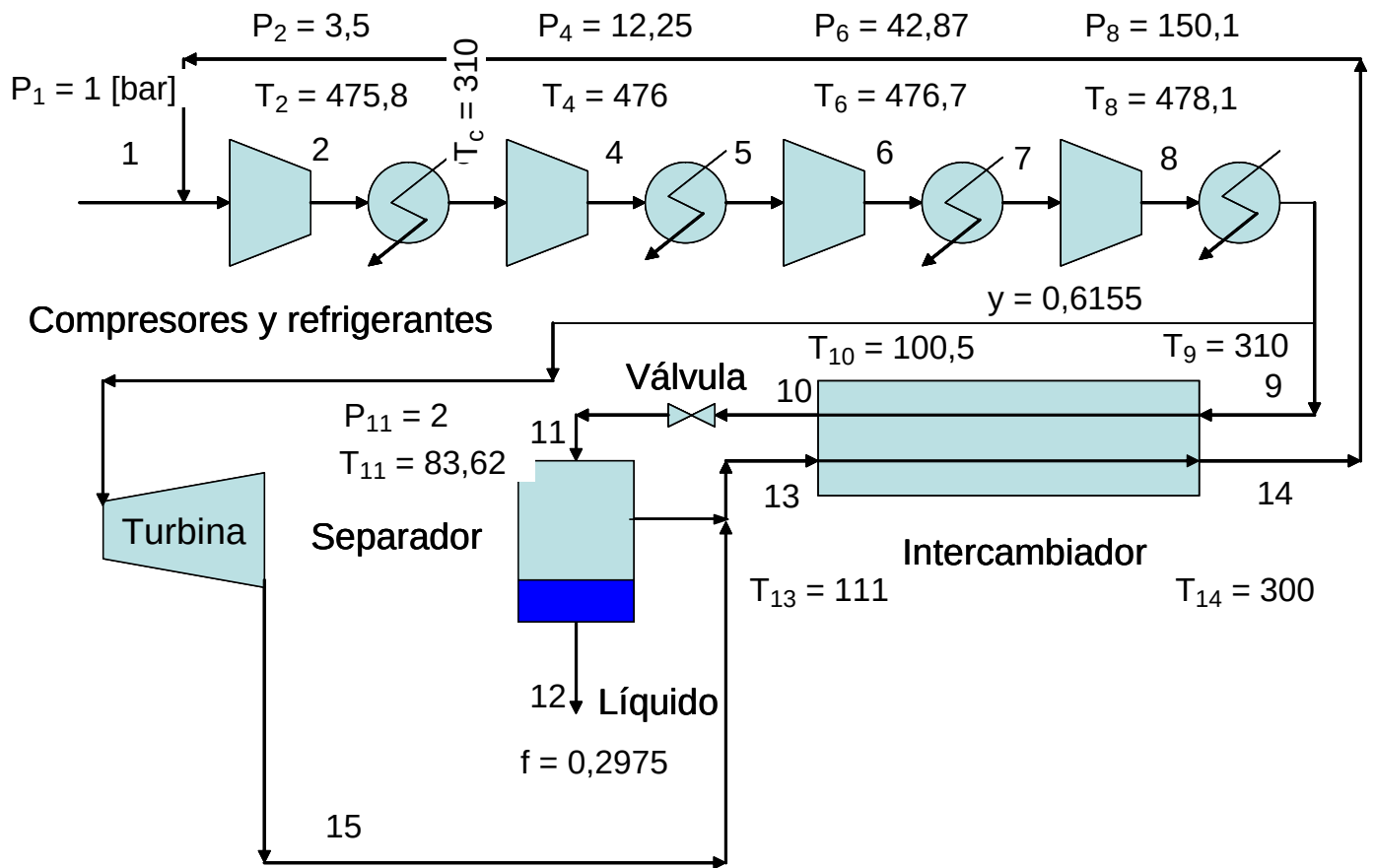




Obtención de nitrógeno líquido a partir de nitrógeno gas a temperatura ambiente por el proceso mixto Linde-Claude.

Cálculo también del balance exergético y el rendimiento

Copyright J.I. Zubizarreta

R\$ = 'Nitrogen'

$T_c = 310$ [K] Temperatura de enfriamiento con agua de refrigeración

$r = 3.5$ Relación de compresión

$Eff = 0.8$ Eficiencia isoentrópica del compresor

$Eff_t = 0.85$ Eficiencia isoentrópica de la turbina de expansión

Compresor

$T_1 = T_c$

$P_1 = 1$ [bar]

$h_1 = h [R\$; T = T_1 ; P = P_1]$

$s_1 = s [R\$; T = T_1 ; P = P_1]$

$\frac{P_2}{P_1} = r$ Presión en la 1ª etapa de compresión

$$h_{2,ID} = h \left[R\$; P = P_2 ; s = s_1 \right] \text{ Entalpía obtenida en la isoentropica}$$

$$W_{c1} = \frac{h_{2,ID} - h_1}{\text{Eff}} \text{ El trabajo efectivo es mayor por la pérdida de eficiencia y añade entalpía extra}$$

$$h_2 = h_1 + W_{c1}$$

Balance de entalpía total en el compresor real, que se asume adiabático y además aumenta la temperatura de descarga

$$s_2 = s \left[R\$; h = h_2 ; P = P_2 \right] \text{ propiedades para el estado 2}$$

$$T_2 = T \left[R\$; h = h_2 ; P = P_2 \right]$$

$$P_3 = P_2 \text{ enfriamiento en la isobara}$$

$$T_3 = T_c$$

$$h_3 = h \left[R\$; T = T_3 ; P = P_3 \right] \text{ propiedades para el estado 3}$$

$$s_3 = s \left[R\$; h = h_3 ; P = P_3 \right]$$

$$\frac{P_4}{P_3} = r \text{ Presión en la 2ª etapa de compresión}$$

$$h_{4,ID} = h \left[R\$; P = P_4 ; s = s_3 \right] \text{ Entalpía obtenida en la isoentropica}$$

$$W_{c2} = \frac{h_{4,ID} - h_3}{\text{Eff}} \text{ El trabajo efectivo es mayor por la pérdida de eficiencia y añade entalpía extra}$$

$$h_4 = h_3 + W_{c2}$$

Balance de entalpía total en el compresor real, que se asume adiabático y además aumenta la temperatura de descarga

$$s_4 = s \left[R\$; h = h_4 ; P = P_4 \right] \text{ propiedades para el estado 4}$$

$$T_4 = T \left[R\$; h = h_4 ; P = P_4 \right]$$

$$P_5 = P_4 \text{ enfriamiento en la isobara}$$

$$T_5 = T_c$$

$$h_5 = h \left[R\$; T = T_5 ; P = P_5 \right] \text{ propiedades para el estado 3}$$

$$s_5 = s \left[R\$; h = h_5 ; P = P_5 \right]$$

$$\frac{P_6}{P_5} = r \text{ Presión en la 3ª etapa de compresión}$$

$$h_{6,ID} = h \left[R\$; P = P_6 ; s = s_5 \right] \text{ Entalpía obtenida en la isoentropica}$$

$$W_{c3} = \frac{h_{6,ID} - h_5}{\text{Eff}} \text{ El trabajo efectivo es mayor por la pérdida de eficiencia y añade entalpía extra}$$

$$h_6 = h_5 + W_{c3}$$

Balance de entalpía total en el compresor real, que se asume adiabático y además aumenta la temperatura de descarga

$$s_6 = s \left[R\$; h = h_6 ; P = P_6 \right] \text{ propiedades para el estado 4}$$

$$T_6 = T [R\$; h = h_6 ; P = P_6]$$

$$P_7 = P_6 \quad \text{enfriamiento en la isobara}$$

$$T_7 = T_c$$

$$h_7 = h [R\$; T = T_7 ; P = P_7] \quad \text{propiedades para el estado 3}$$

$$s_7 = s [R\$; h = h_7 ; P = P_7]$$

$$\frac{P_8}{P_7} = r \quad \text{Presión en la 4ª etapa de compresión}$$

$$h_{8,ID} = h [R\$; P = P_8 ; s = s_7] \quad \text{Entalpía obtenida en la isoentropica}$$

$$W_{c4} = \frac{h_{8,ID} - h_7}{\text{Eff}} \quad \text{El trabajo efectivo es mayor por la pérdida de eficiencia y añade entalpía extra}$$

$$h_8 = h_7 + W_{c4}$$

Balance de entalpía total en el compresor real, que se asume adiabático y además aumenta la temperatura de descarga

$$s_8 = s [R\$; h = h_8 ; P = P_8] \quad \text{propiedades para el estado 4}$$

$$T_8 = T [R\$; h = h_8 ; P = P_8]$$

$$P_9 = P_8 \quad \text{enfriamiento en la isobara}$$

$$T_9 = T_c$$

$$h_9 = h [R\$; T = T_9 ; P = P_9] \quad \text{propiedades para el estado 9}$$

$$s_9 = s [R\$; h = h_9 ; P = P_9]$$

Cambiador

Balance entálpico en el cambiador

$$[h_9 - h_{10}] \cdot [1 - y] = [h_{14} - h_{13}] \cdot [1 - f]$$

Balance global que incluye input/output del cambiador + salida de líquido y trabajo de la turbina

$$W_t = f \cdot h_{12} + [1 - f] \cdot h_{14} - h_9 \quad \text{Siendo } f \text{ la fracción de gas que se licúa. Para que el proceso sea viable ha de cumplirse que } T_9 > T_{14} \text{ y } f \leq 1-x$$

$$h_{t,ID} = h [R\$; P = P_{11} ; s = s_9] \quad \text{Entalpía obtenida en la isoentropica}$$

$$W_{t1} = [h_{t,ID} - h_9] \cdot \text{Eff}_t \quad \text{El trabajo efectivo es menor por la pérdida de eficiencia}$$

$$h_{15} = h_9 + W_{t1}$$

Balance de entalpía total en el compresor real, que se asume adiabático y además aumenta la temperatura de descarga

$$W_t = y \cdot W_{t1} \quad \text{El trabajo de expansión isoentrópica en la turbina}$$

$$P_{15} = P_{11} \quad \text{propiedades para el estado 15}$$

$$s_{15} = s [R\$; h = h_{15} ; P = P_{15}]$$

$$T_{15} = T [R\$; h = h_{15} ; P = P_{15}]$$

$$h_{13} = \frac{y \cdot h_{15} + [1 - y - f] \cdot h[R\$; P=2; x=1]}{1 - f} \quad \text{Entalpía de mezcla de las corrientes de salida del separador y la turbina}$$

$$T_{14} = T_c - 10 \quad [C] \quad \text{En el cambiador un approach de 10 °C}$$

$$P_{10} = P_9$$

$$s_{10} = s[R\$; h=h_{10}; P=P_{10}]$$

$$T_{10} = T[R\$; h=h_{10}; P=P_{10}]$$

Válvula

$$P_{11} = 2 \quad [bar] \quad \text{Laminación en válvula a 2 bar}$$

$$h_{11} = h_{10}$$

$$s_{11} = s[R\$; h=h_{11}; P=P_{11}]$$

$$T_{11} = T[R\$; h=h_{11}; P=P_{11}]$$

$$P_{12} = P_{11}$$

$$h_{12} = h[R\$; P=P_{12}; x=0]$$

$$s_{12} = s[R\$; h=h_{12}; P=P_{12}]$$

$$T_{12} = T[R\$; h=h_{12}; P=P_{12}]$$

$$P_{13} = P_{12}$$

$$s_{13} = s[R\$; h=h_{13}; P=P_{13}]$$

$$T_{13} = T[R\$; h=h_{13}; P=P_{13}]$$

$$P_{14} = P_{13}$$

$$h_{14} = h[R\$; P=P_{13}; T=T_{14}]$$

$$s_{14} = s[R\$; h=h_{14}; P=P_{14}]$$

$$h_{11} \cdot [1 - y] - f \cdot h_{12} - [1 - y - f] \cdot h[R\$; P=2; x=1] = 0$$

Trabajo total

$$W = W_{c1} + W_{c2} + W_{c3} + W_{c4} + W_t$$

Trabajo por kg de líquido

$$W_l = W \cdot \frac{\left| 0,000277778 \cdot \frac{\text{kWh/kmol}}{\text{kJ/kmol}} \right|}{f \cdot \text{MolarMass}[R\$]}$$

Balance exergético

$$T_0 = 298 \quad [K]$$

$$\Delta B = f \cdot [h_{12} - h_1 - T_0 \cdot (s_{12} - s_1)] + [1 - f] \cdot [h_{14} - h_1 - T_0 \cdot (s_{14} - s_1)]$$

$$\eta = \frac{\Delta B}{W_{c1} + W_{c2} + W_{c3} + W_{c4} + W_t} \quad \text{Rendimiento exergético}$$

Condición

$$z = f + y$$

SOLUTION

Unit Settings: [kJ]/[K]/[bar]/[kmol]/[degrees]

$$\Delta B = 7265 \quad [\text{kJ/kmol}]$$

$$\text{Eff} = 0,85$$

$$f = 0,2975$$

$$h_{4,ID} = 4222 \quad [\text{kJ/kmol}]$$

$$h_{8,ID} = 4131 \quad [\text{kJ/kmol}]$$

$$r = 3,5$$

$$T_0 = 298 \quad [\text{K}]$$

$$W = 16520 \quad [\text{kJ/kmol}]$$

$$W_{c2} = 4864 \quad [\text{kJ/kmol}]$$

$$W_{c4} = 5019 \quad [\text{kJ/kmol}]$$

$$W_t = -3113 \quad [\text{kJ/kmol}]$$

$$y = 0,6155$$

$$\text{Eff} = 0,8$$

$$\eta = 0,4398$$

$$h_{2,ID} = 4230 \quad [\text{kJ/kmol}]$$

$$h_{6,ID} = 4196 \quad [\text{kJ/kmol}]$$

$$h_{t,ID} = -6293 \quad [\text{kJ/kmol}]$$

$$R\$ = \text{'Nitrogen'}$$

$$T_c = 310 \quad [\text{K}]$$

$$W_{c1} = 4857 \quad [\text{kJ/kmol}]$$

$$W_{c3} = 4893 \quad [\text{kJ/kmol}]$$

$$W_l = 0,5505 \quad [\text{kWh/kg}]$$

$$W_{t1} = -5058 \quad [\text{kJ/kmol}]$$

$$z = 0,9131$$

No unit problems were detected.

Arrays Table

	h_i [kJ/kmol]	P_i [bar]	s_i [kJ/kmol·K]	T_i [K]
1	345,1	1	1,245	310
2	5202	3,5	3,359	475,8
3	330,6	3,5	-9,215	310
4	5195	12,25	-7,099	476
5	280,9	12,25	-19,78	310
6	5174	42,87	-17,66	476,7
7	115,7	42,87	-30,72	310
8	5135	150,1	-28,55	478,1
9	-342,4	150,1	-42,71	310
10	-10520	150,1	-100,4	100,5
11	-10520	2	-93,24	83,62
12	-11725	2	-107,6	83,62
13	-5524	2	-34,86	111
14	46,87	2	-5,494	300
15	-5400	2	-33,77	115

