

**UNIVERSIDAD DE BUENOS
AIRES**

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA

CÁTEDRA DE "CONSTRUCCIONES HIDRÁULICAS"

SELECCIÓN FINA DE BOMBAS

VERSIÓN AL 14/07/2005

Ing. Luis E. PÉREZ FARRÁS

INDICE

<u>SELECCIÓN FINA DE BOMBAS</u>	<u>1</u>
<u>1-OBJETIVO Y GENERALIDADES</u>	<u>1</u>
<u>2- CONCEPTO DE ALTURA MANOMÉTRICA DE LA BOMBA</u>	<u>1</u>
<u>3- EL DIÁMETRO MÁS ECONÓMICO DE UNA INSTALACIÓN DE IMPULSIÓN</u>	<u>5</u>
<u>4- CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS</u>	<u>7</u>
4.1- CARACTERÍSTICAS H-Q; η -Q Y N-Q	8
4.2- CONCEPTO DE ANPA Y CURVA ANPA-Q	8
<u>5- CONCEPTO DE ALTURA LÍMITE DE ASPIRACIÓN</u>	<u>10</u>
<u>6- CURVA CARACTERÍSTICA DE LA INSTALACIÓN Y PUNTO DE FUNCIONAMIENTO</u>	<u>12</u>
<u>7- BOMBAS EN SERIE Y EN PARALELO</u>	<u>14</u>
BOMBAS EN SERIE	14
BOMBAS EN PARALELO	15
<u>8- DETERMINACIÓN DE LA CURVA ANPA_{Requerido} – Q</u>	<u>16</u>
<u>9- CONCEPTO DE SUMERGENCIA MÍNIMA</u>	<u>17</u>
<u>10- CONCLUSIONES</u>	<u>18</u>

SELECCIÓN FINA DE BOMBAS

1-OBJETIVO Y GENERALIDADES

El objetivo central es el de brindar, a los alumnos de “Construcciones Hidráulicas”, un texto que les posibilite el estudio de la selección fina de bombas, con mayor amplitud que en el caso de Hidráulica General, de la cuál, la asignatura que nos ocupa, es correlativa.

La preselección del tipo de bomba, más conveniente para una dada instalación (en función del número específico o del gráfico de Church) se ha estudiado en la materia precedente, por lo que no se tratará en el presente texto, en el que se trata, con cierta profundidad, los conceptos de; Altura manométrica y 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).

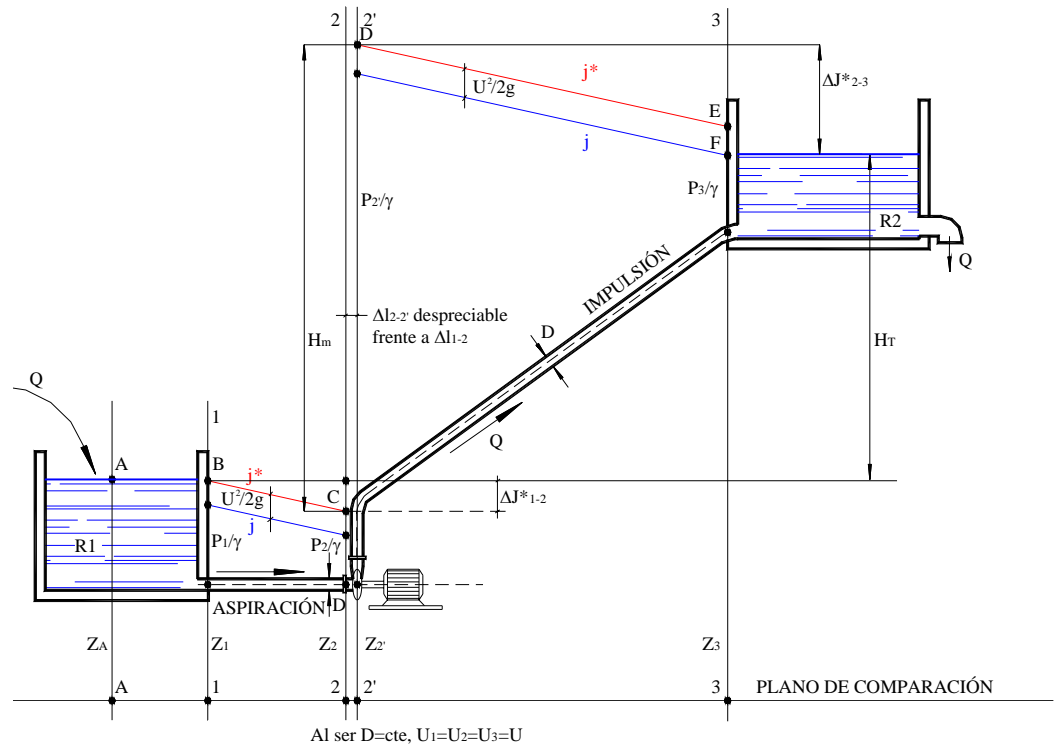
Es muy usual encontrar en la bibliografía especializada, la explicación de los temas de referencia, en forma de definición, lo que hace bastante complicada, su interpretación. En cambio la misma es clara y evidente, cuando se procede a deducir el concepto, a través de la **aplicación de la expresión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

Es de destacar que, como es previsible, en el caso de las tuberías de aspiración (Estudio de ANPA) 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.

Dado lo importante del concepto de ANPA, 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- CONCEPTO DE ALTURA MANOMÉTRICA DE LA BOMBA

En la Figura 1 se esquematiza una instalación de bombeo, la que consta de dos reservorios R_1 y R_2 , siendo el nivel en éste último superior al primero en una altura topográfica que llamamos H_T . Ambos reservorios están conectados por una conducción de diámetro D , interrumpida por una bomba cuya misión es la de elevar un caudal Q a la altura H_T .



Nota: A los fines didácticos, se considera el ingreso en la cañería de impulsión en el reservorio R₂ por debajo del nivel de agua.

Figura 1

Líneas de Energía y Piezométrica en una instalación de bombeo

El tramo de conducción hasta la bomba se denomina “aspiración”, y el que parte de la bomba hasta la cisterna, es la “impulsión propiamente dicha”. En general, a toda la instalación se la denomina genéricamente como “impulsión”.

Analizaremos, a continuación, y en forma cualitativa, la hidrodinámica de la instalación. Es decir, trazaremos las líneas de energía y piezométrica, lo que nos va a permitir definir con precisión el concepto de “altura manométrica”, de gran interés en la selección de la bomba.

Se comienza por calcular la pérdida de energía en la aspiración (Tramo 1-2) que será ΔJ_{1-2} . Se descuenta luego este valor del nivel energético del líquido en la sección 2-2 (un infinitésimo antes de la brida de aspiración), obteniéndose así el punto C que representa la energía de la unidad de peso del líquido antes de ingresar a la bomba. Uniendo C con B se obtiene la línea de energía de pendiente j^* .

Conocido el caudal Q, es inmediato el cálculo de U, con lo que se determina la energía cinética $U^2/2g$ y se está en condiciones de trazar la línea piezométrica de pendiente $j = j^*$.

Se procede ahora a calcular la impulsión, considerando que ésta se desarrolla desde la brida de impulsión (sección 2'-2') hasta la embocadura en el reservorio R₂.

La longitud $\Delta l_{2-2'}$ resulta despreciable frente a la longitud total Δl_{1-3} de toda la conducción, por lo que, en términos prácticos, las secciones 2-2 y 2'-2' son coincidentes.

Para determinar el nivel energético que debe tener el líquido en la brida de impulsión (es decir a la salida de la bomba), se hará el análisis partiendo del único punto conocido de la línea piezométrica, que es el F.

Como el diámetro y el material de la impulsión son los mismos, obviamente la "pendiente" de la línea piezométrica y de la línea de energía seguirá siendo $j = j^*$. Trazando una paralela por F a la piezométrica de la aspiración y limitándola en la sección 2'-2', se obtiene la piezométrica de la impulsión. Trazando una paralela a la distancia $U^2/2g$ se obtiene la línea de energía, la que define, en la sección 2'-2', el punto D, representativo del nivel energético necesario a la salida de la bomba para que el caudal, venciendo la resistencia del conducto (que origina una "pérdida de energía" ΔJ_{2-3}) y con una velocidad U, llegue al nivel del reservorio R₂.

La energía por unidad de peso que escurre y que la bomba debe entregar al líquido, está dada por la altura H_m, que se denominará "altura manométrica". Del análisis de la Figura 1 surge que:

$$H_m = H_T + \Delta J_{1-2} + \Delta J_{2-3} + \frac{U^2}{2g}$$

Es decir:

$$H_m = H_T + \sum \Delta J \quad (1)$$

En la sumatoria se engloban todas las pérdidas de energía de la instalación.

Para pasar a la expresión de la potencia que se necesita entregar a la vena líquida para elevar el caudal Q a la altura H_T, venciendo las resistencias de la conducción, se multiplica por Q.

$$N = \gamma Q H_m \quad (2)$$

Como la bomba tiene rozamientos mecánicos, es evidente que el motor tendrá que entregar algo más de potencia para suplir la que se disipa en los rozamientos, de modo que a la vena líquida llegue la potencia necesaria N.

La potencia a suministrar en el eje será entonces:

$$N_e = \frac{N}{\eta} \quad (3)$$

Donde η es el rendimiento de la bomba (siempre menor que la unidad).

Reemplazando la (2) en la (3):

$$Ne = \frac{\gamma Q H_m}{\eta} \quad (4)$$

Las unidades de la (4) en el sistema técnico resultan:

$$[Ne] = \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \text{m} = \frac{\text{kg m}}{\text{s}}$$

Para expresarla en HP debe dividirse por 75 y para expresarla en KW por 102, por lo que finalmente tendremos:

$$Ne = \frac{\gamma Q H_m}{75 \eta} \quad (\text{HP}) \quad (5)$$

$$Ne = \frac{\gamma Q H_m}{102 \eta} \quad (\text{KW}) \quad (6)$$

Las (4), (5), (6) constituyen expresiones fundamentales para la selección de bombas.

Aclaremos, a continuación, el porqué de la denominación de altura manométrica al concepto dado por la (1).

Planteando el teorema de Bernoulli entre brida de aspiración y brida de impulsión de la bomba, tendremos:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2g} + H_m = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2g}$$

Despejando H_m :

$$H_m = (Z_2 - Z_1) + \frac{(P_2 - P_1)}{\gamma} + \frac{(U_2^2 - U_1^2)}{2g} \quad (7)$$

Pero las diferencias entre Z_2 y Z_1 son unos pocos centímetros frente a los muchos metros que implican las alturas de presiones. Por otra parte, U_2 resulta igual a U_1 al ser el diámetro de la aspiración igual al de la impulsión, por lo que:

$$\begin{aligned} Z_2 - Z_1 &\cong 0 \\ \frac{U_2^2 - U_1^2}{2g} &= 0 \end{aligned}$$

Entonces, la (7) se reduce a:

$$H_m = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} \tag{8}$$

Por lo que la altura manométrica puede ser medida conectando un manómetro diferencial entre brida de aspiración y brida de impulsión. Este concepto es el que motiva su denominación.

3- EL DIÁMETRO MÁS ECONÓMICO DE UNA INSTALACIÓN DE IMPULSIÓN

En teoría, existen infinitas soluciones al problema de elevar un caudal Q a la altura H_T .

En efecto, consideremos la instalación de la Figura 2 y pensemos en resolver el problema con un diámetro D_1 relativamente grande.

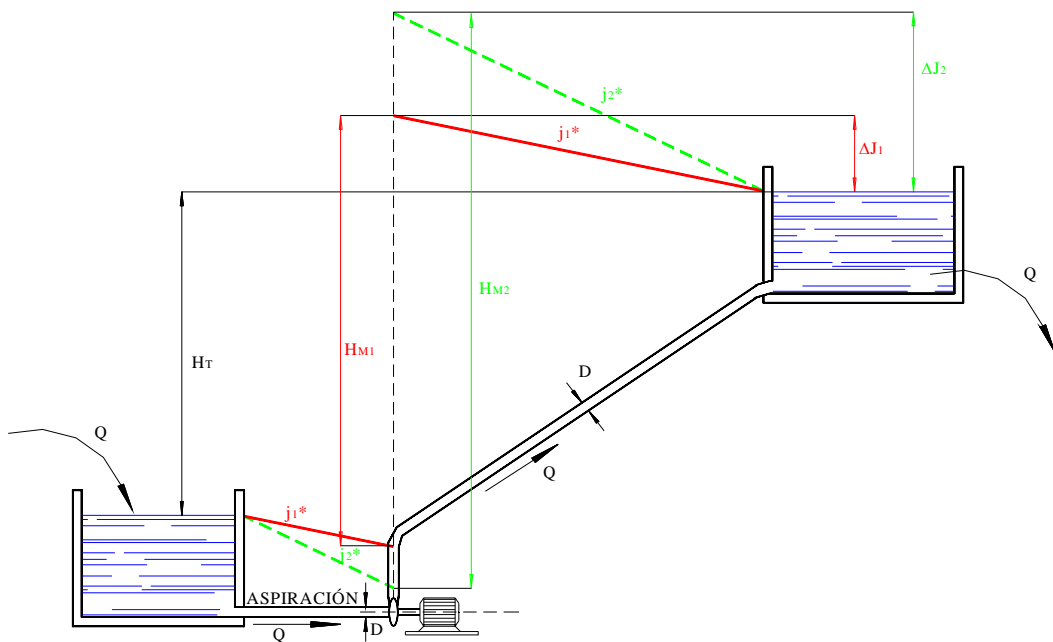


Figura 2
Variación de H_m con el diámetro D

Ello implica un valor de pérdida de energía unitaria relativamente pequeña según deducimos de la expresión de Darcy-Weisbach:

$$j_1^* = \frac{f}{D_1} \frac{U_1^2}{2g} \tag{9}$$

En cambio, de optar por un diámetro relativamente chico, el valor de j_2^* será sensiblemente mayor que j_1^* , puesto que crece con el cuadrado de la velocidad. En consecuencia, en el segundo caso, la altura manométrica resulta mayor que en el primero.

Obviamente, un mayor diámetro implica una mayor inversión inicial en la adquisición de los caños, su transporte al lugar de emplazamiento y sus costos de instalación, a la vez que implica menores costos de operación, puesto que se consume menos energía eléctrica al bombear el mismo caudal a una altura manométrica menor.

El cálculo hidráulico brinda, en teoría, infinitas soluciones al problema y, en la práctica, numerosas opciones dadas por un gran número de posibilidades de diámetros y bombas ofertadas por la industria.

El problema se resuelve introduciendo variables económicas que posibiliten una solución a la indeterminación planteada, a la vez que impliquen el diseño más económico de la instalación.

No sedesarrollarán aquí las ecuaciones para el cálculo, dado que el tema será tratado “in extenso” en el desarrollo de la materia, pero sí se entiende es importante brindar los conceptos básicos, que permiten al proyectista la determinación del diámetro, originalmente indeterminado.

La inversión inicial implica un capital por m de caño de instalación, el que, con un interés anual “i”, en el plazo de amortización de la obra que estimamos en “n” años, se transforma en una compleja función del diámetro, creciente en forma aproximada con el cuadrado del mismo y que denominaremos “Costo Unitario Anualizado de Caños, C_{uac} ”:

$$C_{uac} = f(D^2) \quad (10)$$

En cambio, los costos de energía, por m de caño instalado y por año, dan una función variable aproximadamente con la inversa del diámetro a la quinta potencia; lo denominamos “Costo Unitario Anual de Energía”:

$$C_{uae} = f(1/D^5) \quad (11)$$

La función suma de ambos será:

$$C_{uc} = C_{uac} + C_{uae} \quad (12)$$

El valor mínimo de la (12) nos da el diámetro más económico, el que, además de satisfacer las exigencias hidráulicas, cumplimenta con el objetivo de dar lugar a la solución más económica, para el plazo de amortización de la obra.

En la Figura 3, se brindan gráficamente las ecuaciones (10) a (12) y se observa el valor del diámetro mínimo o más económico. Este gráfico es tratado en la bibliografía especializada con la denominación de “Diagrama de CAMERER”.

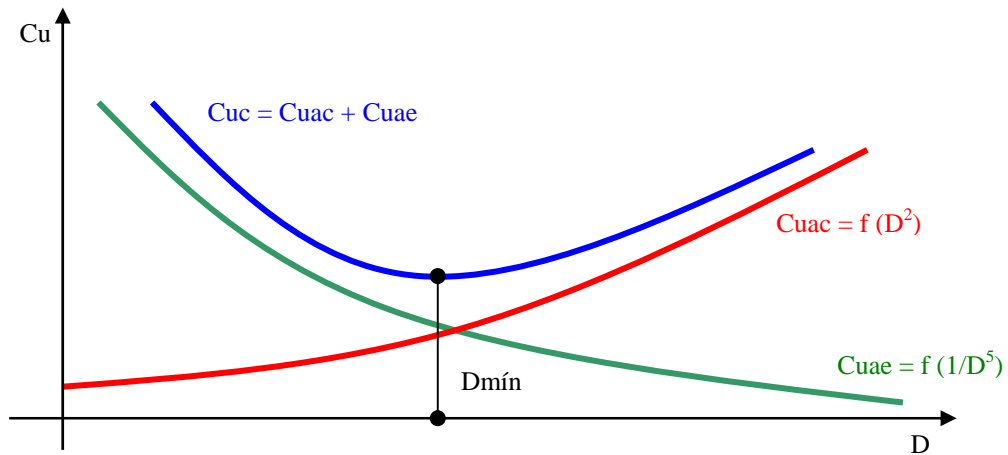


Figura 3
Diagrama de CAMERER

Nota: Durante el curso se tratará el tema en profundidad, teniendo en cuenta, además, una cantidad de variables no consideradas en el esquema conceptual presentado, tales como variaciones de traza, intercalación de estaciones de bombeo, cambio en el recorrido de espesores y diámetros de las tuberías, cambio en el recorrido de la zanja, etc.

4- CURVAS CARACTERÍSTICAS DE LAS BOMBAS

El fabricante brinda por lo general al usuario cuatro curvas características de las bombas que oferta. Se denominan así las funciones H , η y N en función del caudal Q , a las que se les agrega una cuarta denominada “Altura Neta Positiva de Aspiración”, más conocida por su sigla ANPA, que también es función de Q , y que estudiaremos más adelante en profundidad.

En general, la forma de estas cuatro curvas es similar a las de la Figura 4.

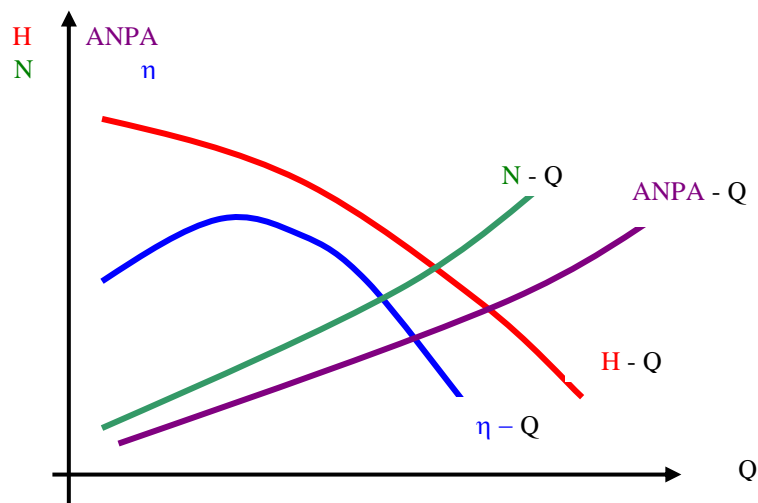


Figura 4
Curvas características de la bomba

4.1- Características H-Q; η -Q y N-Q

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 η -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.

4.2- Concepto de ANPA y curva ANPA-Q

En la Figura 5 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 a 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 justamente en el valor de la altura manométrica. Es decir que en la sección de salida del rotor la presión alcanza los valores máximos.

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.

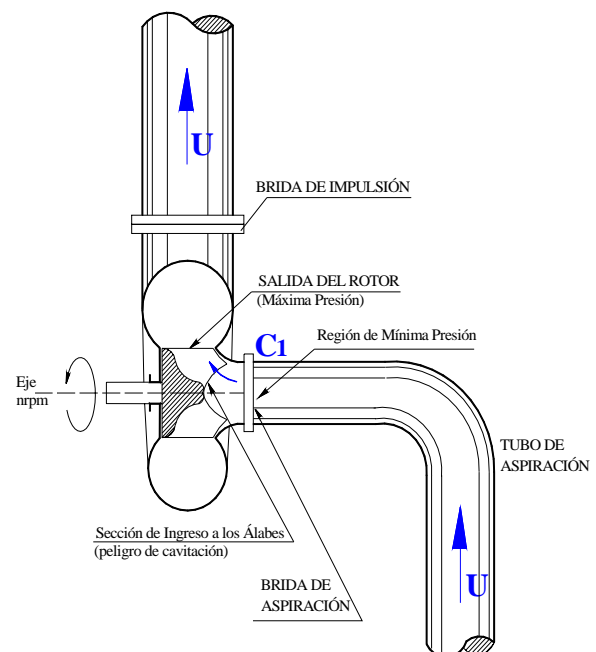


Figura 5
Corte de una Bomba

Analicemos lo que ocurre en las inmediaciones del ingreso a los álabes: si la presión es tan baja que posibilita la evaporación del agua, se forman burbujas de vapor que, un instante después, al ingresar al rotor, se encuentran en una zona de alta presión, que obliga a un condensado prácticamente instantáneo de las burbujas de referencia.

Este condensado súbito se produce por razones no del todo conocidas, a través de un 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 y hasta de las instalaciones anexas.

Este fenómeno, 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. 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 desarrollaremos.

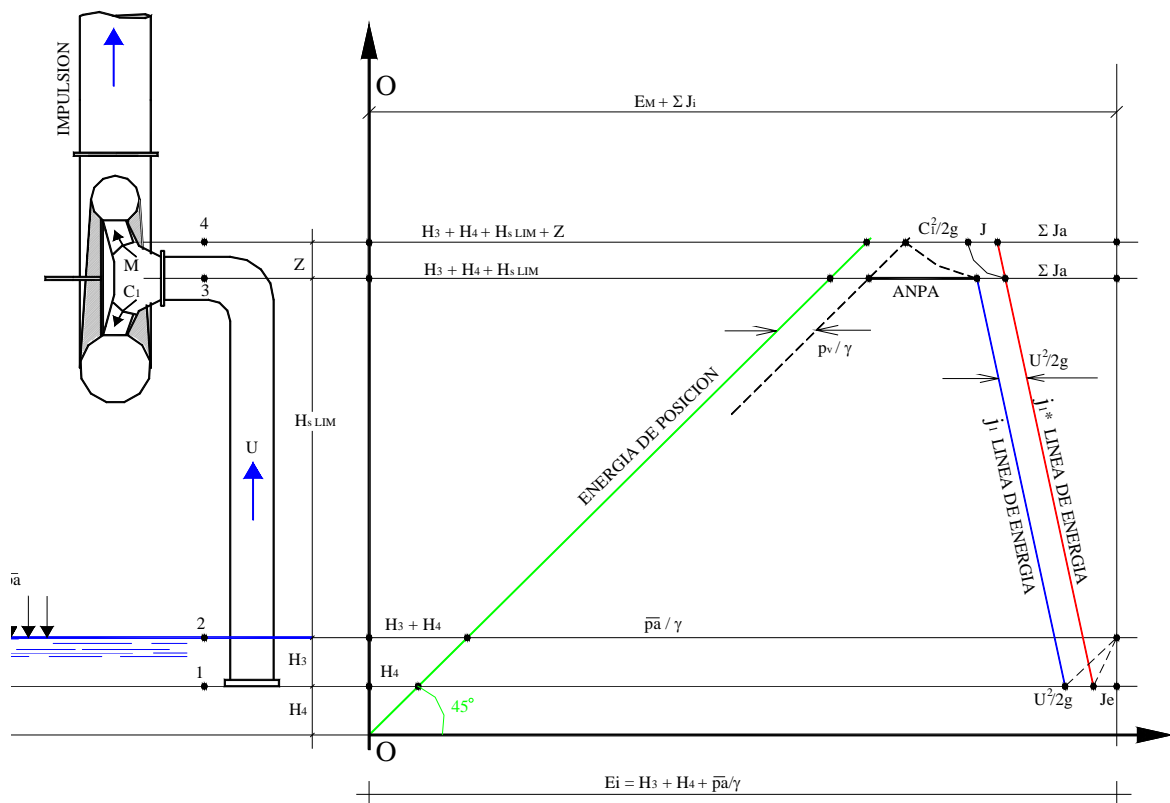


Figura 6

Tubo de aspiración en una instalación de bombeo

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.

Para entender un poco mejor esta definición miremos la Figura 6. En esta figura, al ser la bomba de eje horizontal, 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.

En dicha figura, si planteamos Bernoulli entre los puntos 3 y 4 obtenemos:

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

Y, simplificando y despejando:

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

Por lo que ANPA es, como ya mencionamos, 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) en ese recorrido.

La teoría y la experimentación prueban que ANPA es una función creciente con los valores del caudal, tal como se ilustra en la Figura 7.4, en la que puede distinguirse la curva ANPA-Q, como una de las 4 características que debe brindar el fabricante al usuario.

5- CONCEPTO DE ALTURA LÍMITE DE ASPIRACIÓN

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.

Cuanto más alto el tubo 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. Y este valor se deduce de la Figura 7.7, planteando Bernoulli entre los puntos 2 y 3:

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

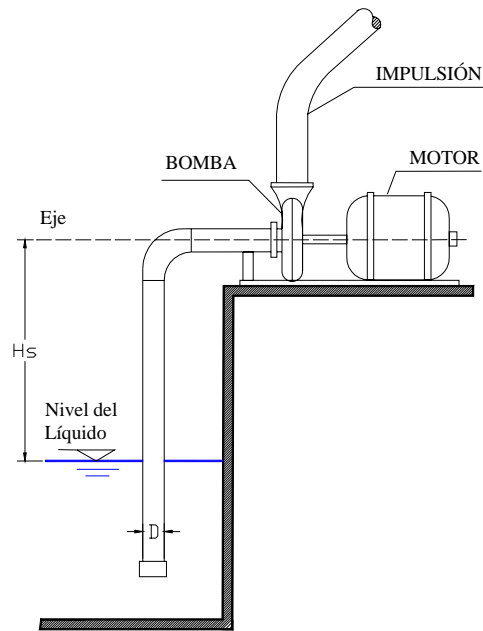


Figura 7
Altura de Aspiración

Despejando entonces $H_{S_{lim}}$ se obtiene:

$$H_{S_{lim}} = \frac{\overline{P}_a - \overline{P}_v}{\gamma} - \left[ANPA + \frac{U^2}{2g} + \sum J_a \right] \quad (13)$$

En la (13) tenemos que:

- $H_{S_{lim}}$ 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.

- $\sum J_a$ 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 (13), es decir:

$$H_s \leq H_{s\text{lim}} \quad (14)$$

6- CURVA CARACTERÍSTICA DE LA INSTALACIÓN Y PUNTO DE FUNCIONAMIENTO

En la curva dada por la ecuación (1), es decir:

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

en la que $\Sigma \Delta J$ incluye a todas las pérdidas de la instalación, sean éstas generales o localizadas, 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 transformar la (1) 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 utilizaremos 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 ΔJ en un tramo de longitud L , multiplicamos la anterior por la suma $L + Le$, donde Le es la “longitud equivalente” de los accesorios incluidos en el tramo en estudio, es decir:

$$\Delta J = j(L + Le) = \frac{(L + Le)}{(0.275 C)^{1.85}} \frac{Q^{1.85}}{D^{4.85}} \quad (15)$$

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

$$\Delta J = \left[\frac{(L_a + Le_a)}{(0.275 C_a)^{1.85} D_a^{4.85}} + \frac{(L_i + Le_i)}{(0.275 C_i)^{1.85} D_i^{4.85}} \right] Q^{1.85} \quad (16)$$

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

Finalmente, la expresión (1) nos queda:

$$H_m = H_T + \left[\frac{(L_a + Le_a)}{(0.275 C_a)^{1.85} D_a^{4.85}} + \frac{(L_i + Le_i)}{(0.275 C_i)^{1.85} D_i^{4.85}} \right] Q^{1.85} \quad (17)$$

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

Representando la (17) en la Figura 8, 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 H-Q.

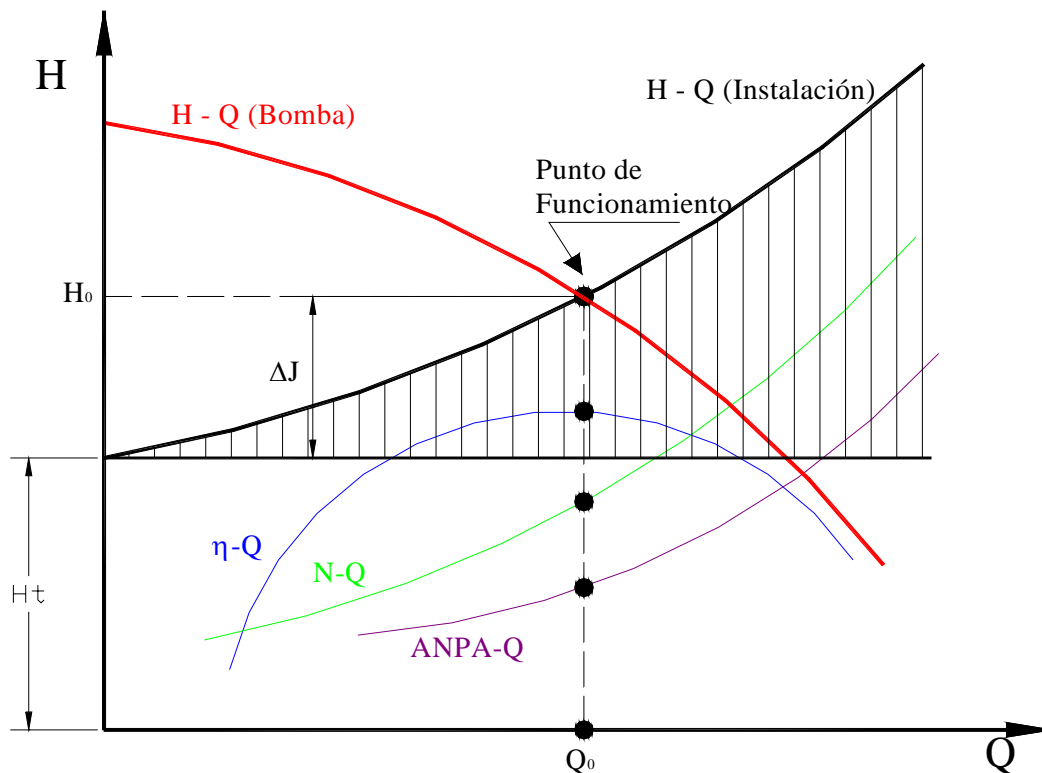


Figura 8
Punto de funcionamiento de la instalación

De las curvas características, se obtiene el valor del ANPA correspondiente a Q_0 , que posibilita la verificación de la altura de aspiración H_s con las (13) y (14). Finalmente la curva N-Q, en su intersección con Q_0 , determinará la potencia absorbida por el caudal de diseño y posibilitará los análisis precisos de costos de energía.

7- BOMBAS EN SERIE Y EN PARALELO

Bombas en Serie

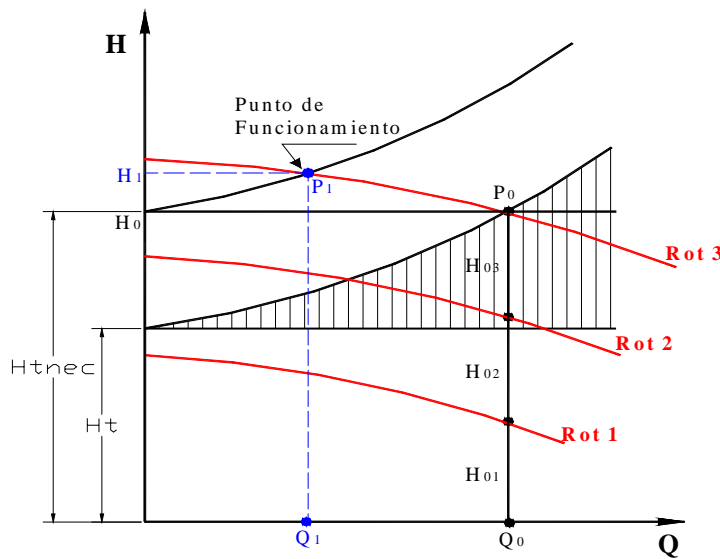


Figura 9
Rotores en serie

Cuando se requiere elevar un dado caudal a alturas importantes, se pueden instalar rotores en serie puesto que sus curvas características se suman en el sentido del eje H.

En la Figura 9 esquematizamos 3 rotores en serie. Imaginemos que los requerimientos de proyecto son el par de valores H_0-Q_0 . Los tres rotores en serie resolverían en teoría el problema, aportando cada uno la tercera parte de H_0 y siendo:

$$H_{01} = H_{02} = H_{03}$$

$$y \quad H_0 = H_{01} + H_{02} + H_{03} = 3 H_{01}$$

Pero esta solución está dando un H_T menor que el $H_T = H_0$ requerido en el proyecto, puesto que la característica de la instalación que pasa por ese punto así lo confirma. Trazando la característica a partir de H_{Tnec} el punto de funcionamiento es P_1 que implica una altura $H_1 > H_0$ y Q algo menor que Q_0 .

En consecuencia, cuando se disponen rotores en serie no podemos decir que el mismo caudal es elevado en forma exactamente proporcional al número de rotors. Existe una modificación originada por la curva característica de la instalación.

Desde el punto de vista constructivo, se pueden disponer los rotors en serie sobre un mismo eje, tal como puede observarse en la Figura 10. Este es el criterio de diseño utilizado para las bombas de pozo profundo, las que, en general, deben elevar relativamente bajos caudales a alturas considerables.

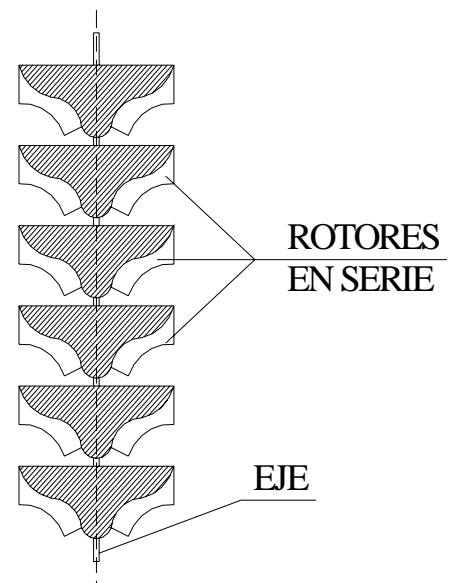


Figura 10
Bombas de pozo profundo

Bombas en Paralelo

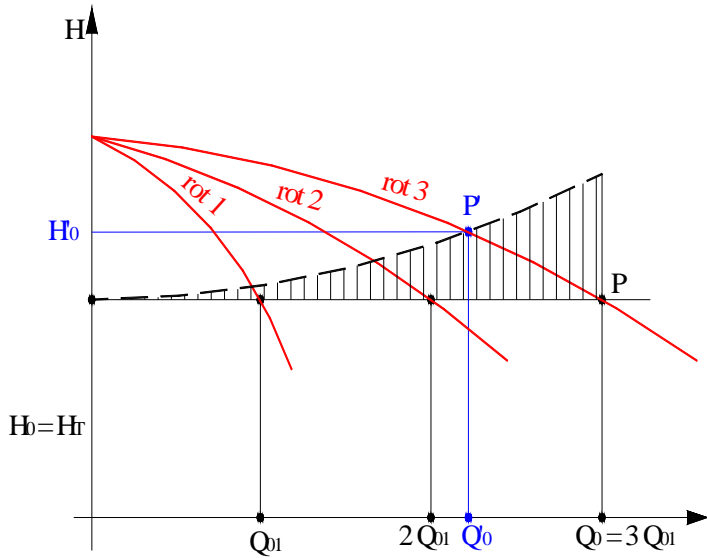


Figura 11
Bombas en paralelo

Se disponen las bombas en paralelo cuando se requiere aumentar el caudal a elevar a una determinada altura.

En este caso, las características de los rotores se suman en el sentido del eje Q tal como puede apreciarse en la Figura 7.11. En la Figura 7.12 se ilustra esquemáticamente la disposición de una instalación de tres bombas en paralelo.

De la Figura 11 puede deducirse que para un determinado valor de H_0 , el caudal suma de los tres rotores en paralelo será:

$$Q_0 = 3 Q_{01}$$

Es decir que cada rotor aportaría, en teoría, un caudal $Q_{01} = \frac{Q_0}{3}$. Lo que sería válido siempre que H_0 fuera igual a H_T . Pero como la curva característica de la instalación debe ser tenida en cuenta, en realidad el punto de funcionamiento será el P' en lugar de P.

Este hecho implica un caudal Q_0' menor que Q_0 y que será elevado a una altura manométrica H_0' mayor que H_0 .

Nótese que no siempre es beneficioso el agregado de bombas en paralelo, puesto que el aporte de caudal a partir de un determinado número de bombas, puede ser irrelevante.

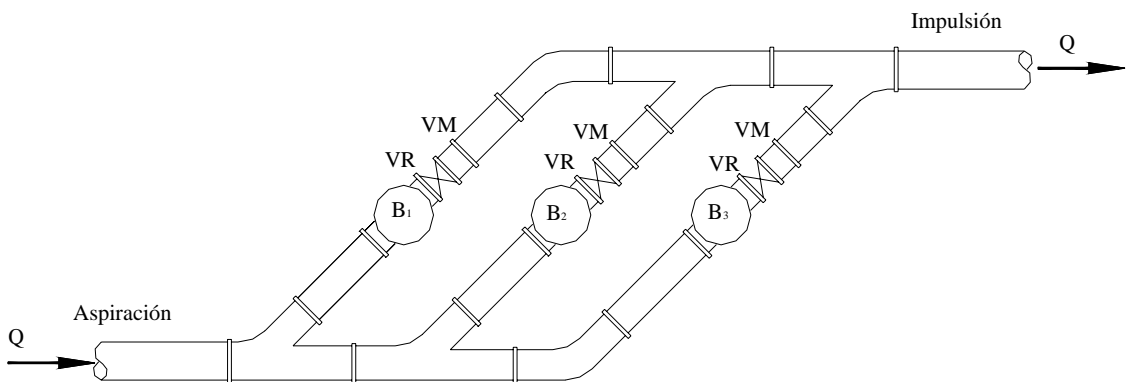


Figura 12
Instalación de 3 bombas en paralelo

8- DETERMINACIÓN DE LA CURVA ANPA_{Requerido} – Q

Si en la expresión que posibilita el cálculo de H_s se considera H_{slim} en vez de H_s , el ANPA que se obtiene es el requerido, con lo que la expresión se convierte en

$$ANPA_{Requerido} = \frac{(\bar{p}_a - \bar{p}_v)}{\gamma} - \left(H_{slim} + \frac{U^2}{2g} + \sum J_a \right)$$

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

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

Si se reemplaza ANPA_{Requerido} por la expresión anterior, resulta

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

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

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

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

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

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

9- CONCEPTO DE SUMERGENCIA MÍNIMA

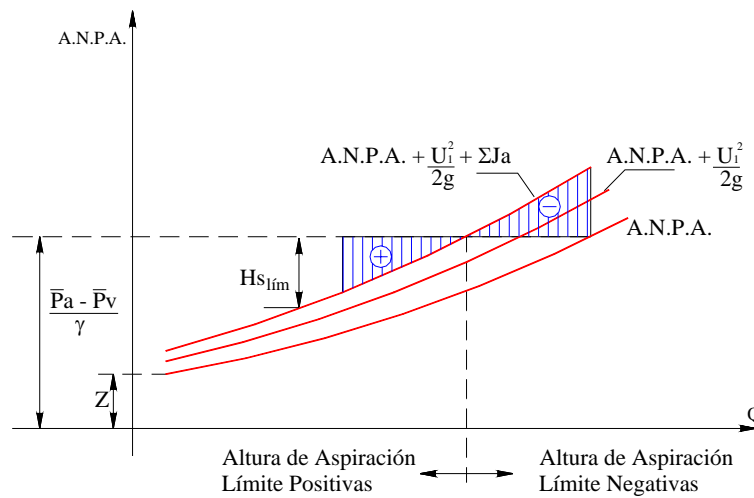


Figura 13
Hslim en función del caudal

En la Figura 13, 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, $ANPA_{Requeridas}$, 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 Hslim, y más gráficamente su representación de la Figura 5, indican valores mínimos de 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 14 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.

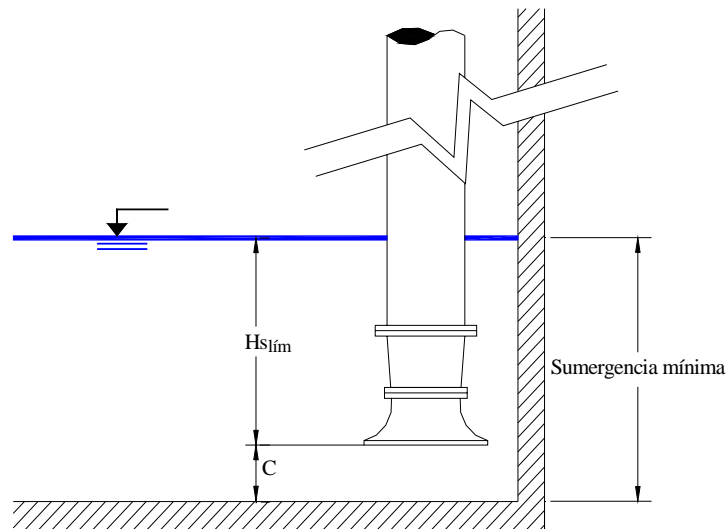


Figura 14
Sumergencia

10- 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 en el numeral 4-2.

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 **augmentar** 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.