que también experimenta daños internos, fallas de los sellos, rodamientos, etc.

*En resumen, la **cavitación** es una condición anormal que puede producir pérdidas de producción, daños al equipo y lo peor de todo, lesiones al personal.*

Los profesionales de la Planta deben estar capacitados para detectar rápidamente los signos de cavitación, identificar correctamente su tipo y la causa que la produce para así poder eliminarla o atenuarla. Una comprensión correcta de los conceptos envueltos es clave para el diagnóstico y corrección de cualquier problema de bombeo relacionado con cavitación.

Significado del término “Cavitación” en el contexto de las bombas centrifugas.

Cavitación procede del latín “cavus”, que significa espacio hueco o cavidad. En los diccionarios técnicos se define como ‘la rápida formación y colapso de cavidades en zonas de muy baja presión en un flujo líquido.

En la literatura sobre bombas centrifugas, en lugar de “cavidad”, se usan varios términos como: bolsones de vapor, bolsones de gas, hoyos, burbujas, etc. En este artículo se usará el término “burbuja”.

En el contexto de las bombas centrifugas, el término cavitación implica un proceso dinámico de formación de burbujas dentro del líquido, su crecimiento y subsecuente colapsamiento a medida que el líquido fluye a través de la bomba.

Generalmente las burbujas que se forman dentro de un líquido son de dos tipos: Burbujas de vapor o burbujas de gas.

- Las burbujas de vapor se forman debido a la vaporización del líquido bombeado. La cavitación inducida por la formación y colapso de estas burbujas se conoce como Cavitación Vaporosa.
- Las burbujas de gas se forman por la presencia de gases disueltos en el líquido bombeado (generalmente aire pero puede ser cualquier gas presente en el sistema). La cavitación inducida por la formación y colapso de estas burbujas se

conoce como Cavitación Gaseosa.

En ambos tipos, las burbujas se forman en un punto interior de la bomba en el que la presión estática es menor que la presión de vapor del líquido (cavitación vaporosa) o que la presión de saturación del gas (cavitación gaseosa).

La Cavitación Vaporosa es la forma de cavitación más común en las bombas de proceso. Generalmente ocurre debido a un insuficiente NPSH disponible o a fenómenos de recirculación interna. Se manifiesta como una reducción del desempeño de la bomba, ruido excesivo, alta vibración y desgaste en algunos componentes de la bomba. La extensión del daño puede ir desde unas picaduras relativamente menores después de años de servicio, hasta fallas catastróficas en un corto periodo de tiempo.

La Cavitación Gaseosa se produce por efecto de gases disueltos (más comúnmente aire) en el líquido. Esta cavitación raramente produce daño en el impulsor o carcasa. Su efecto principal es una pérdida de capacidad. No debe confundirse con el ingreso de aire o bombeo de líquidos espumosos, situaciones que no necesariamente producen cavitación pero sí reducción de capacidad, detención del bombeo y otros problemas. Para el bombeo de líquidos espumosos se han diseñado y se siguen desarrollando bombas especiales (Froth pumps) que han logrado un considerable mejoramiento en el manejo de estos fluidos.

Para poder identificar los tipos de cavitación es necesario entender primero sus mecanismos, es decir, como ocurre. En este artículo se abordará solamente la cavitación vaporosa.

Definiciones Importantes

Presión estática, (p_s)

La presión estática en una corriente de fluido es la fuerza normal por unidad de área actuando sobre un plano o contorno sólido en un punto dado. Describe la diferencia de presión entre el interior y el exterior de un sistema, despreciando cualquier movimiento en el líquido. Por lo tanto, la presión estática en un punto de un ducto, es la diferencia entre la presión interna y externa en ese punto, omitiendo cualquier movimiento del flujo en su interior. En términos de energía, la presión estática es una medida de la energía potencial de un fluido.

Presión Dinámica (p_d)

Un fluido en movimiento ejerce una presión mas alta que la presión estática debido a la energía cinética ($mv^2/2$) del fluido. Esta presión adicional se define como presión dinámica. Se puede medir convirtiendo la energía cinética del fluido en energía potencial. En otras palabras, es la presión que existiría en una corriente de fluido que ha sido desacelerada desde su velocidad "v" a velocidad "cero".

Presión Total (p_t)

Se define como la suma de la presión estática más la presión dinámica. Es una medida de la energía total de una corriente de fluido en movimiento. Esto es, energía cinética mas energía potencial.

Relación entre p_s , p_d y p_t

En un fluido incompresible la relación se puede medir usando un aparato llamado Tubo Pitot.

La relación también puede establecerse aplicando un simple balance energético: **energía potencial + energía cinética = energía Total (constante)** o en términos de presión: **presión estática + presión dinámica = presión Total.**

La energía cinética es una función de la velocidad "v" y de su masa comúnmente representada por la densidad del fluido (ρ). Entonces: **E.C. = $p_d = \frac{1}{2} \rho v^2$.** En términos de presión total: **$p_t = p_s + \frac{1}{2} \rho v^2$.**

En lugar de utilizar unidades de presión se prefiere expresar la energía de bombeo como energía por unidad de peso de líquido bombeado, la que se indica en Newton- metro por Newton o justamente en **metros** de columna de líquido; esta magnitud se identifica universalmente como "**cabeza**" (**head en inglés**). Esto es necesario debido a que la altura de la columna que produce una bomba centrífuga es independiente de la densidad del líquido. Por ejemplo una bomba 'X' corriendo a 'N' rpm. producirá una misma cabeza 'H' metros de agua, o de ácido sulfúrico concentrado, o de cualquier otro fluido; sin embargo, la potencia empleada será proporcional a la densidad de cada fluido.

Los términos de presión pueden convertirse en metros de cabeza dividiendo la presión en kPa por 9.81 (g) y por la densidad específica(ρ) del fluido.

Cabeza Estática (he) = Presión Estática/ $g \cdot \rho$

Cabeza de Velocidad (hv) = Presión Dinámica / $g \cdot \rho = (\frac{1}{2} \rho v^2) / (\rho \cdot g) = v^2 / 2g$

Presión de Vapor (pv) = Es la presión requerida para mantener a un líquido en estado líquido. Si la presión que se aplica sobre la superficie de un líquido no es suficiente para mantener sus moléculas estrechamente unidas entre sí, las moléculas se desprenderán en la forma de gas o vapor. La presión de vapor es dependiente de la temperatura del líquido. A mayor temperatura más alta es la presión de vapor.

Mecanismo de la Cavitación

El fenómeno de la cavitación es un proceso progresivo de varias etapas como se aprecia en la Figura 5.

Etapas de la Cavitación

Formación de burbujas dentro del líquido

Crecimiento de las burbujas

Colapso de las burbujas

Figura 5

cavitación

Etapa 1. Formación de Burbujas

Las burbujas se forman dentro del líquido cuando este se vaporiza. Esto es, cuando cambia desde la fase líquida a la de vapor.

La vaporización de cualquier líquido dentro de un contenedor se produce ya sea porque la presión sobre la superficie del líquido disminuye hasta ser igual o inferior a su presión de vapor (a la temperatura actual), o bien porque la temperatura del

líquido sube hasta hacer que la presión de vapor sobrepase a la presión sobre la superficie de líquido. Por ejemplo en un depósito abierto a nivel del mar la superficie del agua está sometida a una presión atmosférica de aprox. 10 bar por lo que la temperatura tendría que subir a 100 °C para que su presión de vapor sobrepase los 10 bar y se inicie la ebullición (formación de burbujas). A 4000 m. de altitud la presión atmosférica se reduce a 6.2 bar por lo que la temperatura tendría que subir solamente a unos 85 °C para que se inicie la ebullición. Si en un contenedor cerrado se reduce la presión a 0.3 bar, la ebullición se iniciará con el agua a 25 °C. También se producirá la ebullición si la presión permanece constante en alrededor de 0.3 bar pero la temperatura sube sobre 25 °C.

*En resumen, la vaporización se produce por **adición de calor** o por **reducción de la presión estática** (para la definición de cavitación se excluirá la acción dinámica del líquido)*

Lo mismo que en un contenedor cerrado, la vaporización del líquido puede ocurrir en las bombas centrífugas cuando la presión estática en algún punto se reduce a un valor menor que la presión de vapor del líquido (a la temperatura en dicho punto).

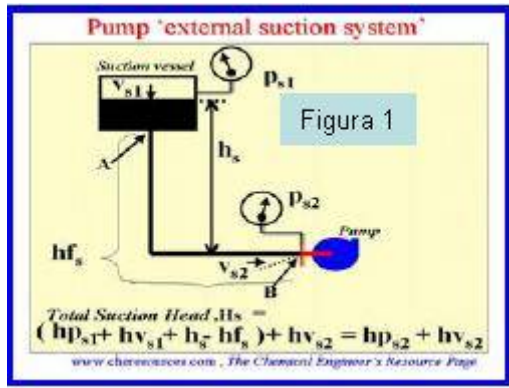
Por lo tanto, el concepto clave es: **Las burbujas de vapor se forman dentro de la bomba cuando la presión estática en algún punto baja a un valor igual o menor que la presión de vapor del líquido.**

La presión estática en algún punto dentro de la bomba puede bajar hasta un nivel inferior a la presión de vapor bajo dos condiciones:

1. Porque la caída de presión actual en el sistema externo de succión es mayor que la que se consideró durante el diseño del sistema. (Es una situación bastante corriente). Esto resulta en que la presión disponible en la succión de la bomba (NPSHa) no es suficientemente alta para suministrar la energía requerida para superar la caída de presión interna (NPSHr) propia del diseño de la bomba.
2. Porque la caída de presión actual dentro de la bomba (NPSHr) es mas grande que la informada por el fabricante y que se usó para seleccionar la bomba.

- **Caída de Presión en el sistema externo de succión de la bomba**

En la Figura 3 se muestra un esquema simple de un “**sistema externo de succión**” y los factores principales que determinan la presión a la entrada de la bomba (NPSHa). La reducción de cualquiera de los componentes positivos o el incremento de cualquiera de los componentes negativos producirá una disminución de la presión en la entrada de la bomba.



Nomenclatura usada en la Figura 1.

ρ = Densidad específica del líquido
 p_{sn} = ‘p’ presión estática local (absoluta). ‘s’ – indica succión y ‘n’ posición de la medición. La presión en cualquier punto puede convertirse en ‘cabeza’ dividiendo su valor en kPa por el factor ‘ ρg ’. ($g = 9.81$)
 p_{s1} = Presión estática (absoluta) del estanque de succión en kPa.

$h_{p_{s1}}$ = Cabeza estática de succión. Es la presión estática absoluta sobre la superficie del líquido en el estanque de succión, convertida en metros de cabeza ($p_{s1} / \rho g$).

En un estanque de agua abierto a nivel del mar, la cabeza estática de succión es igual a la presión atmosférica (101.3 kPa) dividida por $\rho=1$ (agua) y por 9.81; esto es 10.3 m. de cabeza.

v_{s1} = Velocidad del líquido en la superficie del estanque m/s.

$h_{v_{s1}}$ = Cabeza de velocidad. Se define como la energía de un líquido resultante de su movimiento a una velocidad determinada. Equivale a la distancia vertical (en un vacío perfecto) que tendría que caer la masa líquida para adquirir la velocidad v_{s1} . En estanques relativamente grandes su valor es insignificante y no se considera en los cálculos.

h_s = Cabeza estática de succión. Corresponde a la elevación relativa del líquido con respecto a la línea centro de la bomba. Si el nivel está sobre la línea, h_s es positivo; Si el nivel está bajo la línea, h_s es negativo, esta condición se suele nombrar como ‘succión aspirante’ o de levante.

H_{f_s} = Cabeza de fricción. Cabeza (energía) requerida para vencer la resistencia que oponen al flujo las tuberías, válvulas, fittings, etc., existentes entre el punto A y el flanche de succión de la bomba, (punto B). Debe incluir la pérdida por entrada del líquido desde el estanque a la línea de succión (h_i). La cabeza de fricción es dependiente del tamaño, condición y tipo o material del tubo; del número y tipo de fittings y válvulas; del caudal y naturaleza del fluido. Para su cálculo se requieren conocimientos e información especializada.

p_{s2} = Presión estática absoluta en el flanche de succión, en kPa

$h_{p_{s2}}$ = Cabeza estática en el flanche de succión. = $p_{s2} / g \cdot \rho$.

v_{s2} = Velocidad del líquido pasando por el flanche de succión, m/s. La tubería de succión se dimensiona de modo que la velocidad en la succión permanezca baja.

$h_{v_{s2}}$ = Cabeza de velocidad en el flanche de succión. Esto es, energía del líquido moviéndose a una velocidad promedio v_{s2} . En este caso: $h_{v_{s2}} = v_{s2}^2 / 2g$

p_v = Presión de vapor absoluta del líquido a la temperatura de bombeo, en kPa. Los valores se encuentran tabulados en los textos especializados.

h_{p_v} = Cabeza de vapor. Presión de vapor absoluta convertida en metros de cabeza. $h_{p_v} = p_v / g \cdot \rho$

H_s = Cabeza Total de succión en el flanche de entrada de la bomba, en metros.

Cálculo de la Cabeza Total de Succión a la entrada de la bomba.

La bomba se alimenta desde un estanque que debe tener un cierto nivel de líquido y que puede estar sobre o bajo el centro del flanche de succión de la bomba (+ Zm o – Zm). El estanque puede estar abierto a la atmósfera (Hat), o presurizado (+ Hpr), o bajo vacío (- Hpr). El flujo tiene que vencer la resistencia de las tuberías y accesorios entre la salida del estanque y la entrada a la bomba (Hfs, Hi, etc.).

El sistema externo de succión tiene que suministrar una cierta cantidad de cabeza (energía) en el flanche de admisión de la bomba. Esto se conoce como **NPSHa**, (**Net Positive Suction Head available**) Cabeza Neta Positiva de succión disponible. El término ‘cabeza’ medido en metros, se usa como una expresión de la energía del líquido en cualquier punto en el sistema de flujo. Los líquidos incompresibles pueden contener energía en la forma de velocidad, presión, o elevación. El sistema externo de succión tiene que diseñarse de modo que la presión estática en el flanche de succión sea siempre positiva, mayor que la presión de vapor y suficientemente alta para vencer las pérdidas internas en la zona de succión de la bomba, cuyo valor lo especifica el fabricante y es conocido como NPSHr (requerido).

En términos prácticos, el NPSHa (en metros) en el flanche de succión de un sistema simple, está dado por la ecuación algebraica:

$$\text{NPSHa} = + \text{Hat} + (\text{Zm}) + \text{Hvs} + (\text{Hpr}) - \text{Hvap} - \text{Hfs} - \text{Hi}. \quad (\text{Ecuación 1})$$

En donde:

Hat = Cabeza de Presión atmosférica en el lugar de aplicación

Zm = Cabeza estática de succión. Altura estática del líquido. Positivo sobre el eje de la bomba y negativo bajo el eje de la bomba.

Hvs = Cabeza de velocidad en flanche de admisión $V = 1273 \times \text{Caudal (l/s)}/d^2$ donde d = diámetro (mm)

Hpr = Cabeza de presión del estanque de succión. Positivo sobre y negativo bajo la presión atmosférica.

Hvap = Cabeza de presión de vapor (a la temperatura del líquido) en el flanche de admisión.

Hfs = Cabeza de fricción. Cabeza (energía) requerida para vencer la resistencia que oponen al flujo las tuberías, válvulas, fittings, expansiones, restricciones, etc., existentes entre el punto A y el flanche de succión de la bomba, (punto B en Fig. 3). Es función de la velocidad y características del fluido y de la características de la tubería según factores empíricos encontrados en tablas y gráficos especializados.

Hi = Cabeza de ingreso a la línea de succión (Punto A). Representa la energía gastada en el ingreso del fluido desde el estanque a la línea de succión. Es función de la velocidad del fluido y de la forma de unión del estanque al tubo de succión. $Hi = k \cdot V^2/2g$ donde k = factor tabulado en textos especializados.

Nota. Todos los términos de presión se convierten en metros de ‘cabeza’, dividiendo la presión en kPa por 9.81 y por la densidad específica del fluido.

En instalaciones existentes, el **NPSHa** también se puede calcular con la lectura (presión manométrica absoluta) de un manómetro conectado cerca del flanche de succión.

Nota: El manómetro sólo indica la presión estática en el punto de conexión por lo que debe incorporarse la cabeza dinámica Hvs.

$$\text{NPSHa} = + \text{Hat} - \text{Hvap} + \text{Hvs} + (\text{Hms})$$

Hms = Cabeza de succión manométrica. Positiva si la presión manométrica es superior a la presión

atmosférica y negativa si es inferior.

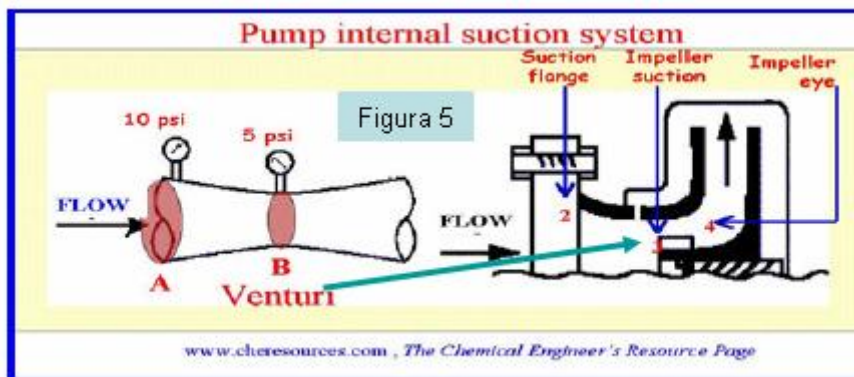
- **Caída de presión en el sistema interno de succión de la bomba.**

El sistema interno de succión incluye el cuello de admisión (desde el flanche), el ojo del impulsor y la zona de entrada de los alabes.

Cuando el líquido ingresa a la bomba se produce una caída adicional de presión durante su trayecto desde el flanche por el cuello de admisión hacia el ojo del impulsor y hasta el punto en el cual recibe energía desde el impulsor. La magnitud de las pérdidas depende de la forma y diseño del sistema interno de succión y obviamente de la velocidad del fluido y rpm del impulsor. Normalmente la sección de menor área corresponde al 'Ojo' del impulsor y por lo tanto, de acuerdo al principio de Bernoulli (efecto venturi), es aquí donde se tiene la presión estática mas baja del sistema. (Figura 4).

La caída de presión por el efecto venturi es la mas significativa, pero también hay caídas por fricción y por choques y turbulencias del líquido a la entrada de los alabes.

El efecto neto de todas las caídas de presión es la creación de una zona de muy baja presión alrededor del ojo del impulsor y en el inicio del borde interno de los alabes. Si baja hasta un valor inferior a la presión de vapor se produce la formación de burbujas. La presión mínima para evitar la formación de burbujas, para un flujo determinado, se conoce como **NPSHr (Net Positive Suction Head requerido)**. El NPSHr es una característica particular de cada modelo, tipo y tamaño de bomba. Es independiente del sistema externo y lo determina y certifica el fabricante de la bomba. La energía necesaria para sobrepasar esta presión mínima la suministra el sistema externo de succión (NPSHa).



Los fabricantes determinan experimentalmente las curvas de NPSHr usando agua como fluido y condiciones de prueba estandarizados. Normalmente se incluyen en las curvas de operación tradicionales

de la bomba. La medición del NPSHr se basa en una convención del H.S.I. según la cual su valor se determina cuando se produce una pérdida de cabeza de 3% debida a la cavitación, En realidad esta alta pérdida de cabeza significa que la cavitación ya estaba presente con un flujo mas alto y antes de que se notara una baja en el funcionamiento de la bomba. En la practica se han observado diferencias superiores a 1.5 metros en el NPSHr entre bombas del mismo tamaño y modelo equipadas con impulsores iguales. Estas variaciones se pueden deber a pequeñas diferencias constructivas, terminaciones de superficie, juegos interiores, etc.

Por eso es imperativo proveer un margen entre el NPSHr informado por el fabricante y el NPSHa en las condiciones de operación.

Un margen razonable de 1.5 m para el caudal de operación es comúnmente utilizado para la mayoría de los servicios. Aplicaciones especiales pueden requerir márgenes más altos.

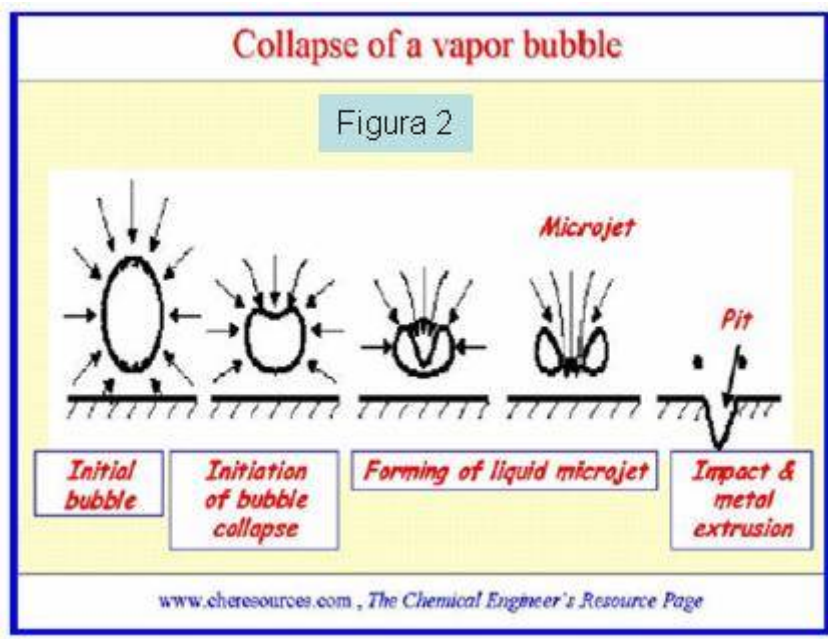
En general el NPSHr tiende a aumentar con el aumento del flujo y cabeza, sin embargo existen casos excepcionales en que esta tendencia no se cumple.

Etapa 2. Crecimiento de las Burbujas

Si no se produce ningún cambio en las condiciones de operación, se seguirán formando burbujas nuevas y las viejas seguirán creciendo en tamaño. Luego serán arrastradas por el líquido desde el ojo del impulsor hacia los alabes y la periferia del impulsor. Debido a la rotación del impulsor las burbujas adquieren alta velocidad y se desplazan hacia las regiones de alta presión dentro del impulsor donde empiezan a colapsar. El ciclo de vida de una burbuja se ha estimado en alrededor de 0.003 segundos.

Etapa 3. Colapso de las Burbujas

A medida que las burbujas se desplazan, la presión que las rodea va aumentando hasta que llegan a un punto donde la presión exterior es mayor que la interior y las burbujas colapsan. El proceso es una implosión. Cientos de burbujas colapsan en aproximadamente el mismo punto de cada alabe. Las burbujas no colapsan simétricamente de modo que el líquido que las rodea se precipita a llenar el hueco produciendo un micro jet. Subsecuentemente los micro jet rompen las burbujas con tal fuerza que produce una acción de martilleo. Se han reportado presiones de colapso de burbujas superiores a 1 GPa (145×10^6 psi). El martilleo altamente focalizado puede producir desprendimiento de material (socavaciones) en el impulsor. La figura 2 ilustra esquemáticamente el proceso.



Después del colapso, emana una onda de choque desde el punto de colapso. Esta onda es la que se escucha y que usualmente se identifica como 'cavitación'.

Síntomas Generales de Cavitación y sus Efectos sobre el Desempeño de la Bomba y de sus Componentes.

La cavitación se produce cuando el NPSHa es Igual o Menor al NPSHr

Las indicaciones perceptibles de la cavitación son los ruidos y vibraciones más o menos

fuerzas y el trabajo inestable de la bomba. Se producen fluctuaciones en el caudal y la presión de descarga con una súbita y drástica reducción de la cabeza de descarga y capacidad de la bomba. Dependiendo del tamaño y cantidad de burbujas los problemas van desde una pérdida parcial de capacidad y cabeza hasta una falla total de bombeo junto con daños irreparables de los componentes internos de la bomba. Se requiere una investigación cuidadosa, mucha experiencia y conocimientos acerca de los efectos de la cavitación sobre los componentes de la bomba para poder identificar el tipo de cavitación y su causa original.

La siguiente es una descripción detallada de los síntomas generales mas comunes:

- **Reducción de la capacidad de bombeo:**

Las burbujas ocupan un volumen que reduce el espacio disponible para el líquido y esto disminuye la capacidad de bombeo. Por ejemplo, cuando el agua pasa del estado líquido al de vapor su volumen aumenta en aproximadamente 1700 veces. Si la generación de burbujas en el ojo del impulsor es suficientemente grande, la bomba se puede 'ahogar' y quedar sin nada de succión con una reducción total del flujo. La formación y colapso de las burbujas es desigual y disparejo, esto genera fluctuaciones en el flujo y el bombeo se produce en chorros intermitentes. **Este síntoma es común a todos los tipos de de cavitación.**

- **Disminución en la generación de cabeza:**

A diferencia de los líquidos, las burbujas son compresibles. La cabeza desarrollada por la bomba disminuye drásticamente debido a que se gasta energía en aumentar la velocidad del líquido empleado en llenar las cavidades que dejan las burbujas colapsadas. **Lo mismo que la reducción en capacidad, este síntoma es común a todos los tipos de cavitación.**

Por lo tanto, el efecto hidráulico de la cavitación en una bomba es que su funcionamiento cae fuera de la curva de desempeño esperada, produciendo una cabeza y flujo mas bajo que el correspondiente a su condición normal de operación

- **Vibración y Ruido anormal:**

El desplazamiento de las burbujas a muy alta velocidad desde el área de baja presión hacia una zona de alta presión y el subsiguiente colapso crea ondas de choque que producen ruidos y vibraciones anormales. Se estima que durante el colapso de las burbujas se desarrollan ondas de choque con presiones del orden de 10^4 atmósferas.

El sonido de la cavitación puede describirse como algo similar a pequeñas partículas duras chocando o rebotando rápidamente en el interior de una bomba o válvula. Se usan varios términos para describirlo; traqueteo, golpeteo, crepitación, etc. El ruido de una bomba cavitando va desde el golpeteo grave y uniforme (como sobre una puerta) hasta una

crepitación aguda y errática (similar a un impacto metálico). El ruido de cavitación puede confundirse fácilmente con el de un rodamiento en mal estado. Para distinguir si el ruido es debido a un rodamiento o a cavitación basta con operar la bomba sin flujo, si el ruido desaparece quiere decir que existe cavitación..

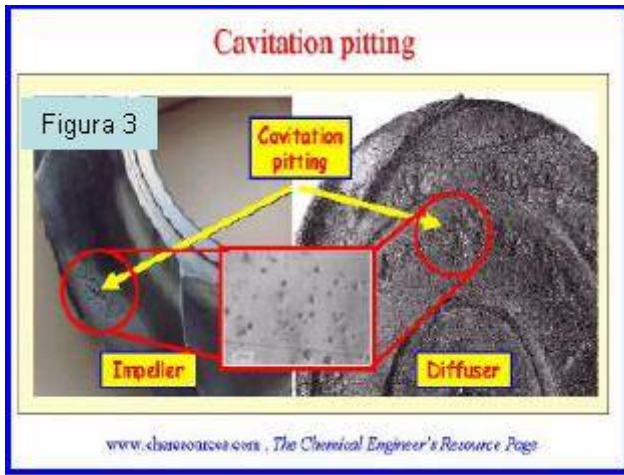
La vibración se debe al efecto de cargas dispares actuando sobre el impulsor y que son generadas por una mezcla no uniforme de líquido y vapor, así como por las ondas de choque por el colapso de las burbujas. En los manuales existe muy poco acuerdo sobre las características de la vibración primaria asociada con la cavitación en las bombas centrifugas. La formación y colapso de las burbujas se alternará periódicamente con la frecuencia resultante de la velocidad y número de alabes. Algunos sugieren que la vibración asociada con la cavitación produce un pico de banda ancha a frecuencias sobre 2000 Herz. Otros sugieren que la cavitación sigue la frecuencia de paso del alabe (número de alabes por la frecuencia de la velocidad de rotación). Otros indican que afecta a la amplitud de la vibración pico. Todas estas indicaciones pueden ser correctas, ya que la cavitación en la bomba puede producir varias frecuencias de vibración dependiendo del tipo de cavitación, diseño de la bomba, instalación y aplicación. La vibración excesiva por cavitación comúnmente produce fallas en los sellos y/o rodamientos. **Este es el modo de falla más probable en una bomba cavitando.**

- **Daños a los componentes**

- ***Erosión o picaduras***

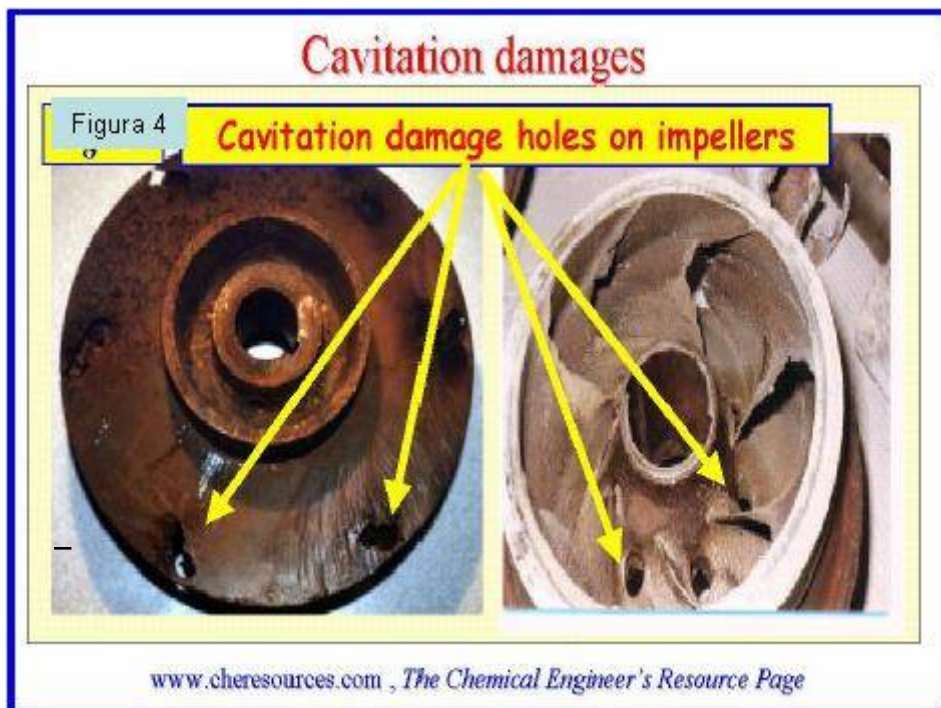
Durante la cavitación el colapso de las burbujas ocurre a velocidades sónicas eyectándose micro chorros de líquido a altísima velocidad (sobre 1000 m/s) con una fuerza suficiente para erosionar componentes de la bomba, particularmente el impulsor. La burbuja es presionada para colapsar desde todos lados, pero si la burbuja está apoyada sobre una pieza de metal como puede ser el impulsor o la voluta, no puede colapsar desde ese lado. Entonces el fluido se mete por el lado opuesto con su alta velocidad y explota contra el metal creando la impresión de que la superficie metálica fue golpeada con un martillo de bola. El daño empieza a hacerse visible en la forma de hendiduras o 'pits' (ver figura 11), las cuales son deformaciones plásticas muy pequeñas (micrométricas). El daño causado por el colapso de las burbujas se conoce comúnmente como erosión o picaduras (pitting) por cavitación. En la foto de la figura 13 se observa su efecto sobre la superficie de un impulsor y un difusor.

Nota.- Si el fluido contiene pequeñas partículas sólidas erosivas (como en bombeo de pulpas minerales), el daño se puede acelerar considerablemente por el efecto de las partículas impulsadas por los pequeños vórtices que se forman en las incipientes picaduras.



La erosión por colapso de burbujas ocurre primeramente como una fractura por fatiga, debido a la repetición de implosiones sobre la superficie, seguida de desprendimiento de material. El efecto es muy similar al de una operación de arenado. Las bombas de alta cabeza son más proclives a sufrir erosión por cavitación, (la fuerza de impacto de las implosiones es mayor), por lo que es un fenómeno mas típico de las bombas de “alta energía”.

Las áreas mas sensitivas a la erosión por cavitación se observan en los lados de baja presión de los alabes del impulsor, cerca de los bordes de entrada. Sin embargo, los daños en el impulsor pueden estar más o menos diseminados. Las picaduras también se han observado en otros puntos de los alabes de impulsión, en los alabes difusores y en la periferia del impulsor. En ocasiones, la cavitación ha sido suficientemente severa para producir perforaciones y dañar los alabes hasta un grado que hace al impulsor completamente inefectivo. La figura 4 muestra un impulsor dañado.



El daño es evidente cerca de la arista externa del impulsor. En esta parte es donde el impulsor desarrolla la presión más alta. Esta presión implota las burbujas cambiando el estado del agua desde gas (vapor) a líquido. Cuando la cavitación es menos severa, el daño puede ocurrir más cerca del ojo del impulsor.

Deformaciones Mecánicas:

Además de la erosión de los componentes, en bombas grandes, la cavitación prolongada puede causar desbalance (debido a una distribución desigual en la formación y colapso de las burbujas) de los esfuerzos radiales y axiales sobre el impulsor. Este desbalance comúnmente lleva a los siguientes problemas mecánicos:

- Torcedura y deflexión de los ejes

- Daño a los rodamientos y roces por la vibración radial
- Daño en el rodamiento de empuje por movimiento axial
- Rotura de la tuerca de fijación del impulsor (cuando la usa)
- Daño en los sellos

Las deformaciones mecánicas pueden arruinar completamente a la bomba y requerir reemplazo de partes. El costo de tales reemplazos puede ser enorme.

– **Corrosión con cavitación**

Frecuentemente la cavitación esta combinada con corrosión. La implosión de las burbujas destruye las capas protectoras dejando a la superficie del metal permanentemente activada para el ataque químico. En esta condición el material puede sufrir un daño considerable aun con niveles bajos de cavitación. La severidad de la erosión puede acentuarse si el líquido mismo tiene agentes corrosivos, como agua con ácidos o gran cantidad de oxígeno disuelto.

Cavitación- un ataque al corazón de la bomba.

Por los efectos que produce, se puede decir que la cavitación **“es un ataque al corazón de la bomba”**

Una investigación y diagnóstico cuidadoso de los síntomas y problemas descritos mas arriba ayuda a detectar el tipo de cavitación y sus causas.

*Sin embargo, **el objetivo fundamental debe ser el de eliminar o a lo menos reducir la cavitación**, considerando que se trata de una condición anormal dentro de la bomba que se produce por la formación y subsiguiente colapso de burbujas de vapor y que las burbujas se forman cuando existe una presión externa sobre el líquido inferior a su presión de vapor.*

Por lo tanto, la cavitación se puede combatir reduciendo la presión de vapor o aumentando la presión exterior sobre el líquido.

La Presión de Vapor se reduce disminuyendo la temperatura del líquido.

En el punto de menor presión dentro de la bomba las burbujas se producen cuando el NPSHa es igual o inferior al NPSHr. (NPSHa = NPSHr)

El NPSHa se puede aumentar actuando sobre cualquiera de los factores de la ecuación N°1.

El NPSHr lo entrega el fabricante y es característico de cada bomba. Generalmente disminuye con el caudal por lo que la cavitación se podría combatir reduciendo el caudal de bombeo. La reducción de caudal generalmente aumenta el NPSHa y reduce el NPSHr.

Si no se puede reducir el caudal ni mejorar el NPSHa, se tendría que sustituir la bomba por otra (apta para la aplicación) de mejor NPSHr (generalmente de mayor tamaño y menor rpm).

En muchas instalaciones el nivel de succión (factor Zm en ecuación 1) es crítico para obtener una relación NPSHa/NPSHr adecuada. Un rango de 0.5 m. o menos puede

hacer la diferencia entre cavitación o no. En estos casos es altamente recomendable implementar un sistema regulador de flujo que permita mantener Z_m dentro de determinados límites. El método más efectivo y universal, para todo tipo de aplicaciones, es controlar el nivel del estanque de succión por medio de un Variador de Frecuencia, que regule automáticamente la velocidad de la bomba (y por ende el caudal) en función del nivel de succión.

Aspiración de Aire

El ingreso de aire al sistema de succión puede confundirse fácilmente con cavitación debido a que genera muchos problemas con síntomas similares (vibración, reducción o bloqueo de flujo, disminución de cabeza, operación errática, etc.). Es una anomalía que no produce el daño típico de pitting, pero que causa grandes problemas al sistema de bombeo y a la operación. El aire puede ingresar directamente al tubo de succión debido a un nivel de líquido muy bajo o puede ser arrastrado por vórtices formados debido a insuficiente sumergencia, en ambos casos (asumiendo que el diseño del sistema es correcto) la solución adecuada es la implementación de un variador de frecuencias para controlar el nivel con la velocidad de la bomba. Los otros puntos de ingreso son flanches con empaquetaduras defectuosas o fallas en los sellos de eje.

Referencias

WARMAN, Slurry Pumping Manual
CHERESOURCES, Centrifugal Pumps by Mukesh Sahdev
GENERAL ELECTRIC, Understanding Pump Cavitation
MECANICA DE FLUIDOS APLICADA, R.L. Mott
CAVITATION IN CENTRIFUGAL PUMPS, Allan R. Budris

Este artículo fue elaborado por:

BORIS CISNEROS H. Ingeniero Consultor

Tel: (56-2) 229 0315

e-mail: bcisneros001@yahoo.es; boriscisneros@hotmail.com