

Operaciones Unitarias 1

La ecuación de Bernoulli revisitada



La ecuación de Bernoulli revisitada Flujo de fluidos incompresibles newtonianos



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

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

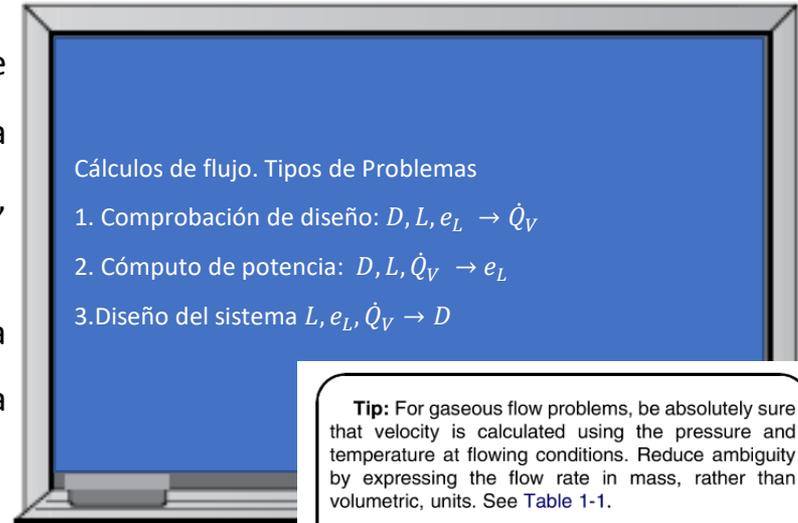
$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + H_s = \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_L \quad m$$

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

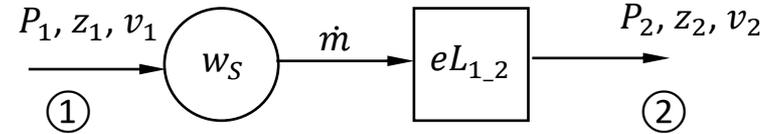
$$\dot{Q}_V = -0,965 \left(\frac{gD^5 h_L}{L} \right)^{0,5} \ln \left[\frac{\varepsilon}{3,7D} + \left(\frac{3,17v^2 L}{gD^3 h_L} \right)^{0,5} \right] \quad Re > 2000$$

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

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

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

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



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

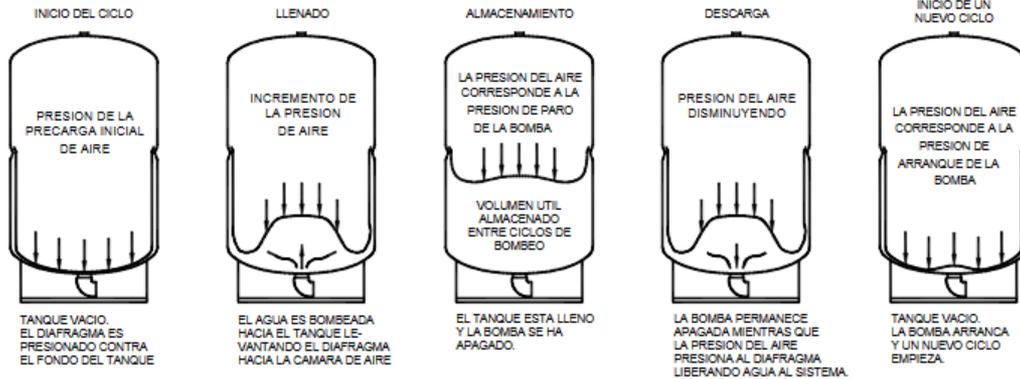
$$DP + w_s = eL_{1-2} = \frac{8Q_{V,min}^2}{\pi^2 D^4} \left[f_D \frac{L}{D} + \left(\sum_j K_L \right) + K_{LV} \right] J.kg^{-1}$$

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 $Q_V \geq Q_{V,min}$



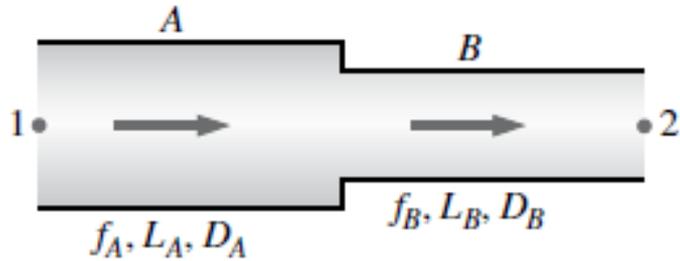
Tanque hidroneumático



Bladder inside tank

Sistemas complejos de conducción conducción en serie

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



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

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

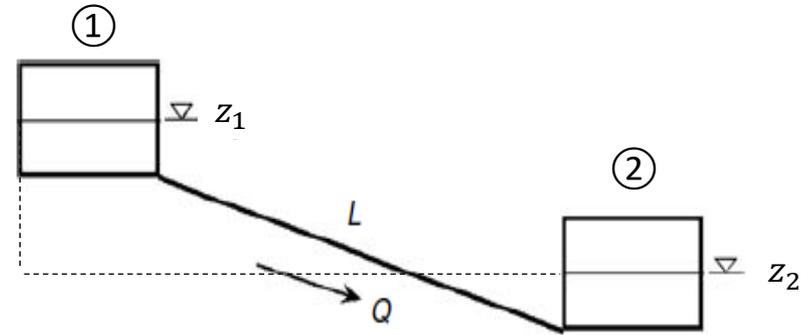
Para tuberías en serie, el caudal es el mismo en cada tubería, y la irreversibilidad total (perdida de carga total) es la suma de las irreversibilidades en las tuberías individuales. Una de las formas de calcular las pérdidas de carga, es considerarla en cada sección y luego sumarlos para obtener la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

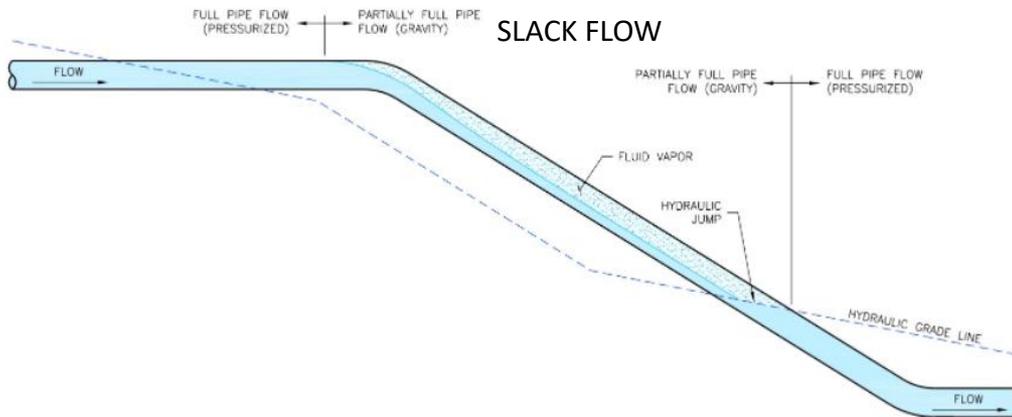
Sistemas complejos de conducción conducción en serie Transporte gravimétrico de fluidos

$$0 = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + (z_2 - z_1) + \frac{\alpha_2 v_2^2 - \alpha_1 v_1^2}{2g} + \sum_i h_{L,i} \quad m \quad (z_1 - z_2) = h_{L,total}$$

Si $(z_1 - z_2) > h_{L,total}$ la diferencia debe ser compensada con un incremento de la velocidad. Por la relación de continuidad (si $Q_v = vA$ es constante), deberá disminuir el área de flujo. (*slack flow*) Ello implica, que, en conductos cerrados, el fluido no los llenará completamente. La presencia de aire y/o vapor del propio fluido (si la presión es lo suficientemente baja a la temperatura de flujo), puede ocasionar erosión y corrosión en el conducto

Una forma de evitar esta situación, para un dado caudal, posiciones *upstream* y *downstream* y diámetro definido es agregar mayor restricción en el *downstream*, tal como una válvula.

El diseño del conducto con diámetros en serie apropiados para el manejo de caudal y velocidad es otra posibilidad.



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 reológico;

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

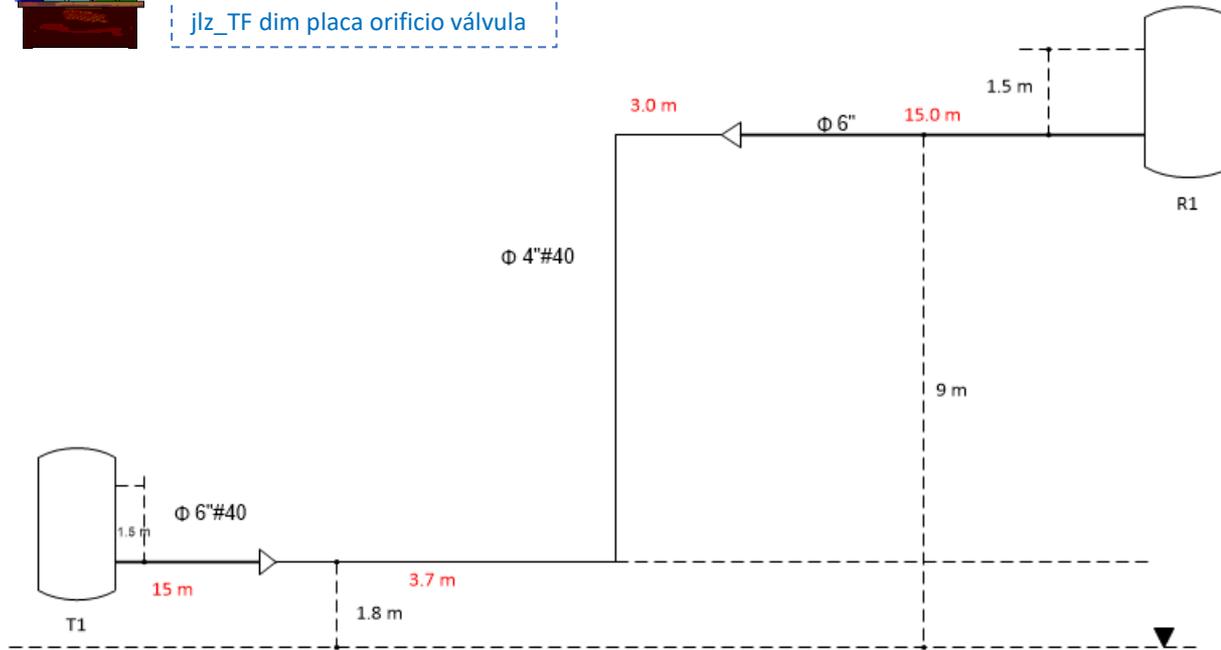


jlz_TF_tr_grav self balanced

mdj_TF_tr_grav absorción gases

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)



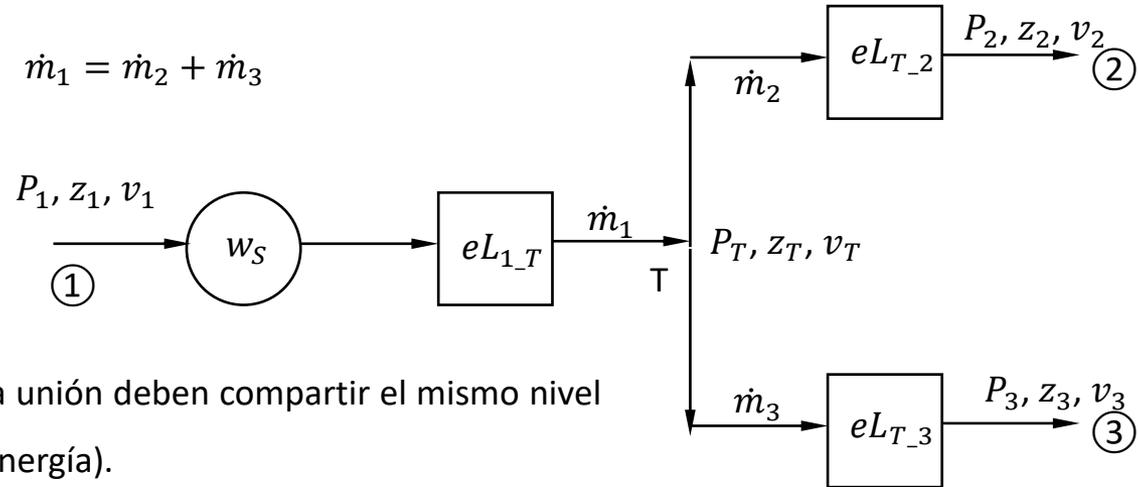
Para el sistema de transporte de la figura, que conduce agua a 15°C , a) evaluar el caudal máximo obtenible si la presión manométrica en el tanque (T1) es 6.8 bar y la del reactor (R1) es de 2.4 bar. b) Se requiere operar con un 75% del caudal suministrado por el sistema anterior, por lo que será restringido 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).



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

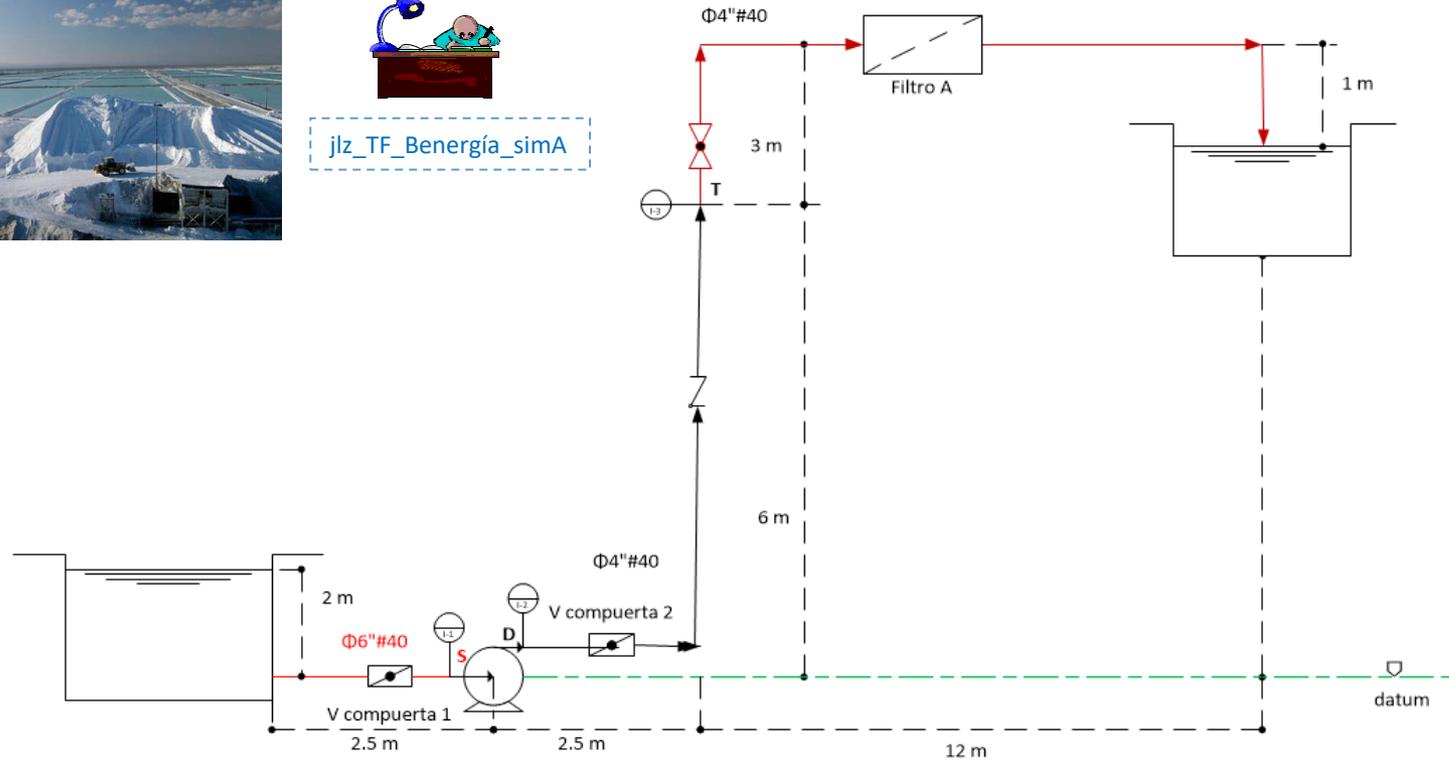
$$\left[\begin{array}{l} \frac{P_1}{\rho} + \alpha_1 \frac{v_1^2}{2} + gz_1 + w_S = \frac{P_T}{\rho} + \alpha_T \frac{v_T^2}{2} + gz_T + eL_{1_T} \quad [J \cdot kg^{-1}] \\ \frac{P_T}{\rho} + \alpha_T \frac{v_T^2}{2} + gz_T = \frac{P_2}{\rho} + \alpha_2 \frac{v_2^2}{2} + gz_2 + eL_{T_2} \quad [J \cdot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

balance general

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



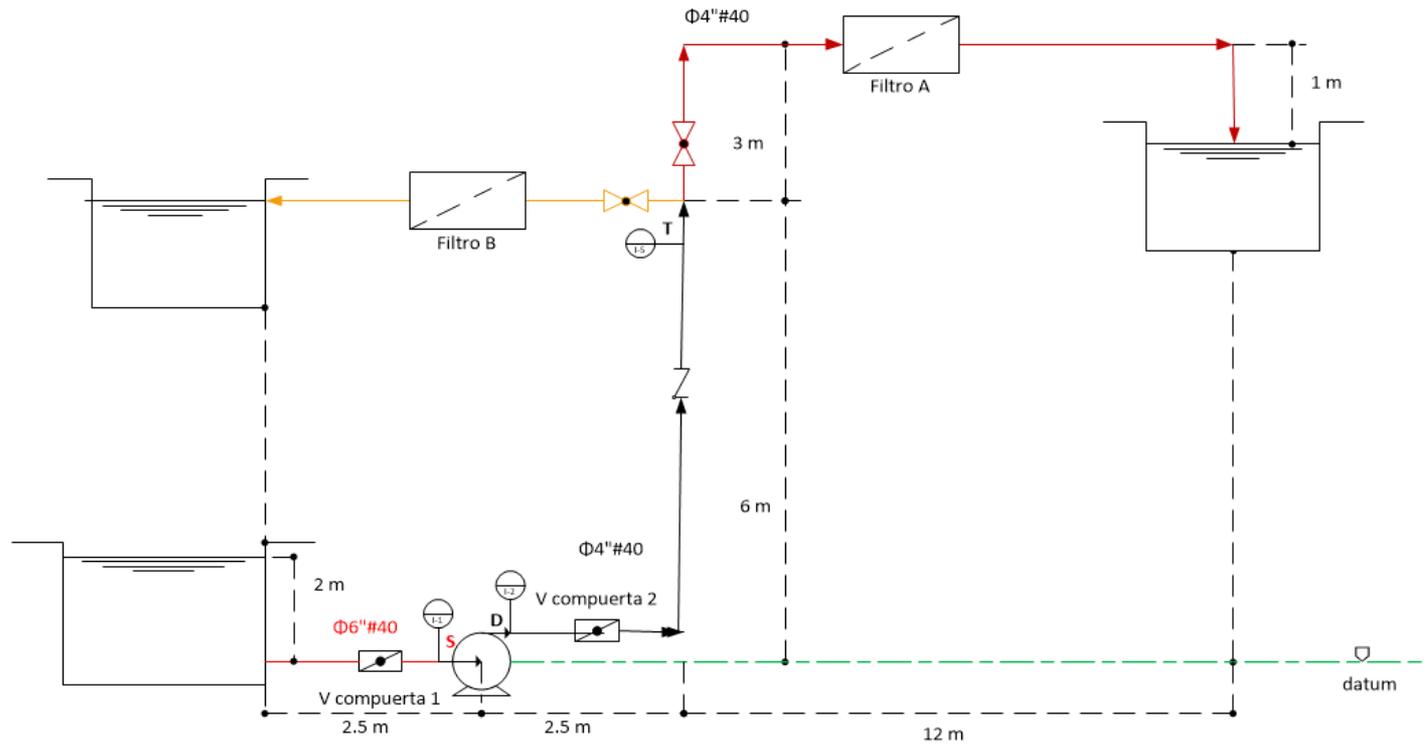
jlz_TF_Benergía_simA



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.



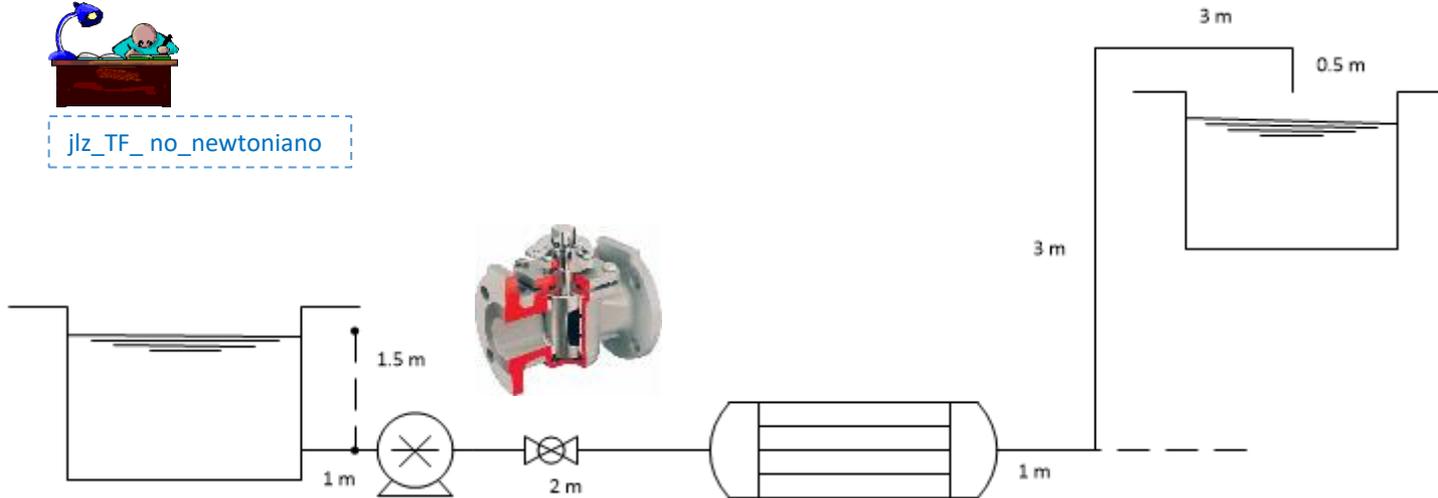
jlz_TF_Benergía_ramAB



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.



jlz_TF_no_newtoniano



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 $1.25'' \# 40\text{s}$. 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 .