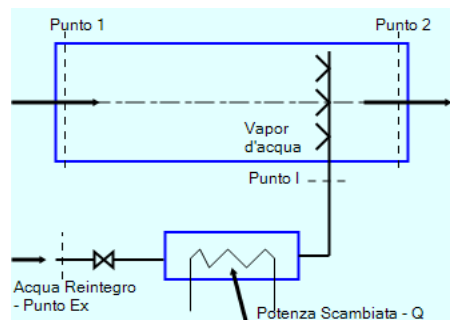


### Umidificazione con vapore d'acqua



Formulario relativo alla trasformazione

$\dot{m}_{ex}$  = portata acqua - vapore

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a$$

$$\dot{m}_{v1} = \dot{m}_{ex} + \dot{m}_{v2}$$

$$h_{ex} = 4,187 \cdot t_{ex}$$

$$h_I = h_{vs}(t_I) \quad \text{entalpia del vapor saturo alla temperatura } t_I$$

$$\dot{m}_{ex} = \dot{m}_I = \dot{m}_a \cdot (x_1 - x_2)$$

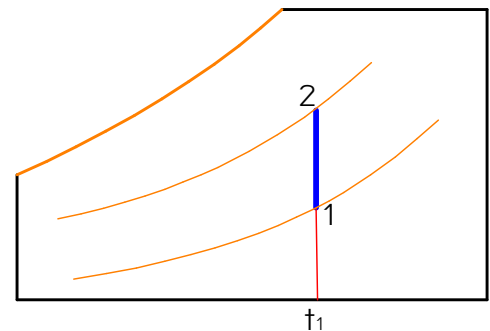
$$\dot{m}_a \cdot (h_2 - h_1) = \dot{m}_I \cdot h_I$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_I \cdot (h_I - h_{ex}) = \dot{m}_a \cdot (h_2 - h_1) - \dot{m}_{ex} \cdot h_{ex} = \dot{m}_a \cdot (h_2 - h_1) - \dot{m}_a \cdot (x_2 - x_1) \cdot h_{ex}$$

$$(h_2 - h_1) = (x_2 - x_1) \cdot h_{ex} + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_a}$$

$$\frac{(h_2 - h_1)}{(x_2 - x_1)} = h_I$$

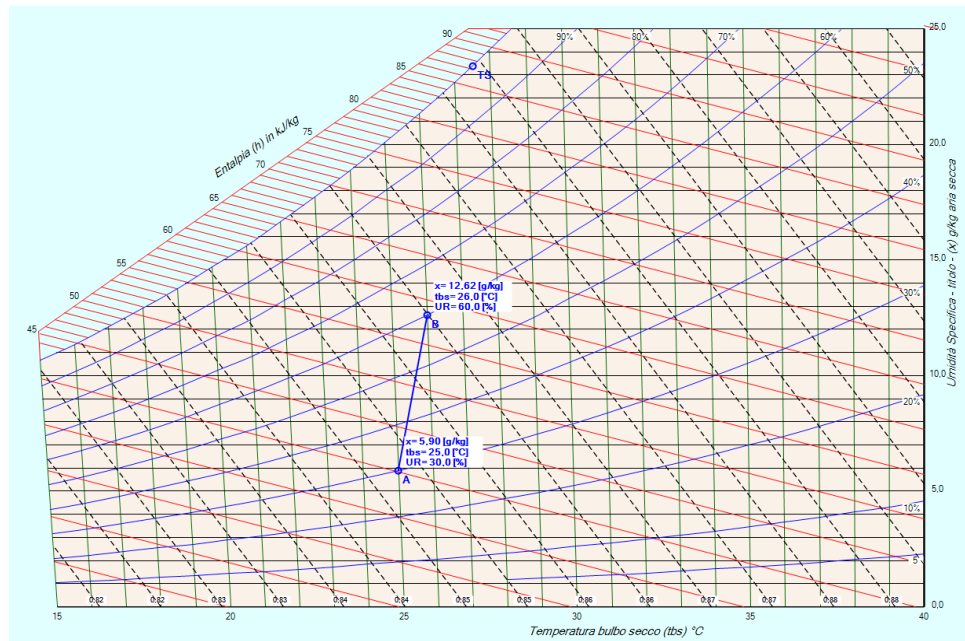
Si ipotizza che l'acqua sia sotto forma di vapor saturo secco alla temperatura  $t_I$



## Esempio n. 01.06

Una portata di 2000 m<sup>3</sup>/h di aria umida, avente temperatura di 25 °C ed umidità del 30%, viene fatta passare attraverso un umidificatore a vapore uscendone con una umidità del 60% ed una temperatura di 26 °C. Si chiede di calcolare la portata del vapore, la potenza scambiata e la temperatura di iniezione del vapore

L'immagine riporta la soluzione grafica fornita dal programma



Si calcolano le condizioni dei punti 1 e 2

Alla temperatura  $t_1 = 25$  [°C] corrisponde una pressione di saturazione  $p_{vs1} = 3173,458$  [Pa]

Indicata con  $\varphi_1$  l'umidità relativa del punto 1 si ha:

$$x_1 = 0,622 \cdot \frac{\varphi_1 p_{vs1}}{p - \varphi_1 p_{vs1}} = 0,622 \cdot \frac{0,3 \cdot 3173,458}{1,013 \cdot 10^5 - 0,3 \cdot 3173,458} = 0,005901 \left[ \frac{kg_v}{kg_a} \right] = 5,90 \left[ \frac{g_v}{kg_a} \right]$$

per l'entalpia:

$$h_1 = 1,006 \cdot t_1 + x_1 \cdot (2500 + 1,875 \cdot t_1) = 1,006 \cdot 25 + 0,005901 \cdot (2500 + 1,875 \cdot 25) = 40,18 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

Alla temperatura  $t_2 = 26$  [°C] corrisponde una pressione di saturazione  $p_{vs2} = 3360,269$  [Pa]

Indicata con  $\varphi_2$  l'umidità relativa si ha:

$$x_2 = 0,622 \cdot \frac{\varphi_2 p_{vs2}}{p - \varphi_2 p_{vs2}} = 0,622 \cdot \frac{0,6 \cdot 3360,269}{1,013 \cdot 10^5 - 0,6 \cdot 3173,458} = 0,012680 \left[ \frac{kg_v}{kg_a} \right] = 12,68 \left[ \frac{g_v}{kg_a} \right]$$

per l'entalpia:

$$h_2 = 1,006 \cdot t_2 + x_2 \cdot (2500 + 1,875 \cdot t_2) = 1,006 \cdot 26 + 0,012680 \cdot (2500 + 1,875 \cdot 26) = 58,34 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

Dalla relazione dei gas ideali applicata all'aria si ricava il volume specifico nel punto 1

$$v_1 = \frac{R_a \cdot T_1}{p_{a1}} = \frac{287,13 \cdot (273,15 + 25)}{101325 - 0,3 \cdot 3173,458} = 0,853 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

Dalla portata volumetrica:  $\dot{V}_{a1} = 2000 \left[ \frac{m^3}{h} \right] = \frac{2000}{3600} = 0,556 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$

si ricava la portata massica dell'aria  $\dot{m}_{a1} = \frac{\dot{V}_{a1}}{v_{a1}} = \frac{0,556}{0,853} = 0,652 \left[ \frac{kg}{s} \right]$

Si calcola adesso la portata del vapore iniettato

$$\dot{m}_I = \dot{m}_{vi} = \dot{m}_a \cdot (x_2 - x_1) = 0,652 \cdot (0,012680 - 0,005901) = 0,00442 \left[ \frac{kg}{s} \right] = 15,91 \left[ \frac{kg}{h} \right]$$

L'entalpia del vapore iniettato sarà:

$$h_I = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_I} \cdot (h_2 - h_1) = \frac{\dot{m}_a \cdot (h_2 - h_1)}{\dot{m}_a \cdot (x_2 - x_1)} = \frac{(h_2 - h_1)}{(x_2 - x_1)} = \frac{(58,34 - 40,18)}{(0,012680 - 0,005901)} = 2678,86 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

Dalla tabella del vapor saturo si ricava che questa pressione è compresa tra  $h_{inf} = 2676,0$  [kJ/kg] relativa a  $t_{inf} = 100$  [°C] e  $h_{sup} = 2691,3$  [kJ/kg] relativa a  $t_{sup} = 110$  [°C]

La temperatura di saturazione, relativa alla pressione trovata, si può ricavare mediante una interpolazione lineare

$$\frac{t_{sup} - t_{inf}}{h_{sup} - h_{inf}} = \frac{t_I - t_{inf}}{h_I - h_{inf}}$$

da cui

$$t_I = t_{inf} + (h_I - h_{inf}) \cdot \frac{t_{sup} - t_{inf}}{h_{sup} - h_{inf}} = 100 + (2683,64 - 2676,0) \cdot \frac{110 - 100}{2691,3 - 2676,0} = 101,87 \left[ ^\circ C \right]$$

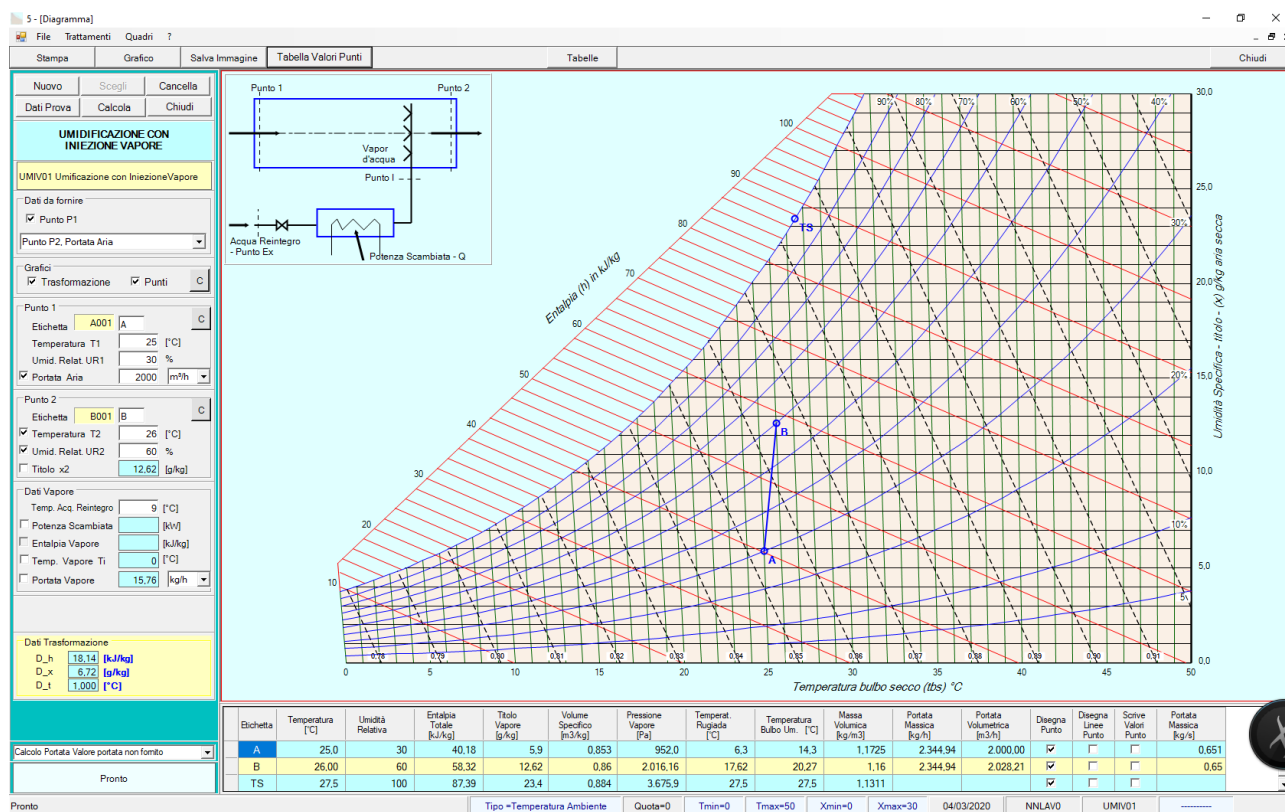
Supposto che l'acqua di reintegro abbia una temperatura iniziale  $t_{ex} = 10$  [°C], la sua entalpia vale:

$$h_{EX} = 4,187 \cdot t_{EX} = 4,187 \cdot 10 = 41,87 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

La potenza scambiata sarà :

$$\dot{Q}_b = \dot{m}_I \cdot (h_I - h_b) = 0,00442 \cdot (2678,86 - 41,87) = 11,64 \left[ kW \right]$$

La figura sottostante riporta la copia della schermata relativa al calcolo fatto dal programma

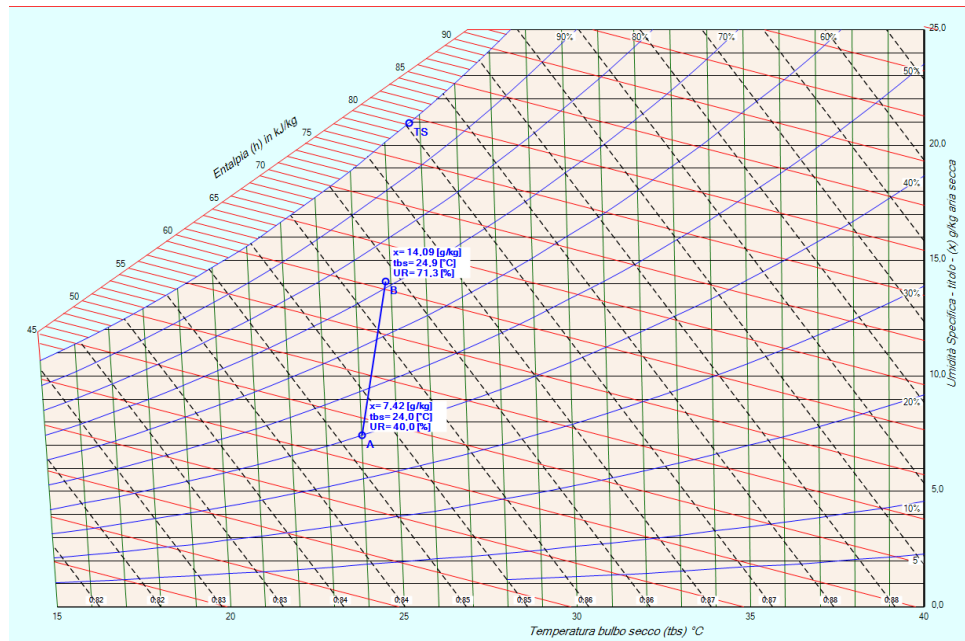


## Esempio n. 02.06

Una portata di 11500 m<sup>3</sup>/h di aria umida, avente temperatura di 24 °C ed umidità del 40%, viene fatta passare attraverso un umidificatore a vapore. La portata del vapore è di 90 kg/h ed il calore scambiato è di 66 kW. La temperatura dell'acqua (liquida) che entra nell'umidificatore è di 9 °C ed il vapore si trova in condizioni di saturo secco.

Si chiede di calcolare le condizioni del punto 2 finale della trasformazione e la temperatura del vapore.

L'immagine riporta la soluzione grafica fornita dal programma



Si calcolano le condizioni del punto 1

Alla temperatura  $t_1 = 24$  [°C] corrisponde una pressione di saturazione  $p_{vs1} = 2986,646$  [Pa]

Indicata con  $\varphi_1$  l'umidità relativa del punto 1 si ha:

$$x_1 = 0,622 \cdot \frac{\varphi_1 p_{vs1}}{p - \varphi_1 p_{vs1}} = 0,622 \cdot \frac{0,4 \cdot 2986,646}{101325 - 0,4 \cdot 2986,646} = 0,007421 \left[ \frac{kg_v}{kg_a} \right] = 7,421 \left[ \frac{g_v}{kg_a} \right]$$

per l'entalpia:

$$h_1 = 1,006 \cdot t_1 + x_1 \cdot (2500 + 1,875 \cdot t_1) = 1,006 \cdot 24 + 0,007421 \cdot (2500 + 1,875 \cdot 24) = 43,03 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

Dalla relazione dei gas ideali, applicata all'aria, si ricava il volume specifico nel punto 1

$$v_1 = \frac{R_a \cdot T_1}{p_{a1}} = \frac{287,13 \cdot (273,15 + 24)}{101325 - 0,4 \cdot 2986,646} = 0,852 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

Dalla portata volumetrica:  $\dot{V}_{a1} = 11500 \left[ \frac{m^3}{h} \right] = \frac{11500}{3600} = 3,194 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$

si ricava la portata massica dell'aria  $\dot{m}_{a1} = \frac{\dot{V}_{a1}}{v_{a1}} = \frac{3,194}{0,852} = 3,749 \left[ \frac{kg}{s} \right]$

L'entalpia dell'acqua di reintegro vale  $h_{EX} = 4,187 \cdot t_{EX} = 4,187 \cdot 9 = 37,683 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$

e la portata vale  $\dot{m}_I = 90 \left[ \frac{kg}{h} \right] = 0,025 \left[ \frac{kg}{s} \right]$

L'entalpia del vapor saturo secco spruzzato si ricava dalla relazione

$$\dot{Q} = \dot{m}_I \cdot (h_I - h_{ex})$$

$$h_I = h_{EX} + \frac{\dot{Q}}{\dot{m}_I} = 37,683 + \frac{66}{0,025} = 2677,68 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

Dalla tabella del vapor saturo si ricava che questa pressione è compresa tra  $h_{inf} = 2676,0$  [kJ/kg] relativa a  $t_{inf} = 100$  [°C] e  $h_{sup} = 2691,3$  [kJ/kg] relativa a  $t_{sup} = 110$  [°C]

La temperatura di saturazione, relativa alla pressione trovata, si può ricavare mediante una interpolazione lineare

$$\frac{t_{sup} - t_{inf}}{h_{sup} - h_{inf}} = \frac{t_I - t_{inf}}{h_I - h_{inf}}$$

da cui

$$t_I = t_{inf} + (h_I - h_{inf}) \cdot \frac{t_{sup} - t_{inf}}{h_{sup} - h_{inf}} = 100 + (2677,68 - 2676,0) \cdot \frac{110 - 100}{2691,3 - 2676,0} = 101,10 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

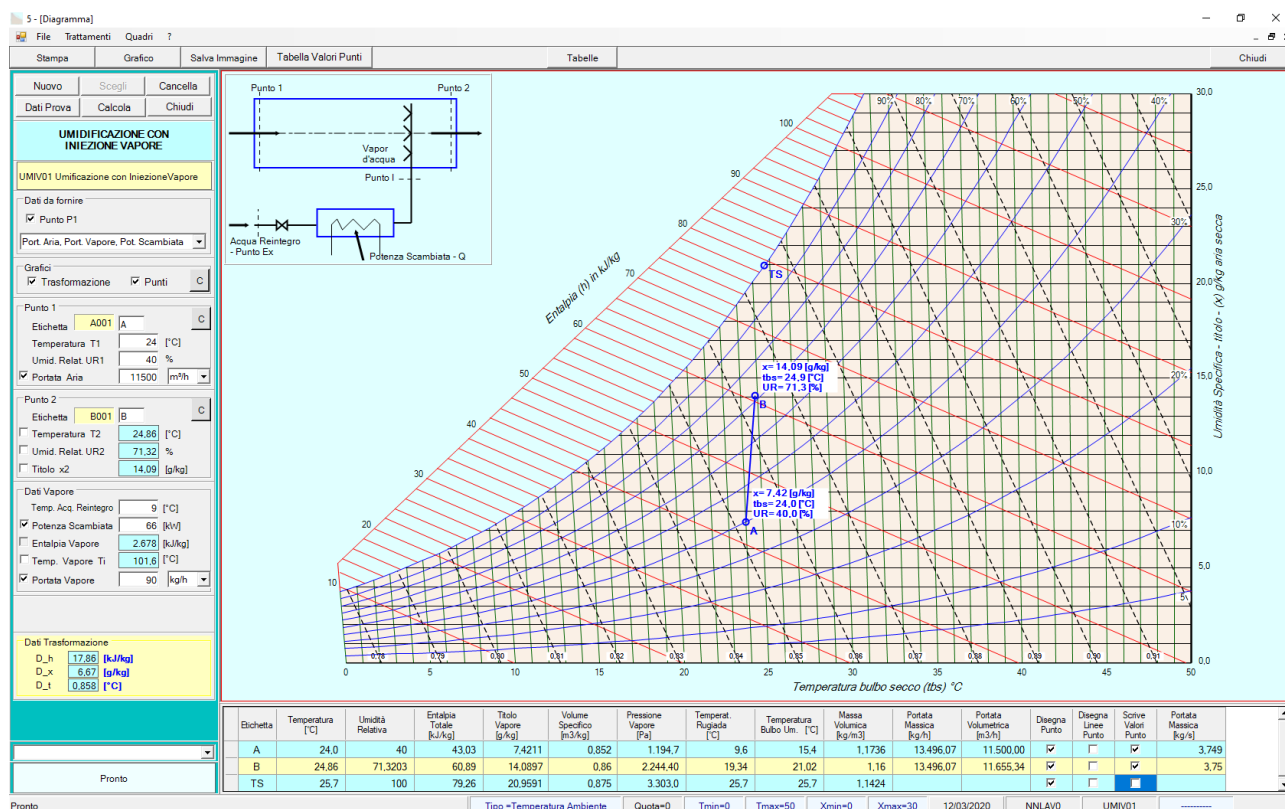
Si ricavano i parametri per il punto 2.

$$h_2 = h_1 + \frac{\dot{m}_I}{\dot{m}_a} \cdot h_I = 43,03 + \frac{0,025}{3,751} \cdot 2677,68 = 60,87 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

e

$$x_2 = x_1 + \frac{\dot{m}_I}{\dot{m}_a} = 0,00742 + \frac{0,025}{3,751} = 0,01408 \left[ \frac{kg_v}{kg_a} \right] = 14,823 \left[ \frac{g_v}{kg_a} \right]$$

La figura sottostante riporta la copia della schermata relativa al calcolo fatto dal programma

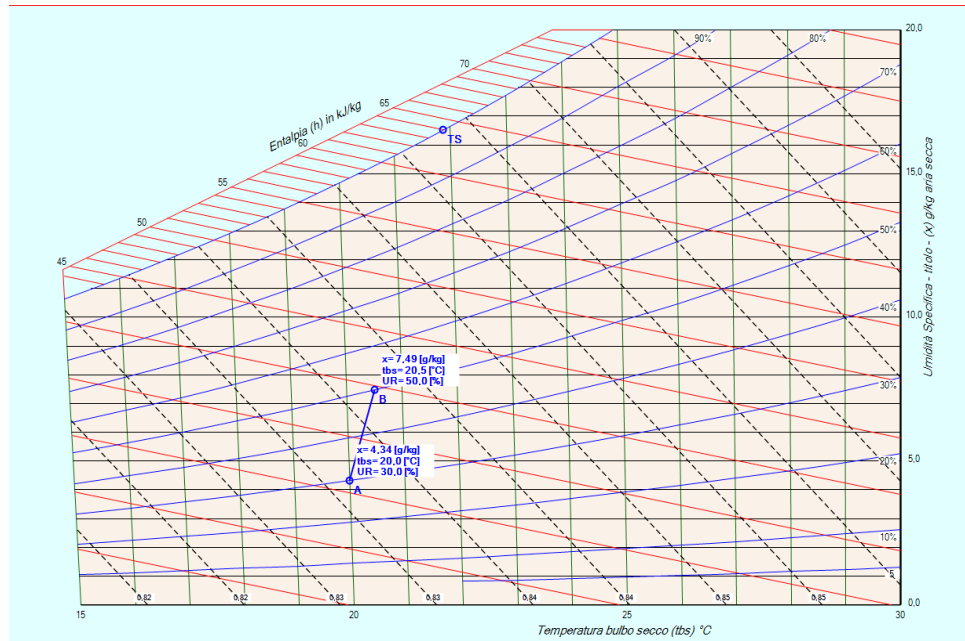


## Esempio n. 03.06

Una portata di 8000 m<sup>3</sup>/h di aria umida, avente temperatura di 20°C ed umidità del 30%, viene fatta passare attraverso un umidificatore a vapore uscendone con una umidità del 50%. La portata del vapore è di 30 kg/h. La temperatura dell'acqua (liquida) che entra nell'umidificatore è di 9 °C ed il vapore si trova in condizioni di saturo secco.

Si chiede di calcolare le condizioni del punto 2 finale della trasformazione e la potenza scambiata.

L'immagine riporta la soluzione grafica fornita dal programma.



Si calcolano le condizioni del punto 1

Alla temperatura  $t_1 = 20$  [°C] corrisponde una pressione di saturazione  $p_{vs1} = 2339,826$  [Pa]

Indicata con  $\varphi_1$  l'umidità relativa del punto 1 si ha:

$$x_1 = 0,622 \cdot \frac{\varphi_1 p_{vs1}}{p - \varphi_1 p_{vs1}} = 0,622 \cdot \frac{0,3 \cdot 2339,846}{101325 - 0,3 \cdot 2339,826} = 0,0043391 \left[ \frac{kg_v}{kg_a} \right] = 4,339 \left[ \frac{g_v}{kg_a} \right]$$

per l'entalpia:

$$h_1 = 1,006 \cdot t_1 + x_1 \cdot (2500 + 1,875 \cdot t_1) = 1,006 \cdot 20 + 0,0043391 \cdot (2500 + 1,875 \cdot 20) = 31,13 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

Dalla relazione dei gas ideali, applicata all'aria, si ricava il volume specifico nel punto 1

$$v_1 = \frac{R_a \cdot T_1}{p_{a1}} = \frac{287 \cdot (273,15 + 20)}{101325 - 0,3 \cdot 2339,826} = 0,836 \left[ \frac{m^3}{kg} \right]$$

Dalla portata volumetrica:  $\dot{V}_{a1} = 8000 \left[ \frac{m^3}{h} \right] = \frac{8000}{3600} = 2,222 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$



si ricava la portata massica dell'aria  $\dot{m}_{a1} = \frac{\dot{V}_{a1}}{v_{a1}} = \frac{2,222}{0,836} = 2,658 \left[ \frac{kg}{s} \right]$

Per la portata massica del vapore si ha  $\dot{m}_I = \frac{30}{3600} = 0,00833 \left[ \frac{kg}{s} \right]$

Dalla relazione  $\dot{m}_{ex} = \dot{m}_I = \dot{m}_a \cdot (x_1 - x_2)$  si ricava il titolo del punto 2

$$x_2 = x_1 + \frac{\dot{m}_I}{\dot{m}_a} = 0,004339 + \frac{0,00833}{2,658} = 0,0074729 \left[ \frac{kg_v}{kg_a} \right] = 7,473 \left[ \frac{g_v}{kg_a} \right]$$

$$x = 0,622 \cdot \frac{\varphi P_{vs}}{p - \varphi P_{vs}}$$

si ricava la pressione del vapor saturo nel punto 2

$$P_{vs2} = \frac{x_2 \cdot p}{\varphi_2 \cdot x_2 + 0,622 \cdot \varphi_2} = \frac{0,0074729 \cdot 101325}{0,5 \cdot 0,0074729 + 0,622 \cdot 0,5} = 2405,80 \text{ [Pa]}$$

Dalla tabella del vapor saturo si ricava che questa pressione è compresa tra  $p_{inf} = 2339,826 \text{ [Pa]}$  relativa a  $t_{inf} = 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$  e  $p_{sup} = 2483,614 \text{ [Pa]}$  relativa a  $t_{sup} = 21 \text{ [}^\circ\text{C]}$

La temperatura di saturazione, relativa alla pressione trovata, si può ricavare mediante una interpolazione lineare

$$\frac{t_{sup} - t_{inf}}{p_{sup} - p_{inf}} = \frac{t_2 - t_{inf}}{p_2 - p_{inf}}$$

da cui

$$t_2 = t_{inf} + (p_2 - p_{inf}) \cdot \frac{t_{sup} - t_{inf}}{p_{sup} - p_{inf}} = 20 + (2405,80 - 2339,826) \cdot \frac{21 - 20}{2483,614 - 2339,826} = 20,458 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

l'entalpia del punto 2 vale

$$h_2 = 1,006 \cdot t_2 + x_2 \cdot (2500 + 1,875 \cdot t_2) = 1,006 \cdot 20,458 + 0,0074729 \cdot (2500 + 1,875 \cdot 20,458) = 39,54 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

L'entalpia del vapor saturo immessa sarà

$$h_I = \frac{(h_2 - h_1)}{(x_2 - x_1)} = \frac{(39,54 - 31,13)}{(0,0074729 - 0,0043391)} = 2683,64 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

Dalla tabella del vapor saturo si ricava che questa pressione è compresa tra  $h_{inf} = 2676,0 \text{ [kJ/kg]}$  relativa a  $t_{inf} = 100 \text{ [}^\circ\text{C]}$  e  $h_{sup} = 2691,3 \text{ [kJ/kg]}$  relativa a  $t_{sup} = 110 \text{ [}^\circ\text{C]}$

La temperatura di saturazione, relativa alla pressione trovata, si può ricavare mediante una interpolazione lineare

$$\frac{t_{sup} - t_{inf}}{h_{sup} - h_{inf}} = \frac{t_I - t_{inf}}{h_I - h_{inf}}$$

da cui

$$t_I = t_{inf} + (h_I - h_{inf}) \cdot \frac{t_{sup} - t_{inf}}{h_{sup} - h_{inf}} = 100 + (2683,64 - 2676,0) \cdot \frac{110 - 100}{2691,3 - 2676,0} = 104,99 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Calcolata l'entalpia dell'acqua di reintegro

$$h_{ex} = 4,187 \cdot t_{ex} = 4,187 \cdot 9 = 37,68 \left[ \frac{kJ}{kg} \right]$$

La potenza scambiata è:

$$\dot{Q} = \dot{m}_I \cdot (h_I - h_{ex}) = 0,00833 \cdot (2683,64 - 37,68) = 22,04 \text{ [kW]}$$

La figura sottostante riporta la copia della schermata relativa al calcolo fatto dal programma

