

## Esercizio 1

### Dati:

$$p_1 = 8.00 \text{ bar}$$

$$T_1 = 120 \text{ °C}$$

Trasformazione isobara

$$\Delta h = 500 \text{ kJ/kg}$$

### Svolgimento:

Tab. A.2.7b

$$T_{\text{sat}}(p_1) = 170.43 \text{ °C}$$

$T_1 < T_{\text{sat}}(p_1) \rightarrow$  liquido sotto-raffreddato

Oppure

Tab. A.2.7a

$$p_{\text{sat}}(T_1) = 1.9853 \text{ bar.}$$

$p_1 > p_{\text{sat}}(T_1) \rightarrow$  liquido sotto-raffreddato

$$v_1 = 1.00 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg};$$

$$h_1 = h_l(T_1) + v[p_1 - p_{\text{sat}}(T_1)] = 503.70 + 1.00 \cdot 10^{-3} \cdot 10^2 \cdot (8.00 - 1.9853) = 504 \text{ kJ/kg};$$

$$s_1 = s_l(T_1) = 1.5276 \text{ kJ/kgK};$$

Dopo la trasformazione

$$p_2 = p_1:$$

$$h_2 = 504 + 500 = 1004 \text{ kJ/kg};$$

Tab. A.2.7a

$$h_l(p_2) = 721.11 \text{ kJ/kg};$$

$$h_{\text{vs}}(p_2) = 2769.15 \text{ kJ/kg};$$

$h_l(p_2) < h_2 < h_{vs}(p_2) \rightarrow$  vapore saturo

$$T_2 = T_{sat}(p_2) = 170.43 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$x_2 = \frac{1004 - 721.11}{2769.15 - 721.11} = 0.138$$

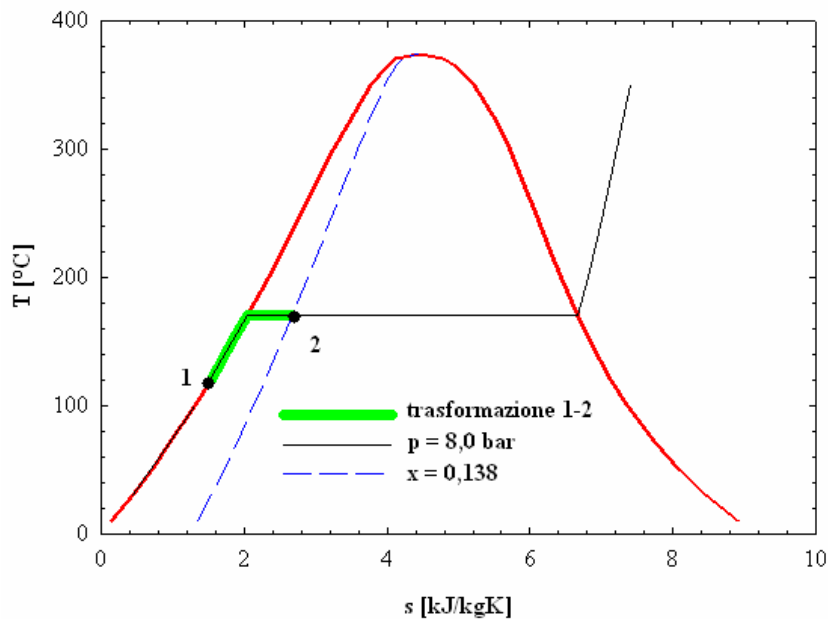
$$v_2 = 1.1148 \cdot 10^{-3} + 0.138 \cdot (2.40 \cdot 10^{-1} - 1.1148 \cdot 10^{-3}) = 0.0341 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$s_2 = 2.0462 + 0.138 \cdot (6.66276 - 2.0462) = 2.68 \text{ kJ/kgK}$$

	T (°C)	p (bar)	v (m <sup>3</sup> /kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	x
1	120	8.00	1.00·10 <sup>-3</sup>	504	1.52	liq. sott.
2	170	8.00	0.0341	1004	2.68	0.138

Proprietà termodinamiche degli stati 1 e 2.

T-s (Acqua)



## Esercizio 2

**Dati:**

$$T_1 = 300 \text{ K}$$

$$p_1 = 4.00 \text{ bar}$$

$$p_2 = 8.00 \text{ bar}$$

dalla tabella A.2.1

$$R = 0.287 \text{ kJ/kgK}$$

### Trasformazione isoentropica:

$$\Delta s_{21} = 0$$

gas perfetto  $\rightarrow$   $c_p(T)$  e  $c_v(T)$  costanti con T

Dalla tabella A.2.3  $c_p$  è preso come media tra le temperature 303.15 e 403.15 K

$$c_p = 1.01 \text{ kJ/kg}$$

$$T_2 := T_1 \cdot \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{R}{c_p}}$$

$$T_2 = 365 \text{ K}$$

$$\Delta h_{21} = c_p (T_2 - T_1) = 65.6 \text{ kJ/kg}$$

### Trasformazione isobara:

$$p_3 := p_2$$

$$T_3 := T_1$$

$$\Delta h_{32} = c_p (T_3 - T_2) = -65.6 \text{ kJ/kg}$$

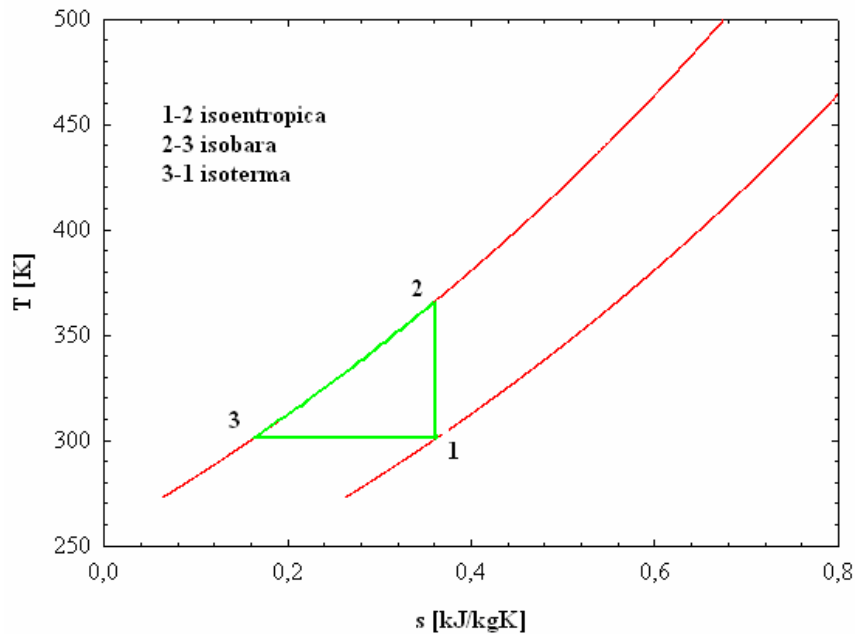
$$\Delta s_{32} = c_p \ln \left( \frac{T_3}{T_2} \right) = -0.199 \text{ kJ/kgK}$$

### Trasformazione isoterma:

$$\Delta h_{13} = 0$$

$$\Delta s_{13} = -R \ln \left( \frac{p_1}{p_3} \right) = 0.199 \text{ kJ/kgK}$$

Piano T-s (Aria)



**Commento:** In una trasformazione ciclica la variazione di una qualunque proprietà deve essere nulla. Pertanto la sommatoria delle variazioni di entalpia, entropia ed energia interna devono essere uguali a zero.

$$\Delta h_{21} + \Delta h_{32} + \Delta h_{13} = 0 \Rightarrow \Delta h_{13} = -\Delta h_{21} + \Delta h_{32} = -65.6 + 65.6 = 0 \text{ kJ/kgK}$$

$$\Delta s_{21} + \Delta s_{32} + \Delta s_{13} = 0 \Rightarrow \Delta s_{13} = -\Delta s_{21} - \Delta s_{32} = -(-0.199) = 0.199 \text{ kJ/kgK}$$

### Esercizio 3

#### **Dati:**

Fluido: H<sub>2</sub>O

p<sub>1</sub>=101 kPa

T<sub>1</sub>=20.0 °C

Trasformazione isoentropica

p<sub>2</sub>=15.0 bar

#### **Svolgimento:**

Tab. A.2.7a

T<sub>sat</sub>(p<sub>1</sub>)=100°C

$T_1 < T_{\text{sat}}(p_1) \rightarrow$  liquido sotto-raffreddato

Tab. A.2.7

$p_{\text{sat}}(T_1) = 0.0234 \text{ bar}$

$p_1 > p_{\text{sat}}(T_1) \rightarrow$  liquido sotto-raffreddato

$$ds = c \frac{dT}{T} = 0$$

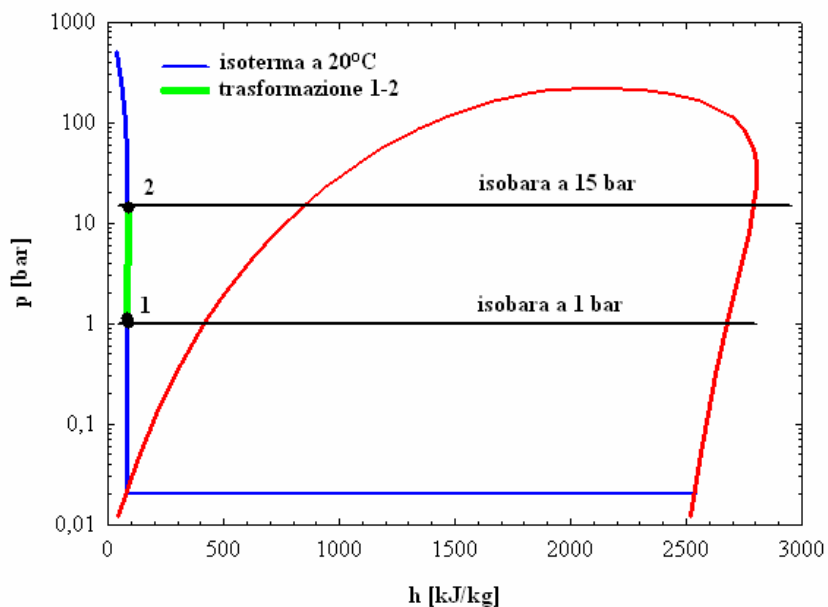
$$dT = 0$$

$$T = \text{cost.}$$

$$T_2 = T_1$$

$$h_2 - h_1 = c \cdot (T_2 - T_1) + v \cdot (p_2 - p_1) = v \cdot (p_2 - p_1) = 1.0 \cdot 10^{-3} \cdot (15.0 \cdot 10^2 - 101) = 1.40 \text{ kJ/kg}$$

p-h (Acqua)



## Esercizio 4

**Dati:**

Fluido: H<sub>2</sub>O

$p_1 = 100 \text{ kPa}$

$x_1 = 0.600$

## Trasformazione isoterma

$p_2=200$  bar

### Svolgimento:

Tab. A.2.7b  $\rightarrow T_{\text{sat}}(p_1)=99.63^\circ\text{C}$  e:

$v_l$ [m <sup>3</sup> /kg]	$v_s$ [m <sup>3</sup> /kg]	$h_l$ [kJ/kg]	$h_s$ [kJ/kg]	$s_l$ [kJ/kgK]	$s_s$ [kJ/kgK]
1.04E-3	1.690	417.45	2.6754E+3	1.3026	7.3593

$$v_1 = v_l + x_1(v_l - v_s) = 1.04 \cdot 10^{-3} + 0.600 \cdot (1.690 - 0.00104) = 1.04 \cdot 10^{-3} + 0.600 \cdot 1.689 = 0.00104 + 1.01 = 1.01 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$h_1 = h_l + x_1 \cdot (h_s - h_l) = 417 + 0.600 \cdot (2.67 - 0.42) \cdot 10^3 = 417 + 1.35 \cdot 10^3 = (1.35 + 0.42) \cdot 10^3 = 1.77 \cdot 10^3 \text{ kJ/kg.}$$

$$s_1 = s_l + x_1 \cdot (s_s - s_l) = 1.30 + 0.600 \cdot (7.36 - 1.30) = 1.30 + 3.64 = 4.94 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K.}$$

$$u_1 = h_1 - p_1 v_1 = 1.77 \cdot 10^3 - 100 \cdot 1.01 = 1.67 \cdot 10^3 \text{ kJ/kg.}$$

### Trasformazione isoterma:

$$T_2 = T_1 = T_{\text{sat}}(p_1)$$

$$p_1 = p_{\text{sat}}(T_2)$$

$p_2 > p_1 \rightarrow p_2 > p_{\text{sat}}(T_2) \rightarrow$  liquido sotto-raffreddato

$$v_1 = 1.00 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg.}$$

$$h_2 = h_l(T_2) + v \cdot [p_2 - p_{\text{sat}}(T_2)] = 417 + 10^{-3} \cdot 199 \cdot 10^2 = 417 + 19.9 = 437 \text{ kJ/kg}$$

$$u_2 = u_l(T_2) = h_l(T_2) - v \cdot p_{\text{sat}}(T_2) = 417 - 10^{-3} \cdot 100 = 417 \text{ kJ/kg}$$

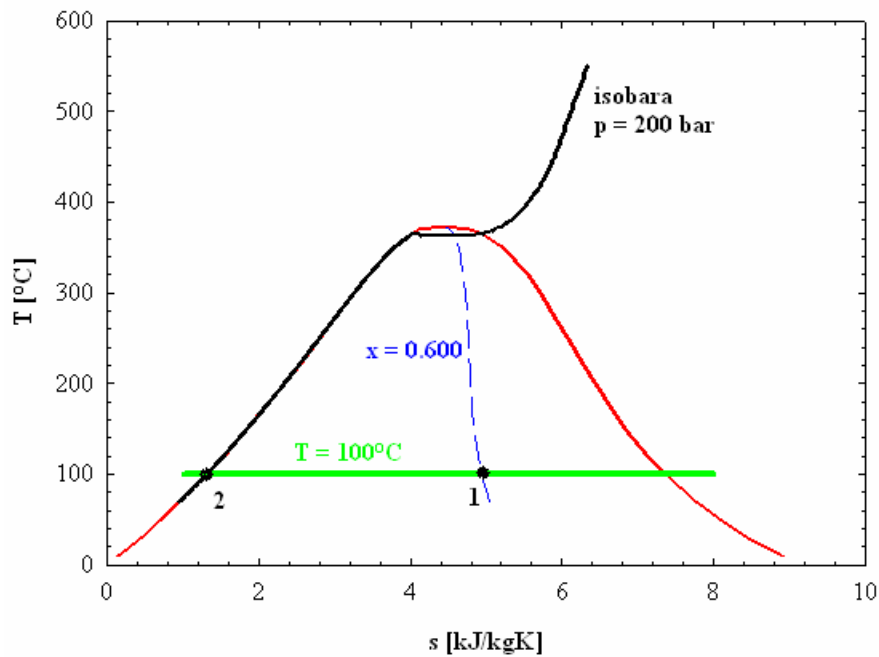
$$s_2 = s_l(T_2) = 1.30 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K.}$$

	T (°C)	p (bar)	v (m <sup>3</sup> /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	x
1	99.63	1.00	1.01	$1.67 \cdot 10^3$	$1.77 \cdot 10^3$	4.94	0.600
2	99.63	200	$1.00 \cdot 10^{-3}$	417	437	1.30	liq. sott.

Proprietà termodinamiche degli stati 1 e 2.

Si invita infine lo studente a fare un confronto tra i valori letti nelle tabelle delle proprietà dei liquidi saturi e quelli delle tabelle del liquido sotto-raffreddato.

T-s (Acqua)



## Esercizio 5

### Dati:

Fluido: R134a

$p_1 = 20.0 \text{ bar}$

$T_1 = 100 \text{ °C}$

Trasformazione isobara

$x_2 = 0.00$

### Svolgimento:

Tab. A.2.8b

$T_{\text{sat}}(p_1) = 67.49 \text{ °C}$ .

$T_1 > T_{\text{sat}}(p_1) \rightarrow$  vapore surriscaldato.

il surriscaldamento è:

$$T_1 - T_{\text{sat}}(p_1) = 100 - 67.49 = (1.00 - 0.67) \cdot 10^2 = 33 \text{ °C}$$

Tab.A.2.12:

$v_1$ [m <sup>3</sup> /kg]	$h_1$ [kJ/kg]	$s_1$ [kJ/kgK]
$1.18 \cdot 10^{-2}$	462.16	1.7914

$$u_1 = h_1 - p_1 v_1 = 462.16 - 20.0 \cdot 10^2 \cdot 1.18 \cdot 10^{-2} = 462.16 - 23.6 = 438.6 \text{ kJ/kg}$$

Tab.A.2.8b:

$v_2$ [m <sup>3</sup> /kg]	$h_2$ [kJ/kg]	$s_2$ [kJ/kgK]
$9.88 \cdot 10^{-2}$	296.47	1.309

e per l'energia interna:

$$u_2 = h_2 - p_2 v_2 = 296.47 - 20.0 \cdot 10^2 \cdot 9.88 \cdot 10^{-4} = 296 - 1.98 = 294 \text{ kJ/kg}.$$

	T (°C)	p (bar)	v (m <sup>3</sup> /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgK)	x
1	100	20.0	$1.18 \cdot 10^{-2}$	438.6	462.16	1.7914	vap.surr.
2	67.49	20.0	$9.88 \cdot 10^{-4}$	294	296.47	1.309	0.00

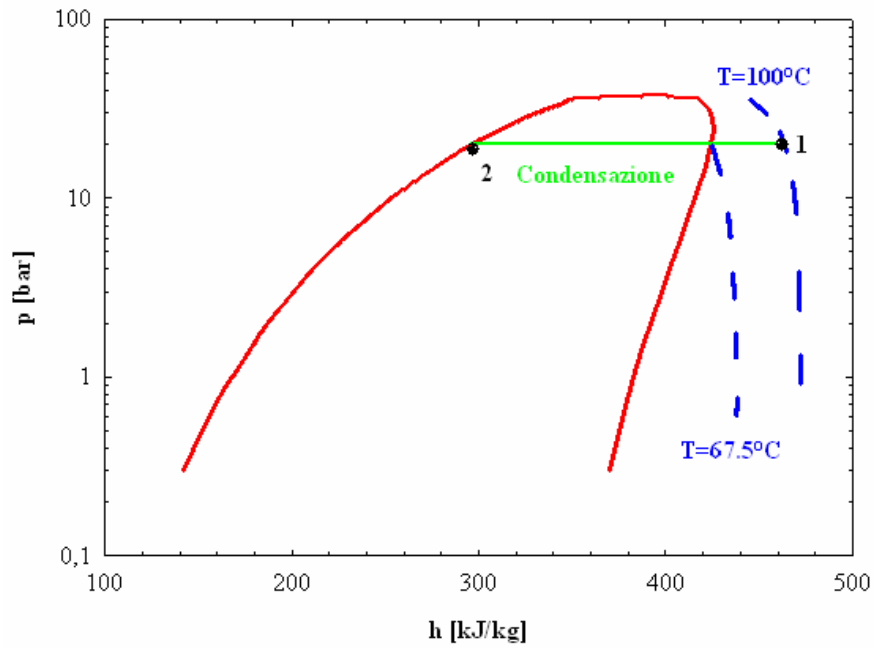
**Proprietà termodinamiche degli stati 1 e 2.**

$$h_2 - h_1 = (296 - 462) = -166 \text{ kJ/kg}$$

$$\frac{v_2 - v_1}{v_1} \cdot 100 = \left( \frac{v_2}{v_1} - 1 \right) \cdot 100 = \left( \frac{9.88 \cdot 10^{-4}}{1.18 \cdot 10^{-2}} - 1 \right) \cdot 100 = -91.6\%.$$

**Commento:** Tra vapore surriscaldato e liquido saturo esiste una notevole riduzione del volume specifico.

### Piano p-h (R134a)



## Esercizio 6

### Dati:

Fluido: R717 (Ammoniaca)

$p_1=1.00$  bar

surriscaldamento:  $8.5^\circ\text{C}$

Trasformazione isoentropica

$p_2=10.0$  bar.

### Svolgimento:

Tab. A.2.13

$T_{\text{sat}}(p_1)=-33.59^\circ\text{C}$ .

$T_1 = T_{\text{sat}} + \text{surriscaldamento} = -33.6 + 8.5 = -25.1^\circ\text{C}$

Tab. A.2.13:

	T[°C]	v <sub>1</sub> [m <sup>3</sup> /kg]	h <sub>1</sub> [kJ/kg]	s <sub>1</sub> [kJ/kg·K]
1	-25.1	1.15	1660	7.103

**Tabella 1: Proprietà termodinamiche dello stato 1.**

$$u_1 = h_1 - p_1 v_1 = 1660 - 1.00 \cdot 10^2 \cdot 1.18 = 1542 \text{ kJ/kg}$$

Tab. A.2.13:

	s[kJ/kg·K]	T[°C]	v [m <sup>3</sup> /kg]	h[kJ/kg]
2	7.103	145	0.198	2016

**Tabella 2: Proprietà termodinamiche dello stato 2.**

$$u_2 = h_2 - p_2 v_2 = 2016 - 10.0 \cdot 10^2 \cdot 1.98 \cdot 10^{-1} = 2016 - 198 = 1818 \text{ kJ/kg}$$

p-h (R717)

