

A 3D rendering of a grid of white cubes, with one red cube standing out prominently in the upper right quadrant. The cubes are arranged in a staggered pattern, creating a sense of depth and perspective. The red cube is the focal point, contrasting sharply with the white ones.

# Fondamenti dell'ingegneria di processo

anno accademico 2022-2023

# Igrometria

**Psicrometria:** studio delle proprietà di un sistema gas-vapore

**Igrometria:** studio delle proprietà del sistema aria-vapore acqueo

## aria secca

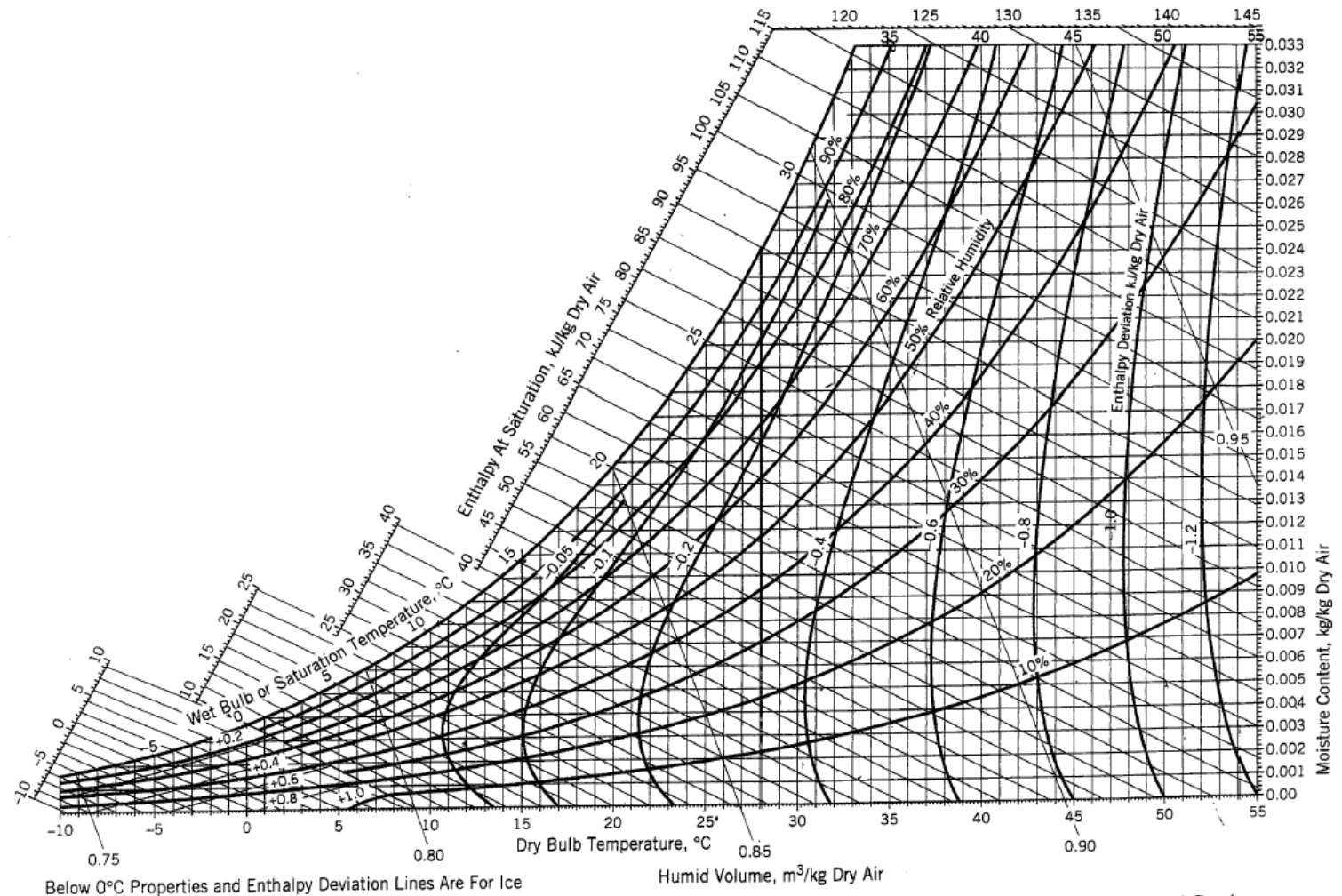
| componenti           | volume (%)          |
|----------------------|---------------------|
| azoto                | 78,09               |
| ossigeno             | 20,95               |
| argo                 | 0,93                |
| biossido di carbonio | $3 \cdot 10^{-2}$   |
| neon                 | $1,8 \cdot 10^{-3}$ |
| elio                 | $5,2 \cdot 10^{-4}$ |
| metano               | $1,5 \cdot 10^{-4}$ |
| cripto               | $1,1 \cdot 10^{-4}$ |
| protossido d'azoto   | $5 \cdot 10^{-5}$   |
| idrogeno             | $5 \cdot 10^{-5}$   |
| ozono                | $5 \cdot 10^{-5}$   |
| ossido di carbonio   | $1 \cdot 10^{-5}$   |
| xeno                 | $8,6 \cdot 10^{-5}$ |
| anidride solforica   | $1 \cdot 10^{-6}$   |
| ammoniaca            | $5 \cdot 10^{-7}$   |
| biossido d'azoto     | $1 \cdot 10^{-7}$   |
| iodio                | $2 \cdot 10^{-11}$  |
| radon                | $6 \cdot 10^{-18}$  |



+ vapore acqueo = **ARIA UMIDA**

# Igrometria

## *Psychrometric chart (Diagramma di Carrier)*



**Figure 8.4-1** Psychrometric chart—SI units. Reference states: H<sub>2</sub>O (L, 0°C, 1 atm), dry air (0°C, 1 atm). (Reprinted with permission of Carrier Corporation.)

# Igrometria

**Igrometria:** studio delle proprietà del sistema aria-vapore acqueo

Le grandezze termoigrometriche dell'aria umida:

- Temperatura a bulbo secco,  $T_{bs}$
- Umidità assoluta,  $X$  (kg/kg d.a.)
- Umidità relativa, U.R. (%)
- Temperatura a bulbo umido,  $T_{bu}$
- Temperatura di rugiada,  $T_{dp}$
- Volume specifico ( $m^3/kg$  d.a.)
- Entalpia specifica,  $h$  (kcal/kg d.a. o kJ/kg d.a.)

*d.a.: dry air*

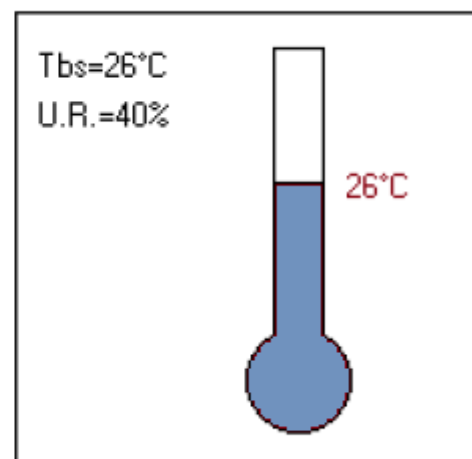
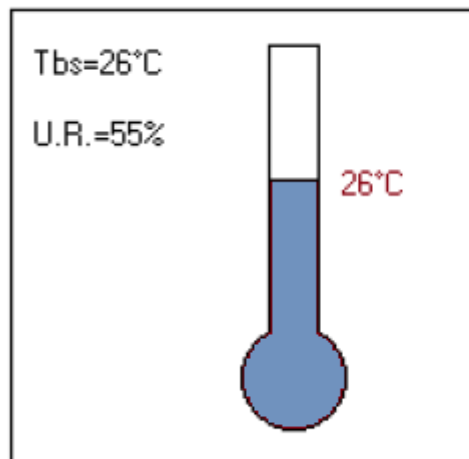


# Igrometria

## Temperatura di bulbo secco (dry bulb temperature)

È la temperatura misurata da un comune termometro o termocoppia. La misura di tale temperatura è indipendente dall'umidità relativa (U.R.) dell'aria

Sul diagramma psicrometrico le temperature a bulbo secco sono indicate sull'asse delle ascisse



# Igrometria

## Umidità assoluta (absolute humidity o moisture content)

L'umidità assoluta,  $X$ , indica esprime i kg di vapore acqueo presenti in ogni kg di aria secca.

Sul diagramma igrometrico l'umidità assoluta è indicata sull'asse delle ordinate (posto sul lato destro).

$$X = 0.015 \text{ kg H}_2\text{O/kg d.a.}$$



1 kg d.a.

+



0.015  
kg H<sub>2</sub>O

=



1.015 kg aria umida



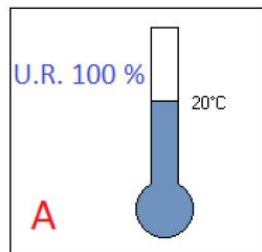
# Igrometria

## Umidità relativa (relative humidity)

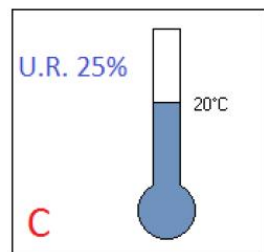
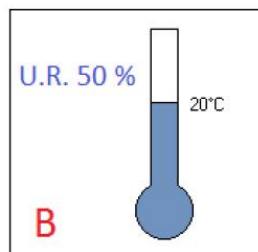
L'umidità relativa (U.R.) rappresenta la percentuale di vapore contenuto nell'aria in rapporto alla massima quantità in essa contenibile alla data temperatura. Sul diagramma igrometrico sono riportate le curve a umidità relativa costante.

$$\frac{\text{pressione parziale}}{\text{tensione di vapore}} 100 = \frac{P_v}{P_{\text{Sat}}} 100$$

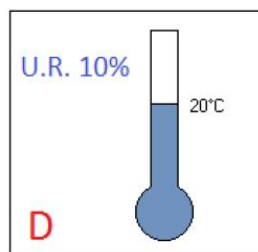
1 kg di aria secca contenente 14.7g di vapor d'acqua



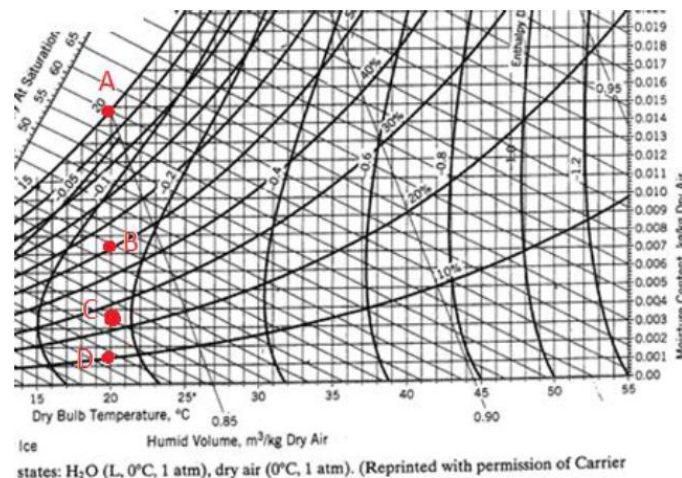
1 kg di aria secca contenente 7.35g di vapor d'acqua



1 kg di aria secca contenente 3.675g di vapor d'acqua



1 kg di aria secca contenente 1.47g di vapor d'acqua

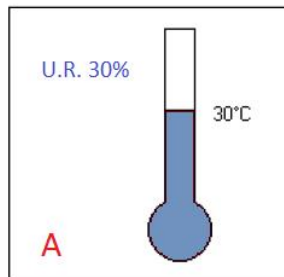


# Igrometria

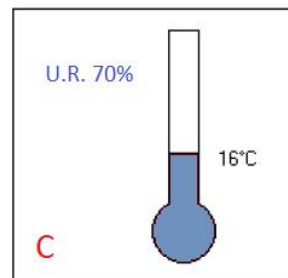
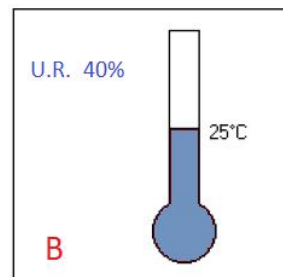
## Temperatura di rugiada (dew point temperature)

E' la temperatura alla quale l'aria umida diventa satura se raffreddata a pressione costante

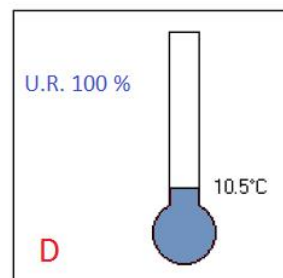
1 kg di aria secca contenente 8 g di vapore acqueo



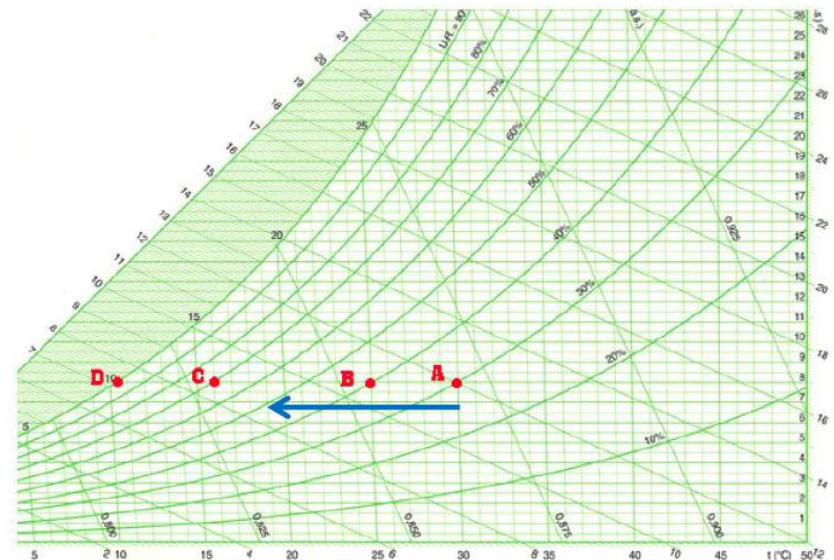
1 kg di aria secca contenente 8 g di vapore acqueo



1 kg di aria secca contenente 8 g di vapore acqueo



1 kg di aria secca contenente 8 g di vapore acqueo





# Igrometria

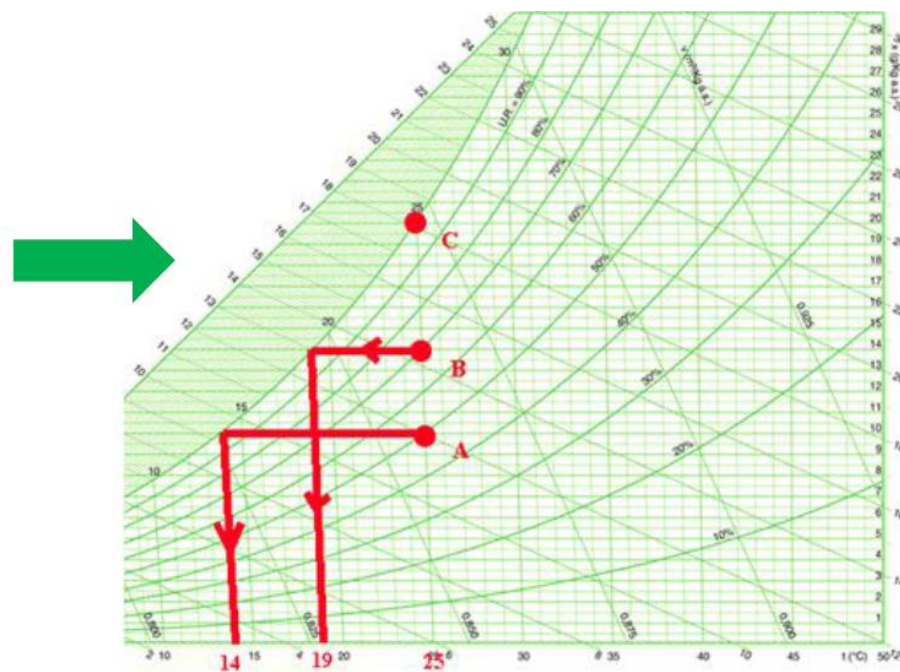
## Temperatura di rugiada (dew point temperature)

E' la temperatura alla quale l'aria umida diventa satura se raffreddata a pressione costante

Supponiamo di avere aria alle condizioni di temperatura a bulbo secco  $T_{bs} = 25^{\circ}\text{C}$  e di umidità relativa  $U.R.=50\%$ ; in questo caso la temperatura di rugiada è pari a  $14^{\circ}\text{C}$  (**caso A** nella figura accanto).

Supponiamo ora di avere aria alle condizioni di temperatura a bulbo secco  $T_{bs} = 25^{\circ}\text{C}$  e di umidità relativa  $U.R. = 70\%$ ; in questo caso la temperatura di rugiada è pari a  $19^{\circ}\text{C}$  (**caso B**).

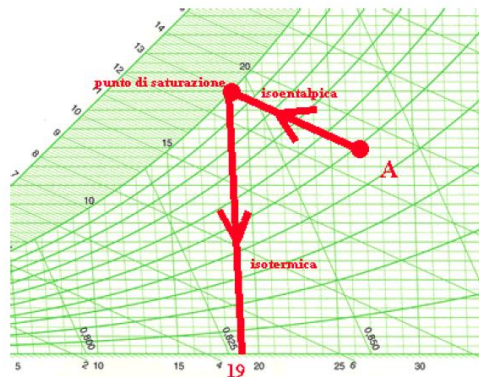
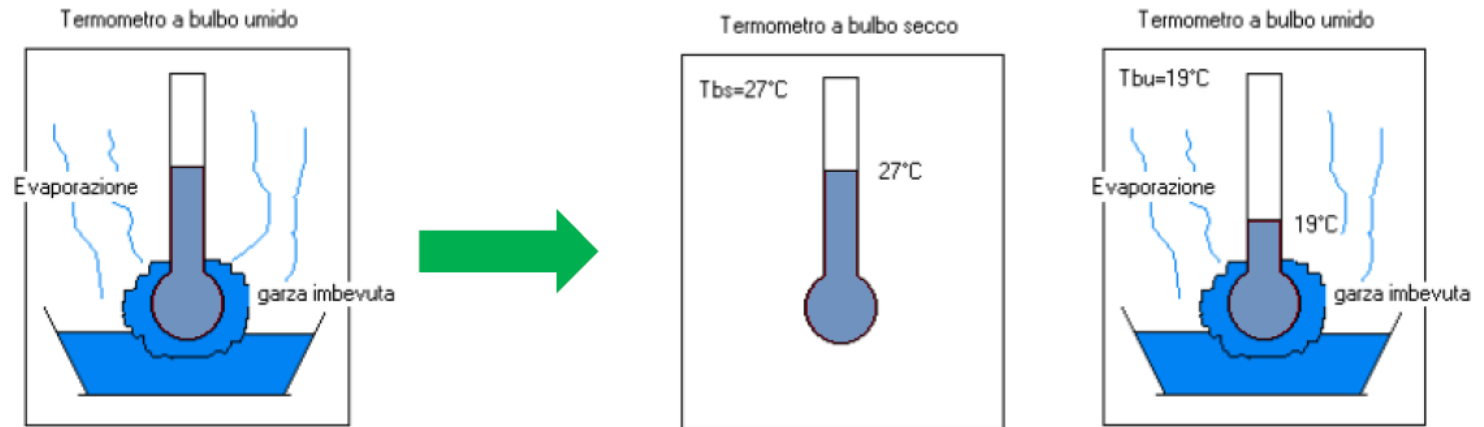
Per l'aria avente  $T_{bs} = 25^{\circ}\text{C}$  ed  $U.R.=100\%$  la temperatura di rugiada è pari a  $25^{\circ}\text{C}$  (**caso C**).



# Igrometria

## Temperatura di bulbo umido (wet-bulb temperature)

La  $T_{wb}$  è la temperatura dell'aria misurata con un termometro il cui bulbo è mantenuto umido con una garza bagnata con acqua pura ed esposto ad una corrente d'aria.



Supponiamo che l'aria umida si trovi nelle seguenti condizioni (punto A)

$T_{bs} = 27^{\circ}\text{C}$

U.R.=50%

la temperatura a bulbo umido sarà pari a

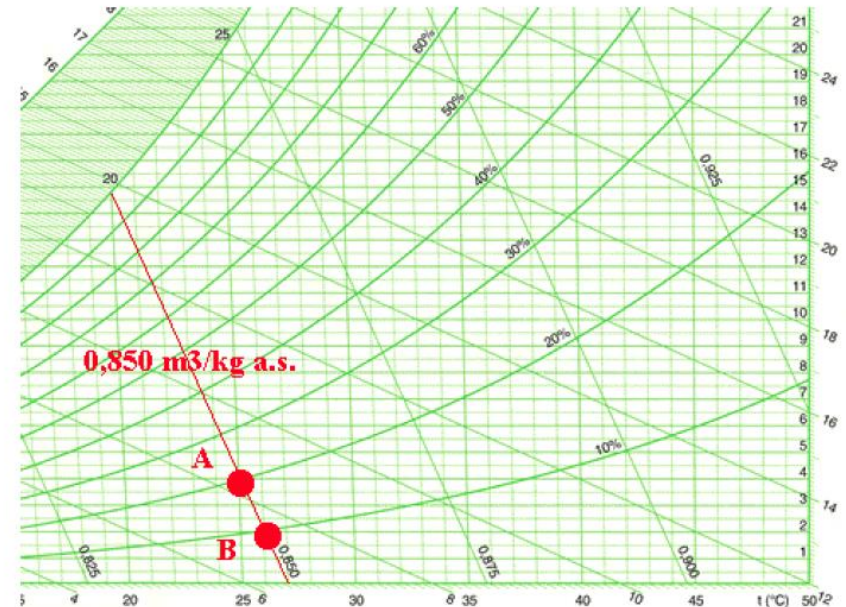
$T_{bu} = 19^{\circ}\text{C}$

# Igrometria

## Volume specifico

Volume occupato dall'aria umida facendo riferimento al kg di aria secca

l'aria umida con  $T_{bs} = 25^{\circ}\text{C}$  e con  $U.R.=20\%$  (**punto A** nella figura seguente) e  
l'aria umida con  $T_{bs} = 26^{\circ}\text{C}$  e con  $U.R.=10\%$  (**punto B**) hanno lo stesso volume specifico pari a  $0.850 \text{ m}^3/\text{kg a.s.}$



# Igrometria

## Entalpia specifica

Entalpia di una massa unitaria di aria secca più il relativo vapor d'acqua alla saturazione

*Stati di riferimento:*

*Acqua liquida a 0 °C e 1 atm*

*Aria secca a 0 °C e 1 atm*

Per calcolare l'entalpia specifica  $h$  dell'aria a  $T_{bs} = T$  e umidità  $X$  basta calcolare il calore necessario per:

- Portare l'aria secca (1kg) dalla temperatura di 0°C alla temperatura finale  $T$ ;
- Far evaporare a 0°C gli  $X$  grammi di acqua contenuti nell'aria umida e riscaldare da 0°C a  $T$ °C gli  $X$  grammi di vapore.

Esempio: l'aria alla temperatura  $T_{bs}$  di 20°C con umidità specifica  $X = 10\text{g/kg}$  ha entalpia specifica pari a 10.85 kcal/kg a.s. (letta sul diagramma psicrometrico) in quanto:

- $h_a = 4.8 \text{ kcal}$  servono per portare il kg di aria secca da 0°C a 20°C  
( $Q = m c_p \Delta T = 1 \times 0.24 \times 20$ );
- $h_v = 6.05 \text{ kcal}$  servono per fare evaporare i 10 grammi di acqua a 0°C e poi a riscaldare il vapore da 0°C a 20°C:  $0.010 \times (\lambda + c_{pv} \times \Delta T) = 0.010 \text{ kg} \times (596 \text{ kcal/kg} + 0.46 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C} \times 20^\circ\text{C})$

➡  $h = h_a + h_v = 4.8 + 6.05 = 10.85 \text{ kcal/kg aria secca}$