

ESTUDIO DE LA CAVITACION EN LAS BOMBAS CENTRIFUGAS

AUTORES

GUSTAVO E. CALDERÓN MUÑOZ

RAFAEL DEL C. CONTRERAS GÓMEZ

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MINOR EN INGENIERÍA MECÁNICA
CARTAGENA DE INDIAS D.T.
2003**

ESTUDIO DE LA CAVITACION EN LAS BOMBAS CENTRIFUGAS

AUTORES

GUSTAVO E. CALDERÓN MUÑOZ

RAFAEL DEL C. CONTRERAS GÓMEZ

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial
Para optar al título de Ingeniero Mecánico
Director: JULIO CANTILLO TORRES
Ingeniero Mecánico Titulado**

**CORPORACIÓN UNIVERSITARIA TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
MINOR EN INGENIERÍA MECÁNICA
CARTAGENA DE INDIAS D.T.
2003**

DEDICATORIA

Estas palabras fueron hechas para todas aquellas personas que me apoyaron en el transcurso de mi carrera y nunca pensaron que me rendiría al conseguir este logro.

Por otra parte esto va dedicado para mis padres y mis abuelos que con mucho cariño y esfuerzo me ayudaron a salir adelante.

PREFACIO

Con esta primera promoción, deseamos señalar, nuestros agradecimientos a nuestros muchos amigos que espontáneamente nos han honrado con su valioso apoyo e inestimable incentivo para el mejoramiento y divulgación de esta obra.

La rápida evolución tecnológica de nuestros tiempos nos lleva a la introducción de materiales innovadores de particular interés.

Eso fue posible gracias al empeño del Ingeniero Julio Cantillo, asesor de este trabajo y así como de la ayuda de los recursos de la universidad como son la biblioteca y profesores especialistas.

INDICE

Cáp.	Pagina
I. ANTECEDENTES	1
II. NATURALEZA DE LA CAVITACIÓN	1
III. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO	2
III.1. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y NUCLEACIÓN	5
III.2. CONTENIDO DE AIRE	6
III.3. IMPLOSION DE LA BURBUJA	7
IV. CAVITACION EN BOMBAS CENTRÍFUGAS	9
IV.1. GENERALIDADES	9
IV.1.1. ALTURA NETA DE ENTRADA DISPONIBLE(NPSHd)	12
IV.1.2. ALTURA NETA DE ENTRADA REQUERIDA(NPSHr)	14
IV.1.3. ALTURA DE ASPIRACIÓN H_a	14
IV.2. INFLUENCIA DE LA CAVITACIÓN EN LOS PARÁMETROS DE ENTRADA	16

IV.2.1. DIÁMETRO ÓPTIMO A LA ENTRADA DEL RODETE	18
IV.2.2. PRESIÓN ABSOLUTA DE ENTRADA	20
IV.2.3. NÚMERO DE REVOLUCIONES ADMISIBLE MÁXIMO.....	20
IV.3. COEFICIENTE DE THOMA.....	22
IV.4. VELOCIDAD ESPECÍFICA DE ASPIRACIÓN n_a	23
IV.5. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL NPSH _r	26
IV.6. CAUDAL MÍNIMO IMPULSADO POR UNA BOMBA CENTRÍFUGA	27
IV.6.1. TEMPERATURA DEL LÍQUIDO	28
IV.7. CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO EN LA ASPIRACIÓN	29
IV.7.1. AUMENTO DE LA NPSH _d	32
IV.7.2. REDUCCIÓN DE LA NPSH _r	34

INDICE DE TABLAS Y GRAFICOS

GRAFICAS	Pág.
FIG.III.1. Comparación entre ebullición y cavitacion	2
FIG.III.2. Resistencia a la tracción teórica del agua	5
FIG.III.3. Colapso de una burbuja con la subsecuente formación del jet	8
FIG.IV.1. Disminución brusca de las curvas características por el efecto de la cavitacion en una bomba centrífuga	11
FIG.IV.2. Campo de presiones en la aspiración	11
FIG.IV.3. Altura neta de entrada disponible	13
FIG.IV.4. Altura neta de entrada requerida	15
FIG.IV.5. Altura de aspiraciones máxima	15
FIG.IV.6. Datos de curvas de rendimientos potencias y NPSHr de una bomba centrífuga	16
FIG.IV.7. Inductor	24
FIG.IV.8. Velocidades especifica de succión y caudal frente a diversas configuraciones del rodete.....	25

INTRODUCCIÓN

Esta monografía fue hecha con el propósito de comprender el fenómeno de la cavitación, que es un problema importante para el análisis en el diseño de la mecánica de fluidos y la hidráulica.

Se pretende demostrar que los efectos de la cavitación se transmiten a las estructuras próximas reduciendo el rendimiento, pudiendo causar serios daños materiales a las instalaciones, que por otra parte son causantes de la corrosión generadora de partículas de metal. El tema es importante ya que conociendo en sí el problema se puede considerar soluciones que no perturben la continuidad del flujo como lo es disminuir el caudal, la altura manométrica y el rendimiento de la bomba.

El trabajo consiste en el estudio de estos fenómenos, como principales en el diseño de los sistemas hidráulicos; Sus investigaciones buscan disminuir o acabar con este problema.

En una bomba el líquido a fluir tiene una determinada presión de vapor, la energía bruta solo es utilizable hasta dicha presión, a partir de la cual aparece el problema por tal razón existen algunas técnicas que nos ayudaran en el análisis cuando esta presión disminuya.

El criterio adoptado usualmente para el examen de las condiciones de funcionamiento de una instalación (con vista a la prevención o eliminación de la cavitación) se debe a la colaboración de los científicos Federico Bernulli y Frank Thomas.

El estudio de la cavitación es un análisis profundo que se realiza a un montaje hidráulico por esa razón existirán dificultades al momento del funcionamiento, como por ejemplo conocer basado el fabricante el comportamiento y la capacidad de la bomba, el fluido que va a circular, los accesorios del sistema, la temperatura de trabajo, la presión de trabajo, etc.

Siempre que la presión en algún punto de una bomba alcance el límite crítico (tensión de vapor) las condiciones de funcionamiento se vuelven precarias y las máquinas comienzan a vibrar a consecuencia de la cavitación.

Se recomienda para el estudio un análisis no solo físico del comportamiento de la bomba hay que tener en cuenta que la temperatura, el calor específico y el fluido (agua). depende de las condiciones de aspiración y se determina por un incremento máximo admisible de la presión de vapor antes de la evaporación del líquido por lo tanto un estudio químico y metalúrgico son importantes en el diseño y montaje de equipos hidráulicos.

I. ANTECEDENTES

El rodete de una bomba centrífuga que ha funcionado con cavitación presenta un aspecto esponjoso, como carcomido o corroído. Así mismo, se ha dado el caso de que un alabé de una turbina de espesor de 25 mm ha quedado totalmente horadado y corroído por la cavitación en un sólo año.

Antiguamente se creyó que la cavitación no era más que una corrosión química producida por la liberación de aire y de oxígeno disuelto en el líquido a bajas presiones.

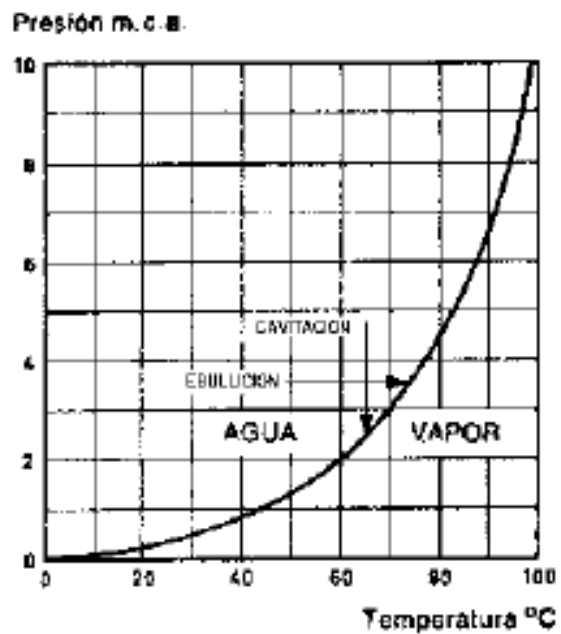
II. NATURALEZA DE LA CAVITACIÓN

Actualmente se sabe que la cavitación es debida principalmente a la acción mecánica de impactos rápidos, a manera de explosiones de las partículas de líquido, aunque no se descarta la posibilidad de acción química corrosiva, ya que su naturaleza no se ha llegado a dilucidar por completo.

Los impactos que se generan son periódicos, es decir, se produce un fenómeno vibratorio que aumenta la erosión del material por fatiga.

En contraste con la ebullición, la cual puede ser causada por la introducción de Calor o por una reducción de la presión estática ambiente del líquido.

La CAVITACION es una vaporización local del liquido, inducido por una reducción hidrodinámica de la presión. (Fig.II.1).comparación entre ebullición y cavitación.



III. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO

La cavitación se produce siempre que la presión en algún punto o zona de la corriente de un líquido desciende por debajo de un cierto valor mínimo admisible.

Esta baja que sufre la presión es debida a los efectos dinámicos de un líquido al escurrir, siguiendo fronteras curvas o alrededor de cuerpos sumergidos.

El fenómeno consiste en un cambio rápido y explosivo de fase líquida a vapor. Si el líquido fluye a través de una región donde la presión es menor que su presión de vapor, éste hierve y forma burbujas. Estas burbujas son transportadas por el líquido hasta llegar a una región de mayor presión, donde el vapor regresa al estado líquido de manera súbita aplastándose bruscamente las burbujas.

El nombre de cavitación es debido a que en la etapa inicial del proceso, pareciese que el flujo presentara cavidades de vapor de agua que crecen rápidamente durante el viaje

Cuando el colapso o implosión de las burbujas se da cerca o en contacto de una pared sólida, las fuerzas que ejerce el líquido al empujar las cavidades crean

presiones muy grandes(hasta de 1000 atm) y localizadas que causan deterioro en la superficie, pues acompaña al fenómeno, fuertes vibraciones y constantes golpeteos.

Si la zona donde chocan las ondas de presión es la misma, el material tiende a debilitarse metalúrgicamente y se inicia una erosión que además de dañar la superficie provoca que ésta se convierta en una zona de mayor pérdida de presión y por ende de mayor foco de formación de burbujas de vapor.

Las burbujas también están sujetas a la difusión de gases disueltos dentro de las cavidades y a la expansión del gas contenido en ellas. Si llamamos "hervir" al fenómeno causado por el aumento de temperatura a presión constante, puede llamar "cavitar" a aquella causada por la disminución de presión a temperatura Constante. Se habla de "Cavitación en Fase Vapor" , cuando es inducida por la reducción de la presión dinámica. Esta cavitación relacionada con los cambios en la presión dinámica es la que tiene lugar en circuitos hidráulicos, turbinas, bombas, Etc. Esta cavitación produce un desgaste en los componentes que se cuantifica por:

- PERDIDA DE PESO

- PÉRDIDA DE VOLUMEN

- NUMERO DE CRÁTERES PRODUCIDO

La cavitación no controlada produce daños serios y hasta catastróficos. El rendimiento de los equipos hidráulicos es afectado por la cavitación, que impone severas condiciones de diseño y operación.

Los efectos no perjudiciales de la cavitación incluyen su uso para limpieza, o en bombas de condensación donde la cavitación puede ser utilizada como regulador de flujo. La cavitación destruirá toda clase de sólidos: los metales duros, concreto, cuarzo, metales nobles, etc.

Sin embargo la cavitación no constituye un fenómeno inevitable, sino un efecto que debe ser juzgado y evaluado desde el punto de vista económico.

III.1 RESISTENCIA A LA TRACCIÓN Y NUCLEACIÓN

De acuerdo a lo expuesto surge el interrogante de cómo aparecen estas burbujas a fin de producir una cavidad en un líquido, debe primero ser estirado y posteriormente desgarrado. Si el líquido es considerado como un sólido, esto es inducido por un esfuerzo de tracción. Por lo tanto, la facultad de un líquido de

soportar este esfuerzo de tracción es llamado **resistencia a la tracción**. La Fig.III.2 muestra la capacidad del agua de tener una presión negativa.

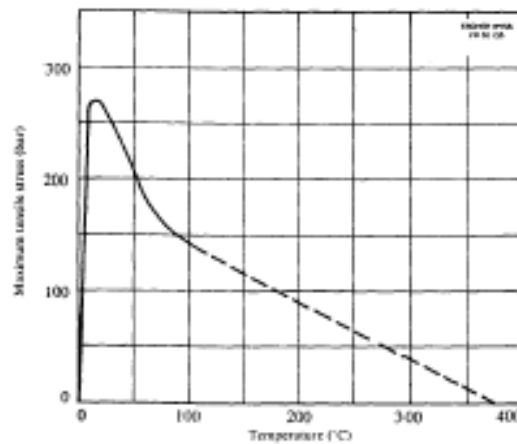


Fig.III.2 resistencia a la tracción teórica del agua

Estos son valores mínimos teóricos para agua absolutamente pura. Así, bajo ciertas condiciones el agua pura puede soportar muy altas tensiones de tracción, o presiones negativas, mucho más bajas que la presión de vaporización. Esta clase de agua, capaz de soportar tensiones de tracción de más de 250 bar a temperatura

ambiente, (125.000 veces más bajas que la presión de vapor) puede ser producida solamente en laboratorios altamente especializados.

Bajo tensiones de tracción un líquido generalmente se separa a la presión de vapor. El hecho de que las tensiones de tracción antes mencionadas, y que el comienzo de la capitación se produzca con el arribo a la tensión de vapor, conduce a la suposición de que las impurezas deben estar presentes en el líquido. Estos son comúnmente llamados **núcleos**.

Estos núcleos son diminutas burbujas de gases adheridas a materiales sólidos presentes en los líquidos, burbujas retenidas en fisuras en los conductos de transporte del mismo, o gases absorbidos por el líquido.

Estos núcleos al ser sometidos a una zona de baja presión comienzan a expandirse. Si aún sigue disminuyendo la presión en una magnitud tal que se alcance la presión de vapor del fluido a la temperatura respectiva, entonces el líquido que rodea a este núcleo (micro burbuja) se vaporiza y comienza a crecer hasta que se hace visible en forma de burbuja.

III.2 CONTENIDO DE AIRE

Los altos contenidos de gas parecen favorecer el comienzo de la cavitación, debido a que originan una mayor cantidad de burbujas. Por otra parte un contenido elevado de aire (presión parcial de aire) disminuye la velocidad de implosión.

Con un contenido bajo de gas se demora el comienzo de la cavitación, ya que la resistencia a la tracción del agua en este caso comienza a jugar un papel considerable.

Para un contenido de un 10% del valor de saturación la cavitación comienza al alcanzar la presión de vapor.

Con elevados contenidos de aire la presión para el comienzo de la cavitación es superior a la presión de vapor, ya que en este caso el crecimiento de las burbujas está favorecido por la difusión de gas en el líquido.

III.3 IMPLOSION DE LA BURBUJA

La bolsa, ya aumentada de tamaño, es arrastrada a una región de mayor presión y finalmente, **implota**. Esta acción periódica está generalmente asociada a un fuerte ruido crepitante.

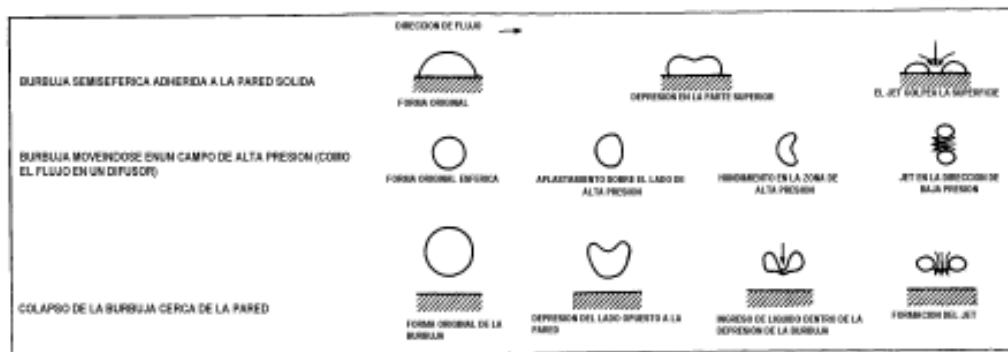
El aumento de tamaño de las burbujas o bolsas reduce los pasajes aumentando así la velocidad de escurrimiento y disminuyendo por lo tanto más aun la presión.

Tan pronto como la presión en la corriente supera la tensión de vapor después de pasar la sección más estrecha, se produce la condensación y el colapso de la burbuja de vapor. La condensación tiene lugar instantáneamente.

El agua que rodea a las burbujas que estallan golpea entonces las paredes u otras partes del fluido, sin amortiguación alguna.

Se ha analizado el desarrollo de una burbuja en la vecindad de una pared, teóricamente, y calculado el tiempo de implosión y la presión demostrándose que la tensión superficial acelera la implosión y aumenta los efectos de la presión.

En estos estudios puede ser tomado como válido que las cavidades no colapsan concéntricamente en la vecindad de una pared. Se forma un 4micro-jet 1que choca con la superficie sólida donde trasmite un impulso de presión, como se ve en la Figura III.3.



FigIII.3 colapso de una burbuja con la subsiguiente formación del jet.

IV. CAVITACION EN BOMBAS CENTRÍFUGAS

IV. GENERALIDADES

Las bombas centrífugas funcionan con normalidad sí la presión absoluta a la entrada del rodete no esta por debajo de un determinado valor; cuando él liquido a

bombear se mueve en una región donde la presión es menor que su presión de vapor, vaporiza en forma de burbuja en su seno, las cuales son arrastradas junto con el líquido hasta una región donde se alcanza una presión más elevada y allí desaparecen.

Si a la entrada del rodete la presión es inferior a la presión parcial del vapor P_v se forman burbujas de vapor que disminuyen el espacio utilizable para el paso del líquido, se perturba la continuidad del flujo debido al desprendimiento de gases y vapores disueltos, **disminuyendo el caudal, la altura manométrica, el Rendimiento de la bomba, etc.** En su recorrido dañan los conductos de paso de líquido en el tubo de aspiración y llegan a una zona en el rodete, de presión superior a la presión de vapor, en la que instantáneamente, toda la fase de vapor pasa a líquido de forma que el volumen de las burbujas pasa a ser ocupado por el líquido en forma violenta, que se acompañan de ruidos y vibraciones, lo cual se traduce en un golpeteo sobre los alabes, que se transmite **al eje, cojinetes, cierres mecánicos, etc.**

Si la bomba funciona en estas condiciones durante cierto tiempo se puede dañar; la intensidad del golpeteo a medida que disminuye la presión absoluta a la entrada

del rodete, se aprecia claramente en las curvas características de la bomba Fig.IV1.

La presión mínima tiene lugar en el punto M, cerca de la entrada del rodete Fig.IV2, por lo que la altura del tubo de aspiración H_a de la bomba centrífuga viene limitada por la cavitación. Lo más frecuente es que al final del tubo de aspiración exista una depresión, punto E, y que la presión siga disminuyendo desde E hasta el interior del rodete, punto M (presión mínima), zona que se encuentra inmediatamente después de la entrada al mismo, siendo ΔP_{EM} la pérdida de carga correspondiente entre E y M.

A partir de M el fluido comienza a notar la influencia del rodete que le comunica una energía cinética relativa, $\frac{w_1^2}{2g}$, aumentando bruscamente su presión, originándose el fenómeno del golpeteo y vibraciones.

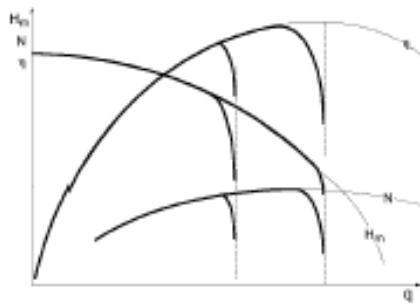


Fig IV.1.- Disminución brusca de las curvas características por el efecto de la cavitación en una bomba centrífuga

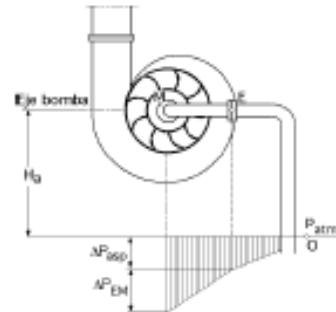


Fig IV.2.- Campo de presiones en la aspiración

La energía o altura específica del líquido al final del tubo de aspiración y entrada en el rodete impulsor, también llamada energía o altura bruta disponible, en condiciones de rendimiento máximo, es:

$$\text{Altura bruta disponible} = \frac{P_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} = \frac{P_M}{\gamma} + \frac{c_1^2}{2g} + \Delta P_{EM}$$

$$\frac{P_E - P_M}{\gamma} = \frac{c_1^2 - v_E^2}{2g} + \Delta P_{EM}$$

Para que a la entrada del rodete se presente la capitación es necesario que la presión $P_M = p_1$, sea igual o menor que la presión parcial de vapor del líquido p_v a la temperatura correspondiente.

Para cada caudal, en el tubo de aspiración existe una presión mínima por encima de la presión de vapor p_v ; por debajo de este valor de p_v la bomba cavitará; ésta presión se puede expresar en metros de columna de líquido (altura neta de entrada en la bomba) y se denomina **altura neta de succión positiva** NPSH, Net Positive Suction Head que, teóricamente, **para una bomba dada y un caudal dado, es constante.**

IV.1.1. ALTURA NETA DE ENTRADA DISPONIBLE, NPSH_d. Para definir esta altura hay que determinar la energía bruta disponible que tiene el flujo a la entrada de la bomba, que se obtiene aplicando la ecuación de Bernoulli entre la entrada al tubo de aspiración, punto O (nivel inferior del líquido), y el final del mismo, punto E, en la forma:

$$\frac{P_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} = \frac{P_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} + H_a + \Delta P_{asp}$$

La altura bruta disponible a la entrada de la bomba es:

$$= \frac{P_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} = \frac{P_0}{\gamma} - H_a - \Delta P_{asp} = \frac{P_{atm}}{\gamma} - H_a - \Delta P_{asp}$$

en la que se ha supuesto que la variación del nivel del líquido es nulo, por lo que, $v_0 = 0$, siendo en general, $p_0 = p_{atm}$.

Como el líquido a bombear tiene una determinada presión de vapor p_v , la energía bruta anterior sólo es utilizable hasta dicha presión p_v , a partir de la cual aparece la cavitación, por lo que se define la **altura neta disponible a la entrada de la bomba NPSH_d** de la forma:

$$NPSH_d = \text{AlturaBruta} - \frac{P_v}{\gamma} = \frac{P_{atm}}{\gamma} - H_a - \Delta P_{asp} - \frac{P_{atm} - P_v}{\gamma} - H_a - k_{asp} q_1^2$$

que representa una familia de parábolas, Fig. IV.3, al ser, $\Delta P_{asp} = k_{asp} q_1^2$, y que no es más que la curva característica de la instalación que sólo afecta al tubo de aspiración, siendo independiente del tipo de bomba instalada.

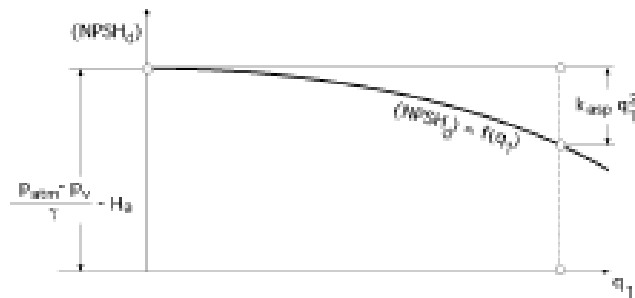


Fig IV.3. - Altura neta de entrada disponible

IV.1.2. ALTURA NETA DE ENTRADA REQUERIDA, NPSHr. La bomba necesita que el flujo disponga en la posición E de un mínimo de energía para hacer él recorrido, sin que aparezca capitación, desde dicha entrada E hasta el punto M de mínima presión en el interior del rodete Fig. IV.2, en el que comienza a recibir Energía; **el límite de esta presión mínima es p_v** . Si se supone que los puntos E y M están al mismo nivel y teniendo en cuenta que p_v es la presión mínima que se puede tener en el punto 1, **la altura bruta a la entrada de la bomba es:**

$$\text{Altura bruta disponible} = \frac{P_E}{\gamma} + \frac{v_E^2}{2g} = \frac{P_1}{\gamma} + \frac{c_1^2}{2g} + \Delta P_{EM} = \frac{P_v}{\lambda} + \frac{C_1^2}{2g} + \Delta P_{EM}$$

La altura neta requerida a la entrada del rodete es, Fig. IV.4:

$$NPSH_r = \text{AlturaBruta} - \frac{P_v}{\gamma} + \frac{P_E - P_v}{\gamma} = \frac{V_E^2}{2g} = \frac{P_v}{\gamma} + \frac{C_1^2}{2g} + \Delta P_{EM} - \frac{P_v}{\gamma} = \frac{C_1^2}{2g} + \Delta P_{EM}$$

ALTURA DE ASPIRACIÓN H_a . Para determinar la altura de aspiración H_a se toma el caudal máximo previsto $q_{m\acute{a}x}$ (que es con el que más riesgo de cavitación existe) sobre el eje de caudales del gráfico suministrado por el fabricante de la bomba, Fig. IV.6.

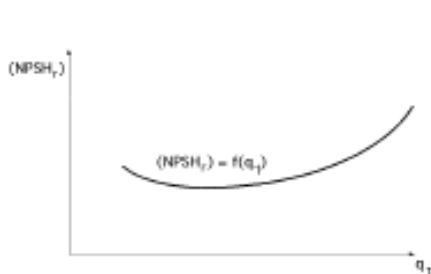


Fig IV.4.- Altura neta de entrada requerida

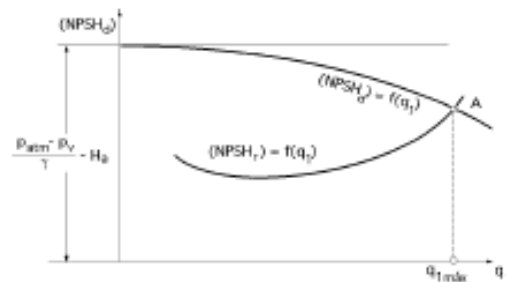


Fig IV.5.- Altura de aspiración máxima

De las infinitas curvas $NPSH_d$ que se tienen en una instalación, función de la altura de aspiración H_a , sólo una pasa por el punto A, Fig. IV.5, verificándose:

$$NPSH_r = NPSH_d = \frac{P_{atm} - P_v}{\gamma} - H_a - \Delta P_{aspm\acute{a}x} \Rightarrow H_a = \frac{P_{atm} - P_v}{\gamma} - \Delta P_{aspm\acute{a}x} - NPSH_r$$

es la máxima altura de aspiración teniendo en cuenta la cavitación, siendo aconsejable disminuir dicha altura en 0,5 m para asegurarnos que ésta no se produzca:

$$H_a = \frac{P_{atm} - P_v}{\gamma} - \Delta P_{aspmáx} - NPSH_R - 0,5$$

que no superará los 6,5 m pudiendo resultar mucho más pequeña e incluso negativa.

Es conveniente que el NPSHr sea lo menor posible, para que la longitud del tubo de aspiración sea mayor, ya que cuanto más pequeño sea el NPSHr, tanto más estable será la bomba en lo que respecta a la cavitación.

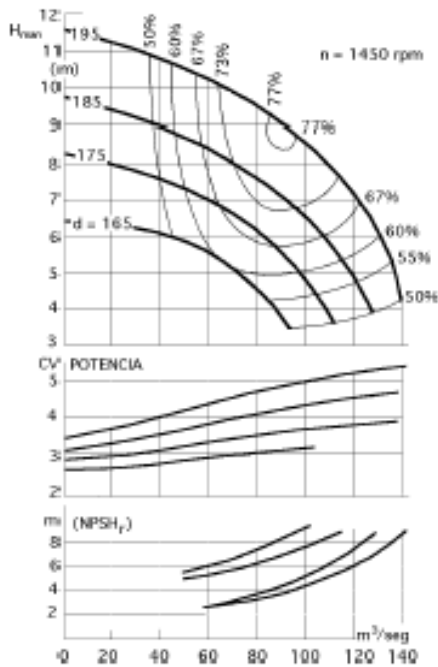


Fig IV.6.- Datos de curvas de colina de rendimientos potencia y NPSH_r de una bomba centrífuga

Que es la máxima altura de aspiración teniendo en cuenta la cavitacion, siendo aconsejable disminuir dicha altura en 0,5 m para asegurarnos que ésta no se produzca:

$$H_a = \frac{P_{atm} - P_v}{\gamma} - \Delta P_{aspm\acute{a}x} - NPSH_R - 0,5$$

que no superará los 6,5 m pudiendo resultar Mucho más pequeña e incluso negativa.

Es conveniente que el NPSHr sea lo menor posible, para que la longitud del tubo de aspiración sea mayor, ya que cuanto más pequeño sea el NPSHr, tanto más estable será la bomba en lo que respecta a la cavitación

IV.2. INFLUENCIA DE LA CAVITACIÓN EN LOS PARÁMETROS DE ENTRADA

El valor del NPSHr se puede obtener en función de los parámetros de entrada, en condiciones de rendimiento máximo, haciendo la siguiente sustitución:

$$\Delta P_{EM} = kq_1^2 = \alpha \frac{W_1^2}{2g}$$

por lo que:

$$NPSH_r = \frac{C_1^2}{2g} + \Delta P_{EM} = \frac{C_1^2}{2g} + \alpha \frac{W_1^2}{2g} = \left. \begin{array}{l} \text{Para } \alpha_1 = 90^\circ; C_1 = C_{1m}; W_1^2 = C_1^2 + U_1^2 \\ C_1 = \frac{q_1}{\Omega_1} = \frac{4q_1}{\pi D_1^2} \\ U_1 = R_1 W = \frac{\pi n D_1}{60} \end{array} \right| =$$

$$= \frac{C_1^2}{2g} + \alpha \frac{C_1^2 + U_1^2}{2g} = \frac{C_1^2(1+\alpha) + \alpha U_1^2}{2g} = \frac{1}{2g} \left\{ \frac{16q_1^2(1+\alpha)}{\pi D_1^4} + \frac{\alpha \pi^2 D_1^2 n^2}{3600} \right\}$$

en las que α es un coeficiente que depende de la forma del álabe y de las condiciones inherentes al paso del líquido del tubo al rodete, **El aumento del número de revoluciones de la bomba implica un aumento del caudal, lo que lleva implícito un aumento de la velocidad c_1 del líquido**, con la consiguiente caída de presión absoluta a la entrada M de los álabes del rodete impulsor, contribuyendo todo ello a la aparición de la capitación, por lo que a veces es necesario limitar el caudal y el número de revoluciones de la bomba.

En estas circunstancias, la pérdida de carga ΔP_{EM} entre la entrada E y el punto M y la velocidad c_1 de entrada en el rodete varían, ya que la altura neta de entrada requerida NPSHr depende del caudal.

Para el caso extremo de bombeo de líquidos a su temperatura crítica, el NPSHr es nulo, ya que el volumen ocupado por la fase líquida y el vapor saturado sería el mismo y al pasar de una fase a otra no existirá variación de Volumen y, por tanto, golpetea.

IV.2.1. DIÁMETRO ÓPTIMO A LA ENTRADA DEL RODETE Si se conocen las condiciones de capitación, se pueden estudiar la corriente fluida a la entrada del rodete y calcular el diámetro D_1 , ya que el NPSHr depende de las velocidades c_1 y 1 , que a su vez, para q_1 y n dados, dependen del diámetro D_1 . Para calcular el valor óptimo de D_1 en estas condiciones, se diferencia la ecuación anterior respecto a D_1 , se iguala a cero, y se obtiene el diámetro óptimo D_1 (óptimo) correspondiente a un NPSHr crítico mínimo, en la forma:

$$\frac{d(NPSH_r)}{dD_1} = \frac{1}{2g} \frac{d}{dD_1} \left\{ \frac{16q_1^2(1+\alpha)}{\pi^2 D_1^4} + \frac{\alpha \pi^2 D_1^2 n^2}{3600} \right\} =$$

$$= \frac{1}{2g} \left\{ \frac{-64q_1^2(1+\alpha)}{\pi^2 D_1^5} + \frac{\alpha\pi^2 D_1 n^2}{1800} \right\} D_1 = D_{1(Optimo)} = 0$$

$$D_{1(Optimo)} = 3,2519 \sqrt[3]{\frac{1+\alpha}{\alpha}} \sqrt[3]{\frac{q_1}{n}} = k_0 \sqrt[3]{\frac{q_1}{n}} = 4,95 \sqrt[3]{\frac{q_1}{n}}$$

En la que k_0 tiene un valor medio igual a 4,4 aunque en cálculos prácticos se recomienda, por posibles sobrecargas de las bombas un valor, $k_0 = 4,95$.

Si se introduce este valor en el NPSHr se obtiene el NPSHr(mínimo):

$$(NPSH_r)_{\min} = \frac{D_{1(optimo)}^2}{2g} \left\{ \frac{16q_1^2(1\alpha)}{\pi^2 D_{1(optimo)}^6} + \frac{\alpha\pi^2 n^2}{3600} \right\} = \frac{k_0^2}{2g} \left(\frac{q_1}{n} \right)^{2/3} \left\{ \frac{16n^2(1+\alpha)}{\pi^2 k_0^6} + \frac{\alpha\pi^2 n^2}{3600} \right\} =$$

$$\frac{k_0^2}{2g} \sqrt[3]{q_1^2 n^4} \left\{ \frac{16(1+\alpha)}{\pi^2 k_0^6} + \frac{\alpha\pi}{3600} \right\} = S \frac{(q_1 n^2)^{2/3}}{2g}$$

Siendo s un coeficiente que depende de α y k_0 de valor $s = 0,02$, para $\alpha = 0,25$, que se puede aplicar a los rodetes corrientes. Cuando aumenta la anchura b_1 a la entrada del rodete, el valor de s disminuye hasta, $s \equiv 0,0125$.

IV.2.2. PRESIÓN ABSOLUTA DE ENTRADA. La presión absoluta de entrada mínima en la bomba es:

$$\frac{P_{E(\text{mínima})}}{\gamma} + \frac{V_E^2}{2g} = NSPH_r + \frac{P_v}{\gamma}$$

$$\frac{P_{E(\text{mínima})}}{\gamma} + NSPH_r + \frac{P_v}{\gamma} - \frac{V_E^2}{2g} = S \frac{(q_1 n^2)^{2/3}}{2g} + \frac{P_v}{\gamma} - \frac{V_E^2}{2g}$$

IV.2.3. NÚMERO DE REVOLUCIONES ADMISIBLE MÁXIMO. Si el diámetro D1 es el óptimo, la condición para que no haya capitación en la bomba es:

$$NSPH_r \geq S \frac{\sqrt[3]{(q_1 n^2)^2}}{2g}$$

$$n \text{ admisible máximo} = \sqrt[4]{\left\{ \frac{2g(NSPH_r)}{S} \right\}^3} = \sqrt[4]{\left(\frac{2g}{S} \right)^3 \frac{(NSPH_r)^3}{\sqrt{q_1}}} =$$

$$= \frac{\sqrt[4]{\left(\frac{2g}{S} \right)^3}}{\sqrt{q_1}} \sqrt[4]{\left(\frac{P_E - P_v}{\gamma} + \frac{V_E^2}{2g} \right)^3} \cong \frac{k_c}{\sqrt{q_1}} \sqrt[4]{\frac{(P_E - P_v)^3}{\gamma}}$$

En la que q1 viene dado en m³/seg, NPSHr en metros, p en kg/cm² y g en kg/dm³ y kc una Constante característica de cada bomba, o coeficiente crítico de cavitación.

$$K_c = \sqrt[4]{\left(\frac{20g}{S}\right)^3}$$

que junto con **s** caracteriza las cualidades de capitación de la bomba, es decir, el grado de predisposición de la misma cuando disminuye la presión absoluta a la entrada.

Cuanto mayor sea el valor de Kc. y menor el de s, tanto menor será la posibilidad de que la bomba entre en capitación. Para las bombas centrífugas corrientes, el coeficiente Kc. oscila entre 800 y 1200 según la forma que tenga la entrada, mayor en las bombas axiales (hélices), y disminuyendo con el número específico de revoluciones, mientras que **s** toma valores comprendidos entre, 0,025 y 0,015.

Para rodetes especiales, que poseen altas cualidades de anticavitación **con ensanchamiento de la parte de entrada del rodete**, el coeficiente Kc. alcanza valores entre 2000 y 2200 mientras que los de s están entre, 0,008 y 0,007.

La exactitud de los cálculos de la cavitación, es decir, el cálculo de $n_{m\acute{a}x}$ ó n_{pe} (mínima) depende de la precisión en la selección de los valores numéricos .

IV.3. COEFICIENTE DE THOMA

Se define el coeficiente σ de capitación de Thoma a la relación entre la energía dinámica disponible al final del tubo de aspiración $V_E^2/2g$ (entrada del rodete) y la altura manométrica máxima $H_{m(\text{máx.})}$ correspondiente al rendimiento manométrico máximo, tomando el NPSHr y la altura manométrica de la bomba H_m en condición de máximo rendimiento.

$$\sigma = \frac{V_E^2}{2gH_{m(\text{máx.})}} = \frac{\left. \begin{array}{l} \text{Altura Bruta Disponible} \\ \frac{P_E}{\gamma} + \frac{V_E^2}{2g} = \frac{P_{atm}}{\gamma} - H_a - \Delta P_{asp} \\ \frac{V_E^2}{2g} = \frac{P_{atm}}{\gamma} - P_E - H_a - \Delta P_{asp} \end{array} \right\}}{H_{m(\text{máx.})}} = \frac{P_{atm} - P_E - H_a - \Delta P_{asp}}{H_{m(\text{máx.})}} = \frac{P_E - P_V}{H_{m(\text{máx.})}}$$

$$= \frac{P_{atm} - P_V - H_a - \Delta P_{asp}}{H_{m(\text{máx.})}} = \frac{NPSH_r}{H_m} \eta_{\text{máx}} \quad \Rightarrow \quad NPSH_{r(\text{máx.})} = \sigma H_{m(\text{máx.})}$$

La altura del tubo de aspiración es:

$$H_a = \frac{P_{atm} - P_V}{\gamma} - \Delta P_{asp} - \sigma H_{m(\text{máx.})}$$

IV.4. VELOCIDAD ESPECÍFICA DE ASPIRACIÓN n_a

De igual forma que la velocidad específica n_q de una bomba indica el tipo de bomba (forma del rodete) la velocidad específica de succión n_a proporciona una idea de las características de aspiración del rodete, definiéndose en la forma:

$$n_a = \frac{n\sqrt{q}}{\sqrt[4]{(NPSH_r)^3}} \eta_{\max}$$

Para el caso particular de un rodete de doble aspiración, el valor del caudal q a considerar es la mitad del total.

Un valor conservador de la velocidad específica de aspiración es 8.000; sin embargo, para caudales elevados se suele tomar un valor no superior a 6.000, aunque algunos fabricantes americanos sitúan este valor en 10.000.

La velocidad específica de aspiración indica el grado de inestabilidad potencial de la bomba a cargas reducidas.

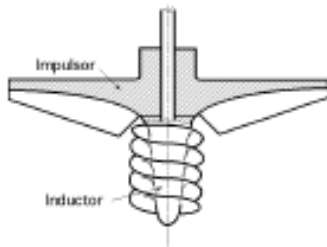


Fig IV. 7.- Inductor

En el punto de rendimiento máximo de la bomba no existe ningún fenómeno de recirculación a la entrada del rodete y el NPSHr de la bomba se mantiene invariable. Sin embargo, a medida que el caudal de la bomba se reduce, y nos alejamos de las condiciones de funcionamiento óptimo (punto de máximo rendimiento) aparecen fenómenos de recirculación en el ojo del rodete que conllevan una cavitación incipiente que pueden originar daños en la bomba. A la hora de analizar una bomba es preciso ver la posición del punto de funcionamiento respecto al punto de máximo rendimiento y qué tipo de campo de regulación de caudal se ha de exigir.

En el caso hipotético de que el caudal coincida prácticamente con el caudal de máximo rendimiento y permanezca invariable, el valor de la velocidad específica de succión de esta bomba carecería de importancia, ya que en estas condiciones de funcionamiento nunca aparecerán problemas de cavitación siempre que se mantenga que el NPSHd sea superior al NPSHr de la bomba.

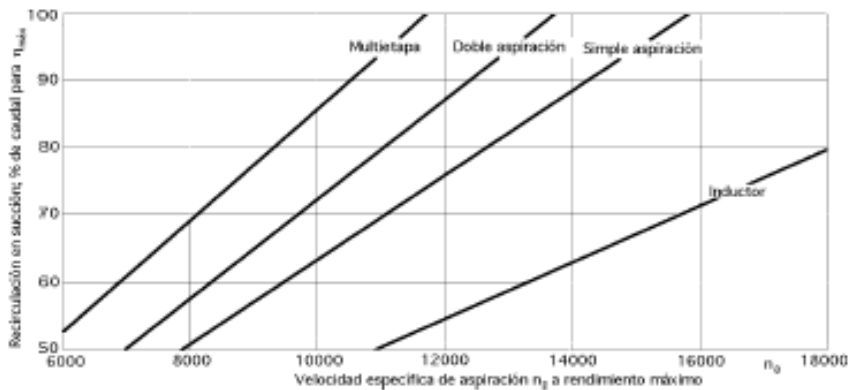


Fig IV.8. - Velocidad específica de succión y caudal frente a diversas configuraciones del rodete

Existen gráficos como el indicado en la Fig. IV.8, en los que se relacionan la velocidad específica de aspiración (abscisas) y el porcentaje del caudal de máximo rendimiento para el que aparece recirculación en la aspiración (ordenadas), frente a distintos tipos de rodetes.

Así, por ejemplo, si se dispone de una bomba de simple aspiración de $n_s = 11.000$ que sobrepasa los límites menos conservadores, no se dudaría en rechazarla; pero suponiendo que el caudal de funcionamiento fuese el 85% del de máximo rendimiento y el caudal mínimo no inferior al 70% del de máximo rendimiento, según la gráfica, esta bomba sería totalmente válida para el servicio que se persigue, por lo que el análisis del parámetro no se debe realizar de forma aislada sino teniendo en cuenta otros factores propios de la bomba y de la regulación del

sistema; en la Fig IV.8 se observa cómo las características de estabilidad mejoran sensiblemente para bombas a las que se les instala un inductor en la aspiración.

IV.5. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL NPSHr

La determinación de la altura neta de succión positiva requerida NPSHr de una bomba se lleva a cabo en un banco de ensayos con instalación de agua en circuito cerrado, ya que la relación {volumen de vapor saturado / volumen de líquido} es muy alta; para el caudal y altura de prueba se somete a la aspiración de la bomba a una reducción paulatina de la presión. Para ello se coloca un vacuo metro a la entrada para medir p_e , una válvula a la salida de la bomba para variar el régimen y un caudalímetro para medir el caudal y la velocidad de entrada:

$$V_E = \frac{q_1}{\Omega_E}$$

Para una cierta altura de aspiración H_a se maniobra gradualmente la válvula hasta que aparezca la cavitación; en ese momento se mide el caudal y la presión p_e y se obtiene el NPSHr correspondiente.

Repitiendo el ensayo con otras alturas de aspiración H_a se obtienen una serie de puntos ($NPSH_r$, q) de la curva característica Fig. IV.4, que primero es decreciente después creciente, variando mucho estas circunstancias de unas bombas a otras.

En el momento en que la altura diferencial o el rendimiento de la bomba cae en un 3% de su valor, se considera que la bomba comienza a cavitarse por falta de $NPSH_d$ en la tubería; en ese instante el $NPSH_r$ iguala al disponible $NPSH_d$.

En algunas circunstancias la bomba no presenta señales anómalas de funcionamiento y sin embargo se puede encontrar bajo condiciones de cavitación; la única forma de saberlo es el estudio estroboscópico de la formación de burbujas a la entrada del rodete, que se lleva a cabo observando por una mirilla la borde de ataque de un álabe, mientras que por otra mirilla entra la luz estroboscópica controlada por el número de revoluciones de la bomba, determinándose la magnitud de las burbujas y de ahí la existencia o no de cavitación, ya que en la práctica no existen funcionamientos exentos de burbujas, por lo que éstas siempre estarán presentes, dependiendo de su tamaño la existencia o no de la cavitación.

IV.6. CAUDAL MÍNIMO IMPULSADO POR UNA BOMBA CENTRÍFUGA

El caudal mínimo de funcionamiento continuo de la bomba viene prefijado por el constructor, por debajo del cual la máquina no debe operar; es función de los NPSH disponible y requerido, de la presión de vapor del líquido y de los esfuerzos que aparecen sobre el impulsor debido a una asimétrica distribución de presiones. A medida que el caudal disminuye, el rendimiento de la bomba también disminuye, lo que se traduce en un aumento de la temperatura del líquido por refrigeración insuficiente y, por lo tanto, de su presión de vapor, por lo que el NPSHd será inferior. El caudal mínimo es aquel para el que el NPSHd disminuido a causa del aumento de temperatura, sea igual al NPSHr por la bomba.

IV.6.1. Temperatura del líquido. El incremento de temperatura ΔT del líquido que atraviesa la bomba se determina por la diferencia entre la potencia absorbida en el eje de la bomba y la potencia hidráulica, despreciando las pérdidas por rozamiento en cojinetes y órganos del cierre, que se transforma en calor que es absorbido por el líquido que circula por la bomba. El incremento de temperatura es:

$$\Delta T = \frac{H_{man}}{427 C_p F} \left(\frac{100}{\eta_{man}} - 1 \right)$$

en la que c_p es el calor específico del líquido bombeado en Kcal/kg°C, y H_{man} en Metros.

El incremento de temperatura depende de las condiciones de aspiración y se determina por el incremento máximo admisible de la presión de vapor antes de la evaporación del líquido; el límite de esta condición se verifica, como sabemos, cuando hay equilibrio entre la presión de vapor p_v y la presión de aspiración p_E . Si la diferencia entre la presión de vapor y la presión de aspiración diese lugar a un incremento de temperatura superior a 8°C se recomienda considerar este valor.

Si no se conoce el valor exacto de la altura manométrica correspondiente al caudal mínimo, se toma en primera aproximación la altura total a válvula cerrada en bombas de flujo mixto y axiales (velocidad específica superior a 4.500), la potencia aumenta a medida que se cierra la válvula de descarga, todo lo contrario a lo que ocurre con las bombas centrífugas normales en las que el motor, diseñado para trabajar en condiciones normales, se puede enfrentar con una carga de hasta dos veces la nominal cuando se arranca la bomba a válvula

cerrada, por lo que siempre este tipo de bombas se arranca a válvula parcialmente abierta.

IV.7. CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO EN LA ASPIRACIÓN

Una bomba centrífuga puede dar una presión en la brida de impulsión considerable pero apenas es capaz de producir una succión en la brida de aspiración, por lo que es necesario hacer llegar previamente líquido hasta la brida de entrada y además inundarla para que pueda empezara trabajar.

El *cebado* de la bomba es el llenado completo de la misma con el líquido que se va a bombear, operación previa a la puesta en marcha del motor.

Si la bomba está siempre sumergida en el líquido (caso de una bomba vertical sumergida), estará siempre cebada y lista para entrar en funcionamiento.

Si el líquido es capaz de llegar a la brida de aspiración por su propio peso, debido a que el depósito de alimentación está a más altura que la bomba, el cebado es sencillo puesto que bastará con abrir la válvula de aspiración y la válvula de una

pequeña línea de purga en la impulsión, que deje escapar el aire que va siendo empujado por el líquido entrante.

Cuando el líquido comienza a salir por la línea de purga, la bomba estará cebada y se cierra esta válvula.

Para el caso en que el depósito se encuentre por debajo del eje de la bomba, conseguir el cebado puede ser complicado, por lo que el llevar a cabo una solución dependerá de las posibilidades que ofrezca el sistema de trabajo, el cual se puede realizar de varias formas, como:

a) Mediante un llenado directo a través de manguera, caldera, etc.

b) Mediante un depósito auxiliar de carga, que sólo se utilizará para realizar el cebado.

c) Mediante conexión directa desde el tanque de impulsión, solución que sólo será satisfactoria para los casos en los que el depósito de impulsión contenga algo de líquido (by-pass).

d) Mediante el uso de un eyector que cree vacío en el interior de la bomba, con lo que el líquido se verá atraído hacia la brida de aspiración por una diferencia de presiones.

El cebado adecuado previo a la puesta en marcha es esencial, ya que sin él cebado la bomba no solamente no funcionará, sino que además puede llegar a sufrir averías al girar en vacío y no existirá líquido a impulsar, puesto es éste mismo el que refrigera y lubrica el rodete.

Una vez arrancada la bomba, ésta puede trabajar en carga o en aspiración según que el nivel del depósito de aspiración esté por encima o por debajo de la misma. Esta diferencia de niveles representa la altura manométrica de aspiración que puede ser positiva o negativa.

A la diferencia de niveles neta se deben restar las pérdidas por rozamiento en tuberías y válvulas que haya entre depósito y bomba cuando la carga es positiva o sumárselas cuando la carga sea negativa.

La NPSH en metros de líquido, es la diferencia entre la altura manométrica de aspiración en la brida de aspiración y la presión de vapor del líquido que se está bombeando en ese mismo punto a la temperatura de succión. Este concepto es de gran importancia a la hora de elegir una bomba para que pueda manejar líquidos en ebullición o próximos a ella, así como líquidos altamente volátiles.

Una NPSH inadecuada (carga de succión demasiado baja) conduce a la aparición de bolsas de líquido vaporizado que ocasionan el fenómeno de la cavitación, influyendo en la buena marcha de la bomba. Cuando una tubería de aspiración tiene insuficiente NPSHd, para una selección óptima de la bomba existen algunos métodos para aumentarla, o reducir la NPSHr, o ambas cosas a la vez.

IV.7.1. AUMENTO DE LA NPSHd . Se puede mejorar en las siguientes situaciones:

a) **Si el líquido está caliente**, se enfría intercalando un refrigerante en la tubería, con lo que la presión de vapor del líquido disminuye. También se puede conseguir aspirando el líquido en algún punto de la corriente, en que esté a temperatura más baja.

b) **Aumentando la altura mínima del líquido en el tanque o elevando éste**. En principio parece la solución más sencilla, salvo que no resulte posible porque el nivel del líquido sea fijo, como en un río, un estanque o un lago, o porque la altura a la que hay que subir el nivel del líquido sea totalmente impracticable, o porque el costo sea excesivo. A menudo se encuentra que elevar el nivel del líquido unos pocos metros permite seleccionar una bomba menos costosa o más eficiente y él

ahorro tanto en el costo inicial, como en el consumo de energía y mantenimiento compensarán los costos adicionales.

c) **Bajando la bomba.**- El costo de poner la bomba más abajo no es prohibitivo como se podría creer, porque permitiría seleccionar una bomba de velocidad más alta, menos costosa y más eficiente.

Un método alternativo sería emplear una bomba vertical con el impulsor debajo del nivel del suelo.

d) **Aumentando el diámetro de la tubería de aspiración** ya que se reducen las pérdidas de carga.

e) **Si entre el tanque y la bomba se intercala otra bomba** que trasiega el caudal en cuestión, que a su vez proporciona una altura diferencial pequeña (justo la necesaria para aumentar el NPSHd en la brida de aspiración de la bomba problema) y que tenga un NPSHr requerido bajo (inferior al disponible), se mejora el NPSHd disponible en la tubería de aspiración de la bomba principal; a la bomba intercalada se la denomina bomba booster. Esta solución es muy eficaz para las bombas en servicio de alta presión, en donde las velocidades permisibles más

altas producirán ahorros en el costo inicial de la bomba principal, así como una mayor eficiencia y, a menudo, un menor número de etapas, que dan mayor Fiabilidad. La bomba booster puede ser de una etapa, de baja velocidad y baja Carga.

f) **Reduciendo las pérdidas por fricción en los tubos de succión.**- Esto se recomienda en todos los casos; su costo se recupera por las mejoras introducidas en la succión y el ahorro de energía.

IV.7.2. REDUCCIÓN DE LA NPSHr.- Se puede reducir:

a) **Verificando un pulido en el tubo de aspiración**, así como en el ojo del rodete

b) **Mediante la utilización de inductores**, Fig. IV.8, (no aconsejable cuando se usan líquidos retransportan sólidos erosivos, "slurry", etc..

c) **Eligiendo una bomba sobredimensionada a la que se somete a un régimen bajo de revoluciones**, siendo el NPSHr proporcional al cuadrado de la velocidad

debido a que la NPSHr requerida por la bomba se reduce conforme disminuye la capacidad, es posible seleccionar una bomba más grande de lo necesario para ese servicio, método que tiene sus riesgos y puede ocasionar resultados indeseables, ya que la capitación produce unas oscilaciones de presión que si no se cortan dañarán la bomba.

El líquido debe entrar en la bomba en condiciones lo más alejadas posibles de su punto de ebullición. La entrada al ojo del rodete fuerza la velocidad del líquido lo que ocasiona un descenso de presión. Si se está cerca del punto de ebullición, al caer la presión se producirán burbujas de vapor que al entrar en el rodete producen capitación; en estas circunstancias el rodete se ve sometido a una intensa vibración que lo destruirá si no se para.

Para evitar la cavitación hay que disponer siempre de una línea de aspiración amplia, evitando los codos y válvulas innecesarias, vigilando la temperatura de entrada a la bomba del líquido. En algunos casos se dispone en la línea de aspiración de una inyección de líquido frío con el único objeto de rebajar la Temperatura.

d) **En bombas de velocidad específica alta, aumentando el diámetro del rodete.**- Esta solución reduce la NPSHr porque disminuye la velocidad de entrada al impulsor. Una velocidad baja puede tener muy poco efecto en el rendimiento de la bomba, en su punto de máxima eficiencia o cerca del mismo, pero al funcionar con capacidad parcial puede ocasionar un funcionamiento ruidoso, borbotos hidráulicos y desgastes prematuros.

e) **En aquellas situaciones en que el tubo de aspiración fuese demasiado largo,** se recurre a tipos de rodetes en los que mediante un **by-pass** se produce una recirculación del líquido a bombear, que permite trabajar con valores del NPSHr relativamente pequeños.

f) **Empleando velocidades más bajas.**- Una vez que se ha seleccionado un valor razonable de la velocidad específica de succión, cuanto más baja sea la velocidad de la bomba, menor será la NPSHr. El problema es que, para el mismo servicio, una bomba de baja velocidad es más costosa y menos eficiente.

LISTA DE SÍMBOLOS

ATM --Atmósfera

BAR--- Bares

PM ----Presión cerca de la entrada del rodete de la bomba

PE ----Presión al final del tubo de aspiración de la bomba

VE ----velocidad al final del tubo de aspiración de la bomba

Y -----Peso específico del fluido

C1 ----Velocidad inicial del fluido

Po -----Presión a la entrada del tubo de aspiración de la bomba

Vo -----Velocidad a la entrada del tubo de aspiración de la bomba

Ha -----Altura del tubo de aspiración de la bomba

Pv -----Presión de vapor del fluido

Patm --Presión atmosférica

α -----Coeficiente que depende del alabe de la bomba

W1-----Sumatoria de la velocidad inicial del fluido y la velocidad lineal dada por las revoluciones de la bomba

q1-----Caudal del fluido

η -----Numero de revoluciones de la bomba

D1 -----Diámetro en la entrada del rodete

Ω 1 -----Área perpendicular al caudal en la entrada del rodete

W -----Velocidad angular

K_o -----Coeficiente que tiene un valor medio igual a 4,4 aunque por sobrecargas en la bomba se recomienda 4,95

S -----Coeficiente que depende de K_o y α

σ -----Coeficiente de Thoma

HMmax--Altura manométrica máxima

n_a -----Velocidad específica de aspiración

CPf -----Calor específico del líquido bombeado

CONCLUSION

Cuando un líquido en movimiento roza una superficie se produce una caída de presión local, y puede ocurrir que se alcance la presión de vaporización del líquido, a la temperatura que se encuentra dicho fluido. En ese instante se forman burbujas de vapor. Las burbujas formadas viajan a zonas de mayor presión e implotan, este fenómeno recibe el nombre de cavitación.

La implosión causa ondas de presión que viajan en el líquido y las mismas pueden disiparse en la corriente del líquido o pueden chocar con una superficie, si la zona donde chocan las ondas de presión es la misma, el material tiende a debilitarse metalúrgicamente y se inicia una erosión que además de dañar la superficie provoca que ésta se convierta en una zona de mayor pérdida de presión y por ende de mayor foco de formación de burbujas de vapor.

La cavitación produce un desgaste en los componentes que se cuantifican por pérdida de peso, pérdida de volumen, números de cráteres producidos. Sin embargo existen efectos no perjudiciales que la incluyen como uso de limpieza, o en bombas de condensación donde la cavitación es utilizada como regulador de flujo. La cavitación destruirá toda clase de sólidos como los metales duros, concreto, cuarzo, metales nobles, etc.

La formación de las burbujas es importante como estudio ya que esta interrogante surge desde hace varios años , el liquido se considera como un sólido , lo que nos dice que este esta inducido por un esfuerzo de tracción , y la facultad de soportar este esfuerzo es llamado resistencia a la tracción ; La cantidad de aire que aparece en grandes masas ayuda a que la cavitacion se genere , ya que produce una gran cantidad de burbujas que por ultimo al aumentarse la bolsa , es arrastrada a una región de mayor presion con el fin de implotar .

Las bombas centrífugas son los principales equipos que se busca disminuir la cavitacion , por esa razón existieron estudios que determinaron las condiciones propias del funcionamiento de una bomba con un sistema hidráulico.

Cuando el liquido a bombear en la entrada del rodete se encuentra con una presion que es inferior a la presion parcial de vapor , se forman las burbujas, estas disminuyen el espacio utilizable para el paso del liquido , esto perturba la continuidad del flujo debido al desprendimiento de gases y vapores disueltos , disminuyendo el caudal , la altura manométrica , el rendimiento de la bomba , etc.

Para comprender este fenómeno en las bombas centrífugas hay que tener en cuenta lo que se debería conocer en el estudio .

Altura Neta de Succion Positiva (NPSH), recibe este nombre a la cantidad en exceso respecto a la suma de las cargas sobre la presion de vapor del liquido que se bombea , en donde (NPSH) tiene que ser mayor que cero.

Hay que distinguir lo dicho anteriormente con lo que es el (NPSH)disponible y (NPSH)requerido, el primero es una característica del sistema o instalación en el que se emplea la bomba centrífuga , representa la diferencia entre la carga absoluta de succión existente y la presion de vapor del liquido a la temperatura que prevalece.

El segundo es una función del diseño de la bomba representa el margen mínimo requerido entre la carga de succión y la presion de vapor del liquido , tanto el primero como el segundo varían según la capacidad.

El valor del (NPSH)requerido se puede obtener en función de los parámetros de entrada en condiciones de rendimiento máximo , en donde va existir un coeficiente que dependerá de la forma del alabe .

El diámetro optimo a la entrada del rodete se debe conocer y también saber la corriente fluida a la entrada del rodete ya que el (NPSH)req. depende de las velocidades que para un caudal depende del diámetro , el numero de revoluciones admisible máximo que en si esta relacionado ya que si el diámetro es optimo existirá condiciones para que no haya cavitacion en la bomba .

No olvidemos los estudios hechos por el científico Thomas que buscaba relacionar la energía dinámica disponible al final del tubo de aspiración y la altura manométrica máxima correspondiente al rendimiento manométrico máximo, tomando el (NPSH) requerido y la altura manométrica de la bomba H_m . condiciones de máximo rendimiento.

BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA, A. G. - Manual de Hidráulica, México D.F

BALLOFFET, A. GOTELLI, L.M. e MEOLI, G.A. - Hidráulica, B. Aires

BRANCO, A. G. - Manual Elemental de Hidráulica, Lisboa

I.C.O.N.T.E.C. - Normas Técnicas y Especificaciones

PERRAZO, R. J. - Técnica de Laboratorios Hidráulicos, B. Aires

PAGINAS WEB

www.fim.utp.ac.pa/Laboratorios/Turbomaquinaria/bombas-practicas.html - 30k

www.ing.unne.edu.ar/pub/maqhidciv.pdf

www.construir.com/Econsult/Construr/Nro69/ruidos_canerias/ruidosok.htm - 51k

www.unq.edu.ar/acad/2c_2003/arquitectura_navai.doc