

Diagrama de flujo para la licuación de Air_{ha}

Obtención de aire líquido por el proceso Linde de expansión isoentálpica.
Cálculo también del balance exergético global y de cada equipo individual.
Copyright J.I. Zubizarreta

$$R\$ = \text{'Air}_{ha}$$

$$T_c = 310 \text{ [K]} \text{ Temperatura de enfriamiento con agua de refrigeración}$$

$$r = 3,76 \text{ Relación de compresión}$$

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

Compresor

$$T_1 = T_c$$

$$P_1 = 1 \text{ [bar]}$$

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

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

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

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

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

$$h_2 = h_1 + W_{c1} \text{ Balance de entalpía total en el compresor real, que se asume adiabático y además aumenta la temperatura de descarga}$$

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

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

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

$$T_3 = T_c$$

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

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

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

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

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

$$h_4 = h_3 + W_{c2} \quad \text{Balance de entalpía total en el compresor real, que se asume adiabático y además aumenta la temperatura de descarga}$$

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

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

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

$$T_5 = T_c$$

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

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

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

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

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

$$h_6 = h_5 + W_{c3} \quad \text{Balance de entalpía total en el compresor real, que se asume adiabático y además aumenta la temperatura de descarga}$$

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

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

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

$$T_7 = T_c$$

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

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

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

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

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

$$h_8 = h_7 + W_{c4} \quad \text{Balance de entalpía total en el compresor real, que se asume adiabático y además aumenta la temperatura de descarga}$$

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

$$T_8 = \mathbf{T} [\text{R\$} ; h = h_8 ; P = P_8]$$

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

$$T_9 = T_c$$

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

$$s_9 = \mathbf{s} [\text{R\$} ; h = h_9 ; P = P_9]$$

Cambiador

Balance entálpico en el cambiador

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

Balance global que incluye input/output al cambiador + salida de líquido

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

$$T_{14} = T_9 - 10 \quad [\text{K}]$$

$$P_{10} = P_9$$

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

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

Válvula

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

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

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

$$T_{11} = T_{13}$$

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

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

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

$$T_{12} = \mathbf{T} [\text{R\$} ; P = P_{12} ; x = 0]$$

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

$$h_{13} = \mathbf{h} [\text{R\$} ; P = 2 ; x = 1]$$

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

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

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

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

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

$$\text{Check} = h_{11} - f \cdot h_{12} - [1 - f] \cdot h_{13}$$

Trabajo total

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

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

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

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

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

Trabajo perdido en el compresor -Q+T0DeltaS

$$W_{l\text{compresor}} = W - [h_9 - h_1] + T_0 \cdot [s_9 - s_1]$$

Trabajo perdido en el cambiador -Q+T0DeltaS

$$W_{l\text{cambiador}} = T_0 \cdot [s_{10} - s_9] + T_0 \cdot [s_{14} - s_{13}] \cdot [1 - f]$$

Trabajo perdido en el conjunto separador válvula -Q+T0DeltaS

$$W_{l\text{conjunto}} = -[h_{12} - h_{10}] \cdot f - [(h_{13} - h_{10}) \cdot (1 - f)] + T_0 \cdot f \cdot [s_{12} - s_{10}] + T_0 \cdot [1 - f] \cdot [s_{13} - s_{10}]$$

$$\text{Check2} = W_{l\text{compresor}} + W_{l\text{cambiador}} + W_{l\text{conjunto}} - [W - \Delta B]$$

SOLUTION

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

$$\text{Check} = 9,095\text{E-}13 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$\Delta B = 2677 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$\eta = 0,1276$$

$$h_{2,\text{ID}} = 13136 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$h_{6,\text{ID}} = 13087 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$r = 3,76$$

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

$$W = 20983 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$W_{l\text{compresor}} = 7895 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$W_{c1} = 5185 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$\text{Check2} = 0 \text{ [kJ/kmol]}$$

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

$$f = 0,05209$$

$$h_{4,\text{ID}} = 13125 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$h_{8,\text{ID}} = 12993 \text{ [kJ/kmol]}$$

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

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

$$W_{l\text{cambiador}} = 2691 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$W_{l\text{conjunto}} = 7720 \text{ [kJ/kmol]}$$

$$W_{c2} = 5192 \text{ [kJ/kmol]}$$

$W_{c3} = 5223$ [kJ/kmol]

$W_{c4} = 5383$ [kJ/kmol]

$W_i = 3,864$ [kWh/kg]

No unit problems were detected.

Arrays Table

	h_i [kJ/kmol]	P_i [bar]	s_i [kJ/kmol·K]	T_i [K]
1	8988	1	199,9	310
2	14173	3,76	202,1	486,5
3	8971	3,76	188,9	310
4	14163	14,14	191,1	486,8
5	8909	14,14	177,7	310
6	14132	53,16	179,9	487,5
7	8687	53,16	166	310
8	14070	199,9	168,3	489,1
9	8066	199,9	152,9	310
10	2108	199,9	127,2	176,4
11	2108	2	153,1	87,99
12	-3285	2	90,69	85,39
13	2404	2	156,5	87,99
14	8690	2	193,2	300

