

SIMULACION DE CIRCULACIÓN DE FLUIDOS

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (UEG)

1 INTRODUCCIÓN

1.1 CIRCULACIÓN DE FLUIDOS

En todas las plantas industriales es necesario el manejo, transporte y almacenamiento de diferentes líquidos y gases. El desplazamiento de fluidos, comúnmente denominado flujo de fluidos, conlleva siempre un coste energético y, por tanto, un coste económico. Las pérdidas de energía mecánica que se producen durante el desplazamiento de un fluido como consecuencia del rozamiento están directamente relacionadas con la viscosidad y, en general, con las propiedades reológicas del mismo.

Las instalaciones de flujo de fluidos se diseñan teniendo en cuenta el coste de las conducciones, del equipo de impulsión y demás accesorios, así como el consumo de energía que se produce durante el desplazamiento del fluido. Por lo tanto, para el análisis o diseño de este proceso se necesitará plantear el balance de materia, el balance de energía mecánica (semejante al balance de cantidad de movimiento) y la ecuación de velocidad de la propiedad que controla el proceso de transporte (ecuación de Fanning).

Estudiaremos el caso de circulación de fluidos newtonianos incompresibles, que llenan completamente la conducción y circulan en régimen estacionario por conducciones de sección circular.

Recordemos la ley de Newton de la viscosidad para fluidos newtonianos, que ya se vio en la Introducción a la Ingeniería Bioquímica:

$$\tau_{yx} = -\mu \cdot \left(\frac{dv_x}{dy} \right) \quad \text{Ley de Newton} \quad (1)$$

es decir, el esfuerzo cortante (τ_{yx}) y el gradiente de velocidad (v_x) son proporcionales. La constante de proporcionalidad recibe el nombre de viscosidad del fluido (μ) y depende de la naturaleza del fluido. La viscosidad de un fluido newtoniano depende fundamentalmente de la temperatura, y en menor grado de la presión.

1.1.1 BALANCES

1.1.1.1 Balance de materia aplicado a una conducción por la que circula un líquido

Supondremos que los sistemas considerados se encuentran siempre en estado estacionario, por lo que el balance macroscópico de materia toma la sencilla forma:

$$\Delta m = 0 \quad \rightarrow \quad m_1 = m_2 \quad (2)$$

es decir, que en el caso de que tengamos una entrada y una salida (en el caso más general, la única magnitud que se mantiene constante a lo largo de la conducción es el caudal másico, m). Expresión que podemos ponerla en la forma:

$$Q_{L1} \cdot \rho_1 = Q_{L2} \cdot \rho_2 \quad \rightarrow \quad V_1 \cdot S_1 \cdot \rho_1 = V_2 \cdot S_2 \cdot \rho_2 \quad (3)$$

Si el fluido es incompresible (líquidos), entonces $\rho_1 = \rho_2 = \rho \equiv \text{cte}$, por lo que el balance de materia queda como:

$$S_1 \cdot V_1 = S_2 \cdot V_2 \quad (4)$$

siendo las unidades de las variables que intervienen las siguientes:

$$\begin{array}{l} m \rightarrow \text{kg} / \text{s} \\ Q_L \rightarrow \text{m}^3 / \text{s} \end{array}$$

$$\begin{array}{l} \rho \rightarrow \text{kg} / \text{m}^3 \\ V \rightarrow \text{m} / \text{s} \end{array}$$

$$S \rightarrow \text{m}^2$$

1.1.1.2 Balance de energía mecánica

En el caso de la circulación de fluidos apenas hay intercambio térmico y la energía puesta en juego es, casi totalmente, energía mecánica, por lo que sólo se suele plantear como balance energético el balance de energía mecánica.

Recordemos el balance de energía mecánica:

$$g \cdot \Delta z + \Delta \left(\frac{v^2}{2\alpha} \right) + \frac{\Delta P}{\rho} = \bar{W} - \sum F \quad (\text{J/Kg}) \quad (5)$$

siendo z la altura respecto a un origen, g la gravedad, v es la velocidad media y α depende del tipo de circulación (0.5 si es laminar y 1 si es turbulento), P es la presión, ρ la densidad del fluido, \bar{W} (= W/m) es el trabajo transferido por unidad de masa (J/kg), y $\sum F$ es la pérdida de energía mecánica por unidad de masa (J/kg).

Esta será la expresión de partida para el estudio de la circulación de líquidos por conducciones.

1.1.1.3 Perdidas de energía mecánica por rozamiento. ecuación de velocidad.

Simulación de circulación de fluidos

De forma general, la pérdida de energía mecánica que experimenta un fluido, que circula por un tramo real de conducción, vendrá expresada por:

$$\sum F = \sum F_{tr} + \sum F_{ac} \quad (6)$$

siendo

- ΣF_{tr} : pérdida de energía mecánica por unidad de masa en los tramos rectos de la conducción.
- ΣF_{ac} : suma de las pérdidas de energía mecánica por unidad de masa en los accidentes del sistema. Se deben a la existencia de rozamientos y turbulencias originados por los cambios de geometría del sistema (estrechamientos, ensanchamientos, entradas, salidas, ...) o por modificaciones de la vena fluida originadas por la presencia en la conducción de una serie de accesorios denominados accidentes (uniones, codos, tes, válvulas, ...).

1.1.1.3.1 Pérdidas de energía mecánica en los tramos rectos de conducción

Para **régimen de transición y turbulento** se utiliza una ecuación empírica denominada **ecuación de Fanning**, también válida para régimen laminar. Esta ecuación relaciona la pérdida de energía mecánica por unidad de masa que sufre un fluido cuando circula por una conducción con las características del fluido, las del flujo y las de la conducción, y es la ecuación de velocidad en los procesos de circulación de fluidos por conducciones:

$$\Sigma F = 2 \cdot f \cdot V^2 \cdot \frac{L}{D} \quad (7)$$

En esta expresión aparece f , que es un **factor de rozamiento** que ha de determinarse experimentalmente. El factor de rozamiento depende del valor del número de Reynolds y de la relación ε/D , denominada rugosidad relativa:

$$f = \Phi \left[Re, \frac{\varepsilon}{D} \right] \quad (8)$$

La rugosidad absoluta (ε) es una medida de la profundidad media que tienen las rugosidades e imperfecciones existentes en la superficie de la pared de la conducción. La rugosidad absoluta depende del material y método de fabricación de la tubería, y posee dimensiones de longitud. Los tubos lisos (vidrio y plástico) tienen una rugosidad nula. Existe una escala normalizada de rugosidades obtenidas experimentalmente para diferentes materiales, que se suele presentar en forma de tablas o gráficas.

Se han desarrollado y propuesto numerosas correlaciones de datos experimentales que permiten el cálculo del factor de rozamiento a partir de valores de la rugosidad relativa y del número de Reynolds. Entre las más utilizadas se encuentran:

- Gráfica de Moody

Simulación de circulación de fluidos

- Ecuación de Colebrook
- Gráfica de Moody. Aunque acabamos de decir que la ecuación de Fanning es una ecuación empírica, puede también deducirse por análisis dimensional y en dicha deducción aparece el factor f como una función del Re y de la rugosidad relativa ε/D . Pues bien, partiendo de esto y teniendo en cuenta las ecuaciones deducidas en el apartado anterior, Moody representó gráficamente el valor de $4f$ frente al Re , utilizando para ello una gran cantidad de datos experimentales y figurando el valor de ε/D como tercer parámetro, en una gráfica que es de la forma que se muestra en la Figura 1.

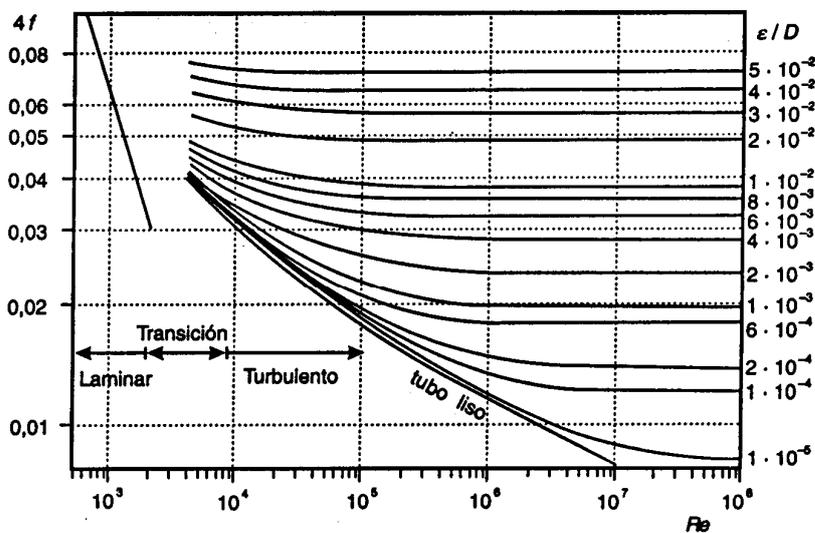


Figura 1. Gráfico de Moody para el cálculo del factor de rozamiento

- Ecuación de Colebrook. Es, en la actualidad, la ecuación que proporciona mejores valores del coeficiente de fricción, en un amplio rango de valores del Reynolds.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \cdot \log \left[\frac{\varepsilon/D}{3.7065} + \frac{1.257}{Re \cdot \sqrt{f}} \right] \quad \text{para } 4 \cdot 10^3 \leq Re \leq 10^7 \quad (9)$$

1.1.1.3.2 Pérdidas de energía mecánica en los accidentes presentes en la conducción

Se denominan así aquellas pérdidas de energía mecánica que experimenta el fluido por rozamiento al atravesar diferentes accesorios y accidentes presentes en las redes de flujo, tales como válvulas, codos, estrechamientos, ensanchamientos, bifurcaciones, etc. El valor correspondiente ha

de sumarse al que se produce durante la circulación en tramos rectos a fin de obtener las pérdidas totales de energía mecánica.

Las pérdidas de energía provocadas por estos elementos se suelen denominar “pérdidas menores” dado que su valor para cada accidente suele ser pequeño. Sin embargo, la suma de estas pequeñas pérdidas puede tener importancia y suponer un elevado porcentaje de la pérdida total.

Las pérdidas menores se pueden calcular por el procedimiento siguiente:

- Método de la constante característica.- Si el régimen de circulación es turbulento, como es lo más frecuente, se puede calcular la pérdida energía mecánica en el accidente como:

$$\Sigma F = K \cdot \frac{V^2}{2} \quad (10)$$

Se basa en suponer que para cada accidente, la pérdida de energía mecánica por unidad de masa es proporcional a la energía cinética del líquido, por unidad de masa. En esta ecuación, K es una constante característica de cada accidente y V es la velocidad media del fluido calculada según las normas que se indican en las tablas con los valores de K . Existen tablas con los valores de K para muchos accidentes.

1.2 BOMBAS

Considérese el circuito esquematizado en la figura 2, que une los puntos 1 y 2:

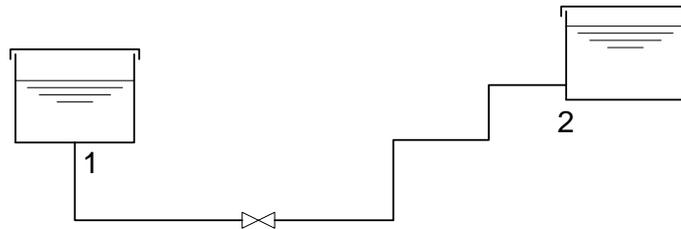


Figura 2. Esquema de un circuito

Si la energía mecánica del punto 1 es mayor que la del punto 2 el sentido de circulación se establecerá desde el punto 1 al punto 2. Si no es así y queremos que fluya en ese sentido, deberemos añadir una cantidad de energía mecánica por unidad de masa al sistema (\hat{W}_s) desde el exterior, de forma que cuando se alcanzara el estado estacionario se cumpliera que:

$$\hat{W}_s + g \cdot z_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2\alpha_1} - \Sigma F = g \cdot z_2 + \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2\alpha_2} \quad (11)$$

Esta energía mecánica se le suministra al sistema mediante unos aparatos que reciben el nombre de **bombas**. La expresión anterior es la ecuación general del balance de energía mecánica entre los puntos 1 y 2 de una conducción, y se suele expresar más frecuentemente como:

$$g(z_2 - z_1) + \left[\frac{V_2^2}{2\alpha_2} - \frac{V_1^2}{2\alpha_1} \right] + \frac{P_2 - P_1}{\rho} + \sum F = \hat{W}_s \quad (\text{J/kg}) \quad (12)$$

siendo \hat{W}_s la energía exterior que debe recibir el líquido por unidad de masa para su transporte.

Sin embargo, cuando se discuten los problemas de bombeo de líquidos los términos del balance de energía mecánica no suelen expresarse como energía por unidad de masa (J/kg), tal como aparecen en la anterior ecuación, sino como **cargas**, que no son más que los mismos términos divididos por la aceleración de la gravedad g . En este caso, las unidades de cada término serán:

$$(J / kg) / (m / s^2) \equiv m$$

es decir, que el valor de la energía mecánica de cada término viene expresada como la altura a la que podría elevarse el líquido de que se trate.

Así pues, el B.E.M. quedará, expresando todos los términos como cargas, de la forma:

$$(z_2 - z_1) + \left[\frac{V_2^2}{2 \cdot g \cdot \alpha_2} - \frac{V_1^2}{2 \cdot g \cdot \alpha_1} \right] + \frac{P_2 - P_1}{g \cdot \rho} + \frac{\sum F}{g} = \frac{\hat{W}_s}{g} \quad (13)$$

Variación de la
carga estática

Variación de la carga de
velocidad

Variación de la
carga de presión

Pérdida de
carga

Carga de la
bomba

Todo el primer miembro de esta ecuación recibe el nombre de carga del sistema h_s . El segundo miembro se denomina carga de la bomba, h_b . Según esto, el B.E.M. puede escribirse de forma simplificada como:

$$h_s = h_b \quad (14)$$

La carga del sistema depende del conjunto de conducciones y de la naturaleza del líquido que circule por ellas; la carga de la bomba depende de la bomba que se instale. Por esta razón vamos a estudiar independientemente el sistema por un lado y la bomba por otro, y luego veremos cómo interaccionan entre sí cuando una determinada bomba se coloca en un sistema concreto, interacción que viene dada por la ecuación anterior.

Se puede considerar que la bomba divide al sistema en dos partes: el lado de **aspiración** o de succión (que es el que se encuentra antes de la bomba, siguiendo el sentido de la corriente) y el lado de **impulsión** (el lado que se encuentra después de la bomba). Estos nombres vienen de la denominación de las dos bocas que tiene la bomba: la de aspiración o de succión (por donde entra el

líquido) y la de impulsión (por donde sale). En este sistema, se pueden definir los siguientes conceptos: carga de aspiración, carga de impulsión y carga total del sistema.

Recibe el nombre de carga de aspiración, h_a , el valor de la energía mecánica que posee el líquido en la boca de aspiración de la bomba (punto 3 de la figura anterior), expresada en metros de líquido:

$$h_a = z_1 + \left(\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2.\alpha} - \sum F_a \right) \frac{1}{g} \quad (15)$$

ecuación que se utiliza para calcular el valor de la carga de aspiración si se conocen las condiciones del punto 1 y $\sum F_a$ (pérdida de energía mecánica por unidad de masa en el lado de aspiración). Puede observarse que al aumentar el caudal de líquido que circula por el sistema disminuye la carga de aspiración, ya que aumenta la pérdida de carga en dicho tramo.

Recibe el nombre de carga de impulsión, h_i , el valor de la energía mecánica que posee el líquido en la boca de impulsión de la bomba (punto 4 de la figura anterior) expresado en metros de líquido:

$$h_i = z_2 + \left(\frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2.\alpha} + \sum F_i \right) \frac{1}{g} \quad (16)$$

ecuación que se utiliza para calcular la carga de impulsión, si se conocen las condiciones del punto 2 y $\sum F_i$ (pérdida de energía mecánica por unidad de masa en el lado de impulsión). En ella puede observarse que al aumentar el caudal de líquido que circula por el sistema aumenta la carga de impulsión, ya que aumenta la pérdida de carga en dicho tramo.

Se denomina carga total del sistema, h_s , a la diferencia algebraica entre la carga de impulsión y la carga de aspiración:

$$h_s = h_i - h_a \quad (17)$$

por lo que, teniendo en cuenta las ecuaciones anteriores:

$$h_s = (z_2 - z_1) + \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2.\alpha} + \sum F \right) \frac{1}{g} \quad (18)$$

donde $\sum F$ es la pérdida de energía mecánica en todo el sistema:

$$\sum F = \sum F_a + \sum F_i \quad (19)$$

Como se ha indicado anteriormente, al aumentar el caudal que circula por el sistema aumenta h_i y disminuye h_a , por lo que la carga total del sistema aumentará.

1.2.1 CARACTERÍSTICAS DE UNA BOMBA

Se puede definir una **bomba** como cualquier máquina o aparato que sirva para transportar líquidos de un sitio a otro a través de una conducción. Para conseguir que un líquido se desplace con

un determinado caudal, la bomba debe suministrar al sistema una cantidad determinada de energía mecánica.

Estas dos magnitudes, la **capacidad de la bomba** (caudal de líquido que es capaz de impulsar la bomba, Q_L , en m^3/s) y la **carga de la bomba** (la energía mecánica que la bomba suministra al líquido expresado como carga, h_B , en m) son las características más importantes de una bomba. Es conveniente resaltar que, para una bomba determinada, las dos magnitudes anteriores no tienen un valor único. Esto quiere decir que según el caudal que deba impulsar la bomba, suministrará una carga distinta, y al revés, según la carga que deba suministrar en una operación, impulsará un caudal de líquido mayor o menor. En realidad, para cada bomba existe una relación entre estas dos variables:

$$h_B = f(Q_L) \quad (20)$$

conocida como **curva característica** de la bomba. Esta relación es independiente de la densidad del líquido bombeado por estar expresada la carga como “metros de líquido”.

El aumento de energía mecánica por unidad de tiempo (potencia, $J/s \equiv \omega_s$) que experimenta el líquido en la bomba para poder circular, viene dado por:

$$\omega_s = \dot{W}_s \cdot m = (h_B \cdot g) \cdot (Q_L \cdot \rho) \quad (21)$$

Ahora bien, esta potencia aprovechada por el líquido (ω_s), que denominaremos teórica, no coincide con la consumida por el motor de la bomba, ya que en el proceso de transmisión existen una serie de pérdidas. Sólo una parte de la energía que consume el motor se aplica a la bomba; sólo una parte de la energía que llega a la bomba se aplica al líquido, y sólo una parte de la energía que llega al líquido es captada por él. De aquí que el consumo real de energía sea bastante superior al que hemos denominado teórico.

Se puede definir un rendimiento para cada una de estas operaciones, aunque normalmente sólo se suele usar el **rendimiento total de la bomba**, que es el cociente entre la potencia aprovechada por el líquido y la potencia real consumida por el motor:

$$\eta = \frac{\omega_s}{\omega_{real}} \quad (22)$$

El rendimiento de una bomba es otra de sus características y también depende, para cada bomba, del caudal que proporciona en cada momento.

De las ecuaciones anteriores se puede deducir que la **potencia real** consumida por el motor de una bomba viene dada por:

$$\omega_{real} = \frac{\omega_s}{\eta} = \frac{h_B \cdot Q_L \cdot \rho \cdot g}{\eta} \quad (23)$$

Como puede observarse, la potencia consumida por una bomba depende del caudal, y también de la carga y del rendimiento (que a su vez, dependen del caudal). Además, depende de la naturaleza del líquido bombeado, ya que en la ecuación anterior aparece su densidad.

Simulación de circulación de fluidos

Todas estas características de las bombas aparecen en los catálogos de los fabricantes. Pueden darse en forma de tabla o de gráfica. En este último caso suele representarse la carga, el rendimiento, la potencia real (en el caso de que el líquido fuera agua) y el NPSH requerido por la bomba, frente al caudal desarrollado por la bomba. El NPSH requerido es una característica adicional de la bomba, utilizada para determinar su punto de instalación, como veremos posteriormente. En la Figura 3 puede observarse una de estas gráficas características.

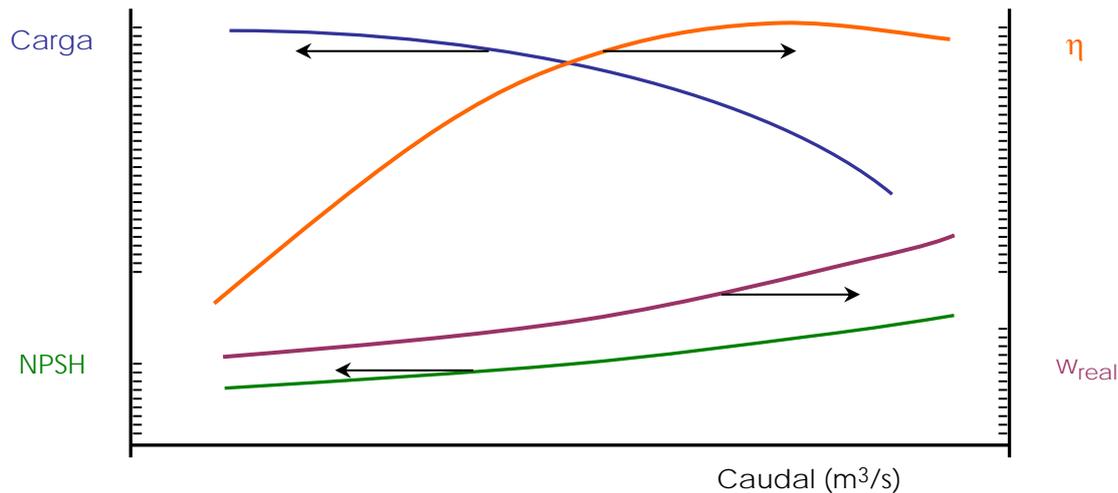


Figura 3. Ejemplo de gráfica característica de una bomba.

1.2.2 PUNTO DE INSTALACIÓN DE UNA BOMBA

Se denomina carga neta de aspiración disponible en el sistema o **NPSH disponible en el sistema** (*Net Positive Suction Head*) a la diferencia entre la carga de aspiración y la presión de vapor del líquido a la temperatura de circulación (P^0), expresadas ambas como cargas.

Teniendo en cuenta el valor de h_a dado anteriormente, el NPSH disponible en el sistema se calculará como:

$$NPSH_{disponible} = z_1 + \frac{1}{g} \left[\frac{V_1^2}{2\alpha} + \frac{P_1 - P^0}{\rho} - \sum F_a \right] \quad (24)$$

donde se comprueba que es una característica del sistema, pues depende de su altura, de la situación de la bomba y de las características particulares de la tubería.

El NPSH disponible en el sistema es un concepto muy importante, que nos permitirá establecer el punto de instalación de una bomba. Su valor no puede ser nunca cero o negativo, ya que si fuera así el líquido herviría en la boca de aspiración de la bomba (o incluso antes de llegar a ella), lo que ocasionaría graves problemas de funcionamiento. Pero no sólo es suficiente con eso, porque aunque la presión en la boca de aspiración sea ligeramente superior a la presión de vapor, dentro del cuerpo

de la bomba puede suceder el fenómeno denominado **cavitación**. Durante la cavitación una parte de líquido se vaporiza como consecuencia de la disminución de la presión dentro de la bomba, apareciendo burbujas en el seno de la corriente líquida que son arrastradas a las zonas de mayor presión de la bomba, produciendo su colapso y dando lugar a ruidos y vibraciones importantes. Este fenómeno hay que evitarlo por encima de todo, ya que disminuye el rendimiento y ocasiona daños mecánicos en la bomba; además produce una disminución de las presiones de descarga y aspiración, lo que puede provocar que la bomba se vacíe de líquido.

Para saber cuando se produce la cavitación, los fabricantes de bombas especifican un valor mínimo del NPSH disponible para que la bomba trabaje sin presentar este problema. Este valor mínimo, denominado **NPSH requerido por la bomba**, es una característica de la misma (como ya se ha comentado anteriormente) y depende de su diseño. Así pues, el NPSH requerido por la bomba representa la carga mínima de aspiración que debe poseer el líquido a la entrada de la bomba para que no se produzca la cavitación, con un determinado caudal de circulación del líquido.

Por lo tanto, para determinar en qué punto de la instalación debe colocarse la bomba para que el fluido pueda circular sin que se produzca cavitación, se debe cumplir que el NPSH disponible en el sistema sea por lo menos igual al NPSH requerido por la bomba en dicho punto.

Si no se dispone del dato concreto del NPSH requerido, se debe colocar la bomba en un punto tal en el que la presión estática (P_3) sea algo superior a la presión de vapor del líquido que circula (P^0). Si aplicamos un B.E.M. entre los puntos 1 y 3 (boca de aspiración de la bomba):

$$g(z_3 - z_1) + \frac{V_3^2 - V_1^2}{2 \cdot \alpha} + \frac{P_3 - P_1}{\rho} + 2 \cdot f \cdot V^2 \cdot \frac{L_a}{D} = 0 \quad (25)$$

se puede calcular la longitud total de tubería (tramos rectos más accesorios) que debe existir antes del punto de aspiración de la bomba (L_a), obteniéndose de esta manera el punto de colocación.

Si el valor del NPSH disponible en el sistema es inferior al NPSH requerido por la bomba ($P_3 < P^0$), tendremos que aumentar su valor para evitar la cavitación. Para ello, existen diferentes soluciones:

- colocar la bomba tan cerca como sea posible del inicio del sistema, así la zona de aspiración será corta y las pérdidas de energía mecánica pequeñas
- disminuir el caudal de circulación, ya que así disminuirán las pérdidas de energía mecánica
- colocar la bomba en carga ($z_1 > 0$) y no en aspiración ($z_1 < 0$)
- disminuir la presión de vapor del líquido, disminuyendo su temperatura
- aumentando la presión en el inicio del sistema (P_1)

Además, cuando se considera la instalación de la bomba hay que tener en cuenta que tanto el NPSH disponible como el NPSH requerido por la bomba no tienen un valor fijo, sino que dependen del caudal que se establezca; el NPSH disponible en el sistema disminuye con el caudal, mientras que el NPSH requerido por la bomba aumenta. Siempre nos encontraremos con algunos de los tres casos esquematizados en la Figura 2.16.

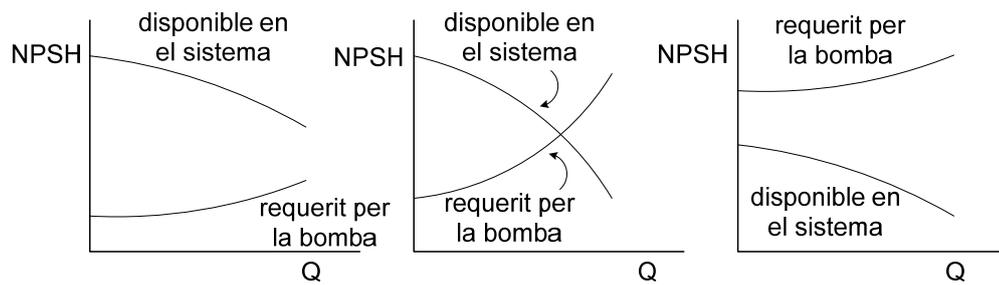


Figura 4. Situaciones posibles a la hora de instalar una bomba entre el NPSH disponible en el sistema y el NPSH requerido por la bomba

En el primer caso, para todo el intervalo de caudales proporcionado por la bomba, el NPSH disponible en el sistema siempre es mayor que el NPSH requerido por la bomba. El funcionamiento de la bomba será, por tanto, correcto. En el segundo caso, para caudales pequeños podría funcionar bien la bomba, pero si el caudal aumentara por encima del punto de cruce de las dos curvas, se produciría la cavitación. En el tercer caso, para todo el intervalo de caudales proporcionado por la bomba, el NPSH disponible en el sistema siempre es menor que el NPSH requerido por la bomba. La bomba no es la adecuada para llevar a cabo esta operación o está mal colocada, porque se produce la cavitación.

1.2.3 CAUDAL Y CARGA SUMINISTRADOS POR UNA BOMBA EN UN SISTEMA

Cuando una bomba está trabajando colocada en una conducción, y haya transcurrido el tiempo necesario para alcanzar el régimen estacionario, se establecerá un determinado caudal de circulación. En ese momento, entre los dos extremos del sistema, se cumplirá el balance de energía mecánica, de acuerdo con la ecuación (35) ya vista, que puede expresarse de forma resumida como:

$$h_s = h_b \quad (26)$$

La carga del sistema se define mediante la ecuación:

$$h_s = (z_2 - z_1) + \left(\frac{P_2 - P_1}{\rho} + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2\alpha} + \sum F \right) \frac{1}{g} \quad (27)$$

y para una operación dada, aumenta con el caudal de líquido que circula por la conducción, debido a que $\sum F$ aumenta casi con el cuadrado del caudal de líquido, si la circulación es turbulenta.

Por otra parte, de las curvas características de las bombas se conoce la relación existente entre la carga de la bomba y el caudal que proporciona. En todas las bombas, la carga proporcionada

disminuye con el caudal (muy rápidamente en el caso de las bombas de desplazamiento positivo, y más lentamente en el caso de las bombas cinéticas).

Si se representa en una gráfica carga-caudal, cómo varía la carga del sistema con el caudal y por otro lado, cómo varía la carga de la bomba con el caudal (curva característica de la bomba), el punto de intersección de ambas curvas cumplirá la ecuación del B.E.M., y nos dará la carga del sistema y de la bomba, y el caudal que circulará por el sistema y por la bomba. La Figura 5 muestra estas representaciones para bombas de desplazamiento positivo y bombas centrífugas.

Ésta es, por tanto, la forma de calcular el caudal que proporciona una bomba determinada en un sistema específico: representar conjuntamente la curva característica de la bomba (h_B-Q_L) y la función (h_s-Q_L), y determinar el punto de corte.

Se puede comprobar en la Figura 5 que la bomba de desplazamiento positivo dará un caudal que no dependerá prácticamente del sistema en que se encuentre, mientras que el caudal que da la bomba centrífuga depende fuertemente del sistema.

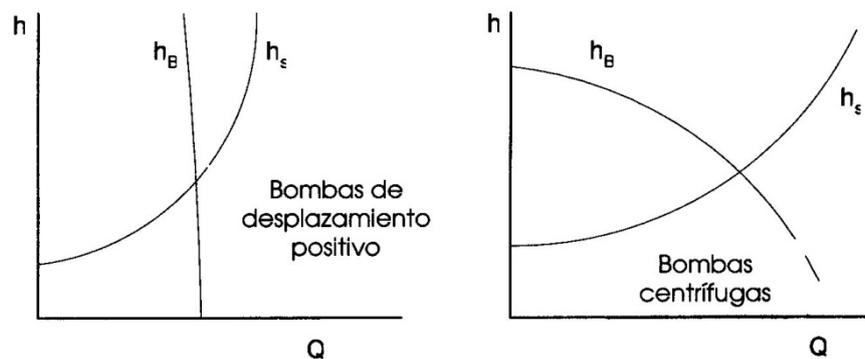


Figura 5. Gráficas para el cálculo del caudal en bombas de desplazamiento positivo y centrífugas

En lo que se acaba de exponer, se ha supuesto implícitamente que el NPSH disponible en el sistema es superior al NPSH requerido por la bomba. Si esto no fuera así y, a partir de un cierto caudal, el NPSH disponible se hiciese menor que el requerido por la bomba, la carga suministrada por la bomba disminuiría rápidamente, como se muestra en la Figura 6, debido a que la bomba empezaría a cavitarse, y el caudal proporcionado por la bomba sería mucho menor.

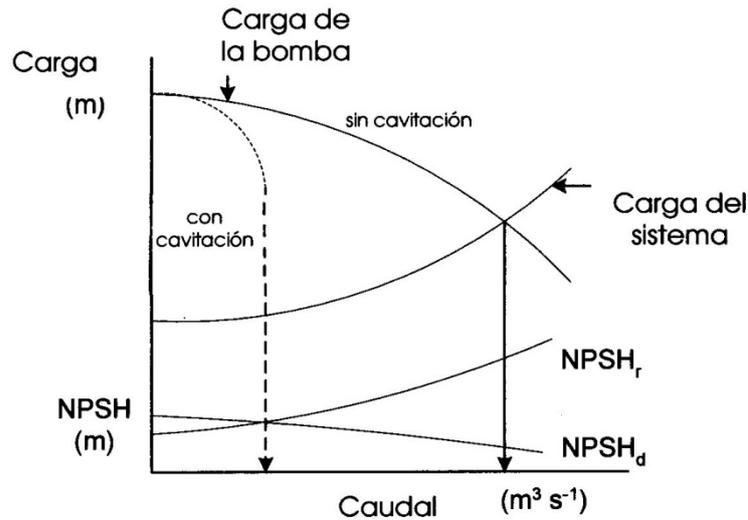


Figura 6. Ejemplo de comportamiento de la carga de la bomba ante el fenómeno de cavitación

2 EL SIMULADOR: EPANET

2.1 INTRODUCCIÓN A EPANET

EPANET es un simulador desarrollado por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los EEUU (U.S. Environmental Protection Agency). Se trata de un programa de libre acceso que ha sido traducido al español por un grupo de profesores de la Universidad Politécnica de Valencia (Grupo Multidisciplinar de Modelación de Fluidos de la Universidad Politécnica de Valencia). Ambas versiones, en inglés y español, y sus respectivos manuales pueden descargarse en la web de libre acceso que se da a continuación:

<http://www.instagua.upv.es/Epanet/>

El simulador permite el diseño y análisis de una instalación de red de agua potable a presión o cualquier instalación industrial que conste de depósitos o tanques de almacenamiento, conducciones, bombas de cualquier tipo, válvulas y fuentes de abastecimientos como ríos, lagos o embalses.

EPANET permite analizar y diseñar redes de cualquier tamaño, calcula las pérdidas de energía mecánica en las conducciones, incluye el cálculo de las pérdidas de energía mecánica en accidentes tales como codos, acoplamientos, etc.... Permite calcular la energía consumida y el coste de bombeo de las estaciones, así como añadir la curva característica de una bomba dada y valorar su viabilidad. Modela diferentes tipos de válvulas, como válvulas de regulación, retención, aislamiento, de control de caudal, etc... Permite el almacenamiento de agua en tanques que presenten cualquier geometría. Y otras muchas variables en relación con el modelo hidráulico que no vamos a tratar aquí. Asimismo,

Simulación de circulación de fluidos

permite trabajar con sistemas con reacción química, caso que tampoco vamos a tratar en esta práctica.

2.2 NOMENCLATURA DEL SIMULADOR.

El simulador utiliza en algunos casos una nomenclatura un tanto característica que debemos conocer para poder abordar con seguridad su manejo.

Entre estos conceptos merece una mención especial el de “demanda”. La demanda en un

En primer lugar es necesario conocer qué son para el simulador los componentes físicos del sistema y sus características: conexiones, bombas, conducciones, etc...

Para ello en primer lugar se revisará del capítulo 3 del manual los siguientes apartados, fijándonos en las características hidráulicas de los mismos (como cota, demanda, presión, diámetro, nudos de entrada y salida, longitud, rugosidad, caudal, velocidad, factor de fricción, ...) y obviando aquellas que están relacionadas con la reacción química o calidad del agua:

- Conexiones.
- Depósitos.
- Tanque.
- Tuberías.
- Pérdidas menores (accidentes).
- Bombas.
- Válvulas.
- Curvas: Curva Característica de una Bomba, Curva de Rendimiento.

Si es necesario a lo largo de la sesión de prácticas se tendrá en cuenta que:

- En el Capítulo 4 (página 47 del manual) se podrá consultar cualquier duda que surja sobre los menús, iconos o comandos del simulador.
- Por otra parte, en el Capítulo 6 (página 67 del manual) se detallan los diferentes objetos (conexiones, depósitos, nudos, tanques, tuberías bombas, válvulas, curvas...) que podemos añadir en nuestro plano de red y las opciones que da el programa a la hora de definirlos.

Dentro de las características particulares de EPANET tendremos en cuenta que:

- La ecuación de Fanning corresponde con la de Darcy-Weisbach del manual (pag. 28).
- Calcula el factor de fricción de la ecuación de Fanning mediante la aproximación de Swamee y Jain a la ecuación de Colebrook para régimen turbulento (pag. 201).
- Utiliza para el cálculo de la rugosidad tablas (pag. 28).
- Calcula las pérdidas de energía mecánica en los accidentes mediante el método de la constante característica (pág. 29).

2.3 INTRODUCCIÓN AL MANEJO DEL SIMULADOR. EJEMPLO PRÁCTICO.

Para empezar a trabajar con el simulador, una vez abierto clicando dos veces sobre el icono correspondiente del escritorio, se procederá a la lectura del apartado 1.4 (página 4 del manual) sobre los pasos generales para realizar una simulación en EPANET.

A continuación, para familiarizarnos con el manejo del simulador, sus iconos y menús, en primer lugar se realizará paso a paso el ejemplo de red que se describe en el punto 2.2 del manual (se inicia en la página 8 del manual).

Una vez se haya finalizado completamente este ejemplo y mostrado el resultado al profesor, se continuará la sesión con los ejercicios marcados en el siguiente apartado.

Para el seguimiento en el manual del ejemplo práctico tendremos en cuenta las siguientes equivalencias en cuanto al glosario seguido por el manual y el que encontraremos en la traducción al castellano de EPANET:

Predeterminado = Valores por defecto

Editor de Propiedades = Editar

Altura, Elevación = cota

Datos del Buscador = Datos (ventana dcha)

ANTES DE FINALIZAR LA SESIÓN DEBES DE ENVIAR POR E-MAIL A TU PROFESOR TODOS LOS CASOS GUARDADOS, COMO PRUEBA DEL TRABAJO REALIZADO. ASIMISMO TE LOS DEBES DE ENVIAR A TU PROPIO CORREO YA QUE ESTÁ PROHIBIDO INTRODUCIR CUALQUIER PEN O ELEMENTO AJENO EN EL PORTÁTIL.

2.4 CASOS PRÁCTICOS DE SIMULACIÓN DE CIRCULACIÓN DE FLUIDOS.

