

## A.08.02 – Misturas Gás-Vapor e Condicionamento de Ar

### Fenômenos de Saturação do Vapor no Ar

Prof. C. Naaktgeboren, PhD



<https://github.com/CNThermSci/ApplThermSci>

Compiled on 2021-03-07 14h57m54s UTC

## 1 Temperatura do Ponto de Orvalho

## • Saturação Adiabática e Temperatura de Bulbo Úmido

- Saturação Adiabática
- Temperatura de Bulbo Úmido
- Psicrômetro Giratório e Cartas Psicrométricas

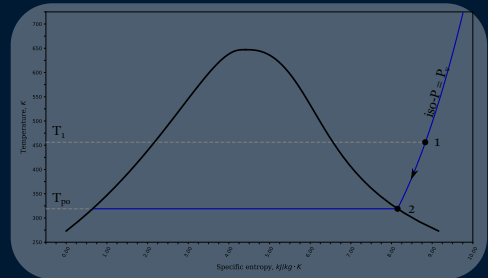
### 3 Referências e Tópicos de Leitura

Esta apresentação baseia-se nas referências [1], Seções 14-3 a 14-4 (tópicos de leitura) e [2].

# Temperatura do Ponto de Orvalho, $T_{po}$

## Definition

Temperatura de ponto de orvalho é definida como a temperatura na qual se dá o **início da condensação** quando o ar é resfriado à **pressão constante**.



Processo de resfriamento a pressão constante desde a temperatura inicial,  $T_1$ , até a temperatura do ponto de orvalho,  $T_{po}$ . Diagrama em escala  
Fonte: autoria própria

# Temperatura do Ponto de Orvalho, $T_{po}$



cl.staticflickr.com



Processo de resfriamento a pressão constante desde a temperatura inicial,  $T_1$ , até a temperatura do ponto de orvalho,  $T_{po}$ . Diagrama em escala

Fonte: autoria própria

# Temperatura do Ponto de Orvalho, $T_{po}$



upload.wikimedia.org



Processo de resfriamento a pressão constante desde a temperatura inicial,  $T_1$ , até a temperatura do ponto de orvalho,  $T_{po}$ . Diagrama em escala

Fonte: autoria própria

## Temperatura do Ponto de Orvalho, $T_{po}$



[www.liquidimageco.com](http://www.liquidimageco.com)



[www.quora.com](http://www.quora.com)

# Temperatura do Ponto de Orvalho, $T_{po}$



images.pexels.com



images.pexels.com







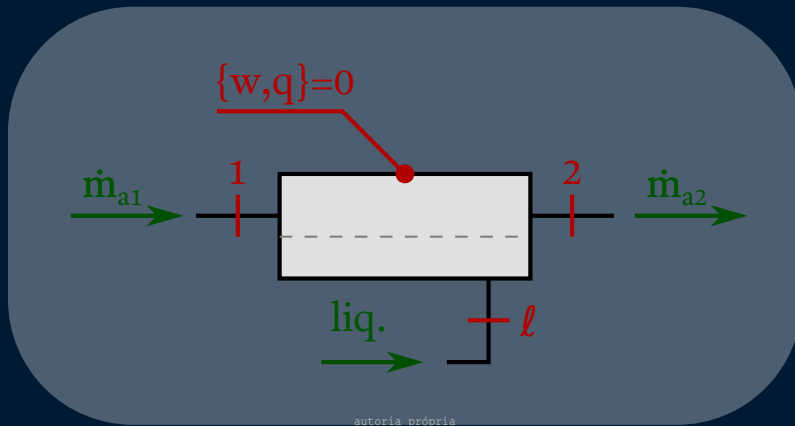
# Saturação Adiabática

- Pressão parcial é um conceito de difícil medição direta;
- É desejável relacionar as umidades a grandezas de fácil medição;
- A medição da temperatura de orvalho,  $T_{po}$ , não é muito prática;

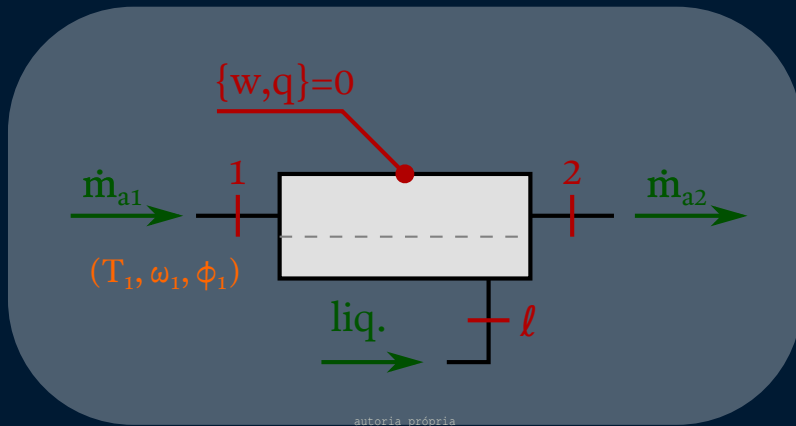
# Saturação Adiabática

- **Pressão parcial** é um conceito de **difícil medição direta**;
- É desejável relacionar as umidades a grandezas de **fácil medição**;
- A medição da temperatura de orvalho,  $T_{po}$ , não é muito prática;
- Estuda-se então o processo de **saturação adiabática**:

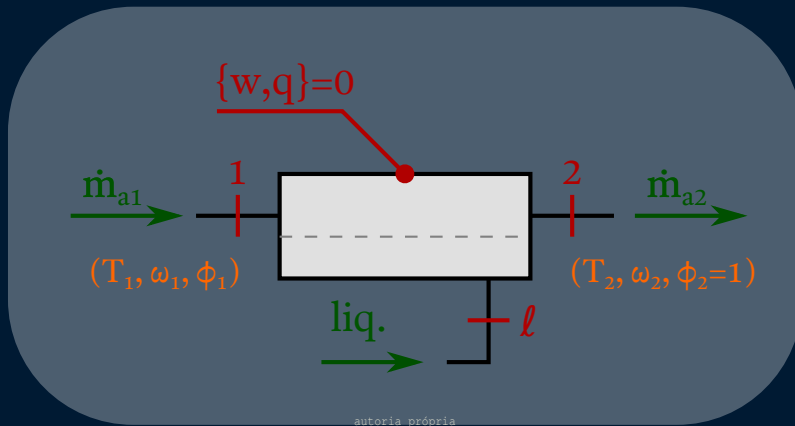
# Saturação Adiabática



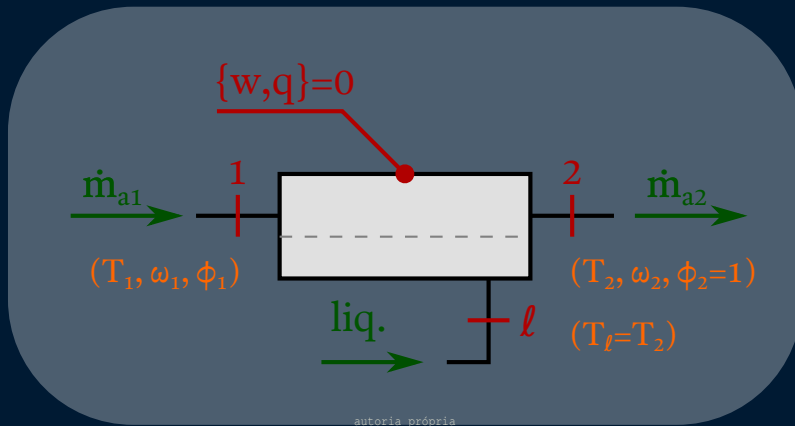
# Saturação Adiabática



## Saturação Adiabática



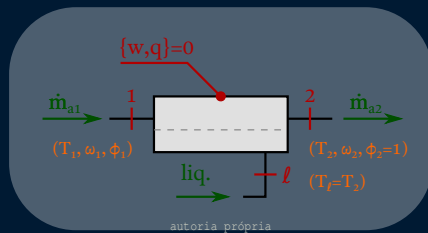
## Saturação Adiabática





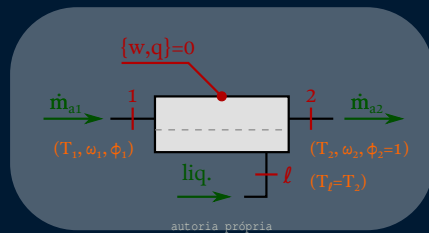
# Balanco de Massa

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



# Balanco de Massa

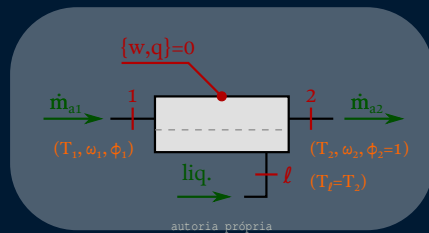
$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a \quad (\text{ar seco})$$



# Balanco de Massa

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a \quad (\text{ar seco})$$

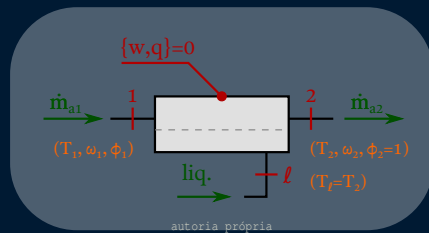
$$\dot{m}_{w1} + \dot{m}_l = \dot{m}_{w2}$$



# Balanco de Massa

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a \quad (\text{ar seco})$$

$$\dot{m}_{w1} + \dot{m}_l = \dot{m}_{w2} \quad \rightarrow$$

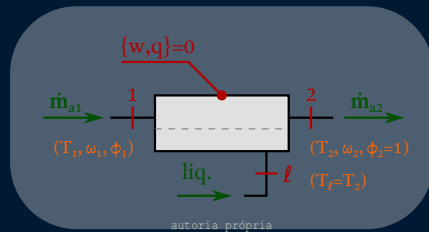


## Balanco de Massa

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a \quad (\text{ar seco})$$

$$\dot{m}_{w1} + \dot{m}_\ell = \dot{m}_{w2} \quad \rightarrow$$

$$\dot{m}_a \omega_1 + \dot{m}_\ell = \dot{m}_a \omega_2$$

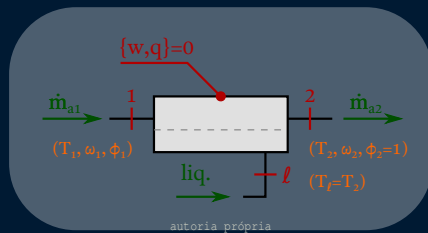


## Balanco de Massa

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a \quad (\text{ar seco})$$

$$\dot{m}_{w1} + \dot{m}_\ell = \dot{m}_{w2} \quad \rightarrow$$

$$\dot{m}_a \omega_1 + \dot{m}_\ell = \dot{m}_a \omega_2 \quad \rightarrow$$



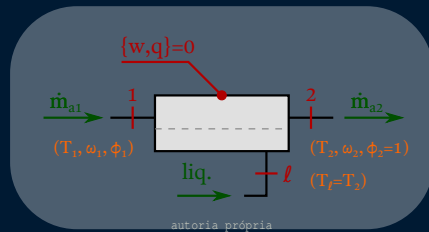
## Balanco de Massa

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \dot{m}_a \quad (\text{ar seco})$$

$$\dot{m}_{w1} + \dot{m}_\ell = \dot{m}_{w2} \quad \rightarrow$$

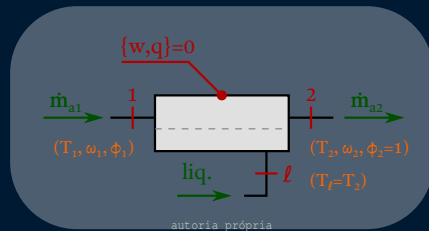
$$\dot{m}_a \omega_1 + \dot{m}_\ell = \dot{m}_a \omega_2 \quad \rightarrow$$

$$\dot{m}_\ell = \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1).$$



## Balço de Energia (com $Q = W = 0$ )

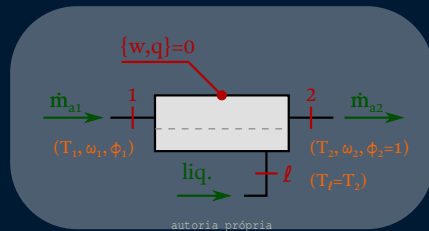
$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{sai}$$





## Balanco de Energia (com $Q = W = 0$ )

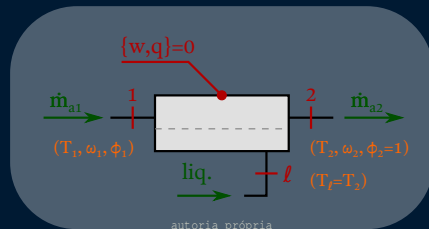
$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{sai} \quad \rightarrow$$



## Balanco de Energia (com $Q = W = 0$ )

$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{sai} \quad \rightarrow$$

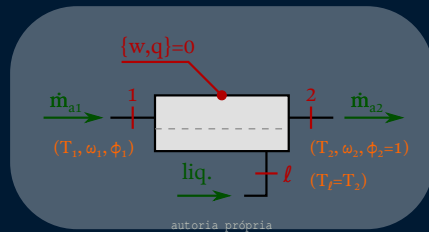
$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_\ell h_\ell = \dot{m}_a h_2$$



## Balanco de Energia (com $Q = W = 0$ )

$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{sai} \quad \rightarrow$$

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_\ell h_\ell = \dot{m}_a h_2 \quad \rightarrow$$

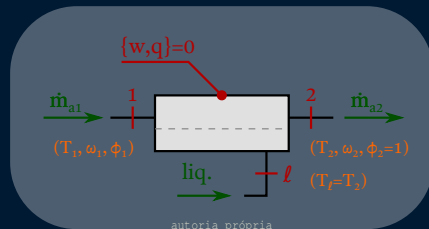


## Balanco de Energia (com $Q = W = 0$ )

$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{sai} \quad \rightarrow$$

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_\ell h_\ell = \dot{m}_a h_2 \quad \rightarrow$$

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1) h_\ell = \dot{m}_a h_2$$

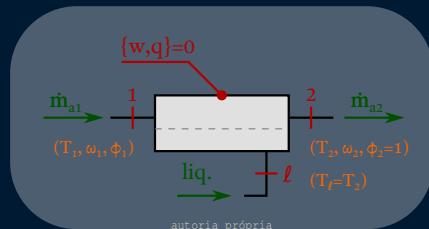


## Balanco de Energia (com $Q = W = 0$ )

$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{sai} \quad \rightarrow$$

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_\ell h_\ell = \dot{m}_a h_2 \quad \rightarrow$$

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1) h_\ell = \dot{m}_a h_2 \quad \rightarrow$$



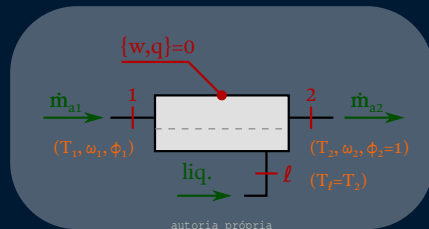
## Balanco de Energia (com $Q = W = 0$ )

$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{sai} \quad \rightarrow$$

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_\ell h_\ell = \dot{m}_a h_2 \quad \rightarrow$$

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1) h_\ell = \dot{m}_a h_2 \quad \rightarrow$$

$$h_1 + (\omega_2 - \omega_1) h_\ell = h_2$$



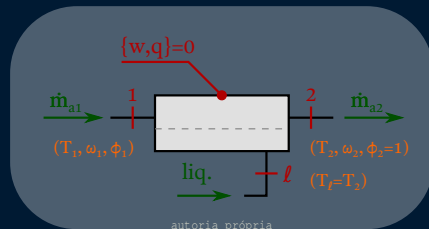
## Balanco de Energia (com $Q = W = 0$ )

$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{sai} \quad \rightarrow$$

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_\ell h_\ell = \dot{m}_a h_2 \quad \rightarrow$$

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1) h_\ell = \dot{m}_a h_2 \quad \rightarrow$$

$$h_1 + (\omega_2 - \omega_1) h_\ell = h_2 \quad \rightarrow$$



## Balanco de Energia (com $Q = W = 0$ )

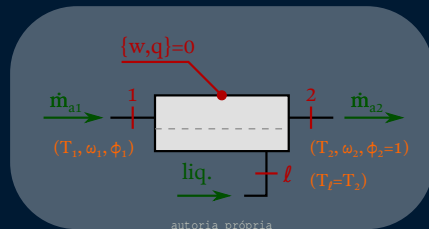
$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{sai} \quad \rightarrow$$

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_\ell h_\ell = \dot{m}_a h_2 \quad \rightarrow$$

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1) h_\ell = \dot{m}_a h_2 \quad \rightarrow$$

$$h_1 + (\omega_2 - \omega_1) h_\ell = h_2 \quad \rightarrow$$

$$(c_P T_1 + \omega_1 h_{v1}) + (\omega_2 - \omega_1) h_\ell = (c_P T_2 + \omega_2 h_{g2})$$





## Balanco de Energia (com $Q = W = 0$ )

$$\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{sai} \quad \rightarrow$$

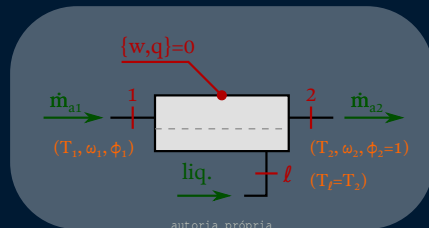
$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_\ell h_\ell = \dot{m}_a h_2 \quad \rightarrow$$

$$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_a (\omega_2 - \omega_1) h_\ell = \dot{m}_a h_2 \quad \rightarrow$$

$$h_1 + (\omega_2 - \omega_1) h_\ell = h_2 \quad \rightarrow$$

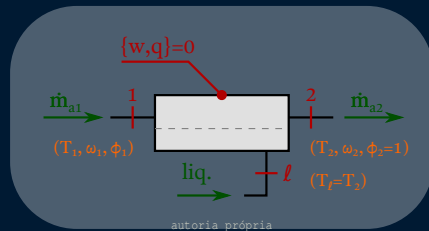
$$(c_P T_1 + \omega_1 h_{v1}) + (\omega_2 - \omega_1) h_\ell = (c_P T_2 + \omega_2 h_{g2})$$

$$\omega_2 = \frac{0,622 P_{g2}}{P - P_{g2}}; \quad \omega_1 = \frac{c_P (T_2 - T_1) + \omega_2 h_{lg2}}{h_{v1} - h_\ell}.$$



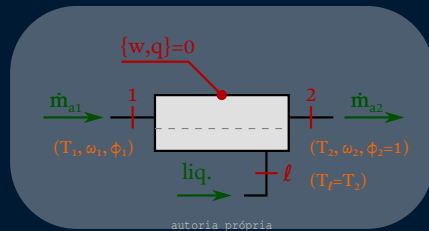
## Exemplo: Ar entrando com $\phi_1 = 100\%$

$$\dot{m}_\ell = \dot{m}_a(\omega_2 - \omega_1) = 0 \text{ kg/s} \quad (\text{sat.})$$



## Exemplo: Ar entrando com $\phi_1 = 100\%$

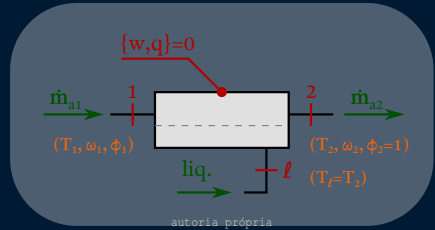
$$\dot{m}_\ell = \dot{m}_a(\omega_2 - \omega_1) = 0 \text{ kg/s} \quad (\text{sat.}) \quad \rightarrow$$



## Exemplo: Ar entrando com $\phi_1 = 100\%$

$$\dot{m}_\ell = \dot{m}_a(\omega_2 - \omega_1) = 0 \text{ kg/s} \quad (\text{sat.}) \quad \rightarrow$$

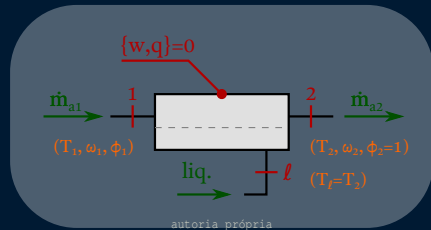
$$\omega_1 = \omega_2$$



## Exemplo: Ar entrando com $\phi_1 = 100\%$

$$\dot{m}_\ell = \dot{m}_a(\omega_2 - \omega_1) = 0 \text{ kg/s} \quad (\text{sat.}) \quad \rightarrow$$

$$\omega_1 = \omega_2 \quad \rightarrow$$

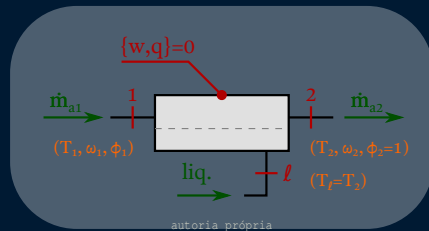


## Exemplo: Ar entrando com $\phi_1 = 100\%$

$$\dot{m}_\ell = \dot{m}_a(\omega_2 - \omega_1) = 0 \text{ kg/s} \quad (\text{sat.}) \quad \rightarrow$$

$$\omega_1 = \omega_2 \quad \rightarrow$$

$$h_1 = h_2$$

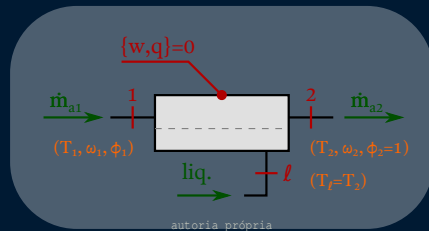


## Exemplo: Ar entrando com $\phi_1 = 100\%$

$$\dot{m}_\ell = \dot{m}_a(\omega_2 - \omega_1) = 0 \text{ kg/s} \quad (\text{sat.}) \quad \rightarrow$$

$$\omega_1 = \omega_2 \quad \rightarrow$$

$$h_1 = h_2 \quad \rightarrow$$



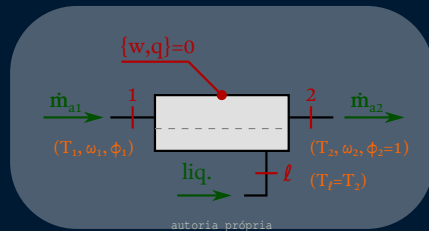
## Exemplo: Ar entrando com $\phi_1 = 100\%$

$$\dot{m}_\ell = \dot{m}_a(\omega_2 - \omega_1) = 0 \text{ kg/s} \quad (\text{sat.}) \quad \rightarrow$$

$$\omega_1 = \omega_2 \quad \rightarrow$$

$$h_1 = h_2 \quad \rightarrow$$

$$T_1 = T_2.$$







## Temperatura de Bulbo Úmido, $T_{bu}$

- Em geral, a temperatura de saturação adiabática segue  $T_{po} \leq T_{sa} \leq T$ ;
- Para ar com vapor saturado, tem-se:  $T_{po} = T_{sa} = T$ ;

## Temperatura de Bulbo Úmido, $T_{bu}$

- Em geral, a temperatura de saturação adiabática segue  $T_{po} \leq T_{sa} \leq T$ ;
- Para ar com vapor saturado, tem-se:  $T_{po} = T_{sa} = T$ ;
- A medição de  $(P, T, T_{sa})$  permite determinar as umidades (absoluta e relativa) do ar;

## Temperatura de Bulbo Úmido, $T_{bu}$

- Em geral, a temperatura de saturação adiabática segue  $T_{po} \leq T_{sa} \leq T$ ;
- Para ar com vapor saturado, tem-se:  $T_{po} = T_{sa} = T$ ;
- A medição de  $(P, T, T_{sa})$  permite determinar as umidades (absoluta e relativa) do ar;
- Porém, a necessidade de **canal longo** para a saturação é um inconveniente;

## Temperatura de Bulbo Úmido, $T_{bu}$

- Em geral, a temperatura de saturação adiabática segue  $T_{po} \leq T_{sa} \leq T$ ;
- Para ar com vapor saturado, tem-se:  $T_{po} = T_{sa} = T$ ;
- A medição de  $(P, T, T_{sa})$  permite determinar as umidades (absoluta e relativa) do ar;
- Porém, a necessidade de **canal longo** para a saturação é um inconveniente;
- Uma abordagem mais prática é a do **par** de termômetros com **bulbos seco e úmido**.

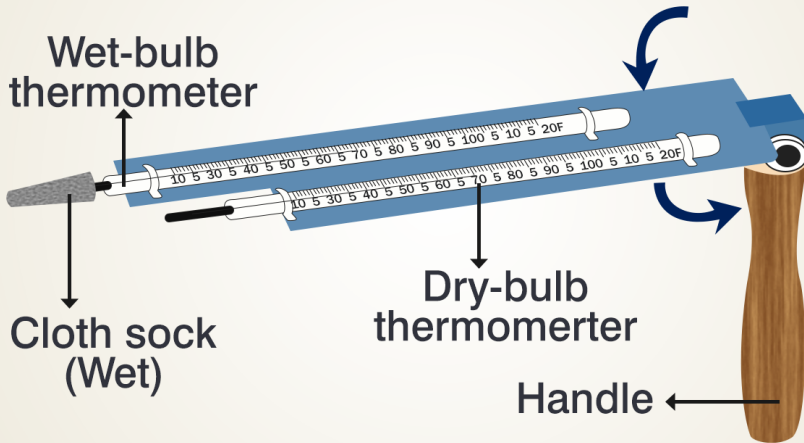
## Temperatura de Bulbo Úmido, $T_{bu}$

- Em geral, a temperatura de saturação adiabática segue  $T_{po} \leq T_{sa} \leq T$ ;
- Para ar com vapor saturado, tem-se:  $T_{po} = T_{sa} = T$ ;
- A medição de  $(P, T, T_{sa})$  permite determinar as umidades (absoluta e relativa) do ar;
- Porém, a necessidade de **canal longo** para a saturação é um inconveniente;
- Uma abordagem mais prática é a do **par** de termômetros com **bulbos seco e úmido**.
- As medidas correspondentes são  $T_{bs} \equiv T$  e  $T_{bu}$ ;

## Temperatura de Bulbo Úmido, $T_{bu}$

- Em geral, a temperatura de saturação adiabática segue  $T_{po} \leq T_{sa} \leq T$ ;
- Para ar com vapor saturado, tem-se:  $T_{po} = T_{sa} = T$ ;
- A medição de  $(P, T, T_{sa})$  permite determinar as umidades (absoluta e relativa) do ar;
- Porém, a necessidade de **canal longo** para a saturação é um inconveniente;
- Uma abordagem mais prática é a do **par** de termômetros com **bulbos seco e úmido**.
- As medidas correspondentes são  $T_{bs} \equiv T$  e  $T_{bu}$ ;
- Neste esquema, *assume-se*  $T_{bu} \approx T_{sa}$ .

# Sling Psychrometer









## Medição de $T$ e $T_{bu}$

- Permitem a **determinação do estado** da mistura ar atmosférico;
- Possível tanto pelas equações já apresentadas, sob a **aproximação**  $T_{bu} \approx T_{sa}$ ;
- Ou por meio de uma **carta psicrométrica** (mostrado a seguir);











## Outras Medições de Umidade

- Baseiam-se em fenômenos que relacionam umidade com **signal eletrônico** [3];
- Umidade varia **comprimento**, **forma**, ou **capacitância** em certas substâncias;



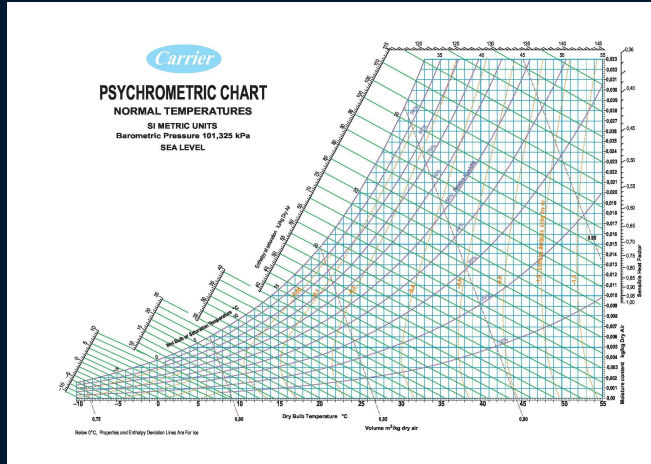








# Carta Psicrométrica



# Carta Psicrométrica

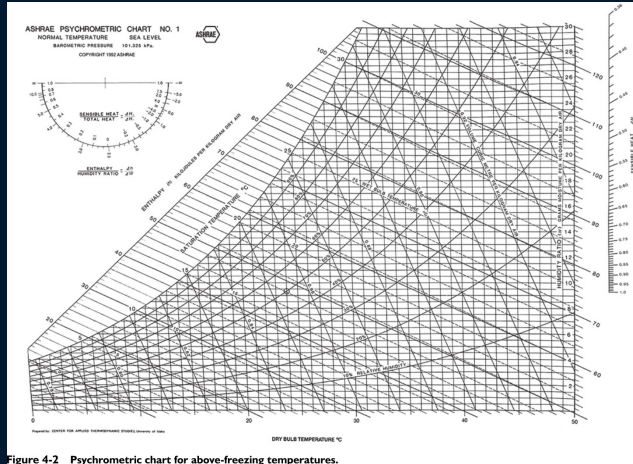


Figure 4-2 Psychrometric chart for above-freezing temperatures.

Fonte: Ref. [2], Fig. 4-2

ASHRAE PSYCHROMETRIC CHART NO. 2  
LOW TEMPERATURE  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $10^{\circ}\text{C}$  SEA LEVEL  
BAROMETRIC PRESSURE 101.325 kPa.  
COPYRIGHT 1981 ASHRAE

Figure 4-3 is a psychrometric chart for below-freezing temperatures, covering a range from  $-40^{\circ}\text{C}$  to  $10^{\circ}\text{C}$  at sea level. The chart is based on a barometric pressure of 101.325 kPa. The main chart area shows Dry Bulb Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) on the horizontal axis and Humidity Ratio ( $\text{g/kg dry air}$ ) on the vertical axis. Key features include:

- Saturation Temperature:** A curved line representing the saturation boundary.
- Wet Bulb Temperature:** A series of lines sloping downwards from the saturation curve.
- Enthalpy:** A series of lines sloping upwards from the bottom left.
- Relative Humidity:** A series of curved lines.
- Sensible Heat and Total Heat:** A circular inset at the top left provides scales for these properties.

Figure 4-3 Psychrometric chart for below-freezing temperatures.

**Figure 4-3 Psychrometric chart for below-freezing temperatures.**

Fonte: Ref. [2], Fig. 4-3

## Referências – I

- [1] Y. A. Çengel and M. A. Boles.  
*Termodinâmica.*  
AMGH, Porto Alegre, 7th edition, 2013.
- [2] D. L. Fenton.  
*Fundamentals of refrigeration: A course book for self-directed or group learning.*  
ASHRAE, second edition edition, 2016.
- [3] Gordon Wylen.  
*Fundamentals of classical thermodynamics.*  
Wiley, New York, fourth edition, 1985.



## Referências – II

- [4] Anatole Bailly.  
*Dictionnaire Grec-Français*.  
Hachette, Paris, 2000.



**Photo by Francesco Ungaro from Pexels**

<https://www.pexels.com/photo/mountains-under-dark-clouds-in-evening-5592630/>