

## CICLOS FRIGORÍFICOS INDUSTRIALES (SOLUCIONES)

### Ejercicio 1

Se dispone de una instalación frigorífica doble etapa con economizador con R-404A trabajando en las siguientes condiciones:  $T^a$  evap:  $-45^\circ\text{C}$ ,  $T^a$  cond:  $40^\circ\text{C}$ , Recal: 13K (7+6), Recal. economizador: 5K Subenf: 4K. La potencia frigorífica requerida es de 25 kW. Calcular:

- El caudal másico de refrigerante en las dos etapas.
- La potencia de compresión de cada etapa y la total.
- La potencia de condensación.
- El COP del ciclo frigorífico.
- La relación de compresión de las dos etapas de compresión.
- Compara los parámetros de funcionamiento con los de un ciclo simple en las mismas condiciones de diseño.

### Solución

En primer lugar se define el ciclo frigorífico doble etapa en Solkane:

La presión intermedia es  $P_i = \sqrt{P_a \cdot P_b} = \sqrt{18,15 \cdot 1,04} = 4,34$  bar. Se puede obtener automáticamente marcando la casilla "Auto" en Solkane.

$t_c$  72,05 °C  
 $P_c$  37,29 bar  
 $v_c$  2,055 dm³/kg

Datos de materiales

**Vaporizador**  
 Temperatura -45,00 °C  
 Recalentamiento 7,00 K  
 Pérdida de presión 0,00 bar  
 Capacidad frigorífica 25,0 kW

**Condensador**  
 Temperatura 40,00 °C  
 Subenfriamiento 4,00 K  
 Pérdida de presión 0,00 bar

**Compresor**  
 Rendimiento isotrópico 1,000  
 Presión intermedia 4,34 bar  
**Economizador**  
 Diferencia de temperatura mín. 5,00 K  
 Recalentamiento 5,00 K

**BP** 1,000  
**AP** 1,000  
☐ Auto  
☒ Auto

**Conducto de gas por aspiración**  
 Recalentamiento 6,00 K  
 Pérdida de presión 0,00 bar  
**Conducto de gas de presión**  
 Enfriamiento 0,00 K  
 Pérdida de presión 0,00 bar

Circulación (F2) | Parámetro de emisión (F3) | Índices funcionales (F4) | Dimensionamiento de tubo (F5)

| Punto    | p<br>bar | t<br>°C | v<br>dm³/kg | h<br>kJ/kg | s<br>kJ/kgK | x<br>-- |
|----------|----------|---------|-------------|------------|-------------|---------|
| 1        | 1,04     | -32,00  | 190,76      | 350,93     | 1,6867      | 0,654   |
| 2s       | 4,34     | 12,13   | 51,06       | 381,11     | 1,6867      | 0,654   |
| 2        | 4,34     | 12,13   | 51,06       | 381,11     | 1,6867      | 0,654   |
| 3        | 4,34     | 6,26    | 49,59       | 375,68     | 1,6675      | 1,000   |
| 4s       | 18,15    | 60,56   | 11,97       | 406,98     | 1,6675      | 1,000   |
| 4        | 18,15    | 60,56   | 11,97       | 406,98     | 1,6675      | 1,000   |
| 5        | 18,15    | 60,56   | 11,97       | 406,98     | 1,6675      | 1,000   |
| 5''      | 18,15    | 40,00   | 9,86        | 380,16     | 1,5845      | 1,000   |
| 5'',6'm  | 18,15    | 39,83   | 5,45        | 319,67     | 1,3915      | 1,000   |
| 6'       | 18,15    | 39,66   | 1,03        | 259,18     | 1,1984      | 1,000   |
| 6        | 18,15    | 35,66   | 1,01        | 252,68     | 1,1774      | 1,000   |
| 7        | 4,34     | -10,15  | 17,85       | 252,68     | 1,2021      | 0,382   |
| 8        | 4,34     | -4,81   | 46,71       | 365,43     | 1,6301      | 0,346   |
| 9        | 18,15    | -5,15   | 0,86        | 193,04     | 0,9744      | 0,654   |
| 10       | 1,04     | -45,55  | 47,83       | 193,04     | 0,9939      | 0,264   |
| 10,11''m | 1,04     | -45,28  | 113,30      | 266,91     | 1,3187      | 0,654   |
| 11''     | 1,04     | -45,00  | 178,77      | 340,78     | 1,6435      | 0,654   |
| 11       | 1,04     | -38,00  | 185,26      | 346,22     | 1,6670      | 0,654   |

Proceso de dos etapas con Economiser

**SOLKANE® 404A**

$t_c$  72,05 °C  
 $p_c$  37,29 bar  
 $v_c$  2,055 dm³/kg

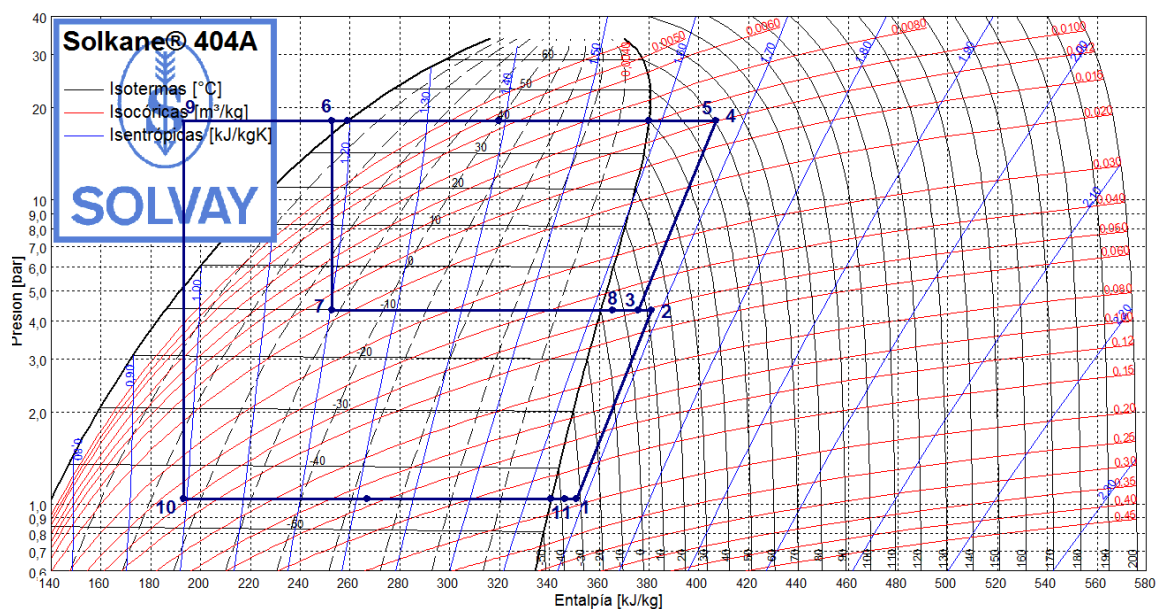
Datos de materiales

| Vaporizador           |           | Condensador        |          | Compresor                      |          | Economizador |      | Conducto de gas por aspiración |          | Conducto de gas de presión |          |
|-----------------------|-----------|--------------------|----------|--------------------------------|----------|--------------|------|--------------------------------|----------|----------------------------|----------|
| Temperatura           | -45,00 °C | Temperatura        | 40,00 °C | Rendimiento isotrópico         | 1,000    | 1,000        | Auto | Recalentamiento                | 6,00 K   | Recalentamiento            | 6,00 K   |
| Recalentamiento       | 7,00 K    | Subenfriamiento    | 4,00 K   | Presión intermedia             | 4,34 bar | Auto         | Auto | Pérdida de presión             | 0,00 bar | Pérdida de presión         | 0,00 bar |
| Pérdida de presión    | 0,00 bar  | Pérdida de presión | 0,00 bar | Diferencia de temperatura mín. | 5,00 K   |              |      | Enfriamiento                   | 0,00 K   | Enfriamiento               | 0,00 K   |
| Capacidad frigorífica | 25,0 kW   |                    |          | Recalentamiento                | 5,00 K   |              |      | Pérdida de presión             | 0,00 bar | Pérdida de presión         | 0,00 bar |

Cálculo

Circulación (F2) | Parámetro de emisión (F3) | Índices funcionales (F4) | Dimensionamiento de tubo (F5)

| Potencias                      | Proceso de dos etapas con Economiser | BP                                 | AP     | total  |           |
|--------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|--------|--------|-----------|
| Vaporizador                    | 25,0 kW                              | Índice de compresión               | 4,18   | 4,18   | 17,51     |
| Condensador                    | 38,5 kW                              | Diferencia de presión              | 3,30   | 13,81  | 17,11 bar |
| Compresor BP                   | 4,92 kW                              | Caudal másico                      | 163,20 | 249,54 | g/s       |
| Compresor AP                   | 7,81 kW                              | Caudal de volumen desplazado       | 112,1  | 44,5   | m³/h      |
| Economizador                   | 14,9 kW                              | Potencia de enfriamiento volúm.    | 803    |        | kJ/m³     |
| Conducto de gas por aspiración | 0,77 kW                              | Índice de potencia de enfriamiento | 1,96   |        |           |
| Conducto de gas de presión     | 0,000 kW                             |                                    |        |        |           |



Contestamos cada apartado realizando el cálculo manual y verificando con el software los resultados:

a) El caudal másico de refrigerante en las dos etapas.

En primer lugar se calcula el caudal de la etapa de baja presión:

$$\dot{m}_b = \frac{\dot{Q}_f}{(h_{11} - h_{10})} = \frac{25}{(346,22 - 193,04)} = 0,163 \text{ kg/s} = 587,54 \text{ kg/h}$$

Para hallar el caudal en la etapa de alta presión, es necesario realizar el balance de energía en el economizador:

$$\dot{m}_b \cdot h_6 + (\dot{m}_a - \dot{m}_b) \cdot h_7 = (\dot{m}_a - \dot{m}_b) \cdot h_8 + \dot{m}_b \cdot h_9$$

$$\dot{m}_a = \dot{m}_b \cdot \frac{(h_8 - h_9)}{(h_8 - h_7)} = 0,163 \cdot \frac{(365,43 - 193,04)}{(365,43 - 252,68)} = 0,249 \text{ kg/s} = 898,33 \text{ kg/h}$$

b) La potencia de compresión de cada etapa y la total.

$$\dot{W}_b = \dot{m}_b \cdot (h_2 - h_1) = 0,163 \cdot (381,11 - 350,93) = 4,92 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_a = \dot{m}_a \cdot (h_4 - h_3) = 0,249 \cdot (406,98 - 375,68) = 7,81 \text{ kW}$$

$$\dot{W}_{TOTAL} = \dot{W}_a + \dot{W}_b = 4,92 + 7,81 = 12,73 \text{ kW}$$

c) La potencia de condensación.

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_a \cdot (h_4 - h_6) = 0,249 \cdot (406,98 - 252,68) = 38,50 \text{ kW}$$

d) El COP del ciclo frigorífico.

$$COP = \frac{\dot{Q}_f}{\dot{W}_{TOTAL}} = \frac{25}{12,73} = 1,96$$

e) La relación de compresión de las dos etapas de compresión.

$$RC_a = \frac{P_a}{P_i} = \frac{18,15}{4,34} = 4,18$$

$$RC_b = \frac{P_i}{P_b} = \frac{4,34}{1,04} = 4,17$$

f) Compara los parámetros de funcionamiento con los de un ciclo simple en las mismas condiciones de diseño.

Si analizamos en Solkane el ciclo simple trabajando en las mismas condiciones, se puede ver que existe un ahorro de un 24 % si empleamos el sistema doble etapa.

|                               | CICLO SIMPLE | CICLO DOBLE ETAPA |
|-------------------------------|--------------|-------------------|
| <b>Pot. Frigorífica (kW)</b>  | 25           | 25,00             |
| <b>Pot. Compresión (kW)</b>   | 16,70        | 12,73             |
| <b>Pot. Condensación (kW)</b> | 43,00        | 38,50             |
| <b>COP</b>                    | 1,50         | 1,96              |