

Operaciones Unitarias 1

La ecuación de Bernoulli revisitada



La ecuación de Bernoulli revisitada Flujo de fluidos incompresibles newtonianos



$$\frac{P_1}{\rho} + gz_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2} + w_s = \frac{P_2}{\rho} + gz_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2} + e_L \quad J \cdot kg^{-1}$$

$$P_1 + \rho gz_1 + \alpha_1 \rho \frac{v_1^2}{2} + \rho w_s = P_2 + \rho gz_2 + \alpha_2 \rho \frac{v_2^2}{2} + \Delta P_L \quad Pa$$

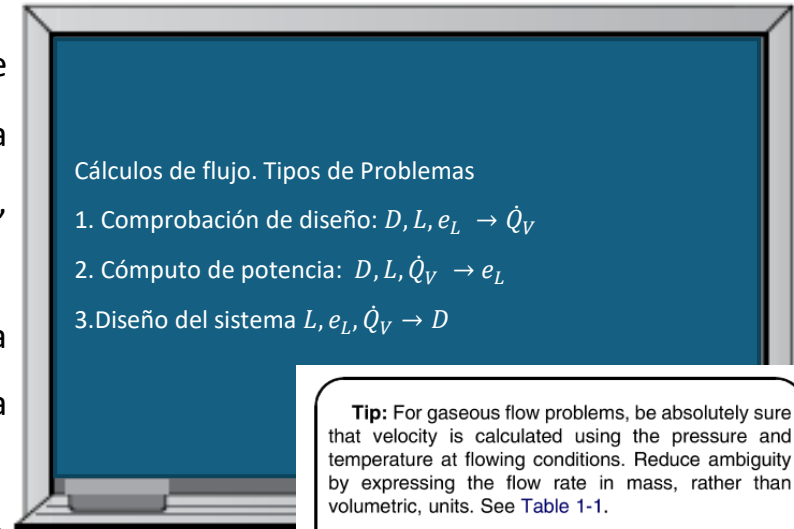
$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + H_s = \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_L \quad m$$

Balance de energía en estado estable, entre un punto y otro del sistema de transporte. Los tres primeros términos de cada miembro de la ecuación establecen relaciones de conversión de energía (este es el sentido de balance), los dos últimos de cada miembro, no;

w_s es energía específica entregada al sistema y e_L energía específica convertida en energía térmica. Este último término es siempre positivo. “Perdida de carga o caída de Presión” significa energía mecánica convertida en energía interna. Si el sistema es adiabático el fluido se calienta; si es diatérmico se transfiere energía como calor al medio ambiente.

La ecuación de Bernoulli revisitada Tipos de problemas de flujo

1. Comprobación de diseño: Determinar la tasa volumétrica de flujo o caudal \dot{Q}_V para una instalación definida (longitud de la trayectoria L , diámetro de la tubería D y las irreversibilidades, e_L o h_L se conocen)
2. Determinar el potencial impulsor requerido: (y/o potencia requerida) para una instalación definida (longitud de la trayectoria L , diámetro de la tubería D , se conocen), dado \dot{Q}_V
3. Diseño del sistema: Determinar el diámetro de la tubería D cuando la longitud L y la tasa de flujo volumétrica \dot{Q}_V se conocen



Tip: For gaseous flow problems, be absolutely sure that velocity is calculated using the pressure and temperature at flowing conditions. Reduce ambiguity by expressing the flow rate in mass, rather than volumetric, units. See Table 1-1.

Table 1-1
Suggested starting point for pipe sizing using fluid velocity or pressure drop criteria

Service	Velocity, m/s or Other Criteria	Velocity, ft/s or Other Criteria
Air, compressed	20 to 30	65 to 100
Gas, dry	15 to 40	50 to 120
Gas, wet	10 to 18	30 to 60
Petrochemicals	1.5 to 4	5 to 12
Sodium hydroxide, 0–30%	1.8	6
Sodium hydroxide, 30–50%	1.5	5
Sodium hydroxide, 50–73%	1.2	4
Steam, dry, high pressure (> 2 bar, superheated)	50	150
Steam, saturated, low pressure (<= 2 bar)	30	100
Steam, small branch lines	15	50
Steam, wet	10 to 15	30 to 50
Vacuum, below 50 mm Hg absolute pressure	Max 5% pressure loss	
Vapor lines, general	Up to 0.3 Mach	
Water, average service	1.5 to 3	5 to 10
Water, boiler feed	1.5 to 4.6	5 to 15
Water, pump suction	0.3 to 1.5	1 to 5
Water, sea and brackish	1.5 to 4	5 to 12
Water, wastewater, pump suction	1 to 1.8	3 to 6
Water, wastewater, pump discharge	1 to 2.5	3 to 8
Water, wastewater, gravity	0.6 to 2.5	2 to 8

REFERENCE: Swamee, Prabhata K. and Jain, Akalank K. "Explicit Equations for Pipe-Flow Problems." *Journal of the Hydraulics Division*. ASCE. Vol. 102, No. HY5, Proc. Paper 12146, May, 1976. pp. 657-664

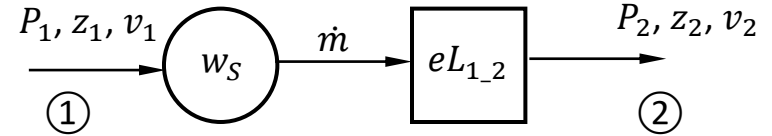
$$\dot{Q}_V = -0,965 \left(\frac{gD^5 h_L}{L} \right)^{0,5} \ln \left[\frac{\varepsilon}{3,7D} + \left(\frac{3,17v^2 L}{gD^3 h_L} \right)^{0,5} \right] \quad Re > 2000$$

$$h_L = 1,07 \frac{L \dot{Q}_V^2}{gD^5} \left\{ \ln \left[\frac{\varepsilon}{3,7D} + 4,62 \left(\frac{vD}{\dot{Q}_V} \right)^{0,9} \right] \right\}^{-2} \quad 10^{-6} < \frac{\varepsilon}{D} < 10^{-2}; \quad 3000 < Re < 3x10^8$$

$$D = 0,66 \left[\varepsilon^{1,25} \left(\frac{L \dot{Q}_V^2}{gh_L} \right)^{4,75} + v \dot{Q}_V^{9,4} \left(\frac{L}{gh_L} \right)^{5,2} \right]^{0,04} \quad 10^{-6} < \frac{\varepsilon}{D} < 10^{-2}; \quad 5000 < Re < 3x10^8$$

La ecuación de Bernoulli revisitada Concepto de potencial impulsor (*driving potential DP*)

$$\frac{P_1}{\rho} + gz_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2} + w_s = \frac{P_2}{\rho} + gz_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2} + eL_{1-2} \text{ J.kg}^{-1}$$



$$DP = \left(\frac{P_1}{\rho} + gz_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2} \right) - \left(\frac{P_2}{\rho} + gz_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2} \right) \text{ J.kg}^{-1}$$

$$DP + w_s = eL_{1-2} = \frac{8Q_{V,min}^2}{\pi^2 D^4} \left[f_D \frac{L}{D} + \left(\sum_j K_L \right) + K_{LV} \right] \text{ J.kg}^{-1}$$

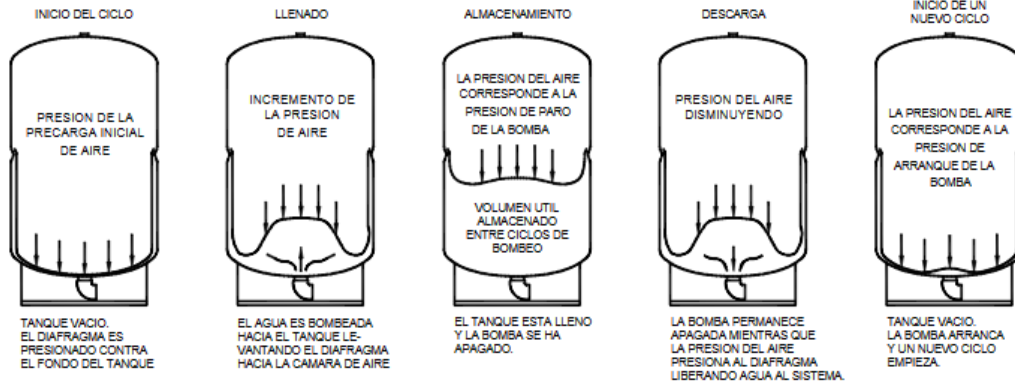


Si $DP > 0$ podrá no requerirse trabajo de bomba ($w_s = 0$) para obtener un caudal mínimo

$Q_{V,min}$ definido por el termino de irreversibilidad eL_{1-2} . Con la utilización de una bomba ($w_s > 0$) se

obtendrá siempre $Q_V \geq Q_{V,min}$

$DP \leq 0$ se requerirá siempre trabajo de bomba para lograr un flujo de transporte $Q_V \geq Q_{V,min}$



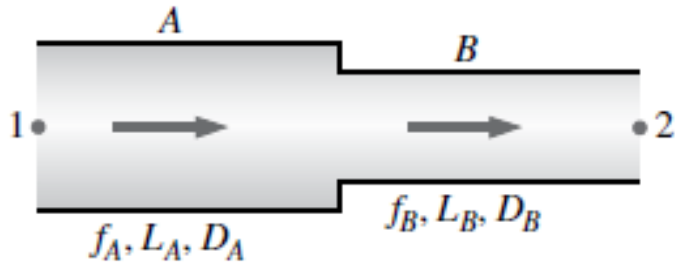
Tanque hidroneumático



Bladder inside tank

Sistemas complejos de conducción conducción en serie

$$\frac{P_1}{\rho} + gz_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2} + w_s = \frac{P_2}{\rho} + gz_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2} + eL_{1-2} \text{ J.kg}^{-1}$$



$$\dot{Q}_{V,A} = \dot{Q}_{V,B}$$

$$eL_{1-2} = eL_{1-A} + eL_{B-2} + eL_{cont/exp sub}$$

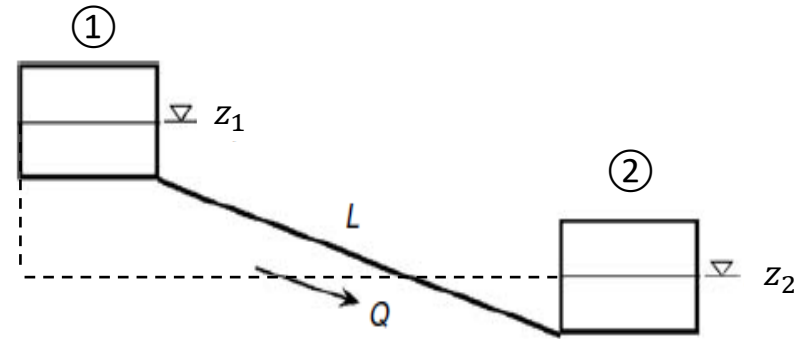
Para tuberías en serie, el caudal es el mismo en cada tubería, y la irreversibilidad total (perdida de carga total) es la suma de las irreversibilidades en las tuberías individuales. Una de las formas de calcular las pérdidas de carga, es considerarla en cada sección y luego sumarlos para obtener la pérdida total.

$$e_{L,i} = \left[\left(f_{D,i} \frac{L_i}{D_i} \right) + K_i \right] \frac{\bar{v}_i^2}{2} \rightarrow e_{L,i} = \left[\left(f_{D,i} \frac{L_i}{D_i} \right) + K_i \right] \frac{8Q_V^2}{\pi^2 D_i^4}$$

$v_i = \frac{4Q_v}{\pi D_i^2}$

Sistemas complejos de conducción conducción en serie Transporte gravimétrico de fluidos

El flujo por gravedad en un ducto ocurre cuando el fluido escurre desde una fuente en el punto A a una mayor altura que el punto de entrega B, sin ningún aporte de energía mecánica (puramente por gravedad). La velocidad de flujo recomendada en este tipo de transporte es de $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$



$$\frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + (z_2 - z_1) + h_{L,total} = 0 \quad h_{L,total} = h_{L,mayor} + h_{L,menor} = \sum_i f_i \frac{L_i}{D_i} \frac{\bar{v}_i^2}{2g} + \sum_j K_{L,j} \frac{\bar{v}_j^2}{2g}$$

Si $v_2 = v_1$ y se requiere una diferencia de presión manométrica en la salida del ducto:

$$\Delta P + \rho g(z_2 - z_1) + \Delta P_{L,total} = 0$$

Una condición más estricta (aunque común) ocurre si $P_2 = P_1$ y $v_2 = v_1$: $(z_1 - z_2) = h_{L,total}$

La sección del ducto se selecciona de modo que coincida su pérdida por irreversibilidad con la energía disponible para lograr el caudal deseado. Si se utilizan ductos comerciales, se recomienda elegir el diámetro inmediato superior al calculado. Si está definido un caudal máximo, deberá obtenerse mediante una restricción adicional (válvula) o bien auto balanceando el sistema al caudal máximo deseado mediante el reemplazo de un ducto simple por una combinación de ductos en serie.

La ecuación de Bernoulli revisitada Flujo de fluidos incompresibles no newtonianos



$$\frac{P_1}{\rho} + gz_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2} + w_s = \frac{P_2}{\rho} + gz_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2} + e_L \quad J.kg^{-1}$$

$$P_1 + \rho gz_1 + \alpha_1 \rho \frac{v_1^2}{2} + \rho w_s = P_2 + \rho gz_2 + \alpha_2 \rho \frac{v_2^2}{2} + \Delta P_L \quad Pa$$

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + H_s = \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_L \quad m$$

La ecuación de Bernoulli aplicable es la misma

$$\bar{v} = \frac{4Q_V}{\pi D^2}$$

Sin embargo, debe tenerse en cuenta, $N_{GRe} = \frac{D^n \bar{v}^{2-n} \rho}{K 8^{n-1}} \left(\frac{4n}{3n+1} \right)^n < N_{GRe,crit}$

en flujo laminar: $N_{GRe} < N_{GRe,crit}$

$$f_{D,nN} = \frac{64}{N_{GRe}}; f_{f,nN} = \frac{16}{N_{GRe}}$$

en flujo turbulento

$$\frac{1}{\sqrt{f_{f,nN}}} = \left(\frac{4}{n^{0,75}} \right) \log \left[N_{GRe} f_{f,nN}^{(1-\frac{n}{2})} \right] - \left(\frac{0,4}{n^{1,2}} \right)$$

$$e_L = \left\{ \frac{8}{\pi^2 D^4} \left[f_{D,nN} \frac{L}{D} + \left(\sum_j K_{L,nN} \right) + K_{LV,nN} \right] + \frac{\Delta P_0}{\rho} \left(\frac{1}{Q_{V,0}^2} \right) \right\} Q_V^2 \quad J.kg^{-1}$$

$$K_{L,nN} \equiv K_L \text{ si } N_{GRe} > 500 \text{ y } K_{L,nN} = \frac{500 K_L}{N_{GRe}} \text{ si } 20 < N_{GRe} < 500; \text{ ídem } K_{LV,nN}$$

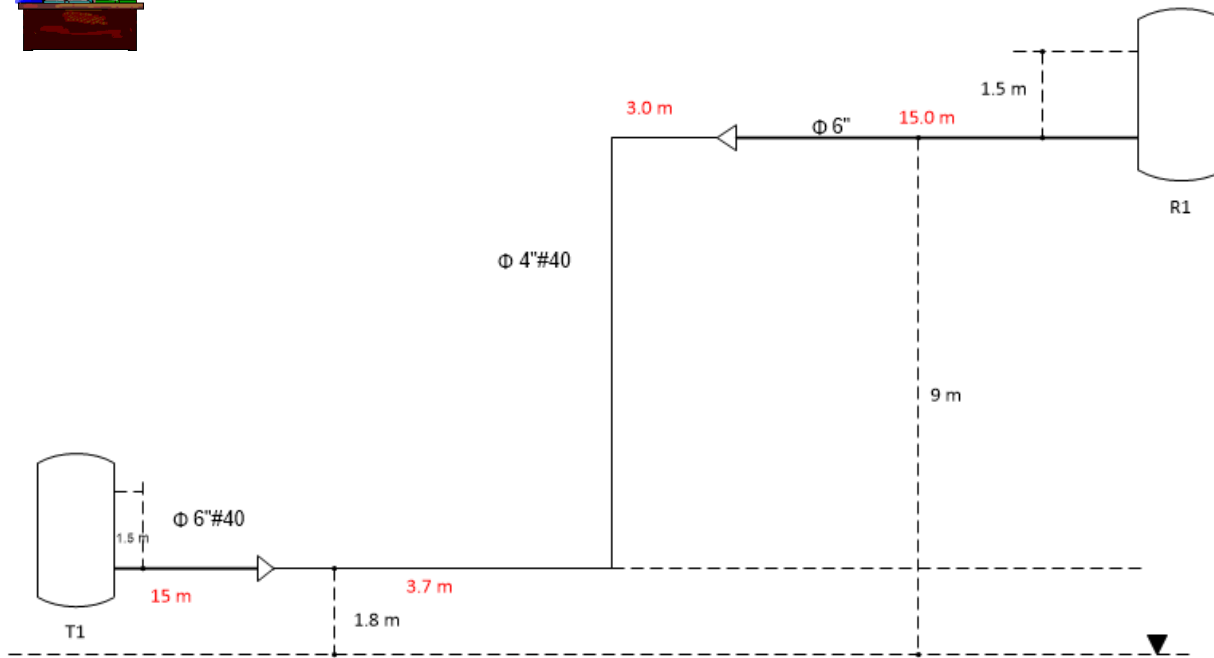
K , coeficiente de consistencia; n índice de flujo;

$f_{D,nN}$, factor de Darcy, $f_{f,nN}$ factor de Fanning, para fluidos no newtonianos que obedecen la Ley de Potencia



Se requiere un sistema de transporte de agua a 14°C entre dos tanques abiertos al ambiente. La distancia a cubrir entre los tanques es de 150 m y entre ellos el desnivel es de 20 m; el caudal no debe superar los $100 \text{ m}^3 \cdot \text{hr}^{-1}$; están disponibles cañerías PE80 ; la trayectoria requiere la utilización de un codo a 90° . Diseñar el sistema.

Una planta industrial localizada a 4000 msnm requiere incorporar un equipo de absorción de gases que opera a presión atmosférica a fin de cumplir con la normativa ambiental. El equipo de ingeniería determinó que se requiere la alimentación continua de $60 \text{ m}^3/\text{h}$ de agua para su operación y pretende utilizar agua de otra etapa de proceso disponible en un tanque de almacenamiento atmosférico a 35°C y cuyo punto de descarga se encuentra 9 m sobre el nivel del suelo. La línea de conducción que conecta el sistema tiene una longitud de 75 m y la boquilla de ingreso al equipo de absorción se localiza a 4 m sobre el nivel del suelo. a) Dimensione y especifique la línea de conducción. b) Analice si es necesario un equipo de impulsión que permita cumplir con el requerimiento de proceso. c) Por requerimiento de proceso es necesario incrementar en un 20% el caudal del fluido transportado, ¿en qué porcentaje incrementa la pérdida de carga en la línea? Considere que la línea de conducción es la establecida en el ítem a) d) Para la situación presentada en el caso anterior analice si el sistema cumple con el requerimiento del proceso. e) Durante la construcción de la línea de conducción, se encuentra que la longitud de línea real es un 10% al supuesto en la etapa de diseño. Evalúe el impacto sobre el sistema establecido en el ítem a)



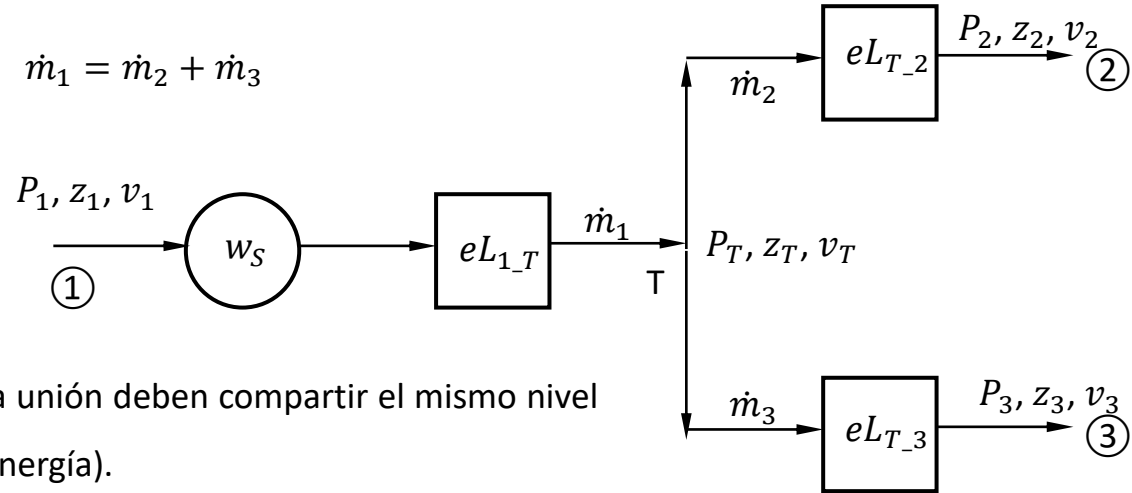
Para el sistema de transporte de la figura, que conduce agua a 15°C , a) evaluar el caudal máximo obtenible si la presión manométrica en el tanque (T1) es 6.8 bar y la del reactor (R1) es de 2.4 bar. b) Se requiere operar con un 75% del caudal suministrado por el sistema anterior, por lo que será restringido el flujo mediante una placa orificio inserta en el conducto de menor diámetro; dimensionar la placa orificio c) en lugar de una placa orificio se insertará una válvula globo de igual porcentaje en el conducto de menor diámetro; dimensione la misma de modo que opere a un 75% de su capacidad d) Evaluar la potencia requerida para el transporte al caudal de operación para la configuración de caudal controlado, si las presiones en los tanques son las del ambiente.

Sistemas complejos de conducción conducción ramificada

Los sistemas de tuberías ramificadas son el resultado de más de dos tuberías que convergen en una unión o empalme T. Estos sistemas deben satisfacer simultáneamente dos condiciones básicas:

1) la cantidad total de fluido escurrido por los ductos a un empalme debe ser siempre igual a la escurrida **desde** el empalme hacia los otros ductos (conservación de la masa).

2) todos los ductos que se encuentran en la unión deben compartir el mismo nivel de energía en la unión T (conservación de energía).



$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$$

$$P_1, z_1, v_1$$

①

w_S

$$eL_{1_T}$$

\dot{m}_1

T

$$P_T, z_T, v_T$$

\dot{m}_2

$$eL_{T_2}$$

$$P_2, z_2, v_2$$

②

\dot{m}_3

$$eL_{T_3}$$

$$P_3, z_3, v_3$$

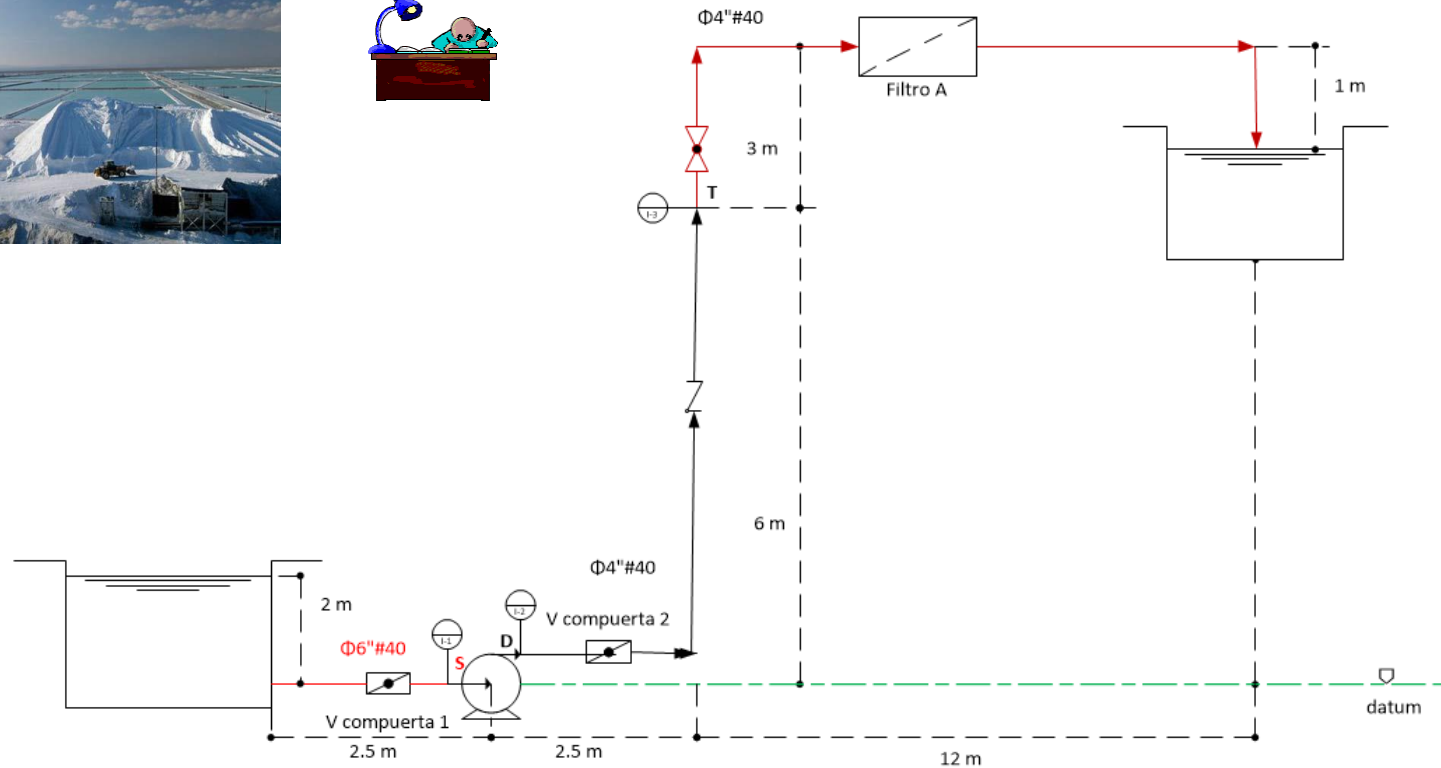
③

Estas ecuaciones son balances de energía específica [$J \cdot kg^{-1}$] válidas en cada tramo; no así, en un balance general; por la división de corrientes, la energía específica $J \cdot kg^{-1}$ no se conserva

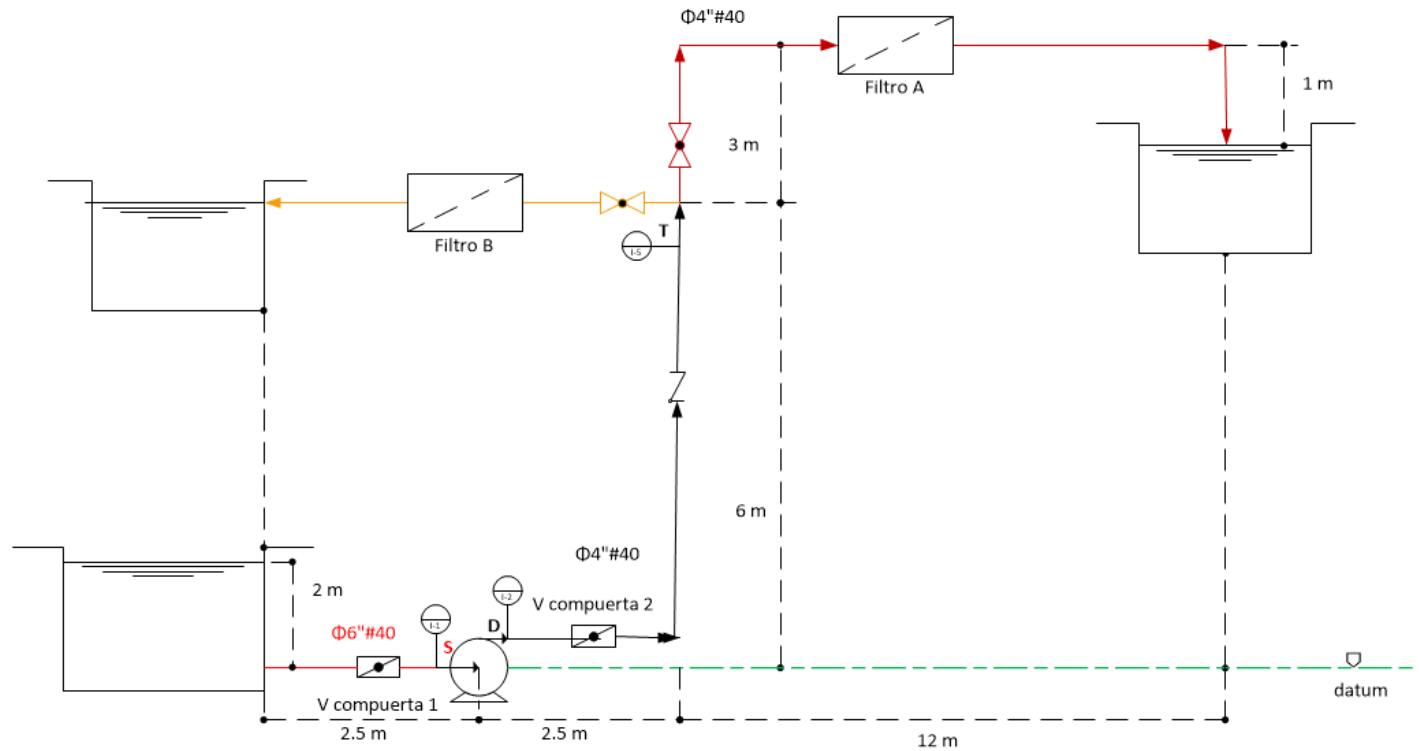
$$\left[\begin{aligned} \frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2} + gz_1 + w_S &= \frac{P_T}{\rho} + \alpha_T \frac{v_T^2}{2} + gz_T + eL_{1_T} \quad [J \cdot kg^{-1}] \\ \frac{P_T}{\rho} + \alpha_T \frac{v_T^2}{2} + gz_T &= \frac{P_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2} + gz_2 + eL_{T_2} \quad [J \cdot kg^{-1}] \\ \frac{P_T}{\rho} + \alpha_T \frac{v_T^2}{2} + gz_T &= \frac{P_3}{\rho} + \alpha_3 \frac{v_3^2}{2} + gz_3 + eL_{T_3} \quad [J \cdot kg^{-1}] \end{aligned} \right.$$

balance general

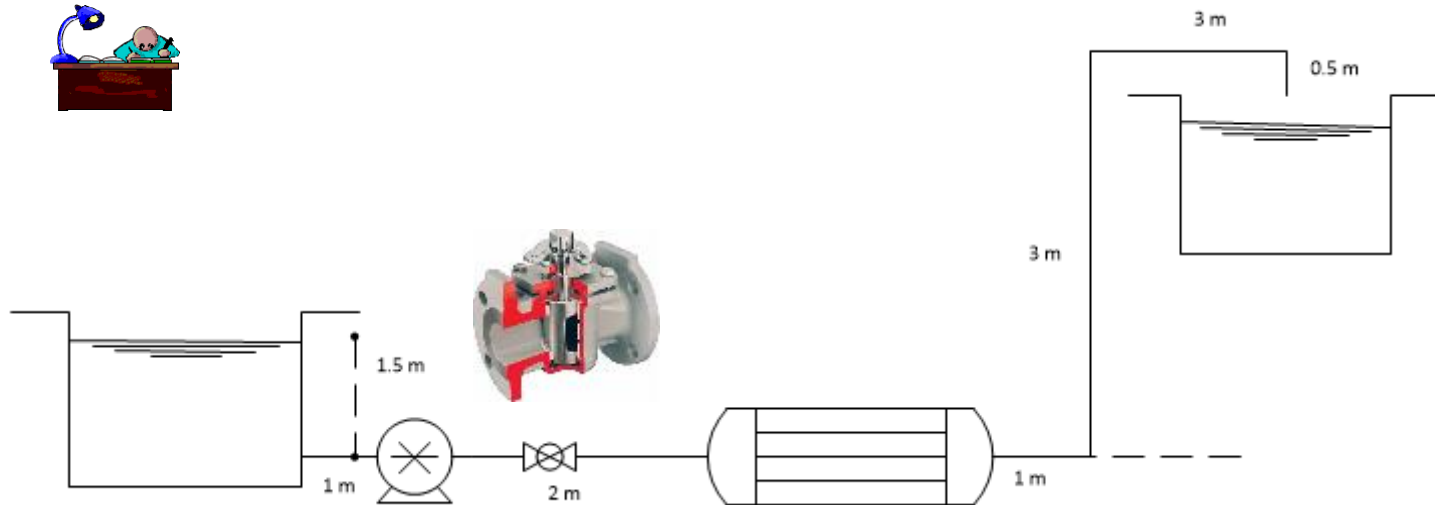
$$\dot{m}_1 \left(\frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2} + gz_1 \right) + \dot{m}_1 w_S = \dot{m}_2 \left(\frac{P_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \right) + \dot{m}_3 \left(\frac{P_3}{\rho} + \alpha_3 \frac{v_3^2}{2} + gz_3 \right) + \dot{m}_1 eL_{1_T} + \dot{m}_2 eL_{T_2} + \dot{m}_3 eL_{T_3} \quad [J \cdot s^{-1}]$$



Se requiere bombear una salmuera diluida (con escasas partículas en suspensión) a través de un filtro presurizado A desde un tanque depósito hasta un tanque de filtrado. El caudal es de $50 \text{ m}^3 \cdot \text{hr}^{-1}$, la temperatura de 15°C y la configuración de Planta es la de la figura. La planta está ubicada a 3900 msnm. El proveedor del equipo de filtración ha informado que su equipo presenta una caída de presión de 1.7 kPa a un caudal de $7 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ a) Evaluar la potencia necesaria de la bomba. b) las presiones manométricas en los puntos T, D y S. Asumir que las propiedades de la salmuera son idénticas a las del agua.



Se requiere bombear una salmuera diluida (con escasas partículas en suspensión) a través de dos filtros presurizados A y B desde un tanque depósito hasta dos tanques de filtrado. El caudal total a filtrar es de $50 \text{ m}^3 \cdot \text{hr}^{-1}$, la temperatura de 15°C y la configuración de Planta es la de la figura. La planta está ubicada a 3900 msnm. El proveedor del equipo de filtración ha informado que sus equipos presentan una caída de presión de 1.7 kPa a un caudal de $7 \text{ L} \cdot \text{s}^{-1}$ a) Evaluar la potencia necesaria de la bomba b) la presión manométrica en el punto T. c) determinar la relación de caudales en ambas ramas para la operación de bombeo de menor costo. Asumir que las propiedades de la salmuera son idénticas a las del agua.

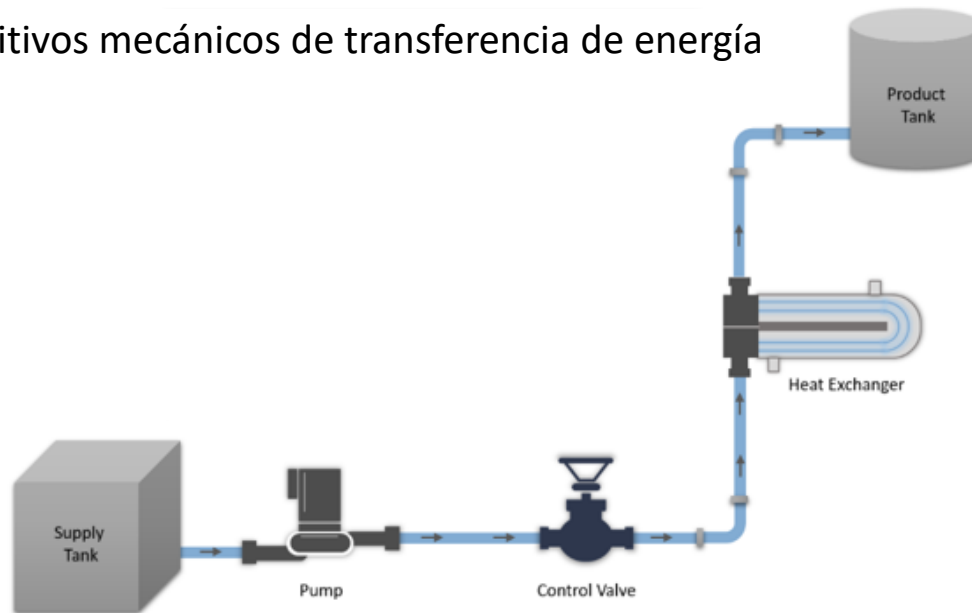


Se requiere transportar $1.97 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ de un fluido no-Newtoniano (densidad, $1250 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) de un tanque a otro, ambos abiertos, mediante un ducto de 1.25" # 40s. La caída de presión a través del SHE es de 100 kPa. Por incremento de la temperatura del fluido, su densidad disminuye un 6%. Asuma que el fluido presenta un comportamiento reológico modelable por LP. Asuma que el K_L de la *plug valve* es 2. Determine la potencia necesaria de bombeo en los casos en que, a) el coeficiente de consistencia es $5.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ y el índice reológico, 0.45; b) el coeficiente de consistencia es $0.25 \text{ Pa}\cdot\text{s}^n$ y el índice reológico, 0.45.

Operaciones Unitarias 1

Elementos para el transporte de fluidos

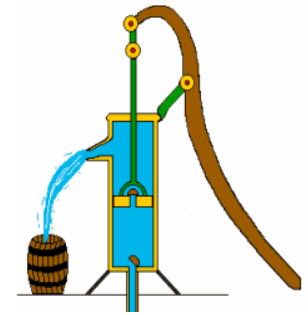
- Dispositivos mecánicos de transferencia de energía



Dispositivos mecánicos de transferencia de energía

Pumps (bombas)

Proveen la energía necesaria para mover un fluido a través de un sistema de transporte (tuberías). Son parámetros característicos: Gasto / caudal , carga, presión, eficiencia



$$w_s = \frac{P_2 - P_1}{\rho} + g(z_2 - z_1) + \frac{1}{2}(\alpha_2 v_2^2 - \alpha_1 v_1^2) + \frac{8}{\pi^2 D^4} \left[f_D \frac{L}{D} + \left(\sum_j K_L \right) + K_{LV} \right] Q_V^2 + \left[\frac{\Delta P_o}{Q_{vo}^2} \right] Q_v^2 \text{ J.kg}^{-1}$$

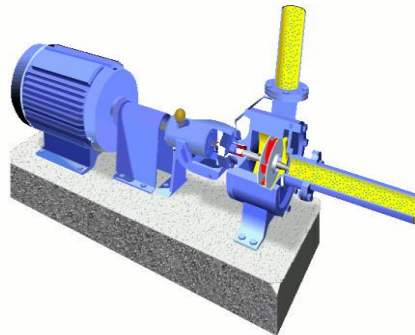
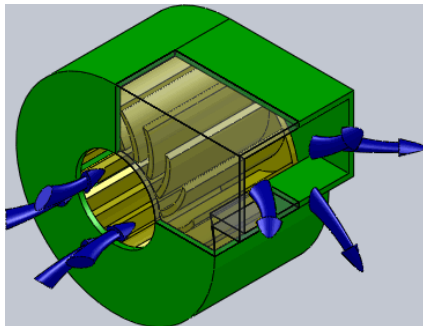
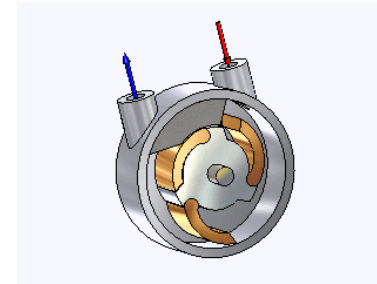
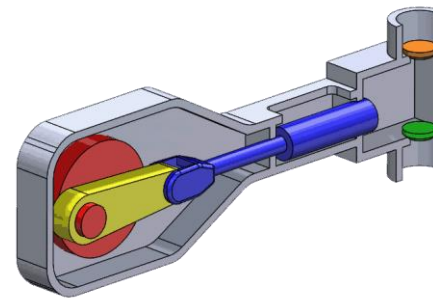
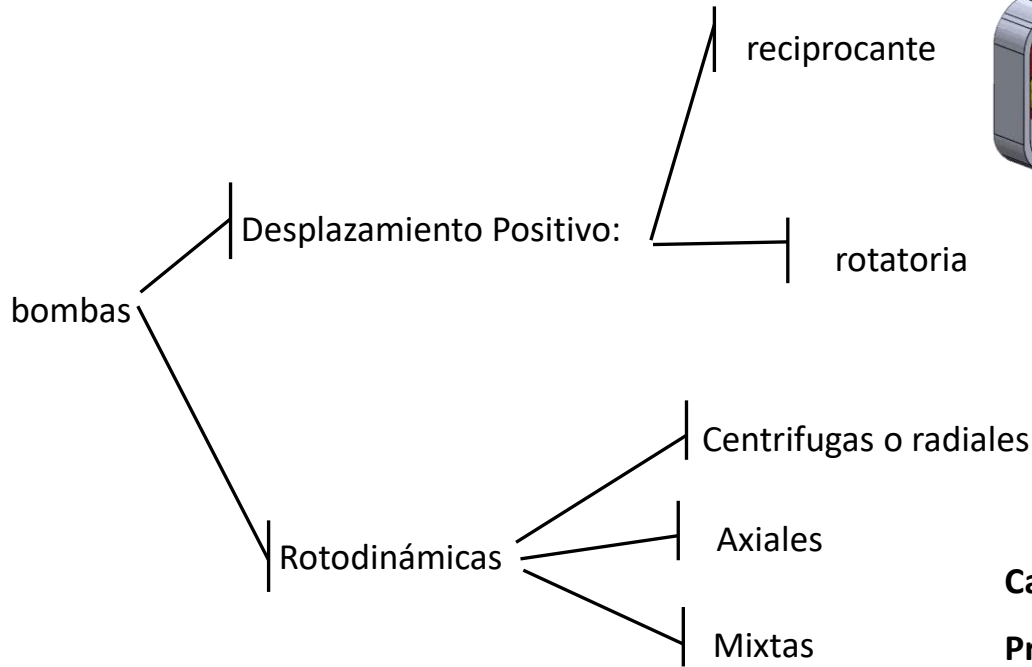
Para que el líquido fluya, se debe entregar trabajo. Una bomba convierte la energía en su eje en energía de fluido. Esta energía de fluido se usa para:

1. elevar el líquido a una altura mayor
2. superar una alta presión en un recipiente;
3. superar la irreversibilidad (o resistencia viscosa) en el transporte;
4. aumentar la velocidad del fluido;
5. o, todas las anteriores.

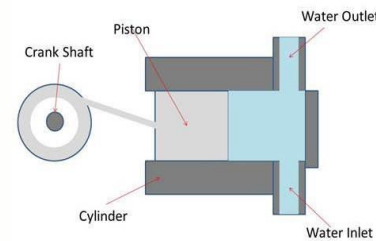


Arquímedes reconoció la funcionalidad de las bombas a mediados del siglo III A.C. Por la invención del tornillo de Arquímedes, el riego de los campos se hizo mucho más efectivo.

Pumps (bombas) clasificación

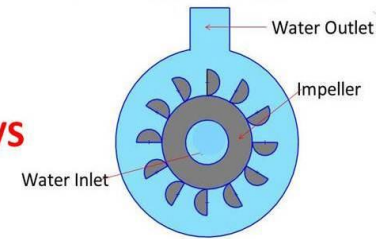


Caudal: centrifugas > rotatoria > reciprocante
Presión: centrifugas < rotatoria < reciprocante



Reciprocating Pump

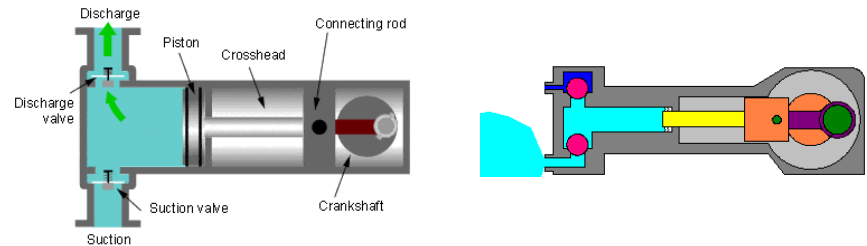
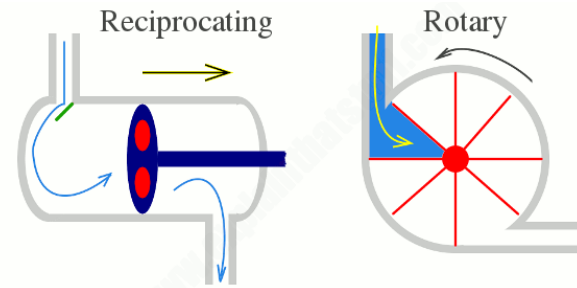
VS



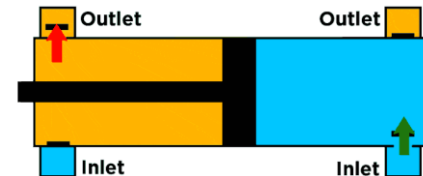
Centrifugal Pump

Bombas de desplazamiento positivo reciprocantes y rotatorias

El fluido se encuentra confinado en un volumen cerrado; la transferencia de energía se efectúa por un movimiento de las fronteras del sistema, que causa una expansión o contracción del volumen. Entrega una cantidad definida de fluido en cada ciclo de movimiento (carrera de pistón o revolución del impulsor).



Una característica común a las bombas de desplazamiento positivo es que no pueden estrangular su descarga. Si se debe controlar el flujo al usuario, se debe hacer mediante control de velocidad o recirculando una cantidad de fluido alrededor de la bomba. La estrangulación daría como resultado una contrapresión excesiva en la bomba que podría detener el impulsor, romper la tubería o la carcasa, o hacer que se levante una válvula de seguridad.



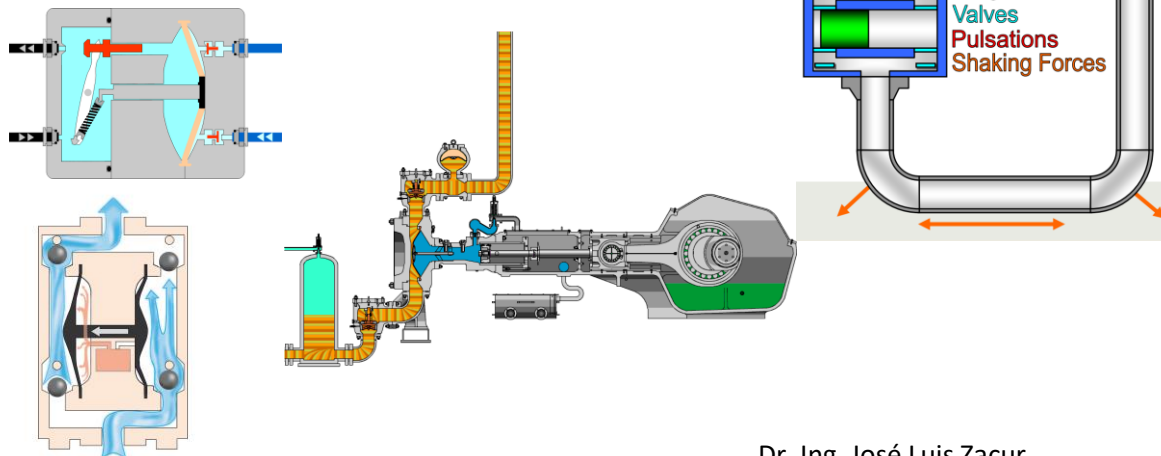
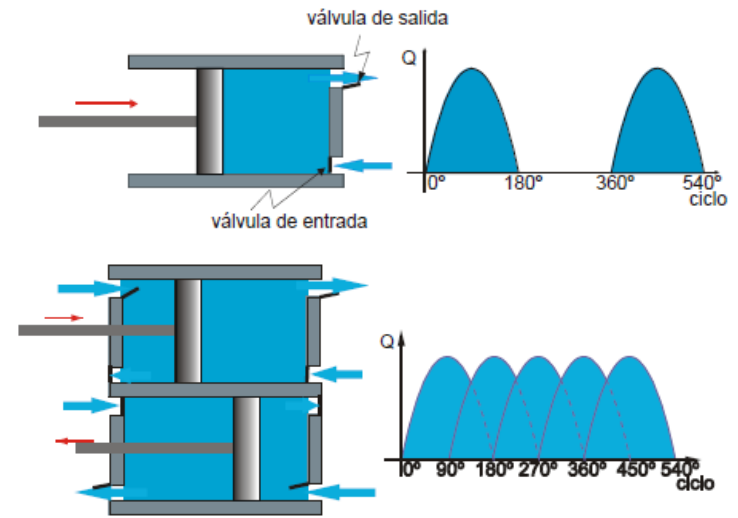
Bombas de desplazamiento positivo reciprocantes o alternativas

Adiciona energía al fluido por medio de un pistón que actúa sobre un volumen de fluido confinado.

En una acción simple (carrera de aspiración y de impulsión) proporciona un flujo discontinuo y pulsante. No es posible obtener un cambio continuo de flujo.

Por cada carrera de pistón, la bomba descarga una cantidad fija de fluido. El flujo es determinado por la geometría de la bomba y depende de la frecuencia del ciclo. Son necesarias válvulas de retención.

Es utilizada para la obtención de altas presiones.



Pulsation Dampeners

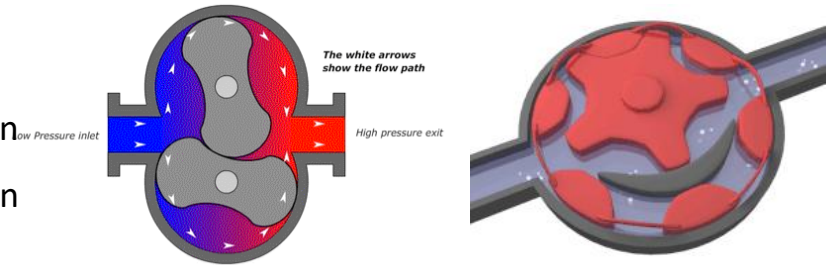
Gas Charged Active/Soft Element	Maintenance Free Reactive/Hard Element

Bombas de desplazamiento positivo, rotatorias

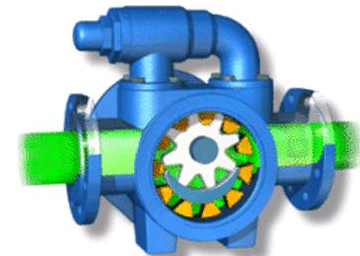
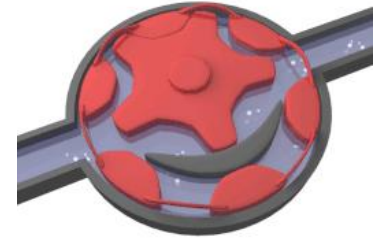
Los elementos rotatorios de la bomba crean una presión reducida en el lado de la entrada, permitiendo que la presión del sistema fuerce el líquido hacia el interior de la bomba.

Al girar el elemento, el fluido queda atrapado entre el elemento móvil y la coraza de la bomba y es forzado del lado de la descarga a mayor presión.

La velocidad del flujo es función del tamaño de la bomba y de su velocidad de rotación, con baja dependencia de la presión en el lado de la descarga. Descarga un flujo continuo. No poseen válvulas de retención. Aunque normalmente destinadas a fluidos viscosos, puede ser utilizada para el transporte de cualquier líquido libre de sólidos abrasivos.



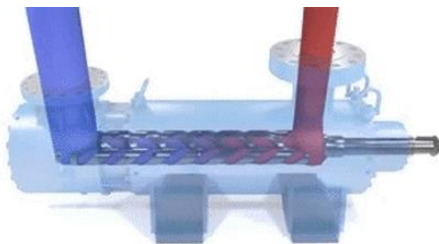
bomba de lóbulos rotativos



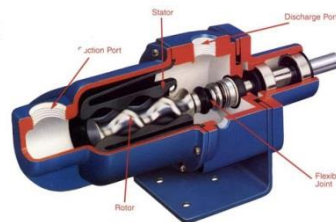
bomba de hoz



bomba de paletas deslizantes excéntricas

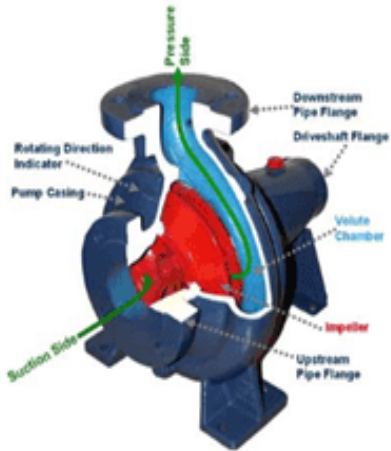


bomba tornillo

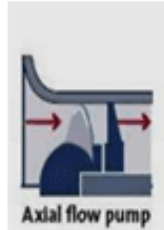
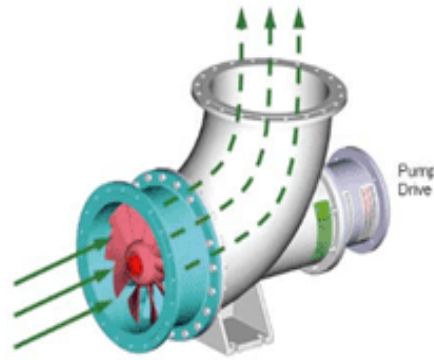


Bombas Rotodinámicas

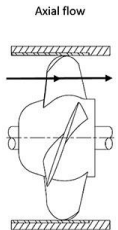
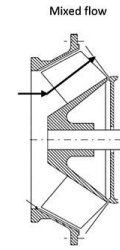
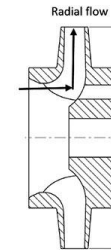
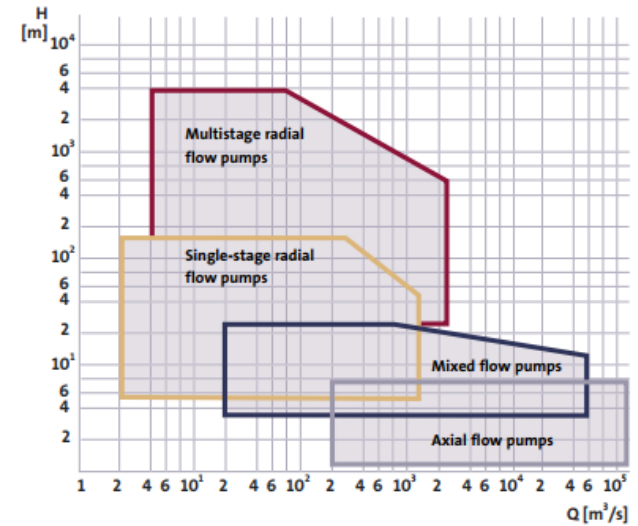
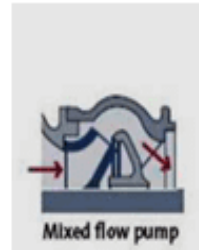
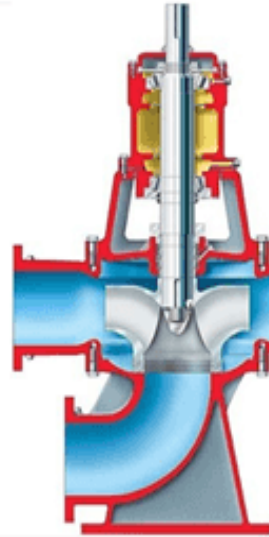
Radial flow pumps



axial flow pumps



Mixed flow pumps



En una bomba de flujo radial, el líquido entra en el centro del impulsor y se dirige hacia afuera a lo largo de las paletas del impulsor en una dirección perpendicular al eje de la bomba.

En una bomba de flujo axial, el impulsor empuja el líquido en una dirección paralela al eje de la bomba.

En una bomba de flujo mixto, las paletas del impulsor empujan el líquido hacia afuera del eje de la bomba y de la succión, en un ángulo superior a 90 grados.

Bombas; definiciones de términos, carga total, carga estática

$$H_s = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + (z_2 - z_1) + \frac{1}{2g} (\alpha_2 v_2^2 - \alpha_1 v_1^2) + \frac{8}{g\pi^2 D^4} \left[f_D \frac{L}{D} + \left(\sum_j K_L \right) + K_{LV} \right] Q_V^2 + \left[\frac{\Delta P_o}{gQ_{vo}^2} \right] Q_v^2 \quad m$$

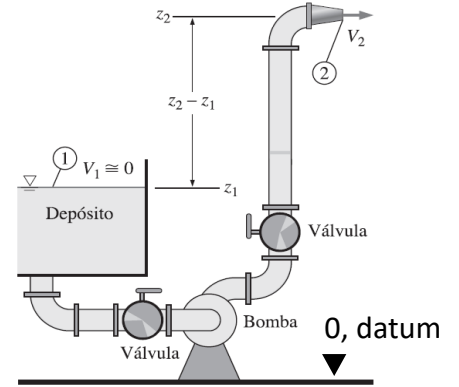
Carga estática

H_{1st} : altura de succión estática

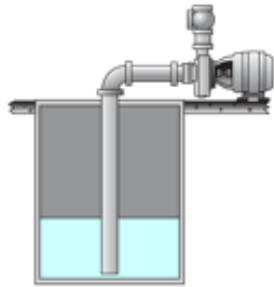
$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + H_s = \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_{L,f} + h_{L,eq} \quad m$$

H_{2st} : altura de descarga estática

$$H_{St} = H_{2st} - H_{1st} = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + (z_2 - z_1)$$



Suction Lift: Pump installed above water level

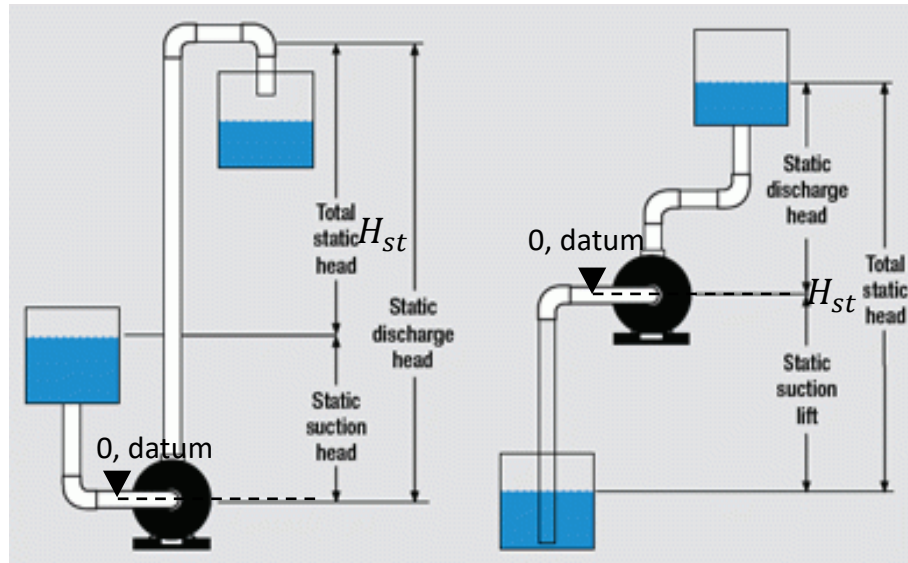


Suction Head: Pump installed below water level



disposición *suction lift* (elevación de succión)

disposición *suction head* (carga de succión)



▼ datum: nivel de referencia o posición donde se fija $z = 0$; Un criterio es definirlo a nivel de succión de la bomba

Bombas; definiciones de términos, carga cinética o de velocidad, pérdida de carga

Carga cinética

H_{1v} : altura de succión cinética

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + H_s = \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_{L,f} + h_{L,eq} \quad m$$

H_{2v} : altura de descarga cinética

$$H_{vt} = H_{2v} - H_{1v} = \frac{(\alpha_2 v_2^2 - \alpha_1 v_1^2)}{2g}$$

Normalmente es solo una pequeña fracción de la carga total.

Excepción, la presencia de boquillas o *nozzles*; por ejemplo, en la *fourdrinier paper machine head box*, donde la velocidad de salida de la suspensión de fibras debe igualar la velocidad de la máquina de papel

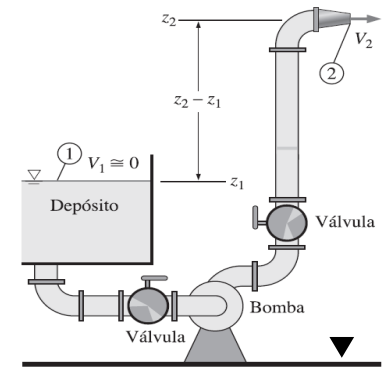
Pérdida de carga h_L

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + H_s = \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_{L,fpss} + h_{L,faccss} + h_{L,fpds} + h_{L,faccds} + h_{L,eq} \quad m$$

$h_{L,fpss}$: pérdida de carga por fricción en *pipe succión side*

$h_{L,faccss}$: pérdida de carga por fricción en *accesorios succión side*

ds: lado de descarga de bomba

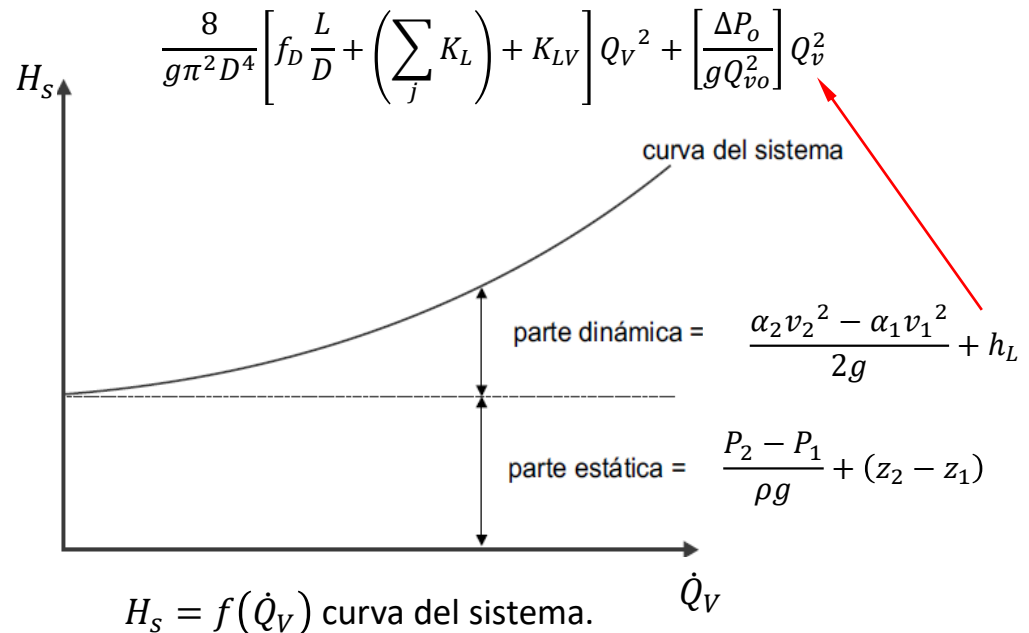


Bombas; definiciones de términos, curva del sistema

a) La ordenada a caudal nulo representa la cantidad mínima de energía por unidad de masa que puede transferirse al fluido para transportarlo (no existe flujo).

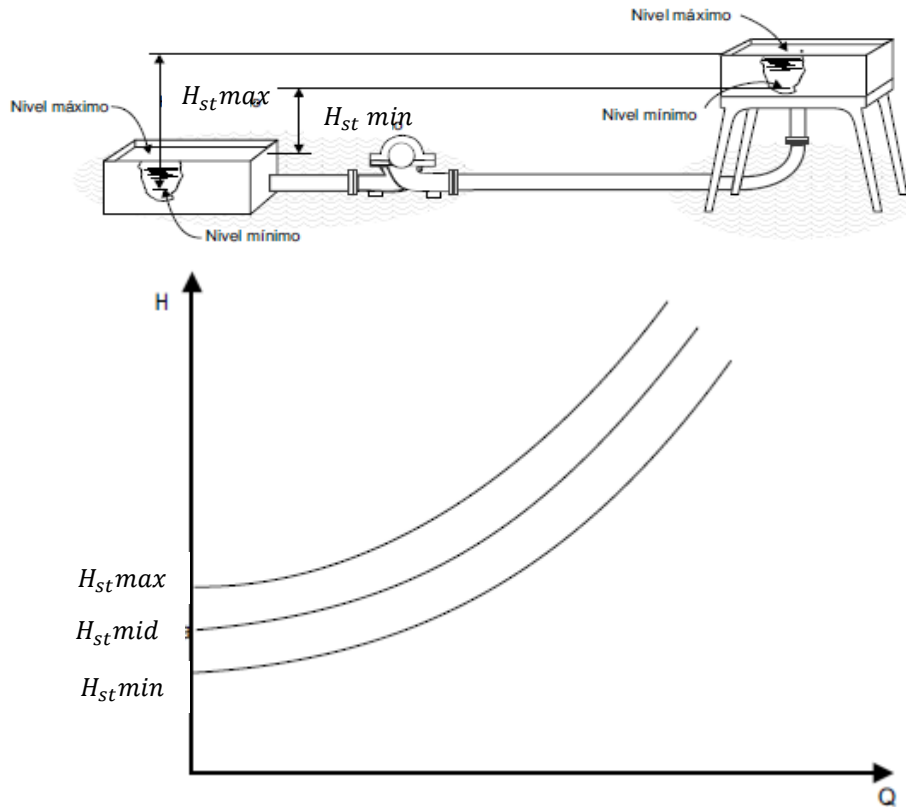
b) A medida que aumenta el flujo, la curva del sistema se curva hacia arriba aproximadamente según un comportamiento cuadrático. Esto se debe a los requisitos de energía para superar las irreversibilidades generadas por el flujo y para proveer la energía cinética que se agrega a los requisitos de energía estática. La energía transferida para vencer la presión, para proveer elevación y la energía cinética es recuperable. La energía transferida para vencer las irreversibilidades no lo es.

$$H_s = \overbrace{\frac{P_2 - P_1}{\rho g} + (z_2 - z_1)}^{\text{estática}} + \overbrace{\frac{\alpha_2 v_2^2 - \alpha_1 v_1^2}{2g} + (h_{L,ss} + h_{L,ds})}^{\text{dinámica}} [m]$$

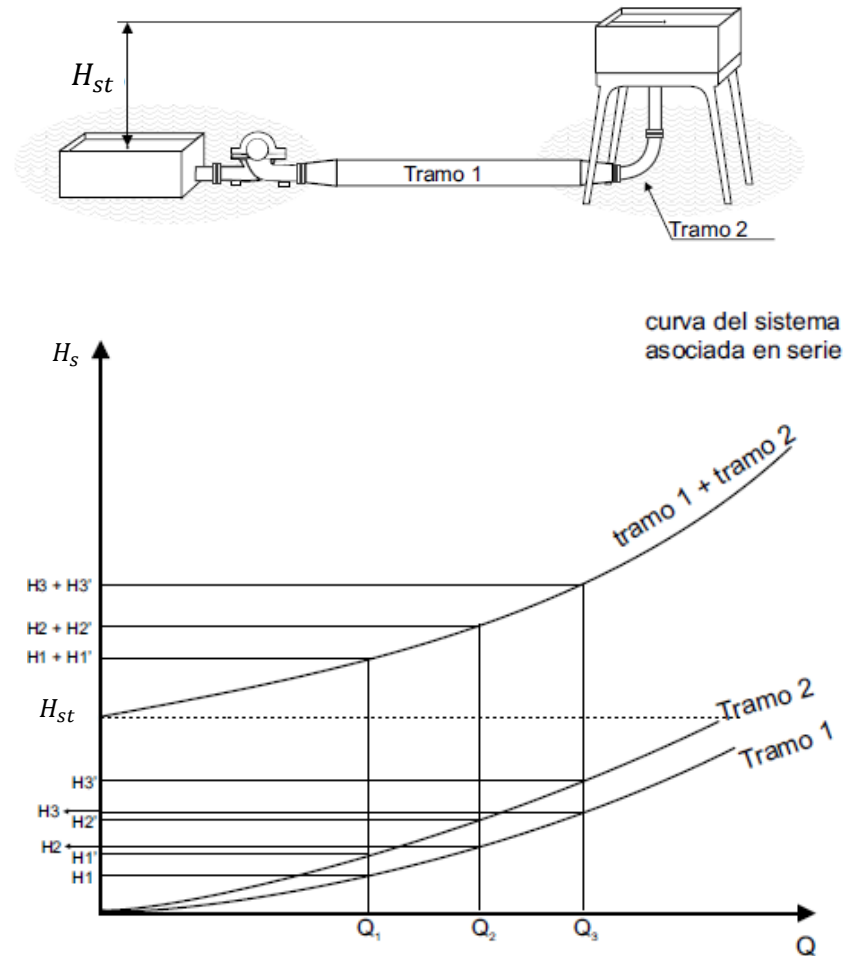


Bombas; curva del sistema, sistemas asociados

Variación en la carga estática (análisis de sensibilidad): en el dimensionamiento, se determina el rango de variación correspondientes a los valores límites, es decir, las curvas del sistema para las alturas estáticas totales máximas y mínimas.



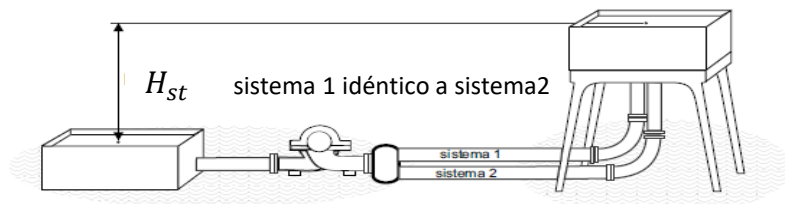
En la **conexión en serie**, para cada \dot{Q}_V, H_s



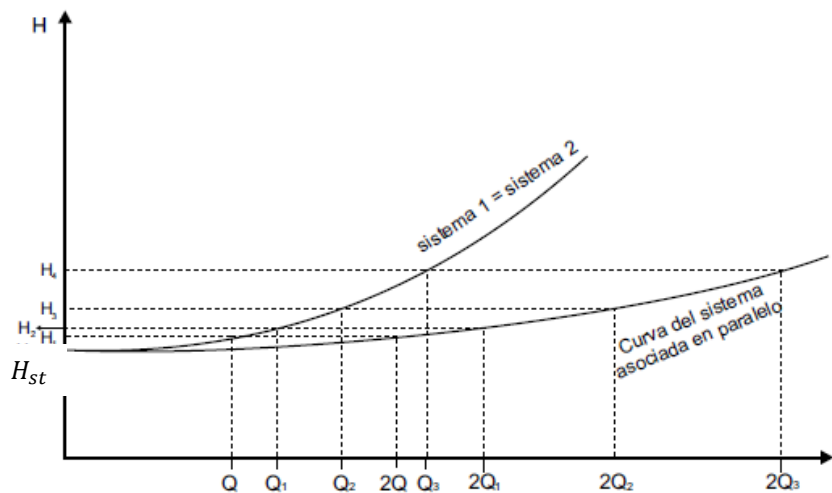
Para una dada bomba, la curva del sistema puede modificarse según su configuración y/o elementos constituyentes

Bombas; curva del sistema, sistemas asociados

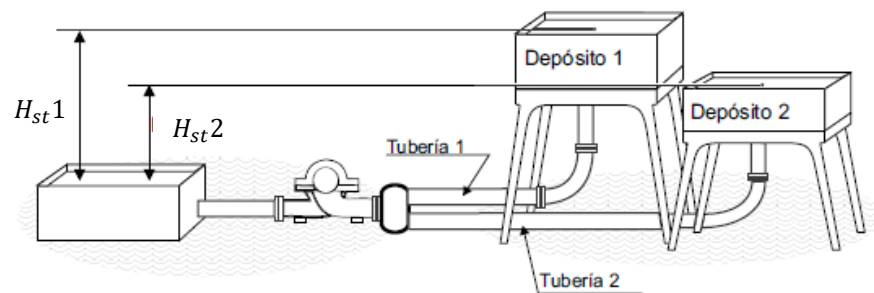
En la **conexión en paralelo**, para cada H_s , $\dot{Q}_{V.T} = \dot{Q}_{V.1} + \dot{Q}_{V.2}$. Se obtiene la curva de cada sistema individualmente. Para cada H_s , se suman los caudales correspondientes de cada sistema.



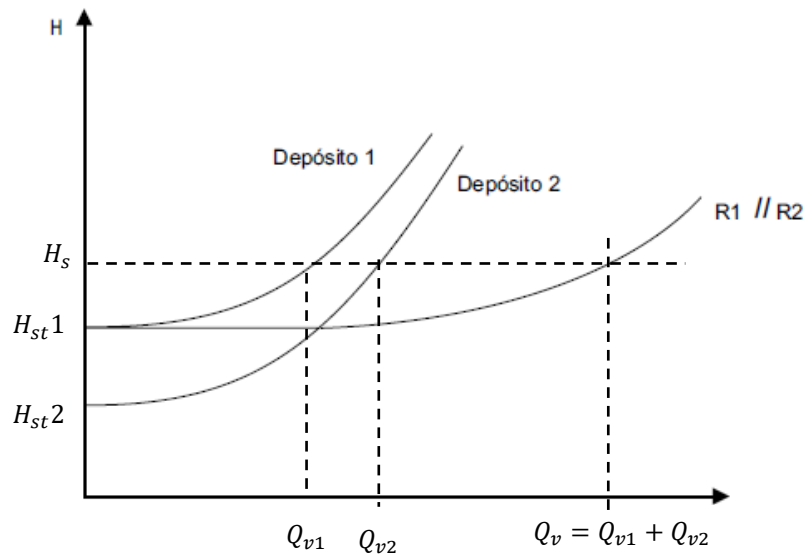
curva del sistema asociado en paralelo de dos sistemas idénticos: para un mismo caudal total, cada sistema podrá transportar **la mitad** dada su idéntica condición estática y dinámica



Bombeo independiente o simultáneo a 2 o + posiciones de descarga. Se considera al sistema con una configuración de conductos en paralelo.



curva del sistema asociada en paralelo de dos sistemas **no** idénticos: para un mismo caudal total, cada sistema podrá transportar **según** $Q_{v1} < Q_{v2} < Q_v$ determinada por su propia condición estática y dinámica



Bombas; cavitación

La presión de succión puede estar por debajo de la presión ambiental, pero la energía mecánica total en la succión no puede estar por debajo de la energía asociada con la presión de vapor del líquido. Si es así, puede ocurrir la vaporización del fluido y quizás cavitación.

Cuando la presión en el *inlet* de la bomba cae por debajo de la presión de saturación a la temperatura del fluido se forman cavidades de vapor (burbujas), resultando en una rotación del impulsor inestable, caída en la eficiencia de bombeo y oscilaciones irregulares en la bomba. Estas cavidades de vapor pueden eventualmente colapsar e implosionar de manera repentina ocasionando daños a la bomba.

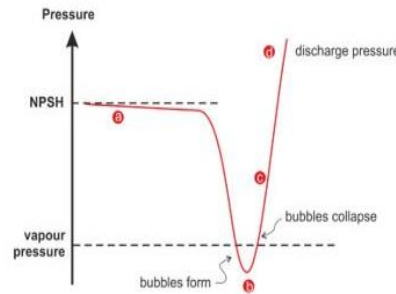
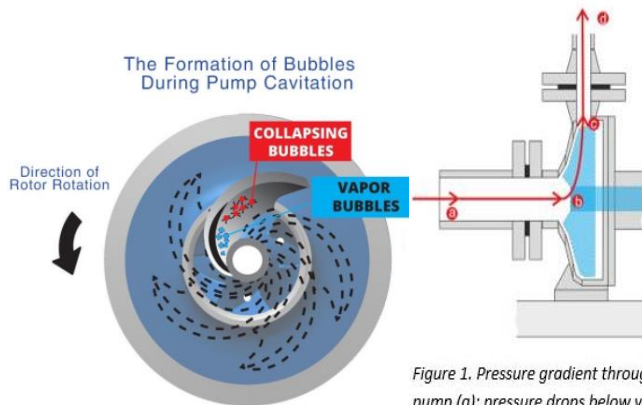
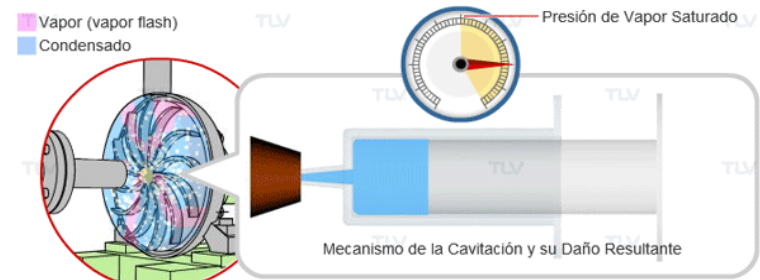
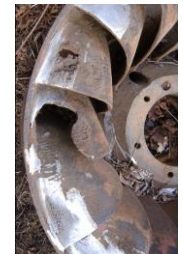
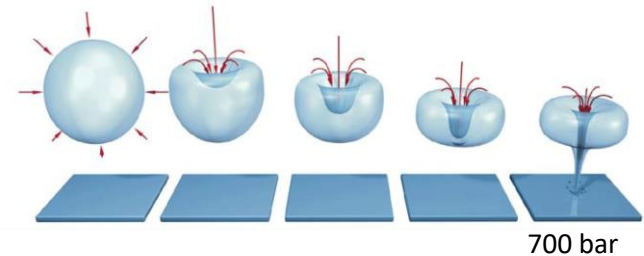
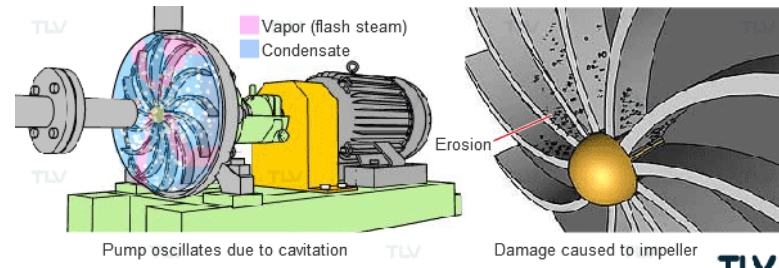


Figure 1. Pressure gradient through a centrifugal pump experiencing cavitation: fluid enters the pump (a); pressure drops below vapour pressure at impeller (b), pressure rises as fluid passes out to discharge (d) and bubbles condense and collapse (c).



Cuando la presión del condensado cae por debajo de presión de saturación del vapor, se forman cavidades de vapor, resultando en una rotación del impulsor inestable, caída en la eficiencia de bombeo, y oscilaciones irregulares en la bomba. Estas cavidades de vapor pueden condensarse e implosionar de manera repentina, ocasionando daños al impulsor y a la carcasa de la bomba.

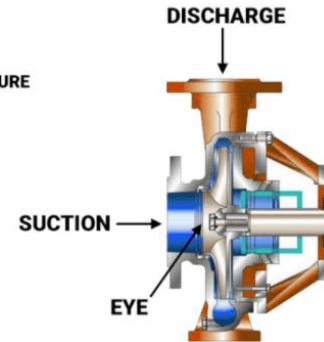
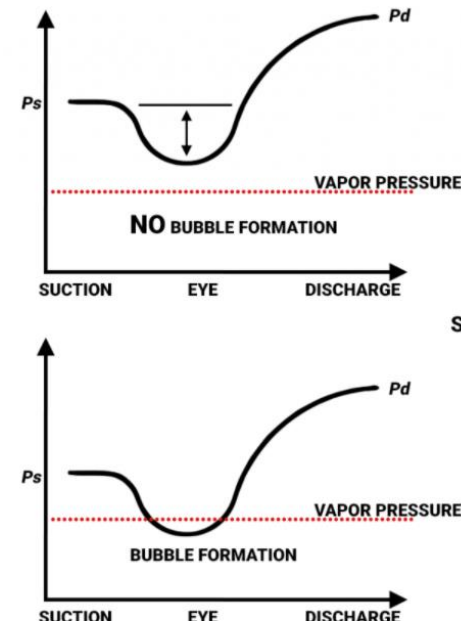


Bombas; cavitación, *NPSH*

La carga neta positiva de succión disponible (*NPSHa*: *Net Positive Suction Head Available*) es la carga en la succión de la bomba menos la carga de presión de vapor del fluido. Esta es la definición normalizada por el *Hydraulic Institute* (USA, Pumps.org). El Instituto Hidráulico es la organización que formula y promueve el uso de estándares comunes. El término "neta" se refiere a la carga real en la brida de succión de la bomba, por las pérdidas de energía por fricción antes de la succión. ¿Por qué es necesario calcular el *NPSHa*? Para evitar la cavitación del fluido. Se logra si la altura en la succión es más alta que la altura de presión de vapor del fluido. Además, los proveedores de bombas exigen un *NPSH* mínimo para garantizar el correcto funcionamiento de la bomba, *NPSHr*, donde "r" significa requerida.

La vaporización no ocurrirá si la suma de la carga de velocidad y la carga estática, en otras palabras, si la suma de la energía cinética y la energía estática (por unidad de masa) es suficientemente mayor que la energía inherente asociada con la presión de vapor del líquido a la temperatura de flujo.

El exceso de la suma de la energía cinética y la energía estática sobre la energía inherente asociada a P^{vap} , representa una medida de seguridad para evitar la vaporización y la cavitación potencial.



Bombas; cavitación, cómputo de $NPSH_a$

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_s}{\rho g} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + z_s + h_{L,s}$$

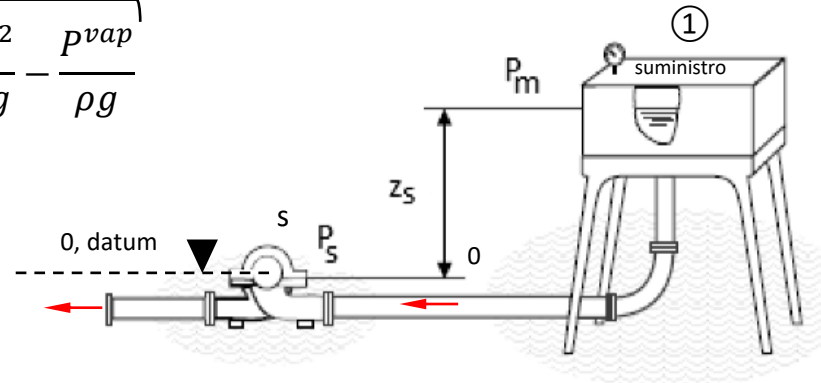
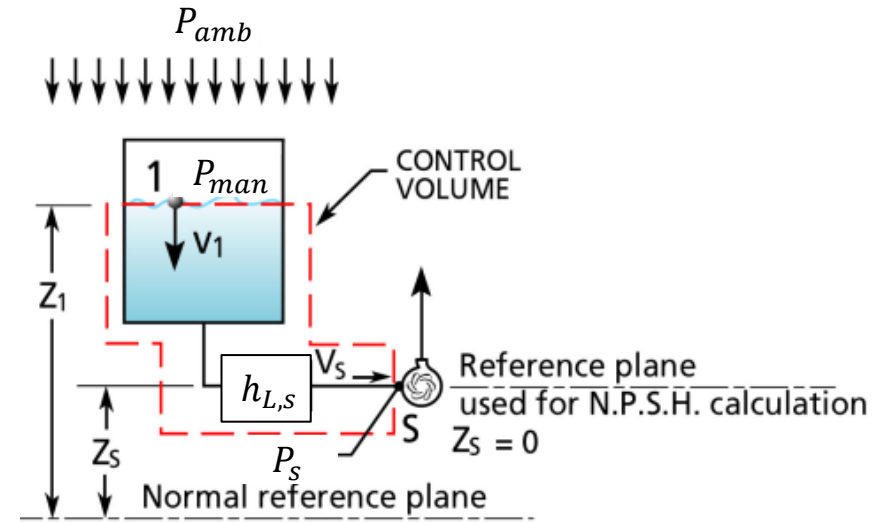
$$\frac{(P_{amb} + P_{man1})}{\rho g} + z_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_s}{\rho g} + \alpha_s \frac{v_s^2}{2g} + z_s + h_{L,s}$$

La vaporización no ocurrirá si $\frac{P_s}{\rho g} + \alpha_s \frac{v_s^2}{2g} > \frac{p^{vap}}{\rho g}$

$$NPSH_a = \frac{P_s}{\rho g} + \alpha_s \frac{v_s^2}{2g} - \frac{p^{vap}}{\rho g} > 0$$

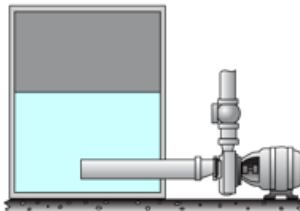
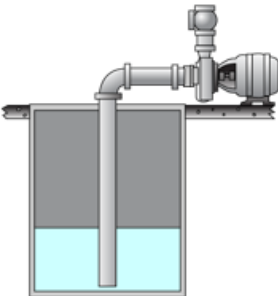
$$\frac{(P_{amb} + P_{man1})}{\rho g} - \frac{p^{vap}}{\rho g} + z_1 - z_s + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} - h_{L,s} = \overbrace{\frac{P_s}{\rho g} + \alpha_s \frac{v_s^2}{2g} - \frac{p^{vap}}{\rho g}}^{NPSH_a}$$

$$NPSH_a = \frac{(P_{amb} + P_{man1})}{\rho g} - \frac{p^{vap}}{\rho g} + z_1 - z_s + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} - h_{L,s} \quad m$$



Suction Lift: Pump installed above water level

Suction Head: Pump installed below water level

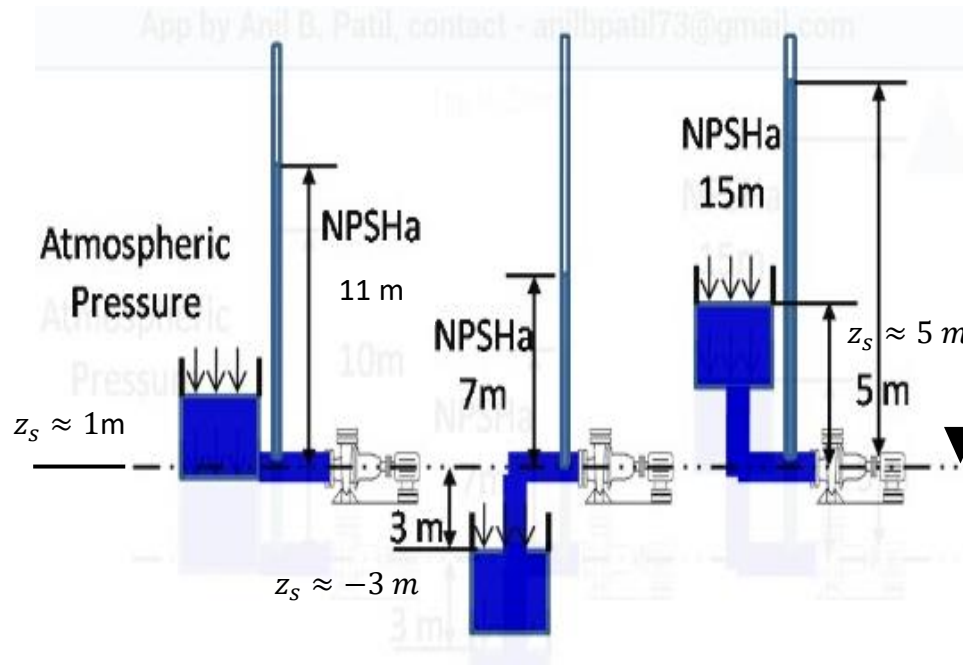


$z_s < 0$ disposición *suction lift* (elevación de succión)

$z_s > 0$ disposición *suction head* (carga de succión)

Bombas; cavitación, cómputo de $NPSH_a$

Ejemplo de cómputo rápido (sin considerar $h_{L,s}$) para agua a 20°C



$$\frac{P_{amb}}{\rho g} = \frac{1. \text{ bar}}{998,2 \frac{\text{ kg }}{\text{ m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{ m }}{\text{ s}^2}} = 10,2 \text{ m}$$

$$\left(\frac{P_w^{vap}}{\rho g} = \frac{0,00237. \text{ bar}}{998,2 \frac{\text{ kg }}{\text{ m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{ m }}{\text{ s}^2}} = 0,24 \text{ m a } 20^\circ\text{C} \right)$$

$$NPSH_a = \frac{(P_{amb} + P_{man1})}{\rho g} - \frac{p^{vap}}{\rho g} + z_1 - z_s + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} - h_{L,s} \text{ m}$$

Bombas; cavitación; $NPSH_a$ $NPSH_r$

El $NPSH_a$ está en metros de fluido absoluto y es un término de carga, que es independiente de la densidad del fluido. Los fabricantes de bombas utilizan agua como fluido, por lo que el valor que proporcionan es también metros de agua absolutos. La bomba requiere una cabeza de presión de succión mínima para funcionar correctamente y evitar la cavitación. Esto es conocido como $NPSH_r$ requerido, que lo proporciona el fabricante para un modelo de bomba específico, diámetro del impulsor, velocidad y caudal. Para satisfacer los requisitos del fabricante: $NPSH_a > NPSH_r$

El $NPSH_R$ proporciona el nivel de carga en términos de metros de agua absoluta requerida en la brida de succión de la bomba. Cuando ese nivel es insuficiente, la capacidad y la carga de la bomba disminuirán y se producirá cavitación. $NPSH_R$ es una característica inherente de la bomba



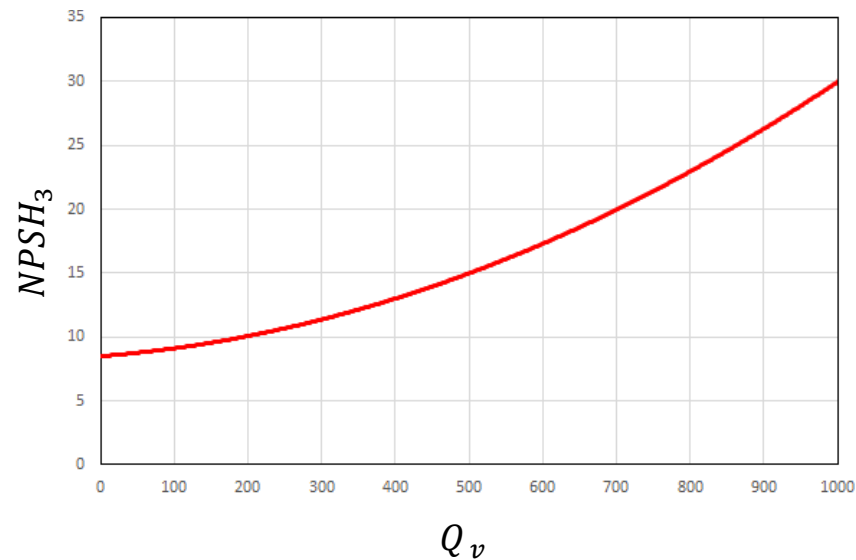
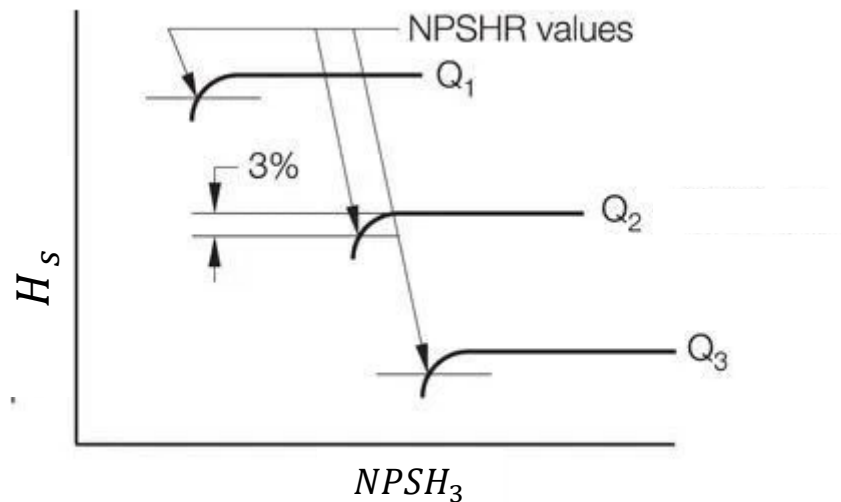
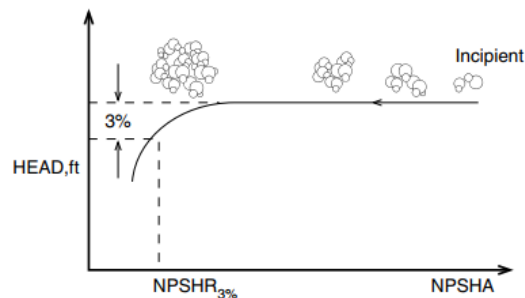
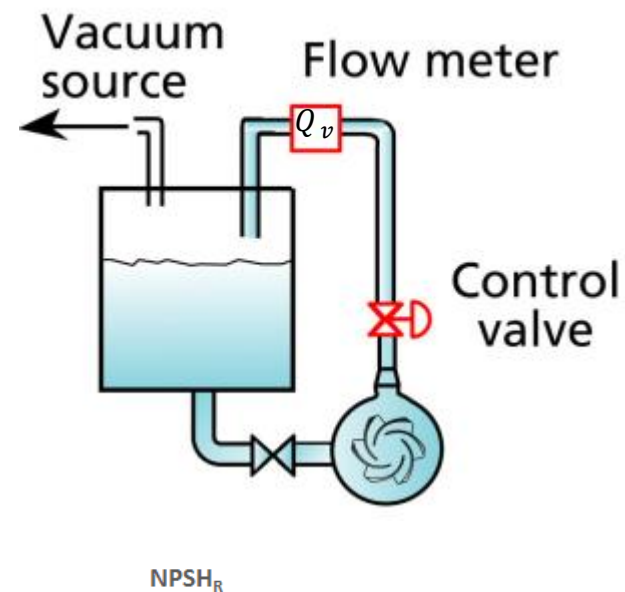
El fin práctico es poner limitaciones a las condiciones de succión de la bomba en servicio, de modo de mantener la presión en la entrada del rodete por sobre la presión de vapor del líquido bombeado; en esta condición, no habrá vaporización ni cavitación.

https://youtu.be/L_kAv0wpST8

Como calcular NPSH

Bombas; cavitación, cómputo de $NPSH_r$

Cada valor de caudal Q_v , tiene asociado un valor de carga de bomba H_s . La presión de succión se reduce mediante bomba de vacío, hasta obtener una disminución del 3% de H_s , manteniendo Q_v constante, mediante la válvula de control. En esta condición se calcula $NPSH_R \equiv NPSH_3$. Norma *American Petroleum Institute (API 610)*.



Se presenta como una curva $NPSH_R$ vs Q_v .

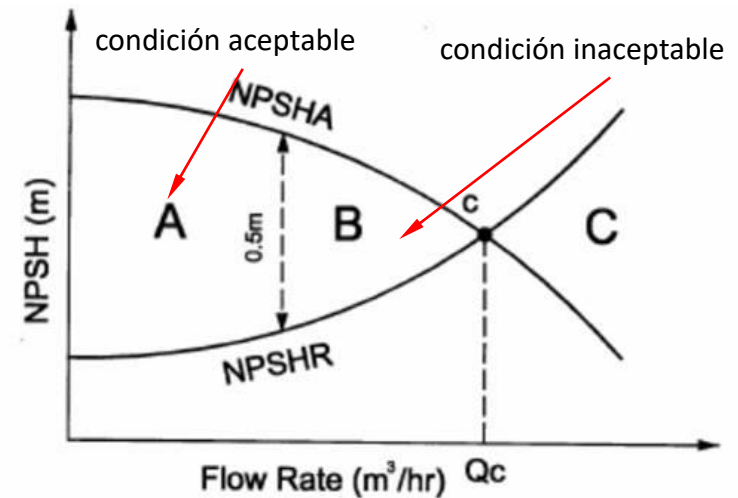
Bombas; cavitación, comparación $NPSH_a$ vs $NPSH_r$

El Net Positive Suction Head requerido ($NPSH_r$) indica cuánta carga se necesita para empujar el líquido en el ojo del impulsor de la bomba. Conocer el valor correcto de $NPSH_r$ evitará que la bomba cavite, vibre y falle prematuramente.



Debe ser $NPSH_a > NPSH_r$ en todos los puntos a lo largo de la curva de la bomba

En la práctica se utiliza como margen mínimo entre el $NPSH_r$ y el $NPSH_a$, un rango de entre el 10 a 15%, siempre que este no sea menor a 0,5 m, valor mínimo recomendado.



Un **criterio de ubicación** de la bomba en una línea de transporte de fluido es el cumplimiento de $NPSH_a > NPSH_r$