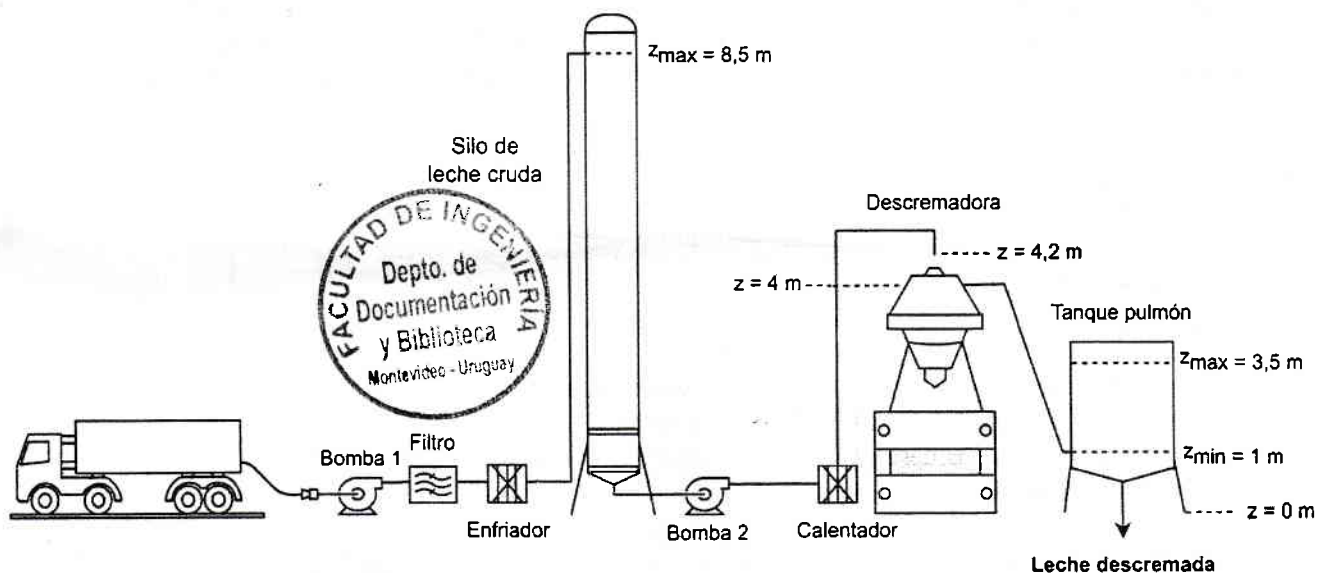


1) El circuito de la figura representa un esquema simplificado del proceso de descremado de leche cruda en una planta industrial para la producción de leche descremada y crema de leche.



La leche cruda llega a la planta en camiones a una temperatura de 8°C . La descarga de la leche cruda se realiza a través de mangueras sanitarias que la llevan directamente al proceso de higienización (por filtración) y preenfriado. Una vez enfriada la leche, se conduce a un silo de almacenamiento donde se mantiene a una temperatura de inhibición bacteriana (4°C) previo a su procesamiento. El nivel máximo del silo se indica en el esquema.

Se dispone de un calentador a la salida de los silos de almacenamiento para elevar la temperatura de la leche cruda hasta 35°C con el fin de mejorar la eficiencia de la etapa de descremado. En la descremadora, se da la separación física por centrifugación en donde la crema de leche se separa para su posterior procesamiento (no se incluye en la figura), obteniéndose leche descremada. La descarga de la leche descremada se da por desborde en el nivel indicado y a presión atmosférica, y se almacena en un tanque pulmón, cuyos niveles mínimos y máximos se indican en el esquema.

a) Determine el caudal mínimo de entrada al tanque pulmón de leche descremada.

b) Evalúe si con alguna de las bombas de la serie CP es posible mantener el caudal de entrada a la descremadora entre 10 y $13 \text{ m}^3/\text{h}$, y de ser posible con más de una, seleccione la más adecuada. Para esta parte puede suponer régimen completamente turbulento.

c) Se decide instalar un tubo pitot para conocer el caudal de leche cruda que llega a la descremadora en cualquier momento. Seleccione el manómetro diferencial que considere más adecuado instalar con el tubo pitot.

Manómetro	ΔP [mbar]
1	0 - 20
2	0 - 50
3	0 - 80
4	0 - 200

1/15

Los niveles variables de leche cruda en el silo provocan fluctuaciones en el caudal de entrada a la descremadora, lo que podría generar un producto de calidad no uniforme.

d) Proponga una alternativa que permita que el caudal de ingreso a la descremadora sea siempre igual al obtenido cuando el silo se encuentra en su nivel máximo sin modificar la pérdida de carga en la conducción.

Realice los cálculos que considere necesarios para evaluar su viabilidad, así como un esquema de la alternativa propuesta.

Datos adicionales:

Silo: recipiente cilíndrico de fondo cónico; cerrado con venteo a la atmósfera; diámetro = 3 m; altura 8,5 m.

Su descarga se encuentra a 1 m del piso.

Puede despreciar la variación de velocidad en la zona cónica.

Cañerías: acero comercial IPS Sch 40 de 1 1/2" de diámetro nominal, $\epsilon = 4,5 \times 10^{-5}$ m.

La longitud equivalente de la descarga de los camiones hasta los silos es de 15 m.

La longitud equivalente de la descarga desde el silo a la descremadora es de 18 m.

La longitud equivalente de la descarga de la descremadora a la sección de entrada al tanque pulmón es de 12 m.

La longitud equivalente del silo a la succión de la bomba es de 10 m.

Caída de presión a través del enfriador y calentador: $\Delta P = 15 \cdot \rho \cdot u^2 / 2$ [Pa]

La leche cruda se descarga a presión atmosférica en la descremadora.

Pitot: el factor de corrección puede considerarse igual a 1.

Motores de las bombas: $P_{\text{nom, max}} = 1,2$ kW (potencia nominal máxima)



Tanque pulmón: recipiente cilíndrico de fondo cónico; cerrado con venteo a la atmósfera.

La entrada al tanque pulmón se da en z_{min} .

Propiedades físicas de la leche cruda y descremada: $\rho = 1034$ kg/m³; $\mu = 1,6 \times 10^{-3}$ Pa·s;

$P_{\text{vapor}} = 2400$ Pa

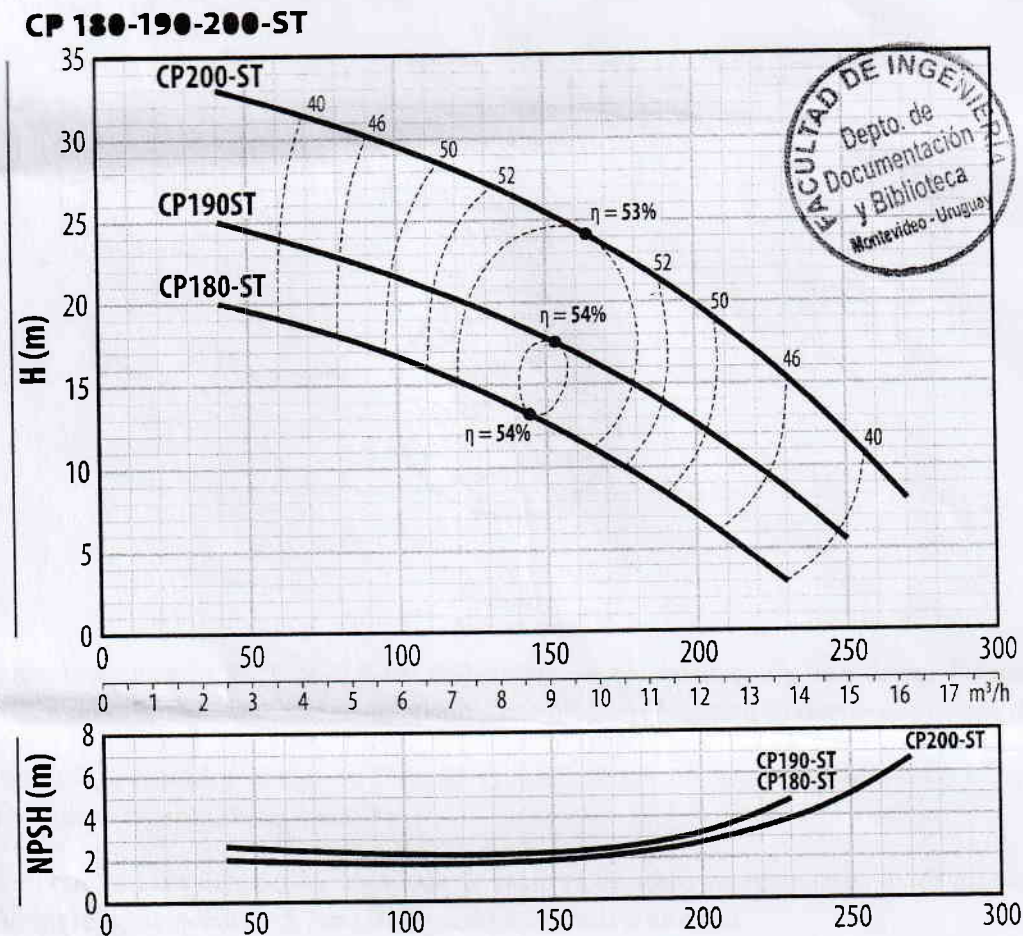
Las propiedades pueden asumirse constantes pese al cambio de temperatura.

$P_{\text{atm}} = 1$ bar

Bombas:

Todas las bombas se encuentran a nivel del piso ($z = 0$ m)

Datos de las bombas proporcionados por el fabricante:



Ajuste de las curvas de las bombas a 2900 rpm (velocidad nominal):

$$\text{CP180-ST: } H(\text{m}) = 21,00 - 0,249 \cdot Q[\text{m}^3/\text{h}] - 0,076 \cdot (Q[\text{m}^3/\text{h}])^2$$

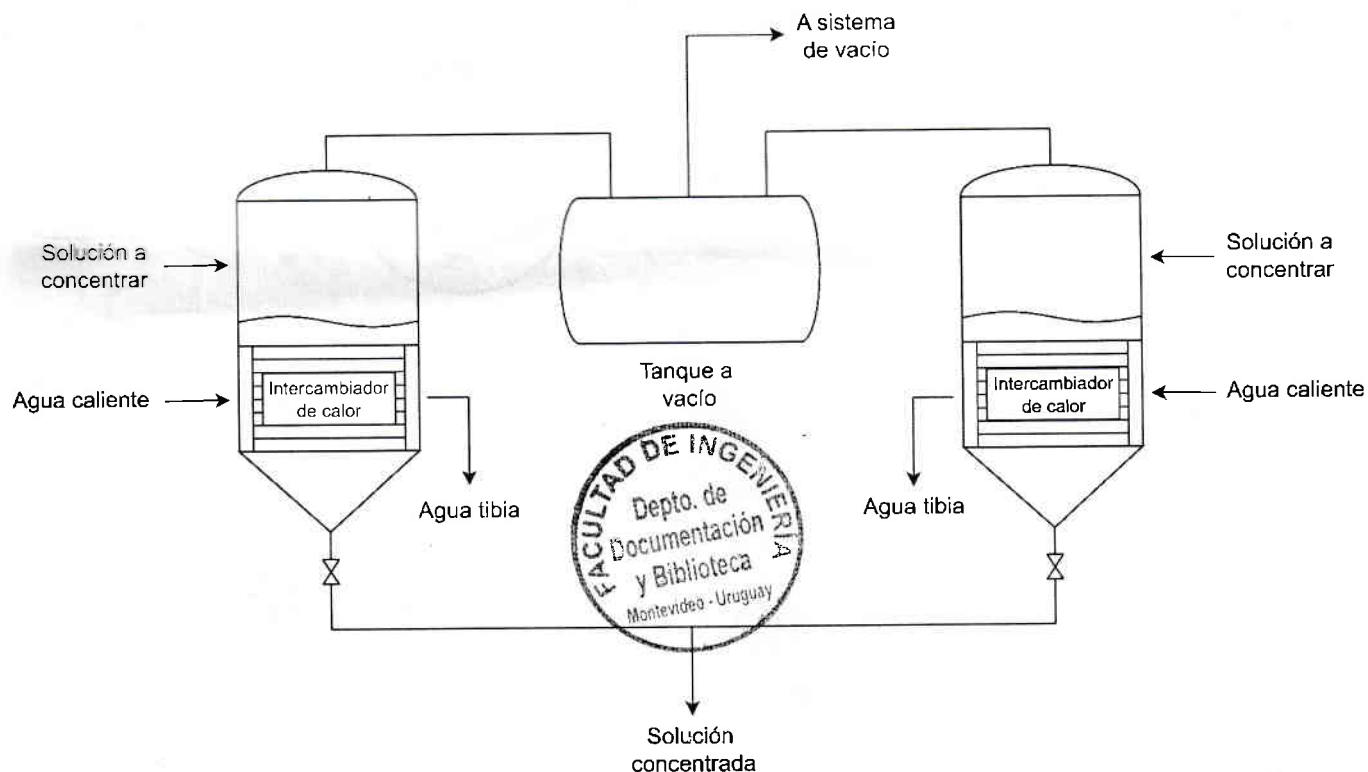
$$\text{CP190-ST: } H(\text{m}) = 25,73 - 0,204 \cdot Q[\text{m}^3/\text{h}] - 0,074 \cdot (Q[\text{m}^3/\text{h}])^2$$

$$\text{CP200-ST: } H(\text{m}) = 33,21 - 0,009 \cdot Q[\text{m}^3/\text{h}] - 0,093 \cdot (Q[\text{m}^3/\text{h}])^2$$

La eficiencia mostrada en el gráfico corresponde a la hidráulica.

3/15

2) Dos evaporadores operan en lotes y en paralelo para concentrar una solución de enzimas termofílicas previo al proceso de liofilización, a través del cual se obtiene finalmente un polvo deshidratado, preservando las propiedades catalíticas y evitando la desnaturalización de las enzimas.



Los evaporadores funcionan a 60°C y $-0,8$ bar manométricos, conectados, a través de conducciones idénticas e independientes, a un mismo tanque que se mantiene a una presión constante mediante un sistema de vacío.

A cada lote de cada evaporador se extraen 30kg de agua al cabo de 60 minutos, alcanzando así la concentración necesaria para pasar a la etapa de liofilización.

La tubería que conecta cada evaporador al tanque de vacío es de acero comercial Sch 40 de diámetro nominal 1" y tiene una longitud equivalente de 5,0 m (incluyendo la entrada a tubería).

- a) Estime la presión de vacío a la que se debe mantener el tanque con un error menor al 5%.

El traslado de estos equipos a otro sector de la planta obliga a incrementar en 7 m la longitud de tubería que conecta cada evaporador al tanque de vacío, manteniendo los accesorios originales.

- b) Asumiendo que la presión del tanque de vacío es 0,15 bar absolutos, estime el tiempo que llevará procesar cada lote luego de la relocalización del equipamiento.
- c) Proponga un cambio en la instalación, sin cambiar el recorrido de la tubería, tal que la relocalización del concentrador no implique un aumento en el tiempo de procesamiento de cada lote. (justifique la propuesta de manera conceptual)
- d) Si el sistema de vacío consistiera únicamente en un impulsor reciprocante que opera adiabáticamente a 900 rpm y se pudiera realizar el proceso de concentración en 60 minutos manteniendo la presión en el tanque de vacío en 0,15 bar absolutos:
- ¿Cuál sería el trabajo mínimo por ciclo teóricamente necesario?
 - ¿Cuál sería la cilindrada mínima teórica del impulsor? Comente este resultado

4/15

Datos adicionales:

Es despreciable el tiempo necesario para evacuar el aire contenido en cada evaporador al inicio de cada lote.

Puede asumir que en los evaporadores las fases se encuentran en equilibrio y que las tuberías están perfectamente aisladas.

Datos del vapor de agua:

$$C_p/C_v = 1,4 \quad P_M = 18 \text{ g/mol} \quad P_{\text{vap}}(60^\circ\text{C}) = 2 \times 10^4 \text{ Pa}$$

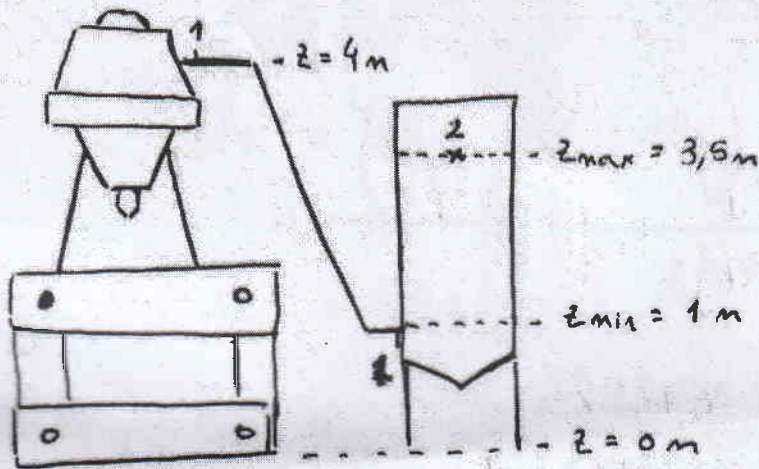
$$P_{\text{atm}} = 1 \text{ bar}$$

Es válido asumir que el régimen de flujo es completamente turbulento.



5/15

Exercício 1



Caneria

$$\phi 1 \frac{1}{2}'' \left\{ \begin{array}{l} d_i = 0,0409 \text{ m} \\ \text{Sch 40} \end{array} \right.$$

$$Q_{min} \rightarrow z_{TK} = z_{max}$$

BEH 1-2

$$\frac{\Delta P}{\rho g} + \Delta z + \Delta h_f + \frac{\Delta u^2}{2g} = 0$$



$$\Delta z = z_2 - z_1$$

$$z_2 = z_{max} = 3,5 \text{ m}$$

$$z_1 = 4 \text{ m}$$

$$\Delta z = -0,5 \text{ m}$$

$$\Delta h_f = \left(\frac{L_e f}{d} + k_s \right) \frac{u^2}{2g}$$

$$\frac{\Delta u^2}{2g} = \frac{-u^2}{2g}$$

$$\text{BEH} \rightarrow -0,5 + \left(\frac{L_e f}{d} + \cancel{k_s} - \cancel{1} \right) \frac{u^2}{2g} = 0$$

$$-0,5 + \left(\frac{L_e f}{d} \right) \frac{u^2}{2g} = 0 \quad (1)$$

$$\hookrightarrow f = f(Re, \frac{\epsilon}{d})$$

6/15

①

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \quad (2)$$

$$\frac{E}{d} = 1,1 \times 10^{-3}$$

Ruta de iteración

$$\text{Sup } u \xrightarrow{(2)} Re \xrightarrow{\frac{E/d}{K_{00} d_j}} f \xrightarrow{(1)} u$$

Valores de cierre

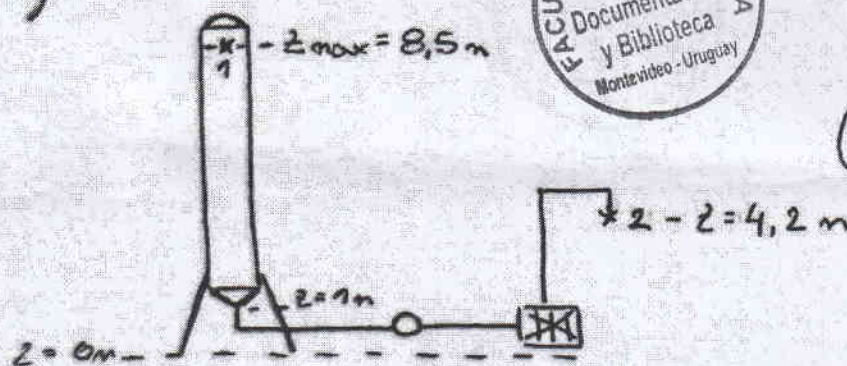
$$u = 1,12 \text{ m/s}$$

$$Re = 2,97 \times 10^4$$

$$f = 0,026$$

$$[Q_{min} = A f \cdot u = 5,32 \text{ m}^3/\text{h}]$$

b)



$$(10 < Q < 13) \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_{max} \Rightarrow z_{max}$$

$$Q_{max} = 13 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow u = 2,75 \text{ m/s}$$

BEM 1-2

$$\frac{\Delta P}{\rho g} + \Delta h_f + \Delta z + \frac{\Delta u^2}{2g} = H$$

$$\Delta h_f = \frac{L_e f}{d} \frac{u^4}{2g} + \frac{\Delta P_{cal}}{\rho g}$$

$$RCT \rightarrow f = 0,021$$

$$\Delta h_f = \frac{18 \cdot 0,021}{0,0409} \cdot \frac{2,7^3}{2 \cdot 9,8} + \frac{15 \cdot \cancel{\rho} u^2}{2 \cdot \cancel{\rho} g}$$

7/15

$$H_{sist} = \frac{18 \cdot f}{d} \frac{u^2}{2g} + \frac{15 u^2}{2g} + z_d - z_{max} + \frac{u^2}{2g}$$

$$H_{sist} = \left(\frac{18 \cdot f}{d} + 1 + 15 \right) \frac{u^2}{2g} + \underset{4,2m}{z_d} - \underset{8,5m}{z_{max}}$$

$$[H_{sist} = 5,43 m]$$

$$Q = 13 \frac{m^3}{h} \rightarrow H_{bba}$$

Si quiero que $Q_{op} < 13 \frac{m^3}{h}$
 $\downarrow$

$$H_{sist} > H_{bba}$$

→ La única bomba que no sirve es
 CP 180 ST

Modelo	H(m)
180	4,92
190	10,57
200	17,37

$$\rightarrow Q > 10 \frac{m^3}{h} \rightarrow u = 2,11 \frac{m}{s}$$



BEH 1-2 → cuando el silo está casi vacío.

$$H_{sist} = \left(\frac{18 \cdot f}{d} + 1 + 15 \right) \frac{u^2}{2g} + \underset{4,2}{z_d} - \underset{1m}{z_{T\text{vacuo}}}$$

$$H_{sist} = 8,96 m$$

$$H_{bba, 180} = 10,91 m$$

$$\left[\rightarrow H_{bba} > H_{sist} \Rightarrow Q_{op} > 10 \frac{m^3}{h} \right]$$

→ Evaluo potencia. → condición crítica → Q_{op} en

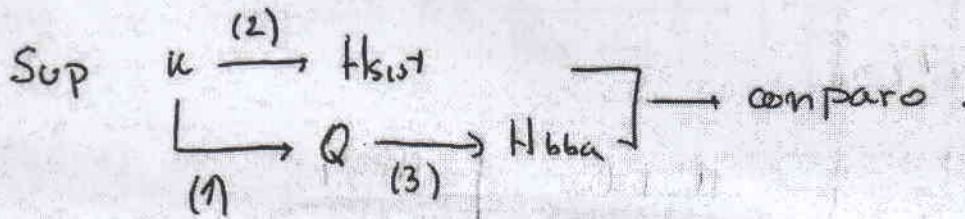
$$Q = A_f \cdot u \rightarrow Q = \frac{\pi (0,0409^2)}{4} \cdot 3600 u \quad (1)$$

8/15

2

$$H_{sist} = \left(\frac{18 \cdot 0,021}{0,0409} + 1 + 15 \right) \frac{u^2}{2 \cdot 9,8} + (4,2 - 1) \rightarrow \text{BEP} \quad (2)$$

$$H_{bba} = 21,00 - 0,249 \cdot Q - 0,076 Q^2 \rightarrow \text{Ecuación de la bomba (3)} \\ 180 \text{ ST}$$



Valores de cierre

$$H_{op} = 9,73 \text{ m}$$

$$Q_{op} = 10,65 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$u = 2,25 \text{ m/s}$$

]} Ponto de operación

$$P_m = \frac{P_h}{\eta}$$



$$\eta \approx 51\%$$

$$P_m = \frac{\rho g H_{op} \cdot Q_{op} \text{ mm}}{3600 \cdot 0,51} = 572 \text{ W} < 1,2 \text{ kW}$$

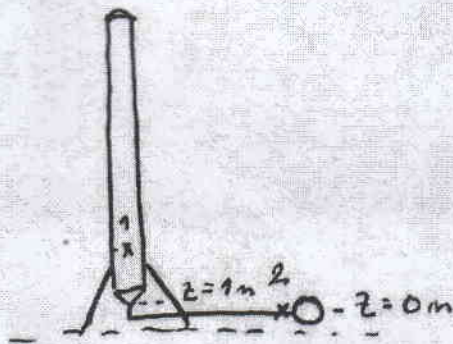
→ Evalúo cavitación → condición más crítica $z_{nk} = z_{min} = 1 \text{ m}$

$$NPSH_d = h_s - h_v$$

$$h_s = \frac{P_s}{\rho g} + \frac{u^2}{2g}$$

$$h_v = \frac{P_v}{\rho g}$$

BEM 1-2



$$\frac{\Delta P}{\rho g} + \Delta h_f + \Delta z + \frac{\Delta u^2}{2g} = 0$$

9/15

(2)

$$u = 2,72 \text{ m/s}$$

$$Q_{op\ max} = 12,86 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$H_{op} = 5,22 \text{ m}$$

Ecuación del Pitot

$$u_{max} = \sqrt{\frac{2 \Delta P}{\rho}} \rightarrow \text{necesito } u_{max}$$

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} = 7,2 \times 10^4 \rightarrow \text{con este valor ingreso al gráfico del Pitot}$$

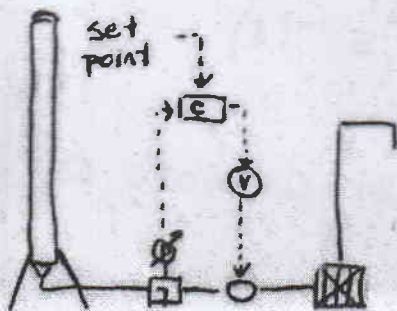
$$\frac{u}{u_{max}} = 0,825 \rightarrow u_{max} = 3,3 \text{ m/s}$$



$$\Rightarrow \Delta P_{max} = 5620 \text{ Pa} \rightarrow \text{Elijo el manómetro ③}$$

d)

Esquema



La alternativa propone instalar un variador de frecuencia que regule la velocidad de giro de la bomba.

Variable actuada $\rightarrow$ presión diferencial medida en el pitot.

Variable controlada $\rightarrow$ velocidad de giro de la bomba.

Mediante el lazo de control esquematizado en la figura se asegura el caudal de ingreso a la descrenadora.

edida que el nivel de leche en el silo desciende, la velocidad de giro de la bomba va a tener que ir aumentando $\Rightarrow$ va a operar en un rango de velocidades.

$$N_{\min} = 2900 \text{ rpm}$$

$N_{\max} \Rightarrow$ Leyes de similitud.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (2)$$

$$H_1 = 21,00 - 0,249 Q_1 - 0,079 Q_1^2 \quad (3)$$

$$Q_2 = Q_{\text{op max}} = 12,86 \text{ m}^3/\text{s} \quad \rightarrow \quad u = 2,72 \text{ m/s}$$

$$H_2 \Rightarrow H_{\text{sist}} = \left(\frac{L \cdot f}{d} + 1 + 15 \right) \frac{u^2}{2 \cdot g} + 4,2 - Z_{\text{TK min}}$$

$$\Rightarrow H_2 = 12,73 \text{ m}$$

$$N_1 = 2900 \text{ rpm}$$



Ruta de iteración $\rightarrow$ Sup $H_1 \xrightarrow{(2)} N_2 \xrightarrow{(1)} Q_1 \xrightarrow{(3)} H_1$

Valores de cierre

$$Q_1 = 10,94 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$H_1 = 9,2 \text{ m}$$

$$N_2 = 3411 \text{ rpm}$$

— Punto homólogo

$$\Rightarrow 2900 < N_{\text{bomba}} < 3411$$

$\rightarrow$ Evaluo Potencia

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q_2 \cdot H_2 = 460,9 \text{ W}$$

$\eta_1 = 51\% \rightarrow$ eficiencia extraída del gráfico para Q_1 ④

$\eta_1 = \eta_2 \rightarrow$ Ley de similitud

$$P_m = \frac{P_h}{\eta_1} = 903,7 \text{ W}$$

$\rightarrow$ Otra forma

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q_1 \cdot H_1 = 282,8 \text{ W}$$

$$\eta_1 = 51 \%$$

$$P_{m1} = \frac{P_{h1}}{\eta_1} = 554,4 \text{ W}$$



Ley de Similitud $\rightarrow \frac{P_{m1}}{P_{m2}} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^3 \rightarrow P_{m2} = 902,2 \text{ W}$
[$P_m < 1,2 \text{ kW}$]

$\rightarrow$ Evaluo cavitación

$$NPSH_d = \frac{P_{atm} - P_v}{\rho \cdot g} - \underset{0}{z_{oba}} + \underset{1}{z_{tmin}} - \frac{L \cdot f}{d} \frac{u^2}{2g}$$

$u = 2,72 \text{ m/s} \rightarrow$ velocidad cuando se opera a $Q_2 = 12,86 \text{ m}^3/\text{s}$

$$NPSH_d = 8,7 \text{ m}$$

$NPSH_m = 2,9 \text{ m} \rightarrow$ obtenido del gráfico a Q_1

Ley de similitud $\rightarrow \frac{NPSH_m}{NPSH_{r2}} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2$

$$NPSH_{r2} = 4,01 \text{ m}$$

$$NPSH_d \gg NPSH_{r2} \Rightarrow \text{no cavita.}$$

a) Tubería perfectamente aislada $\Rightarrow$ flujo adiabático }
 Flujo desde reservorio

$$N = f_B L_e / D \quad L_e = 5 \text{ m} \quad D = 0,0266 \quad \left. \begin{array}{l} \text{Crete} \\ \text{RCT} \Rightarrow f_B = f(c/D) \Rightarrow 0,023 = f_B \end{array} \right\} \rightarrow N = 4,3$$

$$G/G^* = \frac{w/A}{P_0} \sqrt{\frac{R T_0}{\rho M \gamma} \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{(\gamma-1)/(\gamma+1)}}$$



$$P_0 = -0,862 \text{ abso} < > 2 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$T = 333 \text{ K} \quad R = 8,314 \frac{\text{J}}{\text{mol K}} \quad \gamma = 1,4$$

$$w = 30/3600 = 8,33 \times 10^{-3} \text{ kg/s} \quad A = 5,58 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$\Rightarrow G/G^* = 0,43$$

$$\rightarrow P_3/P_0 \sim 0,74 \quad (0,66 < P_3/P_0 < 0,85) \quad \begin{array}{l} \text{para } N=5 \\ \text{para } N=2 \end{array}$$

$$\Rightarrow P_3 \sim 14,8 \text{ kPa} \quad (17 \text{ kPa} > P_3 > 13 \text{ kPa})$$

$$\rightarrow P_{\text{vacuo}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{abs}}$$

$$\Rightarrow \boxed{P_{\text{vacuo}} \approx 85 \text{ kPa}} \quad (83 \text{ kPa} < P_{\text{vacuo}} < 87 \text{ kPa})$$

(error < 5%)

$$b) P_0 = 1,5 \times 10^4 \text{ Pa} \rightarrow P_3/P_0 = 0,75 \quad \left. \begin{array}{l} \rightarrow G/G^* \\ N = 4,3 + f_B \frac{7}{0,0266} = 10,3 \end{array} \right\}$$

$$\frac{w}{A} = \frac{G/G^* P_0}{\sqrt{\frac{R T_0}{\rho M \gamma} \left(\frac{\gamma+1}{2} \right)^{(\gamma-1)/(\gamma+1)}}} \Rightarrow \frac{w}{A} = 9,44 \frac{\text{kg}}{\text{s m}^2}$$

14/15

$$A = 5,58 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

2) c) Aumentando el diámetro de la tubería se puede compensar el incremento de la pérdida de carga producido por el aumento en la longitud de tubería de modo de mantener o incluso aumentar el flujo mínimo y de este modo evitar un aumento en el tiempo de procesamiento.

d) a) ¿W_{acab}? $P_1 = P_{\text{turbina}} = 1,5 \times 10^4 \text{ Pa} = \text{cte} \Rightarrow \omega_{\text{impulsor}} = \omega_{\text{eje}} = 60 \text{ rad/s}$

$$W_{\text{acab}} = P_1 (V_1 - V_4) \frac{k}{k-1} \left(r_c^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)$$

Volumen admitido por ciclo = $V_1 - V_4 = \frac{W}{N P_1} = \frac{1,5}{900 \text{ rpm}}$

$$P_1 = \frac{P_1 M}{R T_1} = \frac{1,5 \times 10^4 \cdot 1,8 \times 10^{-2}}{8,314 \cdot 333} \Rightarrow P_1 = 9,75 \times 10^{-2} \text{ kg/m}^3$$

$T_1 = T_{\text{turbina}} = T_{\text{aspirador}} = 333 \text{ K}$ porque $\frac{\Delta u^2}{2} + \Delta H = 0$

$$\Rightarrow V_1 - V_4 = 1,14 \times 10^{-2} \text{ m}^3$$

$$r_c = \frac{1 \text{ bar}}{0,15 \text{ bar}} = 6,67$$

$k = 1,4$ (adiabático)

$$\Rightarrow \boxed{W_{\text{acab}} = 430 \text{ J/ciclo}}$$



15/15

ii) Cilindro máxima teorica implica $V_H = 0 \Rightarrow C =$