

# CONCEPTO DE ALTURA NETA POSITIVA DE ASPIRACIÓN (ANPA) Y CURVA ANPA-Q

## 1- OBJETIVO Y GENERALIDADES

El objetivo central es el de seguir brindando, continuando los artículos precedentes, aplicaciones importantes de la expresión de Bernoulli.

En el caso del presente artículo, la aplicación tiene lugar para estudiar, con cierta profundidad, el concepto de Altura Neta Positiva de Aspiración, divulgada vastamente en la nomenclatura castellana como ANPA y en la inglesa como NPSH (Net Positive Suction Head) o NPSP (Net Positive Suction Pressure).

Es muy usual encontrar en la bibliografía especializada, la explicación del tema en forma de definición, lo que hace bastante complicada, su interpretación. En cambio la misma es clara y evidente, cuando se procede a deducir el concepto, a través de la **aplicación de la expresión de Bernoulli a determinadas secciones del tubo de aspiración de una instalación de bombeo.**

Es de destacar que, como es previsible, en las tuberías de aspiración tienen lugar presiones relativas negativas, por lo que resulta evidente que el planteo de la expresión de Bernoulli deberá realizarse en términos absolutos, es decir adicionando la presión atmosférica en metros de columna de agua, a los términos de presión relativa, que hasta ahora hemos utilizado en los artículos precedentes.

Dado lo interesante del tema, no solo se abarca en el presente artículo su deducción e interpretación a partir de la expresión de Bernoulli, sino que además se incursiona en la obtención experimental de su curva característica, en función del caudal (curva ANPA - Q) y en el proceso de verificación de la altura de aspiración de una bomba correctamente instalada para evitar el fenómeno de cavitación.

## 2- DEFINICIÓN CONCEPTUAL DE ANPA

En la Figura 1 se esquematiza un corte de una bomba según un plano que contiene al eje. La velocidad en el tubo de aspiración es  $U$  y la energía cedida al eje de la bomba, hace que el líquido sea acelerado hasta la velocidad  $C_1$  en la sección de ingreso a los álabes.

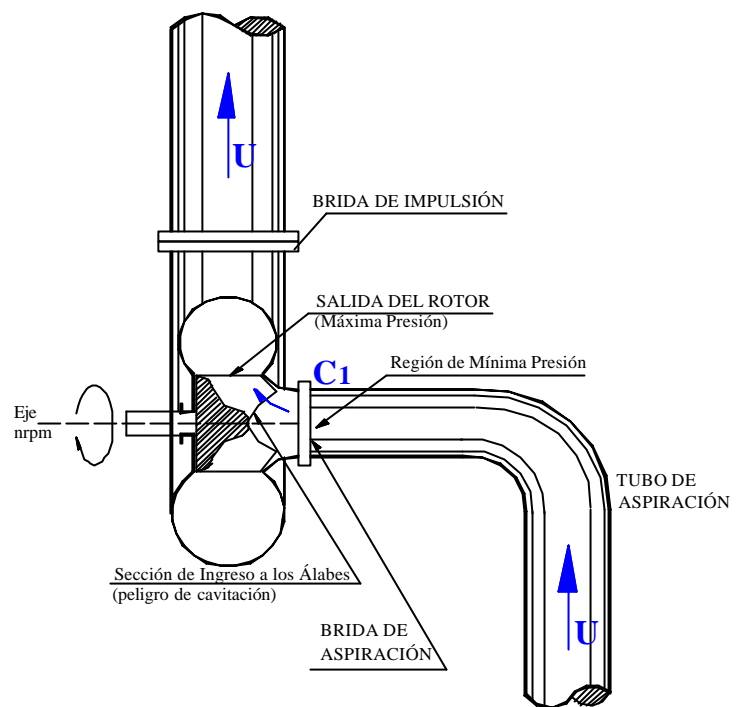
La teoría y la práctica demuestran que la bomba centrífuga origina una depresión en la zona de ingreso a los álabes que posibilita la succión del líquido a través de la tubería de aspiración. Una vez que recibe la energía del exterior, el líquido aumenta su presión hasta alcanzar el valor de la llamada **“altura manométrica”**. Es decir que en la sección de salida del rotor la presión alcanza los valores máximos (ver artículo precedente en el número anterior de la revista).

En resumen, el proceso es el siguiente:

La energía provista por el motor a la bomba implica una aceleración desde  $U$  hasta  $C_1$ , lo que origina una caída de presión (a valores de presión relativa negativa) responsable del efecto de succión que tiene lugar en el tubo de aspiración.

Una vez ingresado el líquido al rotor, recibe la energía externa, que se traduce en un aumento violento de la presión hasta alcanzar la altura manométrica.

Analicemos lo que ocurre en las inmediaciones del ingreso a los álabes. La presión de por sí es baja, y si lo fuera tanto que posibilite la evaporación del agua, se formarán burbujas de vapor que un instante después, al ingresar al rotor, se encontrarán en una zona de alta presión, que obliga a un condensado prácticamente instantáneo de las burbujas de referencia.



**Figura 1**  
Corte de una Bomba

Este condensado súbito se produce a través de un complejo proceso que da, como resultado del mismo, un ataque a las partes metálicas que debilitan su estructura molecular y pueden llevar al colapso del material en las inmediaciones del fenómeno. El mismo, el que debe ser dentro de lo posible evitado, se denomina “**cavitación**”.

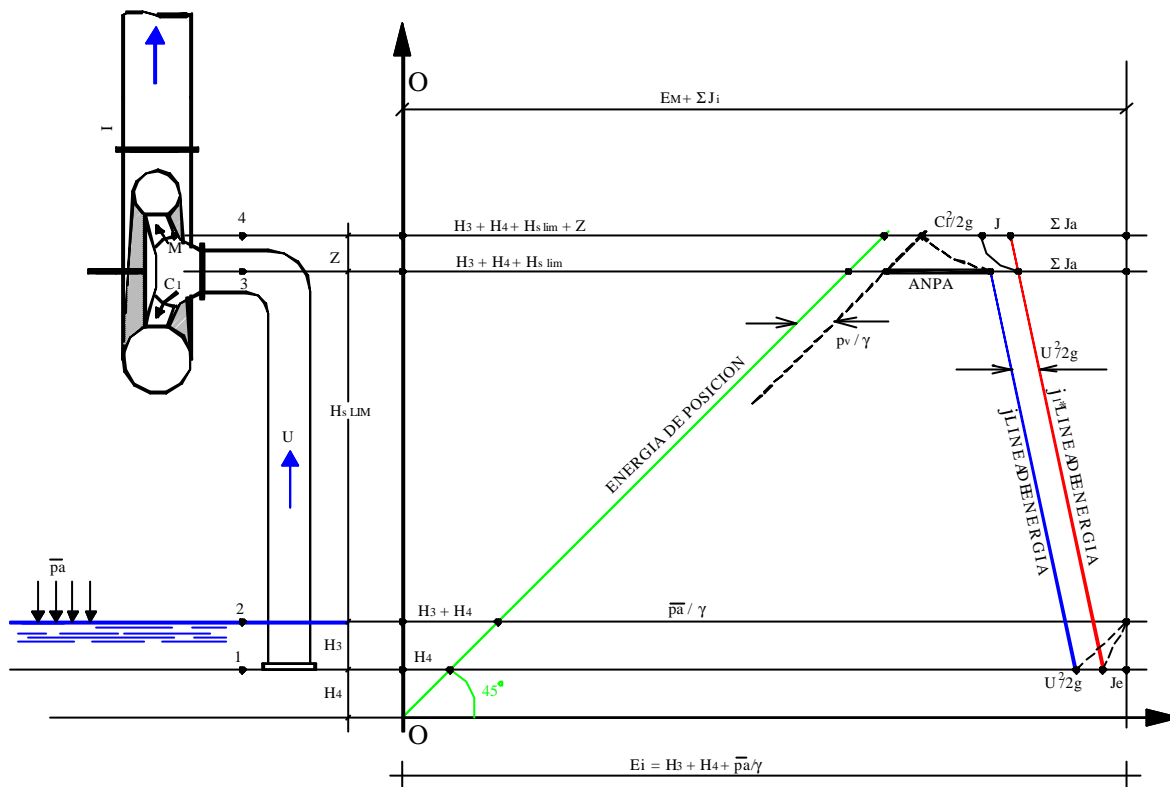
Cuando una bomba “cavita” se produce un sordo ruido característico, a la vez que la bomba no funciona de acuerdo a los requerimientos, e incluso se acorta, muchas veces drásticamente, la vida útil del rotor.

El proyectista de las estaciones de bombeo debe tener muy presente el fenómeno de referencia y evitarlo, considerando el criterio que a continuación se desarrolla.

Para ello debemos definir previamente el concepto de **Altura Neta Positiva de Aspiración**:

“...ANPA es la presión mínima requerida en el eje de la sección de la brida de aspiración, tal que no se produzca cavitación en la sección de ingreso a los álabes del rotor...”. Es decir que, si la presión en el eje baja a valores menores que los de **ANPA**, irremediablemente tendremos cavitación en el ingreso a los álabes.

Con el objeto de precisar esta definición, se remite al lector a la Figura 2, en la que se ha elegido la instalación de la bomba con eje horizontal, para que los conceptos resulten lo más generales posibles. En ese caso resulta muy útil representar las alturas de energía por unidad de peso del líquido que circula (Teorema de Bernoulli) referidas a un eje vertical O-O.



**Figura 2**  
Tubo de aspiración en una instalación de bombeo

En la figura puede apreciarse claramente porque al ser el eje horizontal, queda evidenciado el punto “más elevado del álabe en la sección de ingreso”, indicado como M, a la altura z por sobre el eje de la brida de aspiración. Obviamente al constituir el punto más elevado será el de menor presión posible y el más susceptible de presentar situaciones propicias para el fenómeno de cavitación.

Para las instalaciones de bombas de eje vertical, el nombrado punto no queda evidenciado. Por ello y dado que z (aún en las instalaciones de eje horizontal) es relativamente pequeño, generalmente las referencias, **con criterio de aproximación tecnológica, se hacen con respecto a la brida de aspiración**

Ello no obstante, para evidenciar claramente los conceptos expuestos en la forma más general posible, es necesario presentar el punto M en la forma descrita en la figura de referencia.

**3- DEDUCCIÓN DEL CONCEPTO DE ANPA**

En dicha Figura 2, al plantear la expresión de Bernoulli entre los puntos 3 y 4 se obtiene:

$$H_3 + H_4 + H_{\text{Slim}} + \frac{\overline{P_v}}{\gamma} + \text{ANPA} + \frac{U_1^2}{2g} + \sum J_a = H_3 + H_4 + H_{\text{Slim}} + Z + \frac{\overline{P_v}}{\gamma} + \frac{C_1^2}{2g} + J + \sum J_a$$

Simplificando y despejando:

$$\boxed{\text{ANPA} = Z + J + \frac{C_1^2 - U_1^2}{2g}}$$

Por lo que ANPA es, como ya se mencionó, la energía de presión disponible en la brida de aspiración, por encima de la presión de vaporización, necesaria para elevar al líquido en la altura Z, y acelerar la masa líquida desde la velocidad en la brida ( $U_1$ ) hasta la velocidad en el punto de mayor posibilidad de cavitación ( $C_1$ ) venciendo la resistencia J (interna de la bomba) y sin que se produzca cavitación en el punto “M” (más comprometido).

La teoría y la experimentación prueban que ANPA es una función creciente con los valores del caudal, tal como se ilustra en la Figura 3, en la que puede distinguirse la curva ANPA-Q, como una de las 4 características que debe brindar el fabricante al usuario.

#### 4- CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS Y CURVA ANPA-Q

El fabricante brinda al usuario cuatro curvas características de las bombas que oferta. Constituyen las funciones H,  $\eta$ , N y ANPA, en función del caudal Q, esta última es la que estudiaremos en detalle.

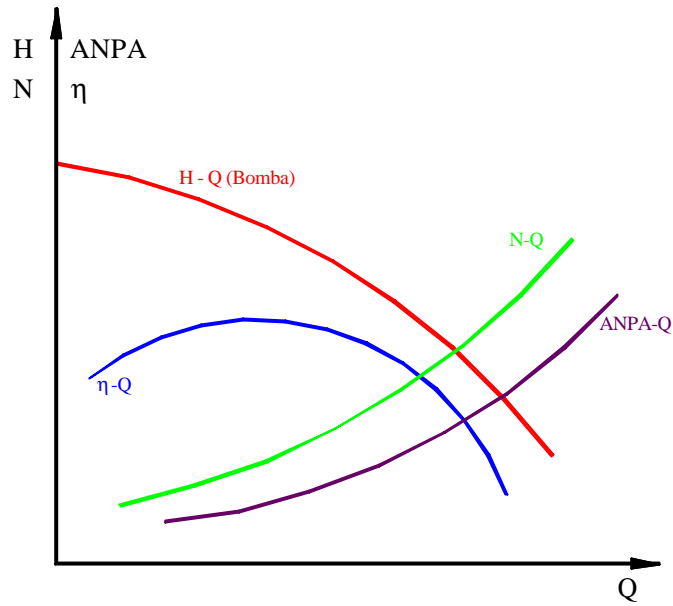
En general, la forma de estas cuatro curvas es similar a las de la Figura 3

La característica principal es la curva H-Q que brinda la altura manométrica de la bomba para cada abscisa, es decir para cada caudal, y para el número de revoluciones nominal.

La curva  $\eta$ -Q brinda el rendimiento en función del caudal y, obviamente, el caudal de diseño de la instalación debe verificar buen rendimiento de la bomba.

La curva N-Q da los valores de la potencia absorbida para cualquier caudal elevado a la correspondiente altura manométrica.

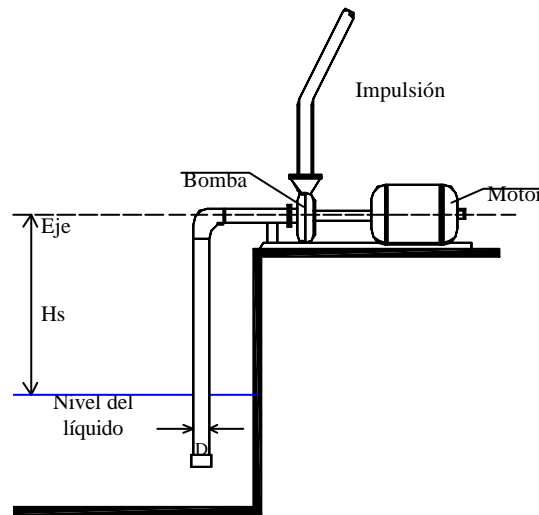
El concepto de ANPA y su curva característica merecen un tratamiento especial.



**Figura 3**  
Curvas Características de la Bomba

**4-1- CONCEPTO DE “ALTURA LÍMITE DE ASPIRACIÓN”, ANPA REQUERIDO Y ANPA DISPONIBLE.**

Se define como “altura de aspiración” al valor  $H_s$  medido desde la superficie del agua hasta el nivel del eje de la bomba cuando éste es horizontal. En el caso de eje vertical, la “altura de aspiración  $H_s$ ” se mide desde el nivel del líquido hasta la sección de la brida de aspiración.



**Figura 4**  
Altura de Aspiración (Positiva)

Cuando más alta es la altura de aspiración, mayor es la depresión en la zona de ingreso al rotor. La depresión máxima teórica será el vacío total, es decir  $-10,33$  m.d.c.a. (al nivel del mar),

por lo que el límite teórico de la altura de aspiración será ese valor. Pero, evidentemente, las pérdidas de energía, la necesidad de mantener un valor de velocidad en el tubo de aspiración, probables mayores cotas que los del nivel del mar y la previsión del fenómeno de cavitación reducen este valor teórico a un valor práctico. Este valor se deduce de la Figura 2, planteando Bernoulli entre los puntos 2 y 3:

$$H_3 + H_4 + \frac{\overline{P}_a}{\gamma} = H_3 + H_4 + H_{S\lim} + \frac{\overline{P}_v}{\gamma} + ANPA + \frac{U_1^2}{2g} + \sum Ja$$

Despejando entonces  $H_{S\lim}$  se obtiene:

$$H_{S\lim} = \frac{\overline{P}_a - \overline{P}_v}{\gamma} - \left[ ANPA + \frac{U^2}{2g} + \sum Ja \right]$$

En la que se tiene:

- $H_{S\lim}$  es la “altura de aspiración límite”.
- $\overline{P}_a$  es la presión atmosférica, función de la altura del lugar de emplazamiento.
- $\overline{P}_v$  es la presión de vaporización, función de la temperatura del agua.
- ANPA es el valor de la presión mínima a la altura de la brida de aspiración, que garantiza evitar el fenómeno de cavitación.
- $U_1$  es la velocidad media en el tubo de aspiración para el caudal de diseño.
- $\sum Ja$  es la suma de todas las pérdidas existentes en la tubería de aspiración.

Evidentemente, para que la bomba no cavite, debe cumplirse la condición de que la “altura de aspiración” de la bomba instalada sea menor o igual que la “altura límite” que surge de la expresión anterior, es decir:

$$H_s \leq H_{S\lim}$$

Es digno de ser destacado el hecho que para el caso teórico de que la instalación implique exactamente la Altura Límite, el ANPA es denominado como “**ANPA requerido**”, y es el que surge de todas las explicaciones, ecuaciones y figuras precedentes.

Es interesante tener en cuenta una vez más, como la interpretación de las energías unitarias y de las presiones como “**segmentos de altura líquida**” (ver artículo de la revista 40, página 59), posibilitan una interpretación sencilla y “visible” de la necesaria disminución del ANPA a medida que sube el tubo de aspiración hasta alcanzar el valor límite. En efecto vasta apreciar en la Figura 2, que al ser la energía constante y representada por el segmento total, como  $H_s$  crece, el término de energía cinética se mantiene constante al no variar el diámetro, y el término de energía perdida también crece en forma acumulativa con  $H_s$ , al término de presión solo le es posible decrecer, para mantener así la constancia del segmento representativo de la energía total.

En el caso de que la instalación, tal como corresponde, se realice con valores de Altura de Elevación menor que la límite, es fácil deducir que en el plano que contiene al eje en la altura de la brida de aspiración, el valor de la presión por encima de la de vaporización, será mayor que el requerido, y tanto mayor cuanto menor es la altura con respecto a la límite. En este caso el ANPA es el denominado “**ANPA Disponible**”.

Entonces también resulta que la condición de verificación a la cavitación puede escribirse

$$\mathbf{ANPA}_{\text{Disponible}} > \mathbf{ANPA}_{\text{Requerido}}$$

Si en la expresión de  $H_{s\text{ lfm}}$  se reemplaza a ésta por la altura de aspiración menor  $H_s$ , y además se despeja el valor del  $\mathbf{ANPA}_{\text{Disponible}}$ , luego de operar y agrupar convenientemente, se obtiene

$$\mathbf{ANPA}_{\text{Disponible}} = \frac{(\bar{p}_a - \bar{p}_v)}{\gamma} - \left( H_s + \frac{U^2}{2g} + \sum J_a \right)$$

#### 4-2- DETERMINACIÓN DE LA CURVA $\mathbf{ANPA}_{\text{Requerido}} - Q$

Si en la expresión anterior se considera  $H_{s\text{ lfm}}$  en vez de  $H_s$ , el  $\mathbf{ANPA}$  que se obtiene es el requerido, con lo que la expresión se convierte en

$$\mathbf{ANPA}_{\text{Requerido}} = \frac{(\bar{p}_a - \bar{p}_v)}{\gamma} - \left( H_{s\text{ lfm}} + \frac{U^2}{2g} + \sum J_a \right)$$

Por otra parte de la Figura 2 se obtiene que la mínima presión absoluta en el eje de la brida de aspiración, a fin de prevenir la cavitación en el punto M, debe ser

$$\frac{\bar{p}_v}{\gamma} + \mathbf{ANPA} = \frac{\bar{p}_B}{\gamma}$$

Si se reemplaza  $\mathbf{ANPA}_{\text{Requerido}}$  por la expresión anterior, resulta

$$\frac{\bar{p}_B}{\gamma} = \frac{\bar{p}_a}{\gamma} - \left[ \frac{U_1^2}{2g} + \sum J_a + H_{s\text{ lfm}} \right]$$

Pero, por otra parte la presión absoluta en B, resulta de sumar a la presión relativa en B la presión atmosférica, lo que en símbolos resulta

$$\bar{p}_B = p_B + \bar{p}_a$$

Por lo que, reemplazando en la anterior, la presión relativa en B resulta

$$\frac{p_B}{\gamma} = - \left[ \frac{U_1^2}{2g} + \sum J_a + H_{s\text{ lfm}} \right]$$

La expresión anterior puede ser medida con un vacuómetro conectado a la brida de aspiración. Por lo que el valor del corchete, puede medirse para cada valor del caudal generado en forma variable, en un banco de pruebas. Reemplazando se obtiene finalmente

$$\text{ANPA} = \frac{\bar{p}_a - \bar{p}_v}{\gamma} + \frac{p_B}{\gamma}$$

La que constituye la expresión que posibilita el trazado, en forma experimental, de la curva característica **ANPA-Q**.

#### **4-3- VERIFICACIÓN DEL ANPA REQUERIDO**

El valor del **ANPA**<sub>Disponible</sub> debe resultar mayor que el que se obtiene de la curva característica **ANPA- Q** provista por el fabricante y correspondiente al valor del caudal obtenido de la intersección de las curvas características de la bomba y de la instalación.

La curva característica de la instalación y el punto de funcionamiento que constituye la intersección de referencia se obtienen como sigue:

La curva de la instalación se obtiene de la expresión de la “Altura manométrica” dada por la ecuación (ver artículo previo en el número anterior):

$$H_m = H_T + \Sigma \Delta J$$

Se recuerda que en la expresión anterior,  $\Sigma \Delta J$  incluye a todas las pérdidas de la instalación, sean éstas generales o localizadas y  $H_T$  es el desnivel entre los reservorios  $R_1$  y  $R_2$ , que se mantiene constante cuando el escurrimiento es permanente.

**El propósito buscado es el de transformar la expresión de  $H_m$  para ponerla en función de  $Q$ , y poder representarla en el diagrama H-Q.**

**Así se podrá determinar el punto de funcionamiento de la instalación, en su intersección con la característica H-Q de la bomba.**

Para evaluar las pérdidas unitarias conviene usar cualquier expresión empírica (Con el fin de evitar las típicas iteraciones que implican las expresiones racionales). Se adopta la ecuación de Hazen y Williams:

$$j = \frac{1}{(0.275 C)^{1.85}} \frac{Q^{1.85}}{D^{4.85}}$$

Para determinar la pérdida  $\Delta J$  en un tramo de longitud  $L$ , se multiplica la anterior por la suma  $L + L_e$ , donde  $L_e$  es la “longitud equivalente” de los accesorios incluidos en el tramo en estudio, es decir:

$$\Delta J = j(L + L_e) = \frac{(L + L_e)}{(0.275 C)^{1.85}} \frac{Q^{1.85}}{D^{4.85}}$$

Considerando para la aspiración y la impulsión propiamente dicha la posibilidad de diámetros y materiales distintos, para mayor generalidad de la expresión a obtener, se tiene:

$$\Delta J = \left[ \frac{(L_a + Le_a)}{(0.275 C_a)^{1.85} D_a^{4.85}} + \frac{(L_i + Le_i)}{(0.275 C_i)^{1.85} D_i^{4.85}} \right] Q^{1.85}$$

en la que los subíndices *a* e *i* indican “aspiración” e “impulsión” respectivamente.

Finalmente, la expresión queda:

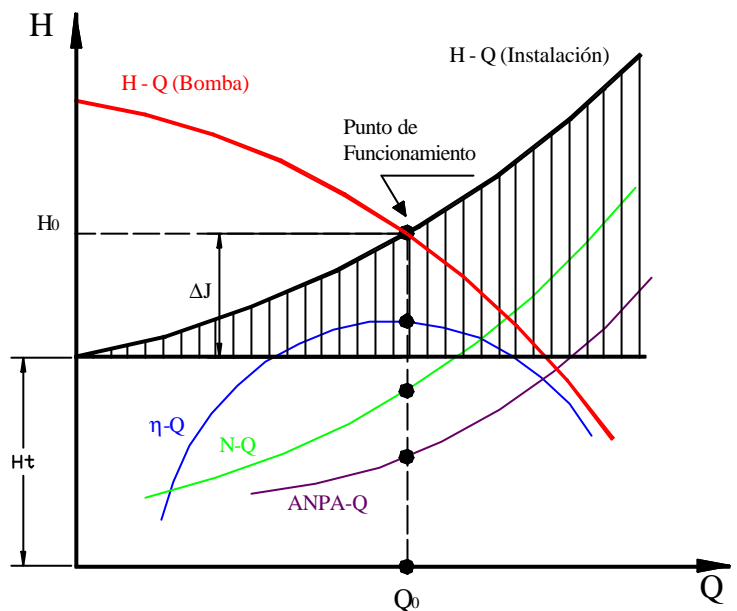
$$H_m = H_T + \left[ \frac{(L_a + Le_a)}{(0.275 C_a)^{1.85} D_a^{4.85}} + \frac{(L_i + Le_i)}{(0.275 C_i)^{1.85} D_i^{4.85}} \right] Q^{1.85}$$

Considerando que los términos dentro del corchete constituyen un valor constante de la instalación, la expresión simplificada de la curva de la instalación se reduce a

$$H_m = H_T + cte Q^{1.85}$$

Es de destacar que normalmente, la aspiración es de acero, mientras que la impulsión puede ser de cualquier material.

Representando la Característica de la Instalación en la Figura 4 (Características de la Bomba), su intersección con la característica H-Q de la bomba nos da el punto de funcionamiento de la instalación. El mismo debe verificar que los valores  $H_0$ - $Q_0$  sean similares a los requeridos en el proyecto, y además implique buen rendimiento de la bomba, es decir se encuentre sobre la colina de la curva  $\eta$ -Q.



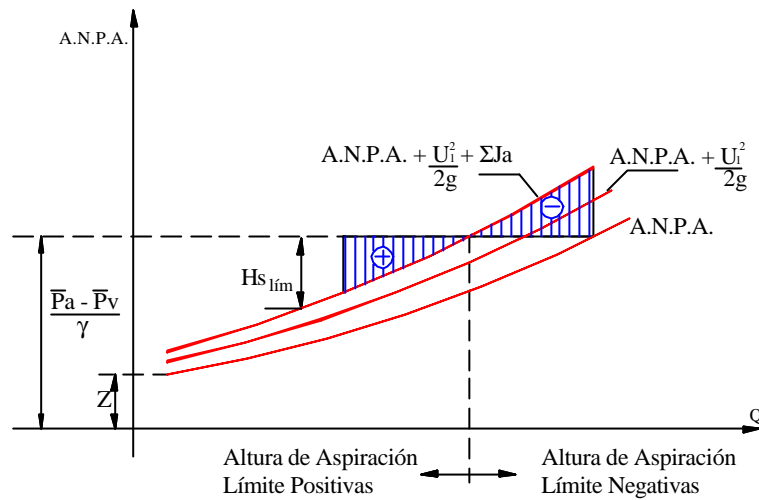
**Figura 5**

Punto de Funcionamiento de la Instalación

**De las curvas características, se obtiene el valor del ANPA correspondiente a  $Q_0$ , que posibilita la verificación de la altura adoptada de aspiración  $H_s$ .**

Finalmente la curva N-Q, en su intersección con  $Q_0$ , posibilita determinar la potencia absorbida por el caudal de diseño y consecuentemente realizar, los análisis precisos de costos de energía, para el caudal de bombeo resultante.

## 5- CONCEPTO DE SUMERGENCIA MÍNIMA



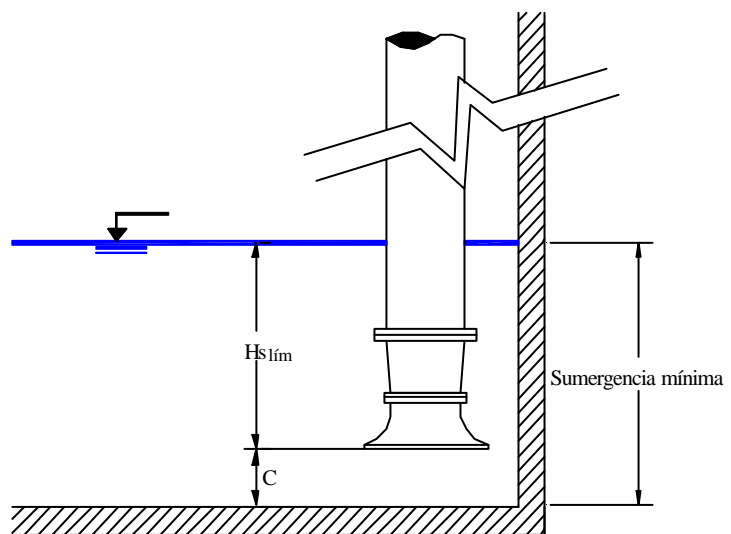
**Figura 5**  
Hslim en función del caudal

En la Figura 5, se aprecian los componentes de la expresión de la Altura Límite de Aspiración, representados en función del caudal  $Q$ . Al representarse en el eje de coordenadas alturas, evidentemente las diferencias de presiones atmosférica y de vaporización en metros de columna de agua (es decir divididas por el peso específico), es representada por una recta horizontal.

Por otra parte,  $ANPA_{Requerida}$ , el término de energía cinética y el de pérdidas de energía, son funciones del caudal, por lo que al crecer este, están representadas por curvas que se alejan entre sí. De la simple interpretación del gráfico puede observarse que, restando para cada valor de  $Q$ , la altura de presiones de la altura suma de las curvas componentes de la ecuación de referencia, el segmento que resta es precisamente el valor de la Altura Límite de Aspiración.

Puede entonces apreciarse la región correspondiente a las Alturas de Aspiración Negativas, lo que implica que la succión de la bomba (Brida de aspiración) se encuentra por debajo del nivel del agua en la cámara de succión (sea ésta "Húmeda" o "seca").

Es bastante difundido el **concepto erróneo** de que la bomba **no cavita por el solo hecho de encontrarse "sumergida"**, pero la ecuación de  $H_{slim}$ , y más gráficamente su representación de la Figura 5, indican valores mínimos de



**Figura 7**  
Sumergencia

altura límite, que de no cumplimentarse, **implicarán cavitación a pesar de encontrarse la bomba “sumergida”**.

Es por ello que deben ser respetados los datos sobre **“Sumergencia mínima”** que proveen los fabricantes para bombas sumergidas, teniendo en cuenta que el valor aludido representa la Altura líquida hasta el fondo de la cámara, la que está integrada por la Altura límite más la distancia de la campana de succión hasta el fondo (Valor necesariamente pequeño siguiendo las recomendaciones del Hydraulics Institute).

En la Figura 6 puede apreciarse el concepto de “Sumergencia” dado por la suma de la Altura de Aspiración (negativa) más la distancia “C” hasta el fondo de la cámara.

## 6- CONCLUSIONES

- El estudio presentado a partir de la aplicación de la expresión de Bernoulli al tubo de aspiración de una instalación de bombeo, posibilita una interpretación mucho más profunda e intuitiva que la simple definición brindada al comienzo del artículo.
- La figura 2 es sumamente ilustrativa y hace posible **“ver”** o interpretar correctamente el concepto de **ANPA requerido**. En efecto, al ser cada vez más alta la tubería de aspiración (hasta llegar al valor límite por encima del cual se tendrá cavitación en el punto M), es claramente visible que el término de presión, **sólo puede decrecer** al mantenerse **la constancia del segmento representativo de toda la energía disponible**, y del representativo del término de energía cinética, y **aumentar** necesariamente los correspondientes a las pérdidas y a las alturas de posición.
- Obviamente la Altura de aspiración de la instalación seleccionada, debe resultar menor que la Altura de Aspiración Límite, lo que implica que el **ANPA Disponible** resultará mayor que el **ANPA Requerido**.
- La obtención del **ANPA Requerido**, necesario para la verificación de la altura de aspiración adoptada, se obtiene de la curva característica **ANPA- Q** provista por el fabricante y para el Caudal de Funcionamiento. El mismo surge de la intersección entre la curva característica de la instalación (a trazar por el proyectista de la instalación) y la característica principal H-Q.
- Cuando se diseñan cámaras de bombeo con bombas “sumergidas” respetar las **sumergencias mínimas** sugeridas por el fabricante, es equivalente a la verificación del ANPA, puesto que implica Alturas de Aspiración mínimas requeridas para evitar la cavitación.