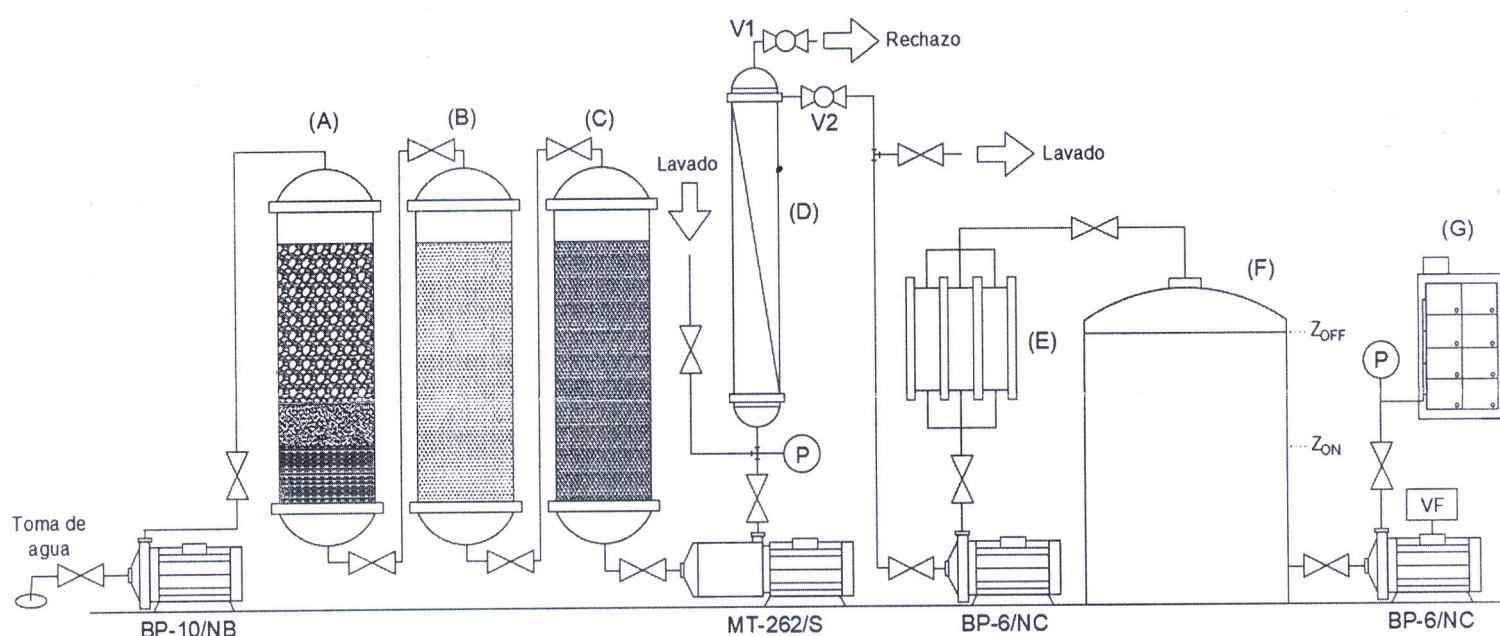


PROBLEMA 1

Se está dimensionando la línea de tratamiento de agua para una planta de hidrógeno verde. El agua bruta se capta desde una fuente superficial y atraviesa un tren de pretratamiento compuesto por: filtro multimedia (A) para reducción de sólidos, filtro de carbón activado (B) para la eliminación de materia orgánica y un ablandador (C) que remueve dureza. Para que el agua alcance una conductividad menor a $0,1 \mu\text{S}/\text{cm}$, esta se bombea a través de una membrana de ósmosis inversa (D) y una etapa de electrodeionización (E). Finalmente, el agua ultra pura se almacena en un tanque (F) de acero inoxidable previo a su ingreso al electrolizador (G). El proceso se muestra en



el siguiente diagrama (no a escala).

Se prevé la instalación de cuatro bombas. La bomba BP-10/NB previa al filtro multimedia (A), la bomba MT-262/S multietapa de alta presión ubicada antes de la membrana de ósmosis inversa (D), y dos bombas BP-6/NC, una utilizada para bombear el agua a través del electrodeionizador (E) y otra para llevar el agua desde el tanque hasta el electrolizador (G). Todas las bombas están a nivel de piso ($z = 0 \text{ m}$).

La presión a la entrada de la ósmosis medida por el manómetro puede variar entre 9 y 14 barg. La entrada a la ósmosis inversa se encuentra 1 m por encima del suelo.

- a) Determine el mínimo y el máximo caudal de agua que podría ingresar a la membrana de ósmosis inversa.

1/10.

- b) Demuestre que, si se quisiera operar con un caudal de agua de entrada al equipo de ósmosis inversa de $12 \text{ m}^3/\text{h}$, y se pudiera ajustar la carga necesaria de bombeo mediante las válvulas V1 y V2 de manera que esa carga corresponda a la altura que indica la curva de la bomba MT-262/S para el mismo caudal, igualmente sería necesaria la bomba BP-10/NB para obtener los $12 \text{ m}^3/\text{h}$.

El electrolizador (G) logra su óptima operación cuando el caudal que pasa por él es de $7,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Para esto, es necesario mantener controlado el caudal ante las fluctuaciones de nivel en el tanque. Esto se realiza mediante un variador de frecuencia que actúa sobre la bomba BP-6/NC que alimenta al electrolizador.

Cada 2 semanas, se realiza una limpieza química de la membrana de ósmosis inversa. Esta etapa consiste en hacer pasar una solución ácida a través de los mismos durante 2 horas. Durante este tiempo, no hay reposición de agua al tanque y el electrolizador (G) debe continuar funcionando con el agua previamente almacenada en el tanque (F).

- c) Determine cuál es el nivel mínimo que puede alcanzar el tanque.
d) Determine la potencia mecánica máxima que podría requerirse del motor de la bomba BP-6/NC utilizada para enviar el agua al electrolizador. Puede asumir que no hay riesgo de cavitación en esta parte.

Datos adicionales:

Cañería de acero comercial de 2" Sch 40. Rugosidad: $5 \times 10^{-5} \text{ m}$

La toma de agua se realiza desde un gran reservorio de nivel $z = -2 \text{ m}$, prácticamente constante. La longitud equivalente estimada entre la toma y la bomba BP-10/NB es de 15 m, desde la bomba BP-10/NB hasta la bomba MT-262/S de 45 m y desde la bomba MT-262/S hasta la entrada de la ósmosis de 3 m.

La longitud equivalente entre el tanque de agua y la entrada al electrolizador es de 20 m. Las longitudes equivalentes informadas previamente no incluyen los filtros ni el ablandador.

La pérdida de carga en cada equipo del tren de pretratamiento se puede calcular como $\Delta h_f = K(u^2/2g)$ siendo K la constante de pérdida de carga proporcionadas por los fabricantes de cada uno: $K_A = 185$ para el filtro multimedia, $K_B = 65$ para el filtro de carbón activado y $K_C = 23$ para el ablandador, todas ellas en relación con la velocidad en la tubería.



2/10.

El sistema de ósmosis cuenta con un sistema de control ON-OFF que actúa sobre las tres bombas previas al tanque, las cuales en operación normal se encienden cuando el nivel del tanque alcanza 2 m debajo de su nivel máximo.

Tanque: Cilíndrico de fondo plano y de acero inoxidable con un diámetro de 3 m y una capacidad máxima de 35 m³. Está venteado a la atmósfera. El tanque se encuentra apoyado a nivel z = 0 m.

Electrolizador: De membrana de intercambio aniónico, con una presión de agua de entrada de 1 barg. La entrada de agua al mismo se encuentra a 1 m por encima del suelo

Todas las unidades excepto el tanque funcionan llenas de agua.

Propiedades del agua: Densidad: 1000 kg/m³; Viscosidad: 0,001 Pa·s; Presión de vapor: 2300 Pa

Bomba MT-262/S (2900 rpm - 50 Hz):

$$H(m) = -0,0390[Q(m^3/h)]^2 - 1,43Q(m^3/h) + 149$$

NPSHr entre 3m y 6m

Bomba BP-10/NB (2900 rpm-50 Hz):

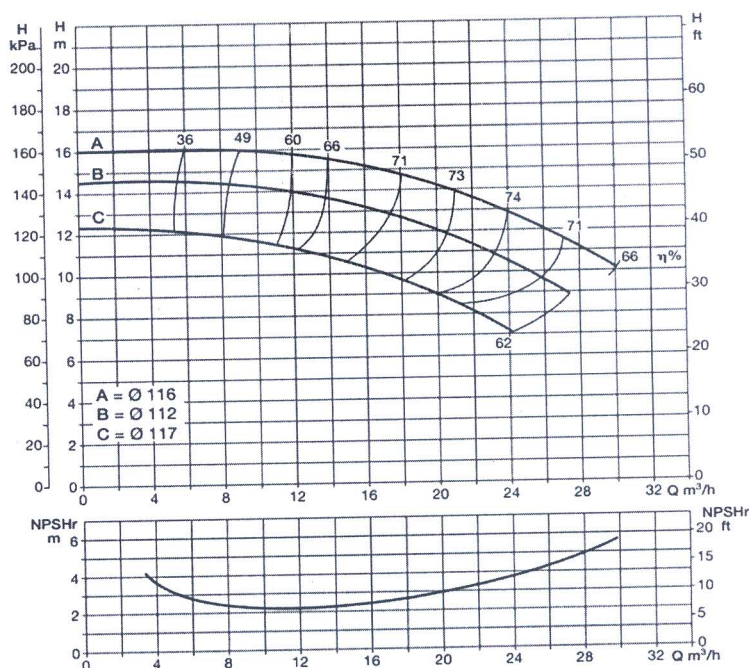
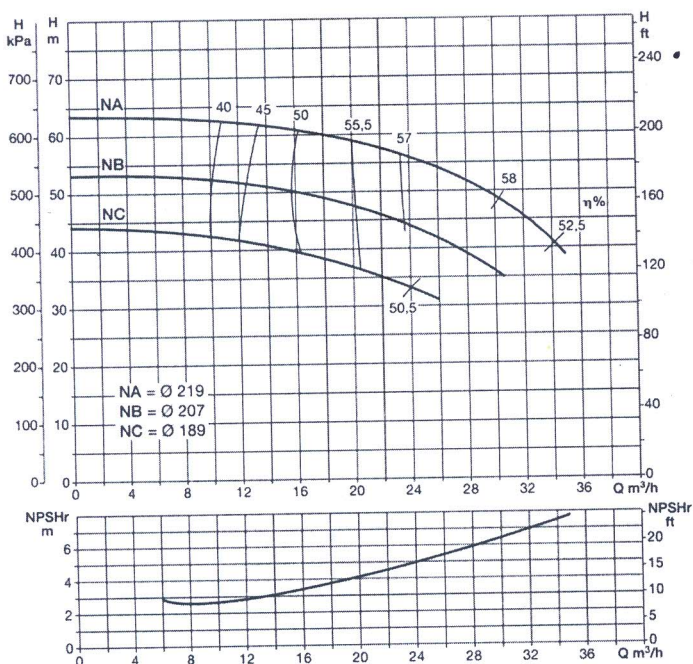
$$H(m) = -0,0270[Q(m^3/h)]^2 + 0,267Q(m^3/h) + 53,1$$

(Gráfico a la izquierda)

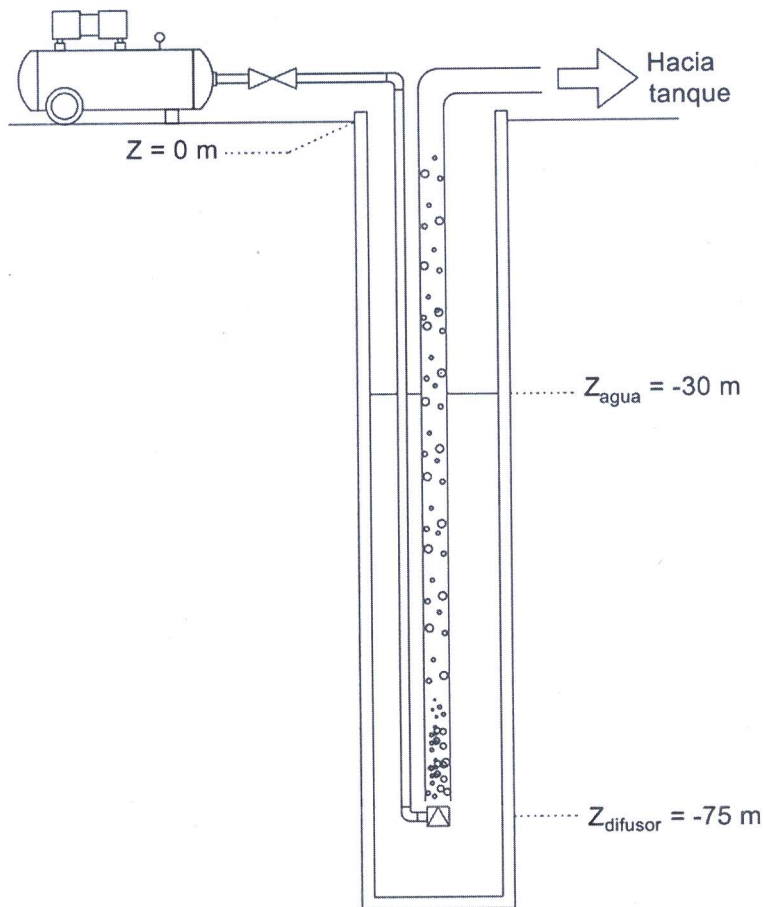
Bomba BP-6/NC (2900 rpm - 50 Hz):

$$H(m) = -0,0103[Q(m^3/h)]^2 + 0,0352Q(m^3/h) + 12,3$$

(Gráfico a la derecha)



3/10.



PROBLEMA 2

Una industria se abastece mediante pozos perforados de gran profundidad. Los pozos en la región contienen un elevado nivel de sólidos suspendidos, por lo que se emplea la tecnología de *air lift*, la cual consiste en inyectar aire con un difusor para generar una mezcla bifásica con una densidad aparente menor que permita el arrastre del agua por la presión que ejerce el resto del líquido en el pozo. El aire proviene de un tanque presurizado por su compresor que admite desde la atmósfera.

Se asume que la presión contra la que descarga el difusor está determinada por la presión hidrostática del agua en el pozo hasta el nivel del difusor.

El flujo volumétrico de aire calculado para satisfacer los requerimientos de agua es de por lo menos $44,6 \text{ m}^3/\text{h}$ de aire en condiciones de admisión.

- Determine la relación de compresión máxima para el caudal de aire mínimo requerido asumiendo despreciables las pérdidas de carga entre el compresor y el tanque.
- Determine si el compresor es adecuado para el servicio requerido y calcule la potencia eléctrica consumida por su motor.



4110

Datos adicionales:

El nivel del agua está 30 metros por debajo de la superficie ($z=0$) y se puede asumir constante.

El pozo cuenta con 80 metros de profundidad total.

El difusor se encuentra a 75 metros por debajo de la superficie ($z=0$)

Propiedades del agua: Densidad: 998 kg/m^3 ; Viscosidad: $0,001 \text{ Pa}\cdot\text{s}$; La temperatura del agua en el pozo es ligeramente inferior a la del aire.

Propiedades del aire: $P_{\text{atm}} = 1,01 \text{ bar}$; $T_{\text{amb}} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; $C_p/C_v = 1,4$; viscosidad (independiente de la temperatura): $2 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$; $P_{\text{Maire}} = 29 \text{ g/mol}$

Conducción de aire comprimido del tanque al difusor: Tubería cédula 80s en acero comercial; diámetro nominal $\frac{1}{2}$ "; rugosidad $= 5 \times 10^{-5} \text{ m}$; Longitud: 80 m; entrada de cantos vivos; 2 codos de 90° ; 1 válvula esfera; difusor con una constante de pérdida de carga de 0,8.

Datos del compresor:

Fracción de volumen muerto: 0,05

Cilindrada total = 1,6 L

$f_{\text{fuga}} = 0,94$; $f_{\text{temp}} = 0,96$

Eficiencia mecánica: 85%

La temperatura en el tanque va desde 20 a $70 \text{ }^\circ\text{C}$.

Velocidad nominal (50 Hz) del motor: 1450 rpm; relación de transmisión: 0,7; Eficiencia del motor: 90%; Potencia mecánica nominal = 8,5 kW

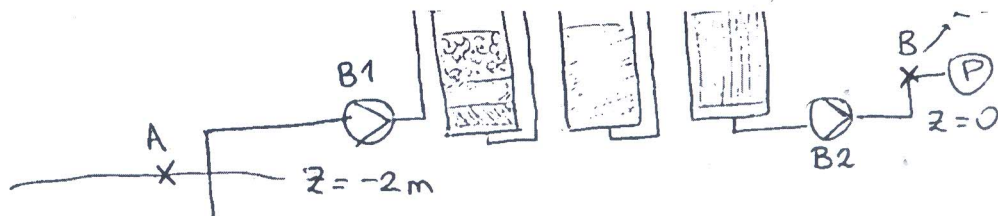
Coefficiente politrópico: $k = 1,35$



S / 10.

PROBLEMA 1

a) $Q_{\min}; Q_{\max}?$



$$\sum_{A-B} : \frac{\Delta U^2}{2\alpha g} + \frac{\Delta P}{\rho g} + \Delta z + \Delta h_f = H_s$$

$$\frac{U^2}{2\alpha g} + \frac{P_B - P_{atm}}{\rho g} + \frac{\Delta z}{3m} + \left(\frac{f(L_{e1} + L_{e2} + L_{e3})}{D} + K_A + K_B + K_C \right) \frac{U^2}{2g} = H_s$$

$$L_{e1} + L_{e2} + L_{e3} = L_{eT} = 63 \text{ m} ; K_A + K_B + K_C = \sum K = 273$$

$$\text{Sumo } \alpha = 1 \rightarrow \frac{P_B - P_{atm}}{\rho g} + \Delta z + \left(\frac{f L_{eT}}{D} + \sum K + 1 \right) \frac{U^2}{2g} = H_s \quad [1]$$

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad [2] \rightarrow f = F(Re, \epsilon/D) \quad [3] \text{ (Churchill)}$$

$$Q = U A_{\text{flujo}} = \frac{U \pi D^2}{4} \rightarrow U = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad [4]$$



$$\text{En el punto de operación} \rightarrow H_s = H_{\text{bombas}} = \underbrace{H_{B1} + H_{B2}}_{\text{conexión en serie}}$$

$$H_{B1} = -0,027Q^2 + 0,267Q + 53,1$$

$$H_{B2} = -0,039Q^2 - 1,43Q + 149$$

$$H_s = -0,066Q^2 - 1,163Q + 202,1 \quad [5]$$

$$\text{Resolviendo } [1], [2], [3], [4] \text{ y } [5] : \text{Si } P_B = 9 \text{ barg} \rightarrow Q_{\max} = 16,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Re_{\min} = 78140 \rightarrow \alpha = 1 \checkmark$$

$$\text{Si } P_B = 14 \text{ barg} \rightarrow Q_{\min} = 11,6 \text{ m}^3/\text{h}$$

b) Si se pudiera regular tal que $H_{\text{sist}} = H_{B2}(Q = 12 \text{ m}^3/\text{h})$

→ Entonces la bomba 2 (MT-262/S) podría entregar toda la altura

¿Por qué sería necesaria la bomba 1 (BP-10/NB)?

6/NO.

Hay una gran pérdida de carga en la línea de succión de la B2

→ Asumo que solo funciona B2

$$\text{BEM}_{A-\text{succión B2}}: \frac{U^2}{2g} + \frac{P_s - P_{atm}}{\rho g} + \left(\frac{f(L_{e1} + L_{e2})}{D} + \sum K \right) \frac{U^2}{2g} + \frac{\Delta z_{succ}}{2m} =$$

$$NPSH_D = \frac{U_s^2}{2g} + \frac{P_s}{\rho g} - \frac{P_v}{\rho g} \rightarrow NPSH_D = \frac{P_{atm} - P_v}{\rho g} - \Delta z_{succ} - \left(\frac{f(L_{e1} + L_{e2})}{D} + \sum K \right) \frac{U^2}{2g}$$

$$Q = 12 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow U = \frac{Q}{A} = 1,54 \text{ m/s} \rightarrow Re = \frac{\rho U D}{\mu} = 80837$$

$$NPSH_D = -28,2 \text{ m} < 0 \rightarrow B2 \text{ cavita!} \quad \hookrightarrow f = 0,0227$$

se precisa la bomba BP-10/NB para presurizar la línea de succión de la bomba MT-262/S

→ Si funcionan ambas bombas:

$$\text{BEM}_{A-\text{succión B2}}: \frac{U^2}{2g} + \frac{P_s - P_{atm}}{\rho g} + \left(\frac{f(L_{e1} + L_{e2})}{D} + \sum K \right) \frac{U^2}{2g} + \Delta z_{succ} = H_{B1}$$

$$NPSH_D = H_{B1} + \frac{P_{atm} - P_v}{\rho g} - \Delta z_{succ} - \left(\frac{f(L_{e1} + L_{e2})}{D} + \sum K \right) \frac{U^2}{2g}$$

$$\text{Para } Q = 12 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow H_{B1} = 52,4 \text{ m} \rightarrow NPSH_D^{(B2)} = 24,3 \text{ m} \gg 6 \text{ m}$$

→ Evalúo cavitación para B1 → BEM_{A-succión B1}

$$NPSH_D(B1) = \frac{P_{atm} - P_v}{\rho g} - \Delta z_{succ} - \frac{f L_{e1}}{D} \frac{U^2}{2g} = 7,2 \text{ m}$$

$$NPSH_R^{B1}(Q = 12 \text{ m}^3/\text{h}) \cong 3 \text{ m} \rightarrow B1 \text{ no cavita}$$

Es necesaria la primer bomba para que el sistema funcione correctamente



$$c) V_{TK}^{max} = \frac{\pi D^2}{4} Z_{OFF} \rightarrow Z_{OFF} = \frac{4 V_{TK}^{max}}{\pi D^2} = 4,95 \text{ m}$$

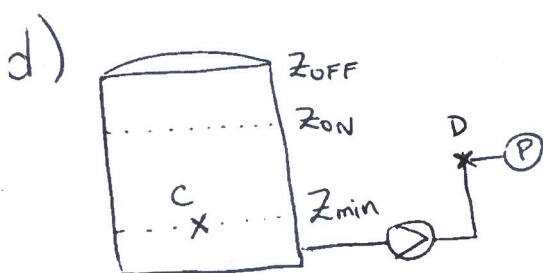
$$Z_{ON} = Z_{OFF} - 2 = 2,95 \text{ m}$$

El nivel mínimo en el tanque se alcanzaría si se decide realizar el lavado cuando $Z_{TK} = Z_{ON}$

$$t_{lavado} = 2 \text{ h} ; Q_{op} = 7,5 \text{ m}^3/\text{h} \text{ (constante)} \rightarrow V_{desc} = Q_{op} \times t = 15 \text{ m}^3$$

$$V_{desc} = \frac{\pi D^2}{4} \Delta Z \rightarrow \Delta Z = \frac{4 V_{desc}}{\pi D^2} = 2,12 \text{ m} \rightarrow \text{Cambio de altura al finalizar el lavado.}$$

$$Z_{min} = Z_{ON} - \Delta Z = 0,83 \text{ m}$$



$$\text{BEM}_{C-D} : \frac{\Delta u^2}{2\alpha g} + \frac{\Delta P}{\rho g} + \Delta z + \Delta h_f = H_2$$

$$\frac{u^2}{2g} + \frac{P_D - P_{atm}}{\rho g} + \frac{z_D - z_C}{1} + \frac{f L_e}{D} \frac{u^2}{2g} = H_2$$

→ La potencia máxima se consumirá cuando la bomba trabaje a la mayor frecuencia → $H_{2,max} \rightarrow z_C = z_{min}$

$$Q_2 = 7,5 \text{ m}^3/\text{h} \rightarrow u = 0,96 \text{ m/s} \rightarrow Re = 50523 \rightarrow f = 0,024$$

$$H_2^{max} = 10,84 \text{ m} \rightarrow \text{a la frecuencia de trabajo } (f_2)$$

$$\text{Leyes de similitud : } \frac{Q_1}{Q_2} = \frac{f_1}{f_2} ; \frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2$$



$$-0,0103 Q_1^2 + 0,0352 Q_1 + 12,3 = H_1 \quad [3]$$

$$f_1 = 50 \text{ Hz} ; Q_2 = 7,5 \text{ m}^3/\text{h} ; H_2 = 10,84 \text{ m}$$

$$\rightarrow \text{Resolviendo [1], [2], y [3]} \rightarrow f_2 = 47,7 \text{ Hz} ; Q_1 = 7,9 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$P_{m2} = \frac{\rho g H_2 Q_2}{\eta_2} \rightarrow \eta_2 \approx 0,47 \text{ tomada del gráfico a } Q_1 \text{ ya que } \eta_1 = \eta_2 \text{ (homólogos)}$$

$$\rightarrow P_{m2}^{max} = 472 \text{ W}$$

8/10

2) (a) Γ_c será máxima cuando T en tope es máxima (por menos de
 $\Rightarrow T_0 = 343 \text{ K} > T_{atm} > T_{agua} \Rightarrow S, T_2 > T_{atm}$
 $Q < 0$

$$D = 0,0139 \text{ m}$$

$$\Rightarrow w_{isol} < w_{2d} < w_r$$

$$W = Q \cdot \rho_{aire} = \frac{44,6 \text{ m}^3/\text{h}}{3600 \text{ s/h}} \cdot \rho_{aire} \Rightarrow w = 1,46 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$$

Asumo subsonico

$$\rho_{aire} = 1,18 \text{ kg/m}^3$$

$$\Rightarrow P_2 = P_3 = 1,01 \times 10^5 + \rho g h_{45m} \Rightarrow P_2 = 5,42 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$L_e = L + \frac{D}{f_s} \sum K$$

$$\sum K = 0,5 + 2 \times 30 f_r + 3 f_r + 0,8 = 3,00$$

Mejor modelo: Adiabático en tubería y flujo desde reservorio

Caso $L_e > 80$ efecto de entrada es menor

$\Rightarrow$ Me aproxima a la solución y flujo adiabático desde tubería

$$W = 1,46 \times 10^{-2} \text{ kg/s}$$

$$P_2 = 5,42 \times 10^5 \text{ Pa}$$

$$V_1 = \frac{P_1 T_1}{P_1 \rho_{aire}} = 0,146 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$T_1 = 343 \text{ K}$$

$$\Rightarrow \text{variando } V_2 \text{ (semilla } 0,2 \text{ m}^3/\text{kg} > 0,146 \text{ m}^3/\text{kg})$$

$$P_1 \text{ (semilla } 9 \times 10^5 \text{ Pa} > 5,42 \times 10^5 \text{ Pa})$$

solucion $\downarrow$

$$V_2 = 0,185 \text{ m}^3/\text{kg} \quad P_1 = 6,72 \times 10^5 \text{ Pa}$$

Modelo adiab. desde reservorio

$$X = \left(\frac{w}{A}\right)^2 \frac{V_0}{P_0} = 2,02 \times 10^{-3}$$

$$W = 0,0146 \text{ kg/s}$$

$$T_0 = 343 \text{ K}$$

$$F = P_2/P_0 = \frac{5,42 \times 10^5}{P_0} \left(\text{variando } P_0 \text{ (semilla } 6,72 \times 10^5 \text{ Pa}) \right)$$

$$\text{Variando } Z \text{ (semilla } 0,81 > 0,80 = F_{semilla})$$

$$\text{Variando } \Gamma \text{ (semilla } 0,99 \text{ porque } L_e \text{ alta)}$$

Restricciones $1 > \Gamma > Z > F > 0,7$

solucion

$$\Rightarrow \Gamma = 0,999 \quad Z = 0,804$$

$$P_0 = 6,74 \times 10^5$$

$$\Gamma_c = \frac{6,74}{1,01} \Rightarrow \boxed{\Gamma_c = 6,67}$$



$$f_s = 0,030$$

$$L_e = 81,4 \text{ m}$$

$$T_2 \sim 343 \text{ K} \Rightarrow T_{ad}$$

$$u_2 = 17,5 \text{ m/s} < u_s$$

9/10

2) (b) Verifico que el compresor de flujo masico suficiente $(> 1,46 \times 10^{-2} \frac{kg}{s})$

$$\dot{m} = \rho_1 \eta_v V_D \frac{N}{60}$$

$$\eta_v = \underbrace{\left(1 + c - c r_c^{\frac{1}{\gamma}} \right)}_{\eta_{res} = 84,6\%} f_{temp} f_{j2} = 76,3\%$$

$$\rho_1 = \frac{p_{atm}}{R T_{atm}} = 1,18 \frac{kg}{m^3}$$

$$V_D = 1,6 \times 10^{-3} m^3$$

$$N = N_{motor} \cdot \eta_t = 1015 rpm <$$

$$\Rightarrow \dot{m} = 2,44 \times 10^{-2} \frac{kg}{s} > 1,46 \times 10^{-2} \frac{kg}{s} \quad \checkmark$$

$$P_e = \frac{W_{acab} \frac{N}{60}}{\eta_{mec} \eta_{elect.}}$$

$$W_{acab} = p_1 \underbrace{(V_1 - V_4)}_{V_D \eta_{res}} \frac{\gamma}{\gamma - 1} \left(r_c^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right) = 335 J/acab$$

$$\Rightarrow \underline{P_e = 7,4 kW} < \frac{8,5 kW}{0,80} \quad \checkmark$$

Potencia Electrica Nominal



10/20.