Bombas instaladas en Paralelo

Para resolver el problema que se plantea cuando dos bombas se instalan en paralelo, vamos a plantear un sistema conformado por dos reservorios con una diferencia de altura de 23m, una cañería de succión y otra de descarga, cada una de ellas lleva unos accesorios que le generan pérdidas localizadas además de las propias de fricción con la cañería.

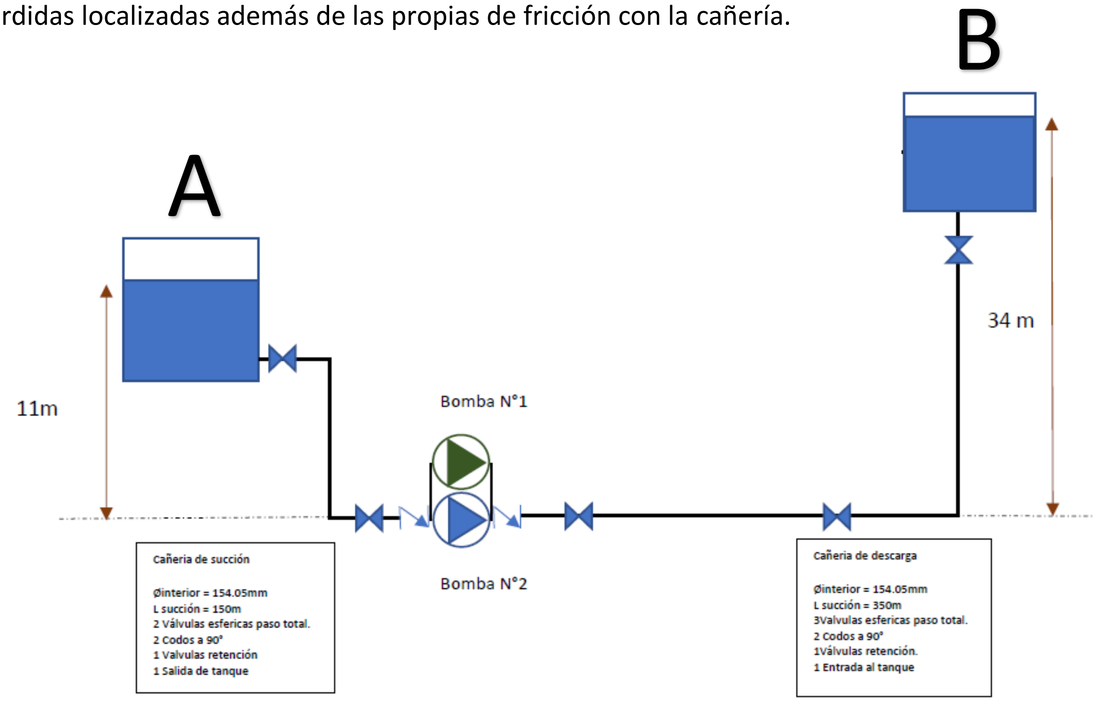

Figura 1

En este caso vamos a plantear que las bombas instaladas no son iguales, cada una de ellas tiene una curva de funcionamiento con distintas prestaciones.

Para este caso vamos a suponer que tenemos las curvas H-Q de las bombas.

Bomba N° 1 $\longrightarrow$ H [m] = 60 – 27500 * Q^2

Bomba N° 2 $\longrightarrow$ H [m] = 45 – 12000 * Q^2

`Las unidades de Q están en` $\frac{m^3}{s}$

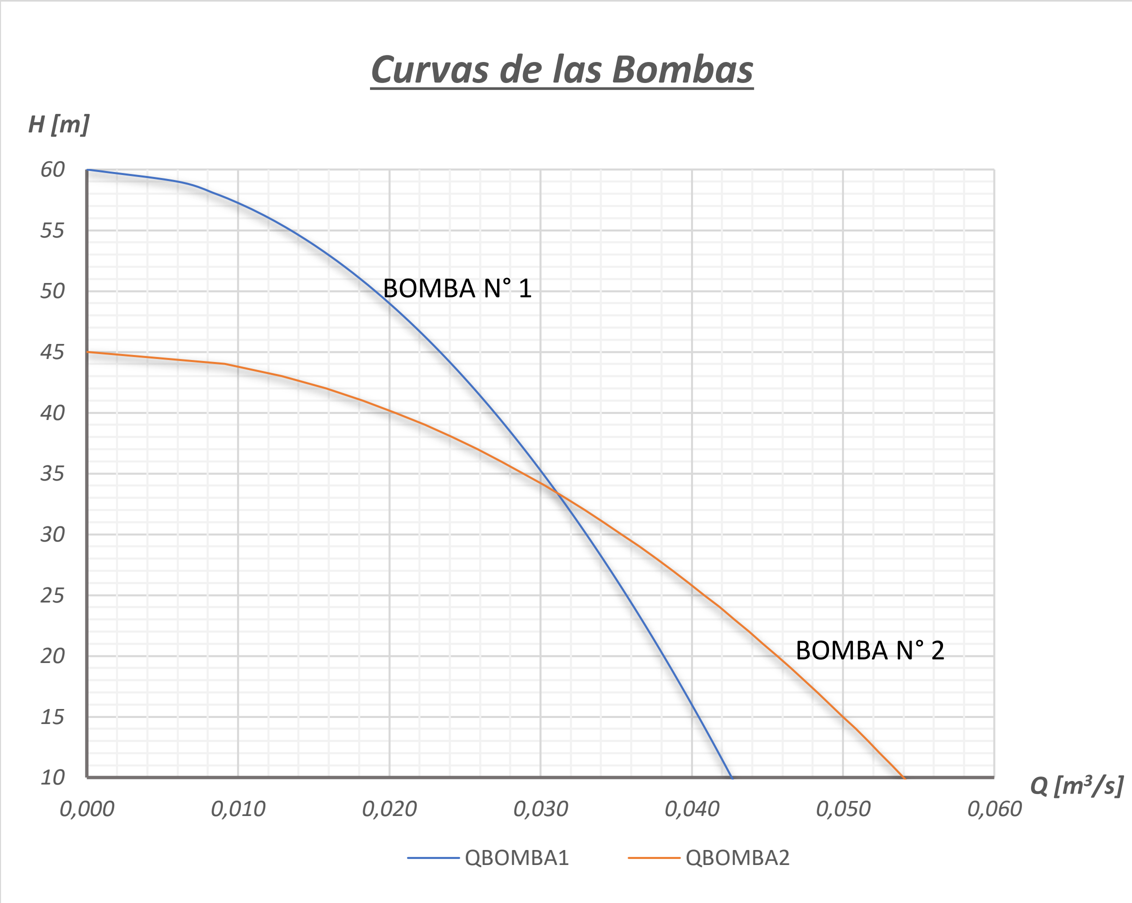

Figura 2

Estas curvas permiten relacionar la energía entregada al fluido por cada bomba en función del caudal que circula por cada una de ellas.

Primero se plantea la ecuación de Bernoulli entre los puntos extremos del sistema, es decir que la energía inicial del fluido más la energía que le entrega la bomba centrifuga tiene que ser igual a la energía final del líquido más todas las pérdidas de energía por fricción que se tienen en el sistema:

$$\frac{P_A}{\gamma} + Z_A + \frac{{V_A}^2}{2\,g} + H_{[bomba]} = \frac{P_B}{\gamma} + Z_B + \frac{{V_B}^2}{2\,g} + J_{Perdidas\ por\ fricción}$$

Para ir resolviendo el ejercicio tenemos que ir desarrollando cada uno de los términos.

Para la determinación de las pérdidas por fricción vamos a plantear la ecuación de Darcy Weisbach. En todo sistema de cañería las pérdidas por fricción se obtienen de sumar las pérdidas propias de la fricción del fluido con las paredes de la cañería más las pérdidas localizadas en los accesorios (contracciones de sección, cambios de dirección, filtros, válvulas, etc.).

$$J_{Perdidas\ por\ fricción} = J_{localizadas} + J_{cañeria}$$

Las pérdidas por fricción del sistema se producen a la largo de la totalidad de la cañería que estamos estudiando desde el estado inicial (A) al estado final (B).

También es conveniente ir identificando el sector del sistema en el cual se producen esas pérdidas. La partición la haremos en la bomba, quedando el sistema dividido en dos sectores, el primero de ellos es donde el fluido sale del reservorio A y se dirige a la bomba, lo llamaremos "cañería de succión" y el tramo o conjunto de cañerías que salen de la bomba y se dirigen al reservorio B lo llamaremos "cañería de descarga".

La pérdida total de energía por fricción será la suma de las pérdidas de ambos tramos.

$$J_{Total} = J_{succión} + J_{descarga}$$

Tendiendo en cada uno de los tramos:

$$J_{succión} = J_{localizadas} + J_{cañeria}$$

$$J_{descarga} = J_{localizadas} + J_{cañeria}$$

Analíticamente las podemos escribir de la siguiente manera:

$$J_{succión} = \sum_{1}^{i} K_i * \frac{{V_i}^2}{2g} + \sum_{1}^{i} \frac{f_i \,.\, l_i \,.\, {V_i}^2}{2.\,g.\ Ø_i}$$

$$J_{succión} = \sum_{1}^{i} K_i * \frac{{V_i}^2}{2g} + \sum_{1}^{i} \frac{f_i \,.\, l_i \,.\, {V_i}^2}{2.\,g.\,Ø_i}$$

Donde:

K_i Constante característica de cada uno de los accesorios obtenida de tabla.

f_i Factor de fricción correspondiente al tramo para un determinado número de Reynold según las características de la cañería.

l_i Longitud del tramo en estudio.

V_i Velocidad del fluido en el interior del tramo estudiado.

$\varnothing_i$ diámetro interior del tramo estudiado.

Para el ejemplo que estamos estudiando, como se tiene una única sección para las cañerías de succión y de descarga tenemos que:

a. Cañería de succión:

Cañería de Ø6" Dn, espesor = 7.11mm, longitud = 150 m; Øint= 154.05 mm

Accesorio	Diámetro	Cantidad	K
Entrada al Reservorio	Ø6"	1	0.50
Codo de radio largo		2	0.24
Válvula de paso total		2	0.05
Válvula de retención		1	1.85
Total			2.93

b. Cañería de descarga:

Cañería de Ø6" Dn, espesor = 7.11 mm, longitud = 350m; Øint= 154.05 mm

Accesorio	Diámetro	Cantidad	K
Salida al Reservorio	Ø6"	1	1.00
Codo de radio largo		1	0.24
Válvula de paso total		3	0.05
Válvula de retención		1	1.85
Total			3.24

Para facilitar los cálculos vamos a suponer inicialmente en forma hipotética una velocidad de $1\frac{m}{s}$ (velocidad económica) y vamos a considerar que el agua se encuentra a 20 °C, tenemos que:

$Reynold\ = \frac{Velocidad\ *Diámetro}{Viscosidad\ cinematica}$ = 153.000

El caño de acero comercial tiene un $^{e}/_{D} = 6.5 * 10^{-4}$, si buscamos un valor del factor de fricción aproximado para empezar a calcular el problema podemos adoptar un f= 0,02

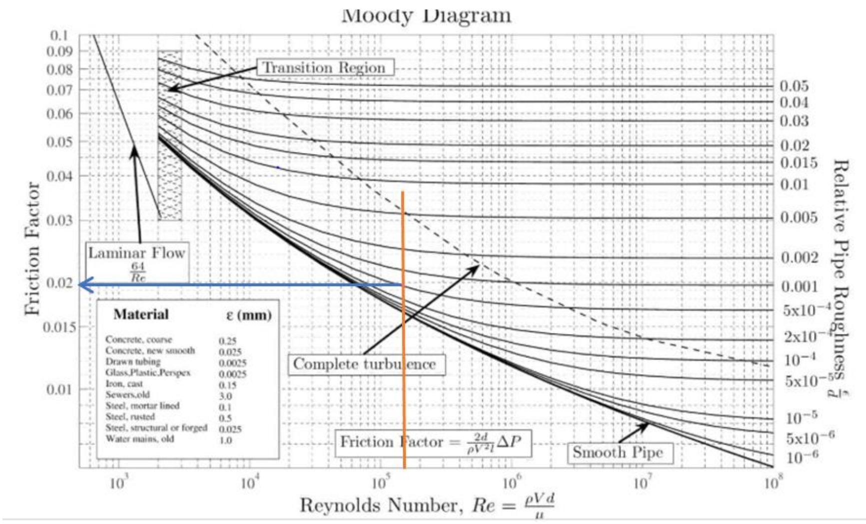

Figura 3

Adoptamos el término $V_{Ø6}$ como la velocidad del fluido en el interior del caño de Ø6" Dn

$$J_{succión} = \sum_{1}^{4}(0{,}5 + 2 * 0{,}24 + 2 * 0{,}05 + 1{,}85) * \frac{{V_{Ø10}}^2}{2 * 9{,}8\, {}^{m}/_{s^2}} + \sum_{1}^{i} \frac{0{,}02 * 150m * {V_{Ø6}}^2}{2 * 9{,}8\, {}^{m}/_{s^2} * 0{,}15405m}$$

$$J\_succión = 2{,}93 * \frac{{V_{Ø6}}^2}{19{,}6\, {}^{m}/_{s}} + 0{,}993 \frac{s^2}{m^2} * {V_{Ø6}}^2$$

$$J\_succión = 0{,}149 * {V_{Ø6}}^2 + 0{,}993 \frac{s^2}{m^2} * {V_{Ø6}}^2$$

$$J\_succión = 1{,}142 \frac{s^2}{m} * {V_{Ø6}}^2$$

$$J_{descarga} = \sum_{1}^{4}(1 + 1 * 0.24 + 3 * 0.05 + 1.85) * \frac{{V_{Ø6}}^2}{2 * 9.8\, {}^{m}/_{s^2}} + \sum_{1}^{i} \frac{0.02 * 350m * {V_{Ø6}}^2}{2 * 9.8\, {}^{m}/_{s^2} * 0{,}15405m}$$

$$J_{descarga} = 0{,}165 * \frac{{V_{Ø6}}^2}{19{,}6\, {}^{m}/_{s^2}} + 2{,}317 \frac{s^2}{m} * {V_{Ø6}}^2$$

$$J_{descarga} = 2{,}482 \frac{s^2}{m} * {V_{Ø6}}^2$$

$$J_{Total} = J_{succión} + J_{descarga}$$

$$J_{Total} = 1{,}142 \frac{s^2}{m} * V_{\text{Ø}6}{}^2 + 2{,}482 \frac{s^2}{m} * V_{\text{Ø}6}{}^2$$

Si volvemos a la ecuación de Bernoulli podemos escribirla de la siguiente manera:

$$\frac{P_A}{\gamma} + Z_A + \frac{V_A{}^2}{2\,g} + H\,[bomba] = \frac{P_B}{\gamma} + Z_B + \frac{V_B{}^2}{2\,g} + 1{,}142 \frac{s^2}{m} * V_{\text{Ø}6}{}^2 + 2{,}482 \frac{s^2}{m} * V_{\text{Ø}6}{}^2$$

Analizando los demás términos de la ecuación podemos decir que $\frac{P_A}{\gamma}\ y\ \frac{P_B}{\gamma}$ son iguales a la presión atmosferica, por lo tanto tomamos la presión relativa P_A y P_B = 0 (cero) por tratarse ambos casos de tanques abiertos

Los términos de $\frac{V_A{}^2}{2\,g}$ y $\frac{V_B{}^2}{2\,g}$ son despreciables por ser un sistema que se encuentra a régimen permanente, por lo que ningunas de sus variables puede alterarse en el tiempo. En este caso los niveles de los tanques no se verán alterados y siempre estarán al mismo desnivel, adoptamos $\frac{V_A{}^2}{2\,g}$ y $\frac{V_B{}^2}{2\,g}$ = 0 (cero).

La altura de $Z_A = 11m\ y\ Z_B = 34m$ La diferencia de niveles del nivel de agua se denomina altura estática, es la altura que tiene que aportar la bomba cuando el caudal es 0 cero (condición hidrostática).

La energía del fluido en el Punto A + la energía aportada por la bomba es igual a la energía final del fluido más todas las pérdidas por fricción del sistema (desde el punto A hasta B).

$$11m + H_{bomba} = 34\,m + 1.142 \frac{s^2}{m} * V_{\text{Ø}6}{}^2 + 2{,}485 \frac{s^2}{m} * V_{\text{Ø}6}{}^2$$

Dado que en el caso que estamos analizando la cañería de succión y de descarga son de igual diámetro, se pueden sumar los términos de $V_{\text{Ø}6}{}^2$

$$H_{bomba} = (34\,m - 11m) + 3.627 \frac{s^2}{m} * V_{\text{Ø}6}{}^2$$

Expresión que representa la curva de la instalación en función de la $V_{\text{Ø}6}$.

También podemos decir que esta expresión es la forma de determinar el valor de H (energía entregada por el sistema de bombeo) que permite alcanzar la igualdad de la ecuación de energía establecida en la ecuación de Bernoulli.

$$H_{bomba} = 23m + 3.627 \frac{s^2}{m} * V_{\text{Ø}6}{}^2$$

Como mencionamos anteriormente, el fabricante de la bomba tiene que entregarnos las "curvas de la bombas" para poder saber cuál es la capacidad de las mismas de entregar energía al sistema en función del caudal que circula por ellas.

Estas curvas también puede estar en función $F_{(Q)}$ o ser una serie de puntos X, Y que corresponden a los valores de H (altura) y Q (caudal).

Para solucionar el problema que se presenta debido a que la "curva de la bomba" está expresada en función del caudal que circula por ella y la expresión de las pérdidas del sistema (o curva de la instalación) se encuentran relacionadas con la velocidad del fluido en el interior de la cañería, hay que reemplazar el término de velocidad en función del caudal.

Como el caudal es constante, y en este caso las secciones de la cañería de succión y de descarga son iguales, lo podemos expresar:

$$Q = \frac{V_{\emptyset 6}}{A_{\emptyset 6}}$$

Siendo:

$$A_{\emptyset 6} = \frac{\pi * {\emptyset_6}^2}{4}$$

Entonces:

$$V_{\emptyset 6} = \frac{Q}{\frac{\pi * {\emptyset_6}^2}{4}} = 53{,}652 * Q$$

Si volvemos a la ecuación de Bernoulli tenemos:

$$H_{bomba} = 23\ m + 1.142 \frac{s^2}{m} * \left(\frac{53{,}652}{m^2} * Q\right)^2 + 2{,}485 \frac{s^2}{m} * (\frac{53{,}652}{m^2} * Q)^2$$

$$H_{bomba} = 23\ m + 3{,}627 \frac{s^2}{m} * (\frac{53.652}{m^2} * Q)^2$$

$$\boldsymbol{H_{bomba}} = 23\ m + 10440.45 \frac{s^2}{m^5} * Q^2$$

Como ya mencionamos anteriormente, la expresión que se encuentra a la derecha de la igualdad se denomina “Curva de la instalación”, representa la energía que debería ser entregada por la bomba para vencer la resistencia de la altura estática y las pérdidas por fricción dentro del sistema.

Esta curva nos va a permitir encontrar el punto de funcionamiento de la bomba, el cual queda determinado por la intersección de la “curva del sistema” con la “curva de la bomba”.

Para poder representar la curva de la instalación hay que darle valores de caudal teniendo en cuenta las unidades en las que fuimos trabajando en la ecuación de Bernoulli (en nuestro caso m^3/s)

$$H_{bomba} = 23\,m + 10440.45\frac{s^2}{m^5} * Q^2$$

H [m]	Q [m3/s]
23	0
24,14	0.010
27,17	0.020
29,07	0.033
29,83	0.041
32,86	0,061
34,76	0.070
37,41	0.081
40,07	0.090
43,10	0.100
45,76	0,107

Hay que notar que en el planteo de la ecuación de Bernoulli no hay ninguna consideración acerca de cómo son las bombas que están instaladas en el sistema. La ecuación esta planteada en términos de energía entregada al sistema, no hace referencia a si son una, dos o más bombas instaladas en serie o en paralelo.

Por otro lado, volviendo a nuestro ejemplo, tenemos las funciones que nos entrega el fabricante que representan las curvas de ambas bombas las cuales graficamos de la siguiente manera:

Bomba N° 1 $\longrightarrow$ H [m] = 60 – 27500 * Q^2
Bomba N° 2 $\longrightarrow$ H [m] = 45 – 12000 * Q^2

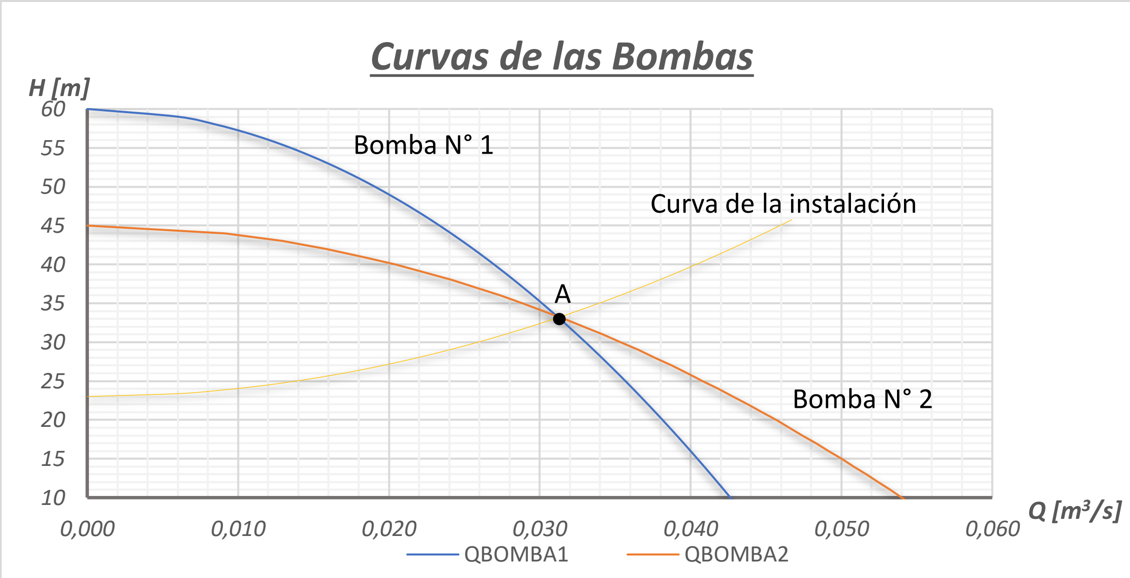

Figura 4

Con este gráfico podemos obtener el punto A de funcionamiento de cada una de las bombas, obtenido como resultado de la intersección de las curvas de las bombas con la curva del sistema.

Por las características de las bombas y del sistema de este ejemplo la intersección de las curvas de cada una de las bombas con la curva de la instalación se encuentra en puntos muy próximos, prácticamente iguales.

En este caso en particular, podemos decir que es igual el caudal que circula por el sistema independientemente de la bomba que se encuentre funcionando, porque la variación de caudal en las cañerías será prácticamente nulo, funcione solamente la Bomba N°1 o la Bomba N°2.

El equilibrio del sistema se va a alcanzar en solo un punto, quiere decir que hay un único resultado que equilibra la ecuación. Ese punto va a determinar el caudal al cual la bomba le va a entregar la energía suficiente para vencer la diferencia de altura y las pérdidas por fricción.

Cualquier otro punto del sistema no estará en equilibrio. Por ejemplo para caudales mayores, la bomba no es capaz de entregarle la suficiente energía al sistema (la curva es decreciente con el aumento del caudal) y a su vez, el sistema al tener mayor circulación tiene mayor velocidad del fluido en su interior y como las pérdidas se incrementan en forma cuadrática con respecto a la velocidad (la curva es creciente respecto del caudal) , la diferencia entre lo que puede entregar la bomba y lo que necesita el sistema para vencer las pérdidas por fricción se incrementa exponencialmente.

En el eje de ordenadas puede verse claramente la diferencia de altura estática, para caudal 0 (cero) no hay pérdidas por fricción y por lo tanto sólo es necesario entregar la energía que pueda vencer la altura estática. En la curva de la instalación la ordenada al origen es la altura estática que tiene que vencer el fluido.

A medida que aumenta el caudal en la cañería aumenta la velocidad del fluido y empieza a aumentar cuadráticamente las pérdidas de carga o de fricción en el sistema. La diferencia entre el valor de la curva de la instalación y la altura estática no es otra cosa que la energía total perdida por fricción.

Si la curva de la instalación estuviera desplazada (situación que se puede lograr si cambia algunas de las condiciones de longitud, diámetro, diferencia de altura, etc.) los puntos de funcionamiento serán diferentes y por consiguiente habrá diferencia de caudal de circulación si se enciende la Bomba N°1 o la Bomba N°2

Si cambiamos el ejercicio, y trabajamos con una diferencia de alturas entre los niveles de agua de 40m podemos obtener una nueva curva de la instalación paralela a la anterior, que cortaría a las curvas de cada una de las bombas en puntos diferentes.

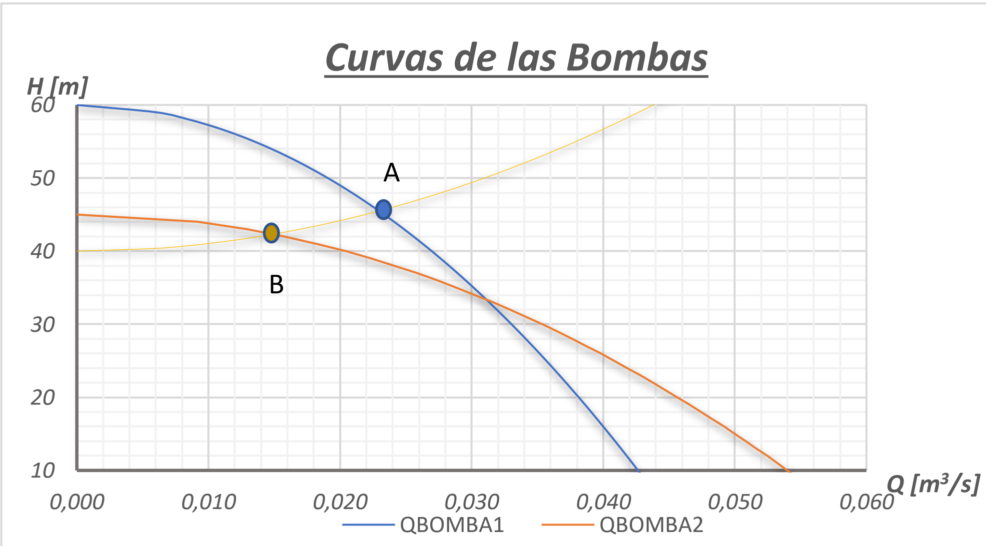

Figura 5

Como puede verse en la *Figura 5* con "otra" curva de instalación la Bomba 1 corta la curva de la instalación en el punto A con un caudal de 0.024 m^3/s y la Bomba N°2 lo hace en el punto B con un caudal de 0.015 m^3/s, ambos puntos tienen distinto caudal y entregan distinta energia.

Cuando la curva de la Bomba viene expresada en una función Hf(Q), se puede reemplazar la función entregada por el fabricante en el término correspondiente a la energía aportada por la bomba y mantener la igualdad con la curva de la instalación. De esta manera, si resolvemos el polinomio, encontrando las raíces de la ecuación podemos obtener analíticamente el punto de funcionamiento.

Dado que la formula empírica que entrega el fabricante puede no tener las mismas unidades que la curva de la instalación hay que homologar los sistemas de unidades para que el resultado sea correcto.

Sistema de Bombas en Paralelo

Lo que nos queda por resolver es cuál sería el nuevo punto de funcionamiento si las bombas funcionaran en paralelo en forma simultánea formando un “sistema de bombeo”.

El esquema que se emplea para representar las bombas instaladas en paralelo es el siguiente:

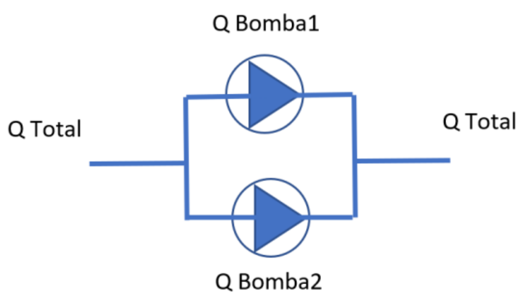

Figura 6

En ese caso ambas bombas estarán tomando el líquido de un colector común en la succión y lo estarán bombeando a otro colector común a la descarga de ambas.

La curva de funcionamiento de cada una de las bombas no va a cambiar por estar instaladas en serie o en paralelo con una o más bombas adicionales. Esto significa que el comportamiento de las bombas individualmente seguirá respondiendo a su única curva de funcionamiento.

Dos o más bombas en paralelo forman un “Sistema de Bombeo”, la energía que aporta al sistema se puede representar por una nueva curva que se logra sumando los caudales de cada una de las bombas cuya altura de salida son de la misma magnitud.

Es decir que la nueva curva o “curva del sistema de bombeo” será una que mantiene la energía entregada por cada una de las bombas pero sumando sus caudales.

En nuestro caso podremos representar la curva del “Sistema de Bombeo” con la gráfica *(Figura 7)* de la serie llamada QTOTAL:

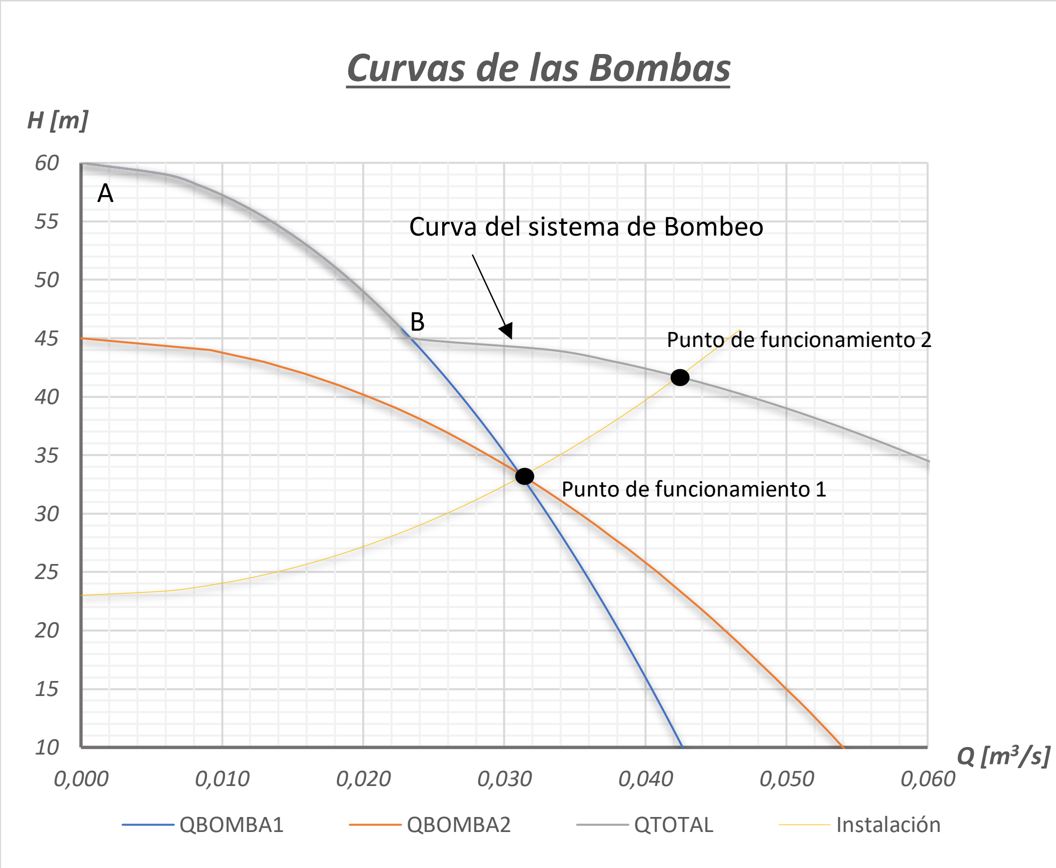

Figura 7

La función Q total representa la curva del "sistema de Bombeo", conformada por la suma de los caudales a igual H de cada una de las bombas.

Hay que notar que el tramo AB de la "curva del sistema de Bombeo" es coincidente con la curva de la Bomba N°1.

En este sector de la curva no hay aporte de la Bomba N°2, esto se debe a que la energía que hay que entregar al líquido supera la máxima energía que la misma puede entregar. En ese tramo dicha bomba no es capaz de entregar esa energía y por lo tanto no aporta nada al sistema de bombeo.

Si la curva de la instalación cortara la curva del sistema de bombeo en el sector AB, lo que ocurriría es que sólo la Bomba N°1 podría entregar la energía necesaria para vencer al sistema y por lo tanto será a través de ella que circule todo el caudal. La Bomba N°2 funcionará pero al no poder entregar la energía que requiere el sistema no podrá evacuar el caudal que tiene en su interior y por lo tanto estará recirculando siempre el mismo fluido que se encuentra en su interior (con los consiguientes problemas operativos que significa que gire el rodete con los álabes pero el caudal no salga de su carcaza). Operativamente sería lo mismo a que la Bomba N°2 estuviera funcionando con su válvula de salida cerrada.

Sólo cuando el sistema requiera que se le entregue una energía menor al fluido que la indicada en el punto B , podrá circular caudal por la Bomba N°2. A partir de ese momento se suman los caudales de la Bomba N°1 y la Bomba N°2.

Desde el punto B la "curva del sistema de bombeo" se desplaza hacia la derecha del gráfico y corta a la curva de la instalación en un nuevo punto 2.

El nuevo punto de funcionamiento 2, es el de equilibrio entre la "curva del sistema de bombeo" y la curva de la instalación.

El caudal PF2 de la *Figura 8*, será el resultante de la sumatoria del caudal que circula por cada una de las bombas, siendo que ambas bombas le entregaron la misma altura de energía al fluido que circula.

Cada bomba le transfirió una altura de aproximadamente 42,5 metros adicionales a la energía que tenía el fluido en la succión.

Para saber el caudal que circula por cada una de las bombas hay que realizar una relación entre el punto de funcionamiento 2 y las curvas características de cada una de las bombas.

El caudal que circulará por la Bomba N°1 quedará definido por la intersección de la línea de igual energía que la del Punto de Funcionamiento N°2 y la curva característica de la Bomba N°1, y con igual criterio se definirá el caudal de la Bomba N°2 (*Figura 8*).

De este modo se cumple que cada una de las bombas trabaja sobre un punto de su curva característica, respondiendo a su propia capacidad de poder entregar energía al sistema.

Si volvemos a la *Figura 4* , podemos observar que ambas bombas originalmente cuando funcionan individualmente le entregan la misma energía al sistema, operando prácticamente con el mismo caudal (punto A de la *Figura 4*).

En cambio, cuando funcionan en paralelo, la diferencia de caudal que circula en cada una de ellas es notoria, alrededor del 44 %, $Q_{Bomba1} = 0.016\ \frac{m^3}{s}$ y el $Q_{Bomba1} = 0.028\ \frac{m^3}{s}$. Esto queda claramente graficado en la *Figura 8.*

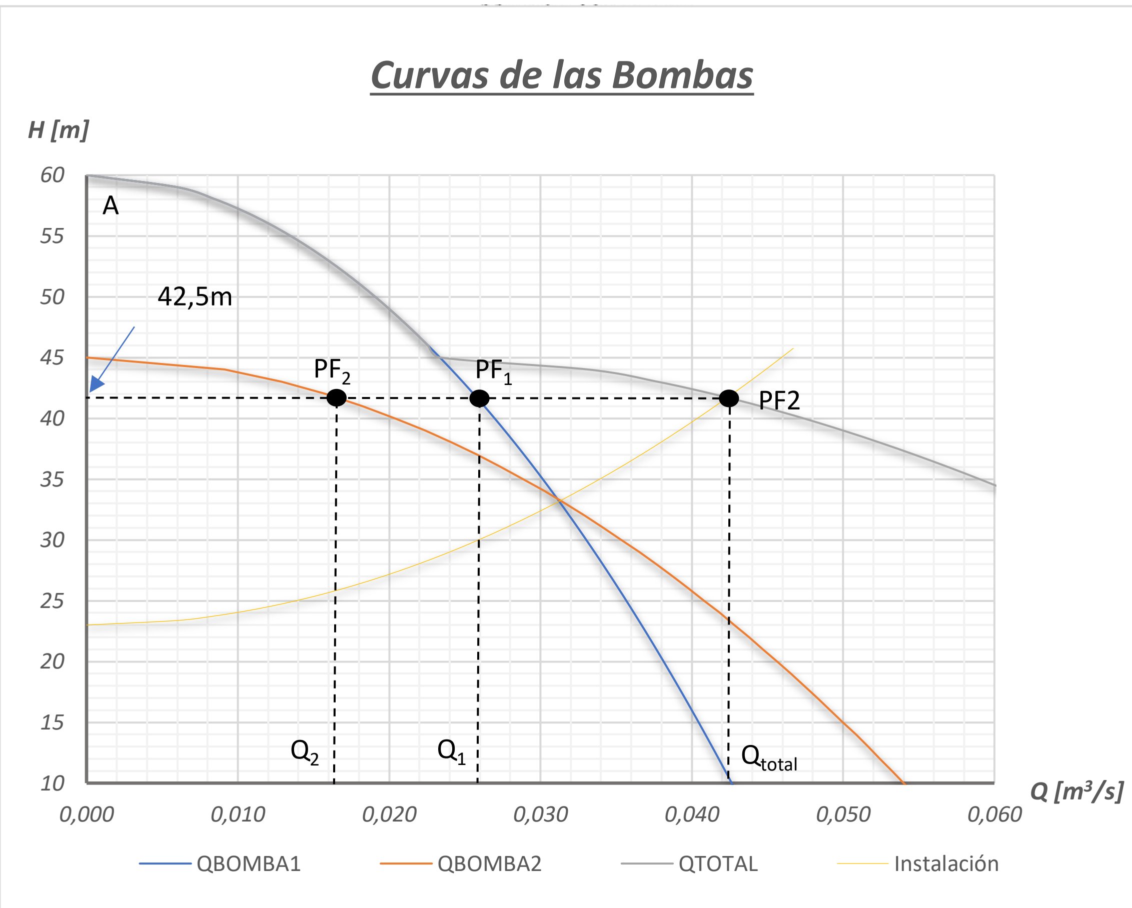

Figura 8

<u>Verificación del factor de fricción</u>:

Cuando comenzamos a resolver el ejercicio, lo que planteamos fue adoptar un factor de fricción igual a 0,02, obtenido de la *Figura 3* correspondiente a una cañería de Ø6" acero comercial de considerando que el fluido en su interior tiene una velocidad de 1 m/s, lo que define un Reynolds = 153.000

Con el nuevo punto de funcionamiento (obtenido en la *Figura 7)* vamos a verificar cual es el factor de fricción que le corresponde considerando la velocidad que va a tener el fluido en la cañería de Ø6".

Caudal en el punto de funcionamiento $Q = 0{,}043 \, \frac{m^3}{s} = 43 \, \frac{l}{s}$

Reynolds= 352.900

Si buscamos el nuevo valor del factor de fricción para esta condición obtenemos que:

El nuevo valor de f = 0.017 es significativamente inferior al adoptado originalmente, por lo tanto, hay que volver a calcular la nueva “curva de instalación”.

Ajustando este valor y resolviendo obtenemos que:

$$H_{bomba} = 23\,m + 0{,}993\frac{s^2}{m} * \left(\frac{53{,}652}{m^2} * Q\right)^2 + 2{,}134\frac{s^2}{m} * \left(\frac{53{,}652}{m^2} * Q\right)^2$$

$$H_{bomba} = 23\,m + 9.003\frac{s^2}{m^5} * Q^2$$

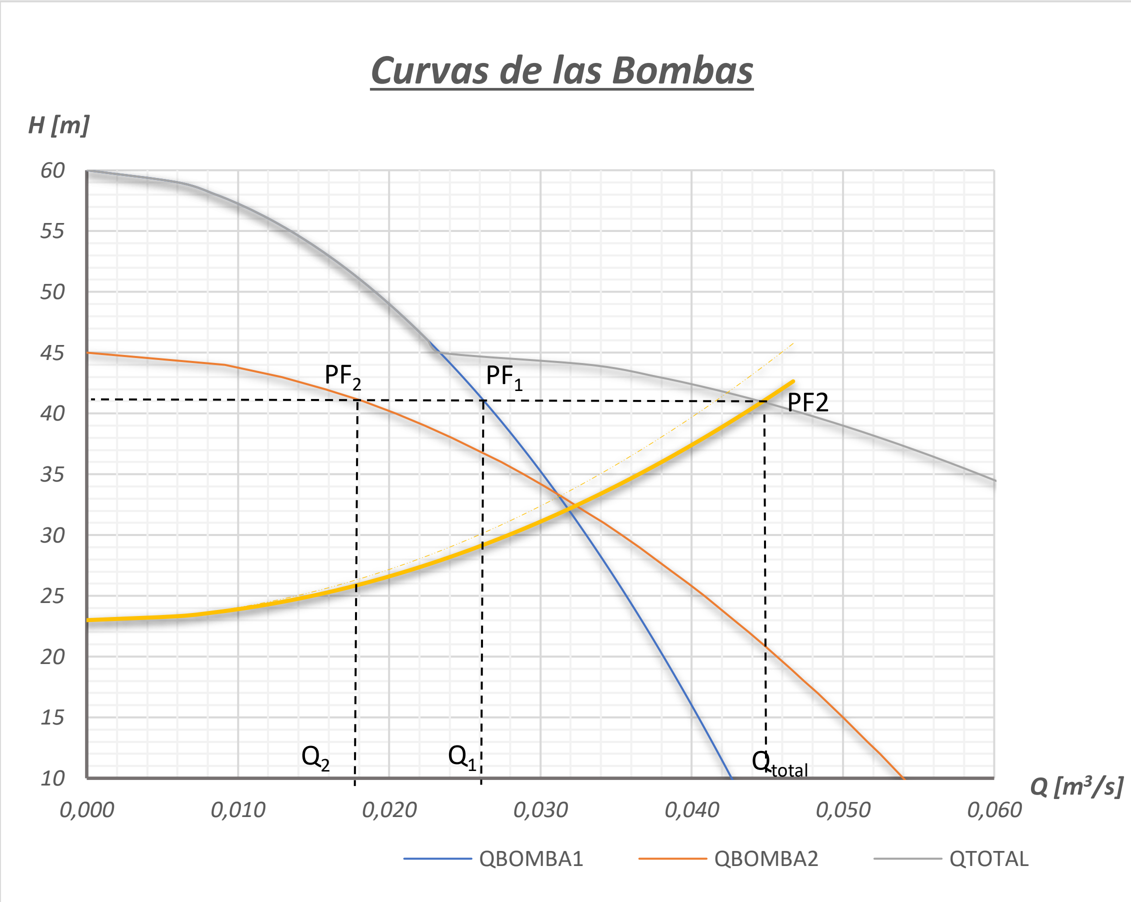

Figura 9

Estos son los nuevos valores obtenidos utilizando un factor de fricción de f:0.017.

Bomba	Caudal $\frac{m^3}{s}$	Altura – H m
Q_{Bomba1}	0.0265	42
Q_{Bomba2}	0.0180	
Q_{TOTAL}	0.0445	

Una vez que se obtiene el nuevo punto de funcionamiento (PF_1 y PF_2, *Figura 9*) de cada una de las bombas nos queda verificar si todas se encuentran funcionando fuera del zona de peligro de operar con cavitación.

A diferencia de la instalación de bombas en serie, hay que verificar que todas las bombas no estén dentro de la zona próxima a la cavitación, dado toman el líquido en condiciones de baja presión del colector común.

La cavitación cuando se bombea líquidos se produce porque la presión en la succión (punto de menor presión en el sistema) es menor que la presión de vapor para esta temperatura del fluido. Entonces las burbujas de vapor entran al inicio del alabe y comienzan a recibir el aumento de presión que las vuelve a transformar en líquido, generando una implosión de la burbuja sobre la pared del alabe que provoca esfuerzos altísimos en las paredes del alabe del rodete.

Cuando la bomba cavita se generan vibraciones, ruidos y esfuerzos que deterioran el rodete en forma prematura.

El fabricante junto con la curva de la bomba tiene que entregar la curva denominada ANPA o NPSH (Altura Neta de Presión de Admisión o Net Positive Succión Head) que no es otra cosa que la representación de la energía mínima que requiere tener el fluido cuando entra a la succión de la bomba para que ésta no cavite. Esta curva es inherente a la bomba, no depende de ninguna característica de la instalación o sistema en el cual se encuentra. La bomba por si misma requiere que el fluido ingrese con una energía mayor en la entrada para que no cavite.

En caso que no se disponga de la misma la misma debe ser reconstruida mediante ensayos en laboratorio. La curva ANPA de la bomba recibe el nombre de $ANPA_r$ (Altura Neta de Presión de Admisión Requerida).

Es importante que la energía del fluido en la succión sea superior a la minina energía necesaria por la bomba por las razones mencionadas anteriormente y por lo tanto es una verificación que obligatoriamente hay que realizar en cualquier instalación.

La energía disponible del fluido en el colector de entrada ($ANPA_d$) estará determinada por la energía inicial menos las pérdidas de energía por fricción del **caudal total** que circula en la cañería de succión, esa energía hay que compararla con la mínima energia indicada en la curva del $ANPA_r$ de la bomba correspondiente, pero no con caudal total sino con aquel que circula por la Bomba que se seleccionó (Q_1 ó Q_2 *Figura 9*)

Para hacer esta verificación hay que hacer nuevamente unos cálculos, planteando Bernoulli entre el reservorio o fuente del fluido y la brida de entrada de la bomba.

La máxima energía disponible para evitar que la cavitación en la bomba se puede obtener si definimos la función de la energía desde el inicio o fuente del líquido hasta la entrada a la bomba utilizando la ecuación de Bernoulli en ese tramo de cañería del sistema. A medida que el líquido circula va a perdiendo energía por fricción (en la cañería y en los accesorios) hasta que llega a brida de entrada donde se debe tener una presión mayor o igual que la presión de vapor del líquido para esa temperatura. A esa ecuación se la denomina $ANPA_d$ (Altura Neta de Presión de Admisión disponible).

El $ANPA_d$ es una función que depende exclusivamente de la geometría de la cañería de succión y su dimensionamiento, las características de la bomba no intervienen por lo tanto es independiente de la bomba.

Tanto la bomba como la cañería del sistema que se encuentra aguas abajo de la bomba (sector presurizado) no intervienen en la expresión del A.N.P.A $_d$.

$$\frac{P_A}{\gamma} + Z_A + \frac{{V_A}^2}{2\,g} += \frac{P_{suc}}{\gamma} + Z_{suc} + \frac{{V_{suc}}^2}{2\,g} + J_{Perdidas\ por\ fricción\ succión}$$

$$\frac{P_A - P_{succ}}{\gamma} + (Z_A - Z_{suc}) - \frac{{V_{suc}}^2}{2\,g} - J_{Perdidas\ por\ fricción\ succión} = A.N.P.A_d$$

El caso límite para evitar la cavitación es cuando $P_{succ} = P_{vapor}$

$$A.N.P.A_d = \frac{P_A - P_v}{\gamma} + (Z_A - Z_{suc}) - \frac{{V_{suc}}^2}{2\,g} - J_{Perdidas\ por\ fricción\ succión}$$

La presión de vapor para el agua a 20° es de 0.0239 kgf/cm^2(a) con lo cual para ser consistente hay que utilizar la P_A en la misma escala absoluta. Si no se quiere utilizar la presión en la escala absoluta, hay que expresar a la presión de vapor en presiones relativas, siendo esta igual a presión de vapor menos la presión atmosférica apox -1.0091 kgf/cm^2.

Cuando se desarrolló la curva de la instalación, la misma se obtuvo como suma de las pérdidas por fricción de la cañería de succión más las pérdidas en la cañería de descarga.

Para el $A.N.P.A_d$ sólo hay que tener en cuenta las pérdidas de fricción de succión. El sector de análisis se concentra exclusivamente en la cañería de succión y particularmente en la entrada de la bomba, que es el punto de menor energía del sistema.

La función que representa las pérdidas de fricción en la cañería de succión es:

$$J\_succión = 2859\frac{s^2}{m^5} * Q^2$$

La velocidad en la cañería de ingreso a la bomba es:

$$\frac{{V_{suc}}^2}{2\,g} = 146{,}765 * Q^2$$

Dándole valores a la expresión del $A.N.P.A_d$ se obtiene:

$$A.N.P.A_d = \frac{(1{,}033 - 0{,}0239)\,\frac{kgf}{cm^2}}{998{,}23\,\frac{kgf}{m^3}} + (11 - 0)m - 2.859\,\frac{s^2}{m^5} * Q^2 - 146{,}765\,\frac{s^2}{m^5} * Q^2$$

$$A.N.P.A_d = 10{,}109m + 11m - 3005{,}765\,\frac{s^2}{m^5} * Q^2$$

$$A.N.P.A_d = 21.109m - 3005{,}765\,\frac{s^2}{m^5} * Q^2$$

Q [m³/s]	$A.N.P.A_d$ [m]	$A.N.P.A_r$ [m] (*)
0	21,109	2,00
0,005	21,034	2,03
0,010	20,808	2,12
0,015	20,432	2,27
0,020	19,906	2,48
0,025	19,230	2,75
0,030	18,403	3,08
0,035	17,426	3,47
0,040	16,299	3,92
0,045	15,021	4,43
0,050	13,593	5,00

(*) Datos entregados por el fabricante de la bomba

La columna del ANPA$_r$ son datos aportados por el fabricante de la bomba, lo importante es verificar que el $\mathrm{A.N.P.A}_r < \mathrm{A.N.P.A}_d$ para asegurar que la bomba trabaja en un punto donde no cavita.

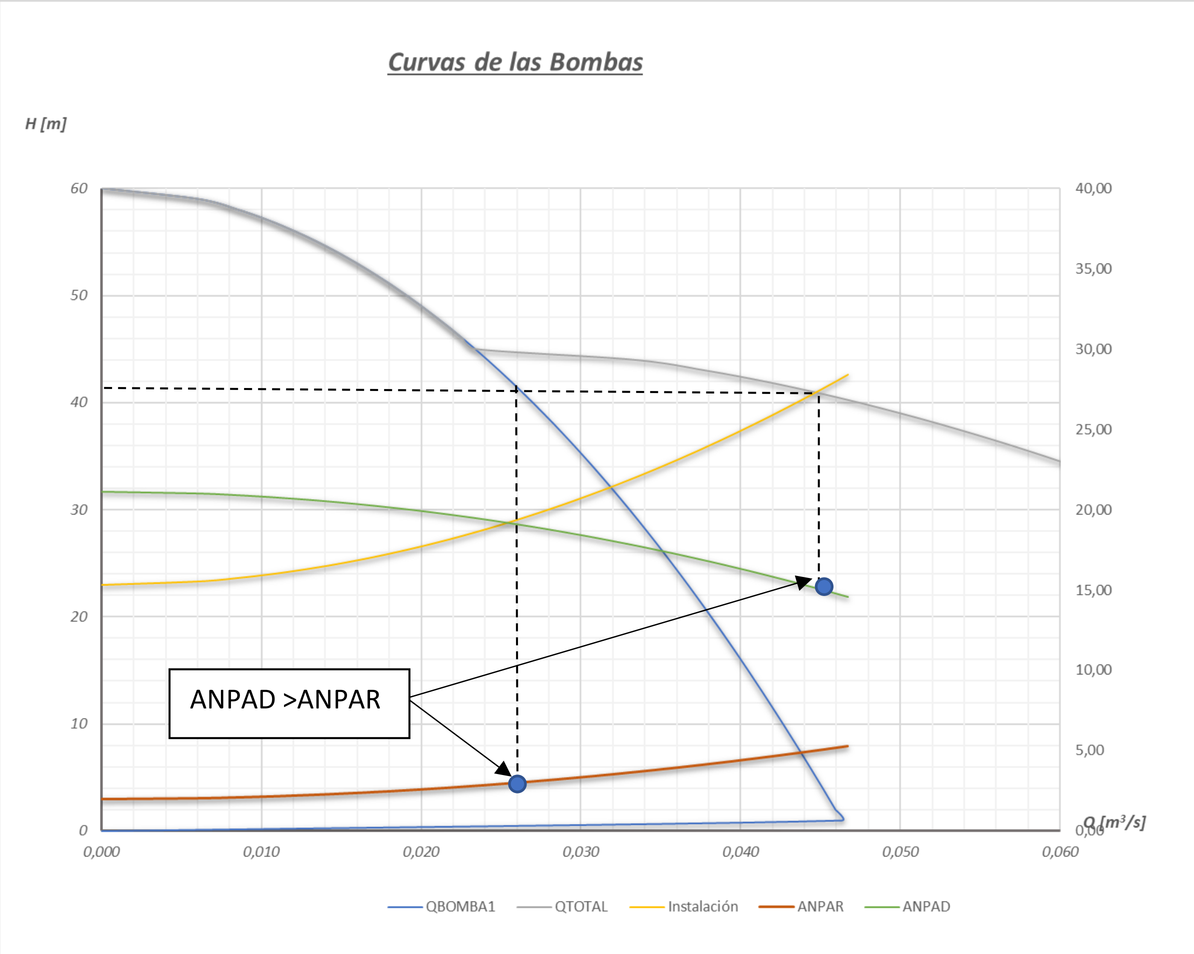

Figura 10

En el punto de funcionamiento de Q = 44,5 $\frac{m^3}{s}$ se puede observar que la energía de entrada del fluido a la entrada de la bomba es de aproximadamente 15,1 m.

Pero los 15,1m será la energía disponible del colector de succión, no todo el caudal va a circular por ala Bomba N°1, el caudal que circulará será Q_{Bomba1} = 0.0265 $\frac{m^3}{s}$ y la bomba requiere para su correcto funcionamiento de una energía de 2.81 m para dicho caudal. Cuanto mayor sea la diferencia entre el $\mathrm{A.N.P.A}_d$ y el $\mathrm{A.N.P.A}_r$ significa que la bomba trabaja mas lejos del punto de cavitación.

$$A.N.P.A_d = 21.109m - 3005{,}765\frac{s^2}{m^5} * Q^2$$

$$A.N.P.A_d = 15.1m$$

Sabiendo el punto de funcionamiento también se puede obtener el rendimiento de la bomba en ese punto, para esa verificación hay que buscar utilizando el grafico entregado por el fabricante cuál es el rendimiento de la bomba en el punto de funcionamiento.