

Meteorologia

LEEA

LMOG

Pedro Matos Soares | pmsoares@fc.ul.pt | 8.3.26

Miguel Lima | malima@fc.ul.pt | 8.3.15



INSTITUTO
DOM LUIZ



Ciências
ULisboa

Sumário

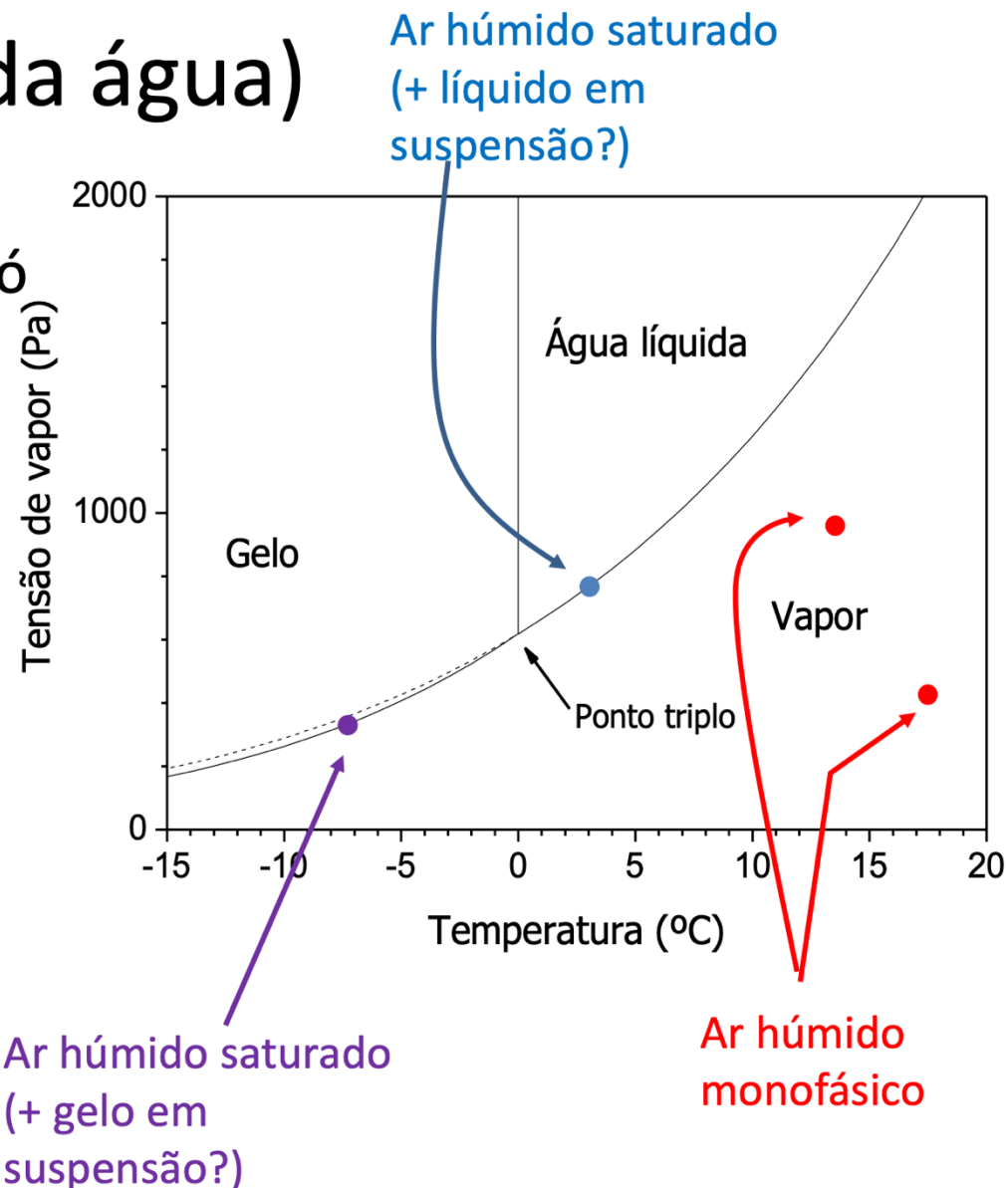
Processos **isobáricos** do ar húmido.

Diagrama de fases (da água)

Apesar do diagrama de fases só representar a água, ele pode representar o ar húmido se $p = \text{const.}$

Notar:

1. É preciso conhecer a **pressão**
2. A **quantidade de condensados** não é dada pelo diagrama (mas pode ser calculada)



Lendo o diagrama de fases

Variáveis base: T, e

Pode calcular-se:

$$r \approx \frac{\varepsilon e}{p}$$

onde se tem a densidade do vapor em relação ao ar:

$$\varepsilon = \frac{M_{H_2O}}{M_d} \approx 0.622$$

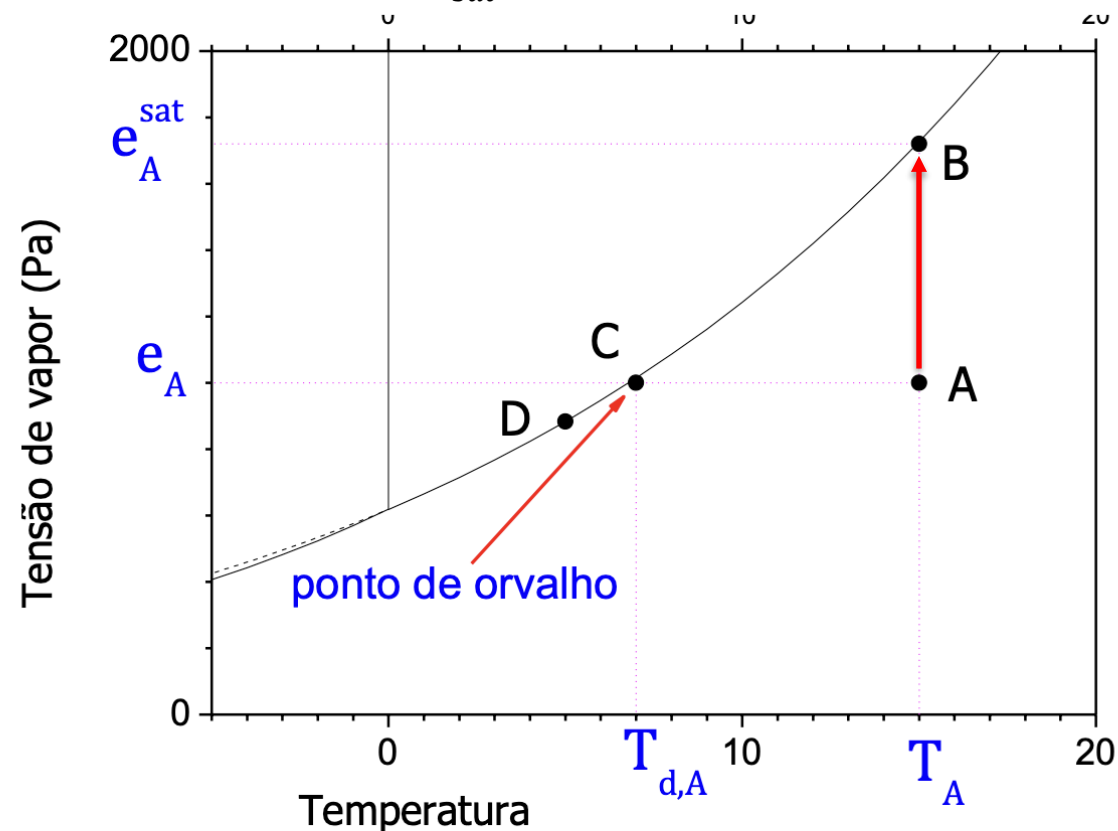
$r = \frac{m_v}{m_d}$ é **adimensional**, como é um número pequeno é descrito em g/kg

ex:

$$T_A = 15^\circ\text{C}; p_A = 1000 \text{ Pa}$$

$$e_{\text{sat}}(15^\circ\text{C}) \approx 1726 \text{ Pa}$$

$$RH = \frac{e}{e^{\text{sat}}} \approx 58\%$$



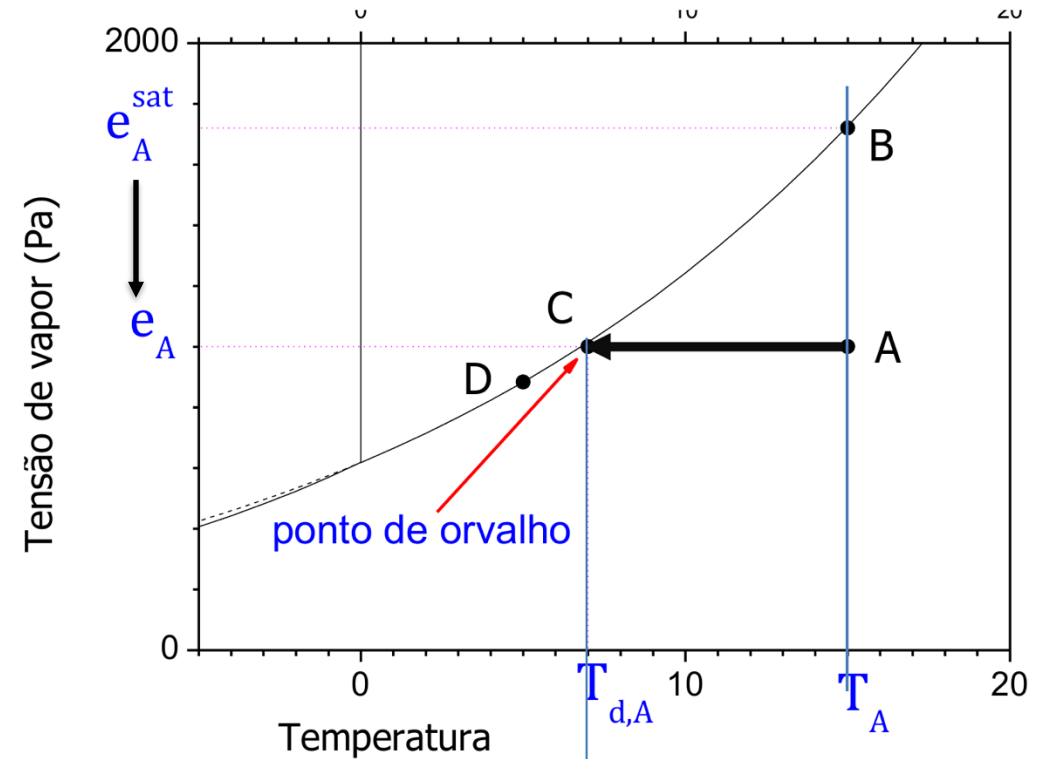
no processo A→B existe adição de vapor (aumento de r e de e) a temperatura constante, até atingir a saturação

No arrefecimento isobárico a $r = \text{const}$

$$r = \frac{\varepsilon e}{p}$$

No processo A→C existe arrefecimento isobárico do ar, sem adição ou subtração de vapor (r e e são constantes)

a tensão de saturação baixa e a humidade relativa sobe, até se atingir a saturação quando a temperatura atinge a **temperatura do ponto de orvalho (T_d - dew-point)**



A temperatura do ponto de orvalho (ou simplesmente ponto de orvalho) é a temperatura à qual o ar tem de ser arrefecido para que atinja a saturação. A partir daí o vapor de água que contém começa a condensar, formando orvalho, nevoeiro ou nuvens — mantendo a pressão constante e sem adicionar nem retirar vapor de água.

No arrefecimento isobárico a $r = \text{const}$

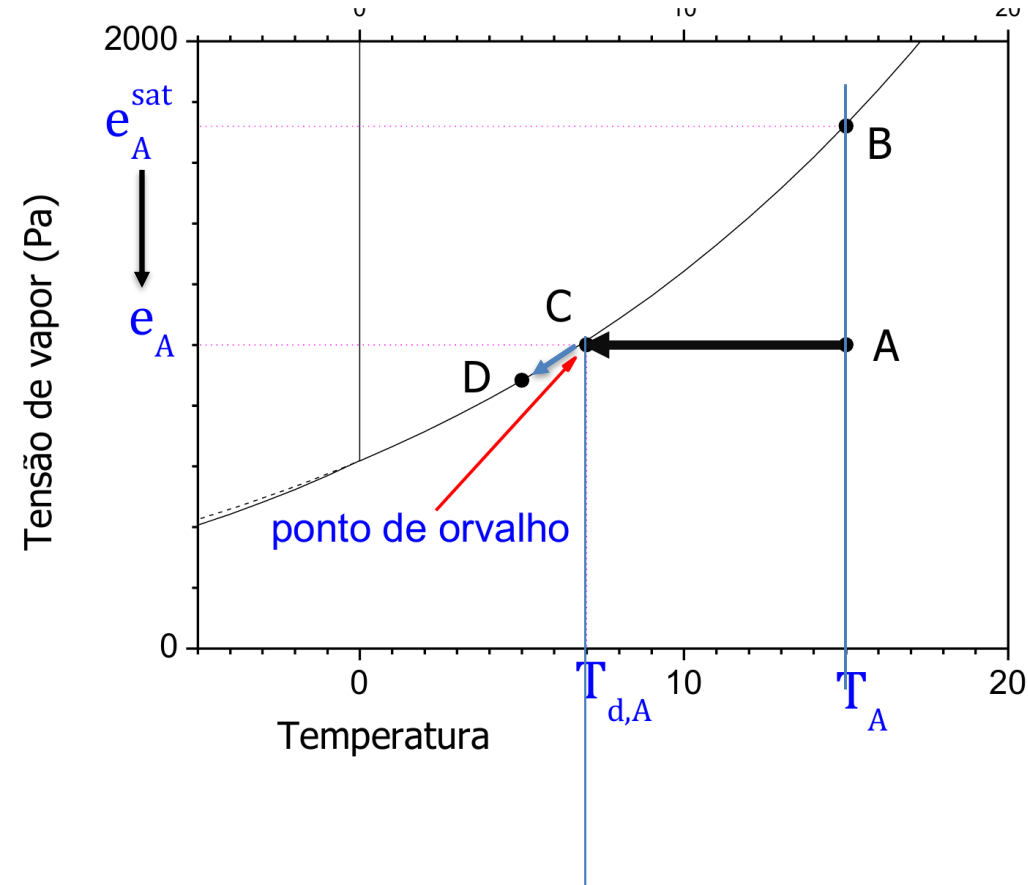
$$r = \frac{\varepsilon e}{p}$$

A partícula de ar perde energia sob a forma de calor:

$$\delta Q = mc_p dT$$

Quando o estado de saturação é atingido (C), não é possível continuar a arrefecer sem condensar.

A temperatura de saturação define o **Ponto de Orvalho**



Se a massa de ar continuar a arrefecer isobaricamente depois da saturação, já não será possível manter constante a tensão de vapor. O estado do ar húmido vai evoluir ao longo da curva de saturação, verificando-se que a quantidade de vapor presente no ar diminui progressivamente (designando por dmv a variação da quantidade de vapor presente no ar, tem-se $dmv < 0$), à medida que parte desse vapor é convertido em água líquida, por **condensação**.

Condensação isobárica

A condensação liberta calor latente, faz baixar r , e cria água líquida r_l . Se não existir chuva, a massa de água conserva-se:

$$r + r_l = r_A = \text{const}$$

O processo continua a existir devido à perda de calor, mas agora:

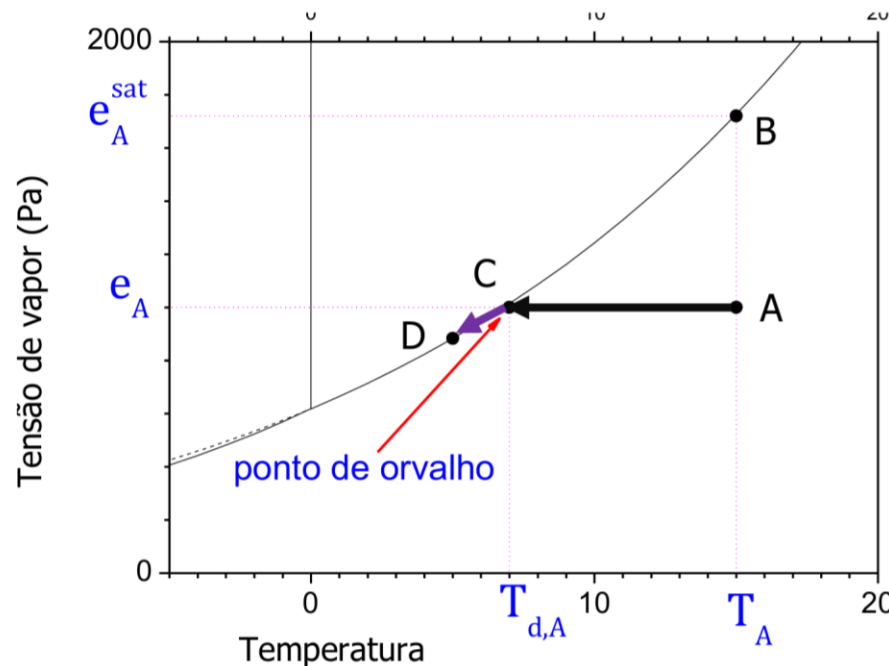
$$\delta Q = mc_p dT + l_v dm_v$$

Libertação de calor latente

Arrefecimento do ar húmido (<0)

i.e. é mais difícil arrefecer uma massa de ar saturada, pois é necessário retirar também o calor latente que vai sendo libertado na condensação.

Na condensação o processo segue a curva de saturação $C \rightarrow D$



m_d e m_v as massa de ar seco e vapor,
($m = m_d + m_v$),

Arrefecimento isobárico $r + r_l = \text{const}$

$$\delta Q = mc_p dT + l_v dm_v$$

$$m = m_v + m_d$$

$$r = \frac{m_v}{m_d}$$

$$\delta Q = m \left(c_p dT + \frac{l_v dm_v}{m} \right) \approx m \left(c_p dT + \frac{l_v dm_v}{m_d} \right) \Rightarrow$$

$$\delta Q = m(c_p dT + l_v dr)$$

Vale também antes da condensação (nesse caso $dr = 0$).

Depois da condensação r_l pode ser calculado ($r_l = r_A - r$).

Ponto de geada

Quando a saturação do ar húmido se dá com uma temperatura inferior a 0°C, pode ocorrer sublimação com formação de gelo. Se esse processo ocorrer junto da superfície, formar-se-á **geada**.

$$T_d < T_f \leq 0^\circ\text{C}$$

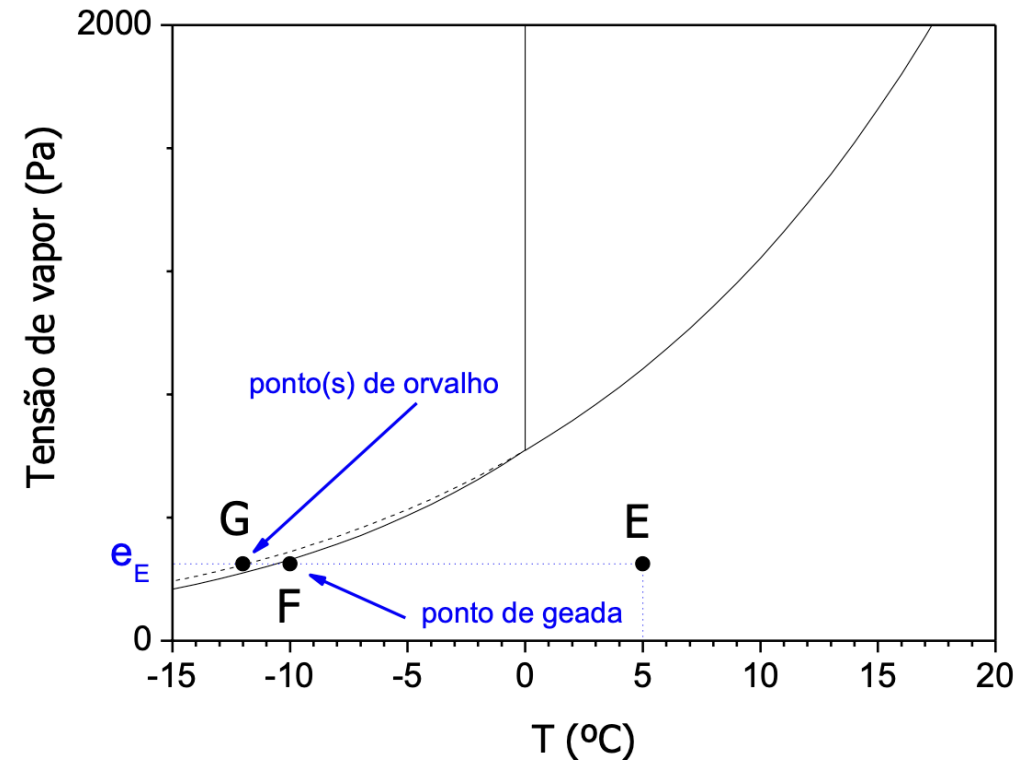
Longe da superfície a formação de cristais de gelo em suspensão é um processo mais difícil, dada a ausência de **núcleos** adequados para a congelação, pelo que o arrefecimento pode prosseguir até ser atingido o **ponto de orvalho**.

Sublimar gelo, é preciso **primeiro derreter o gelo (fusão)** e **depois evaporar a água líquida** – portanto:

$$l_s = l_f + l_v$$

onde l_f é o calor latente de fusão (o inverso condensar e depois congelar).

o **calor latente de sublimação** (l_s) (é maior do que o de vaporização (l_v), (o que dá à **curva de sublimação** (linha a cheio no gráfico) um **declive mais acentuado**).

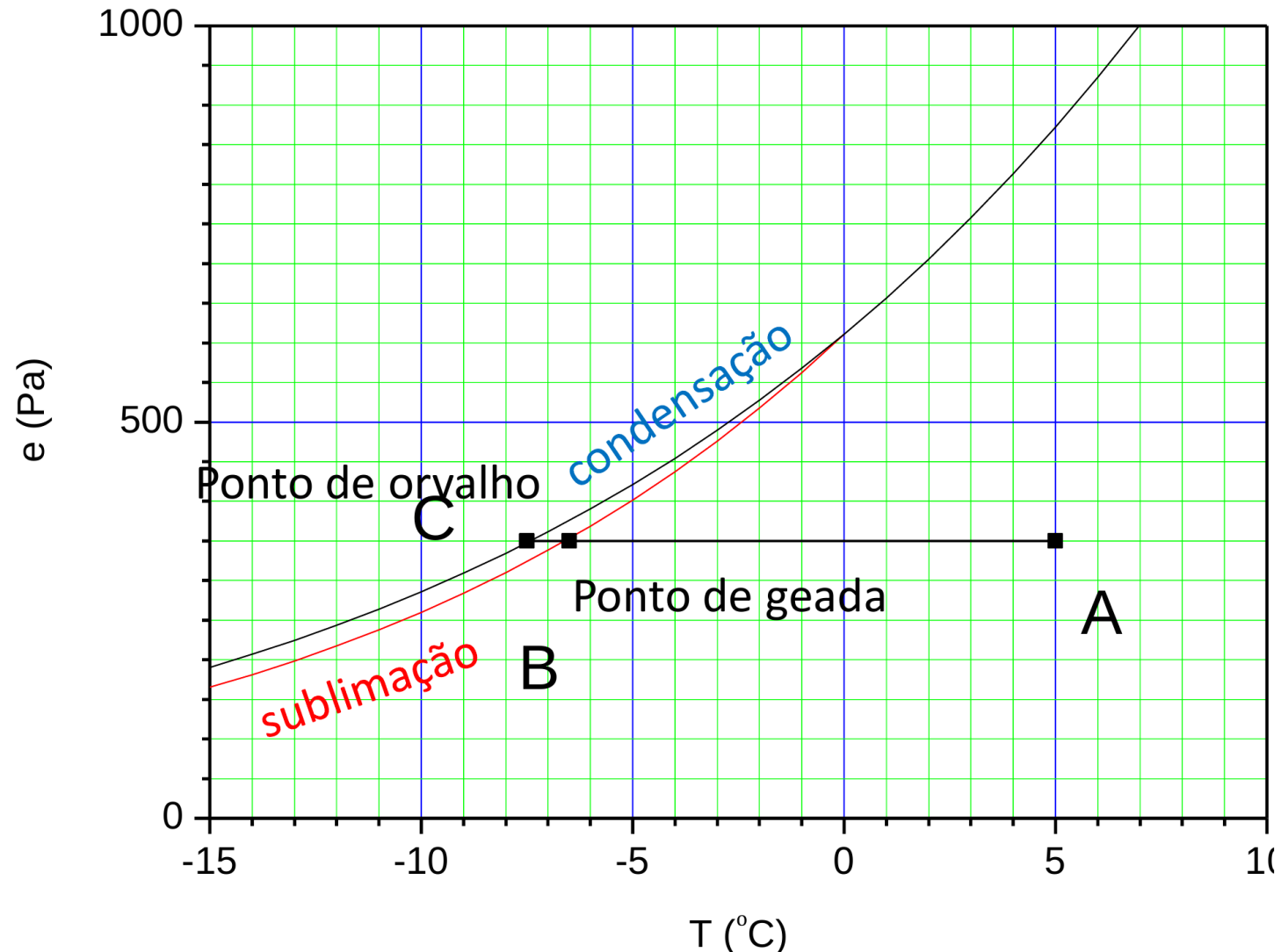


Ponto de geada (T_f : *frost*)

$$l_s > l_v$$

Implica que a
curva de
sublimação tem
maior declive.

Quando $T_d < 0^\circ\text{C}$
 $T_d < T_f$



o calor latente de sublimação (l_s (é maior do que o de vaporização (l_v), (o que dá à curva de sublimação (linha vermelha no gráfico) um declive mais acentuado.

Psicrómetro

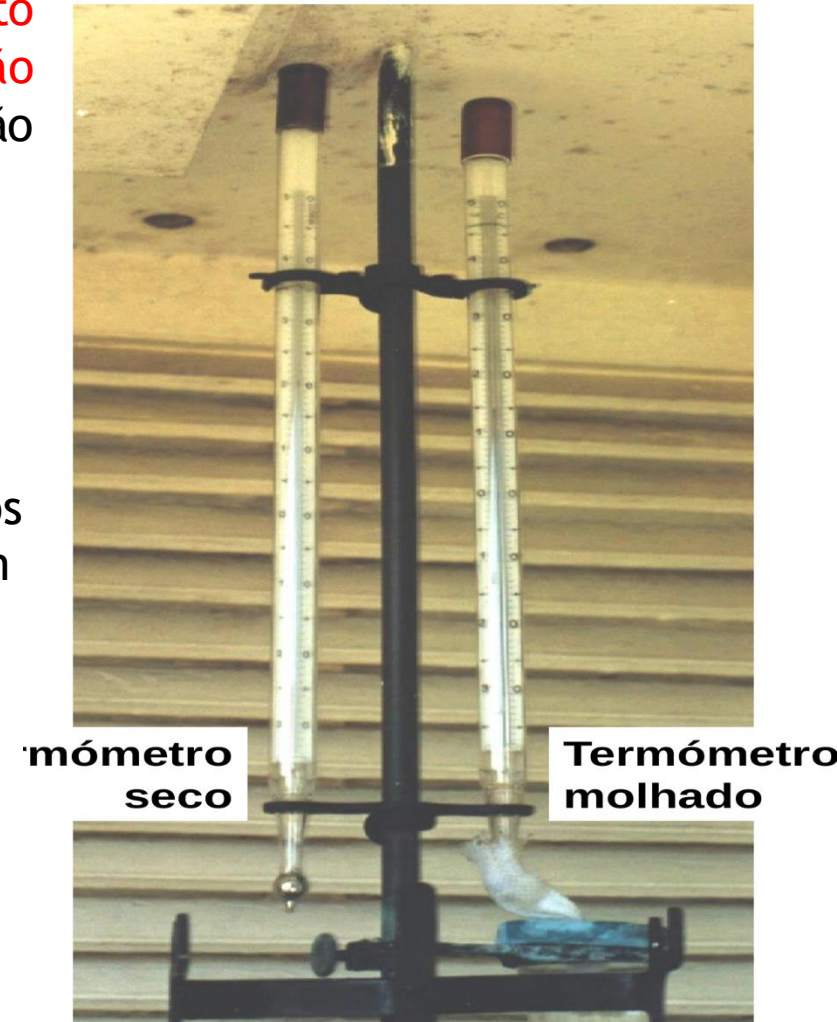
O método padrão de **observação da humidade atmosférica**, por intermédio da utilização do psicrómetro, ilustra um **processo de arrefecimento adiabático** (sem trocas de calor com o exterior) e **isobárico** (pressão constante), em que o arrefecimento do ar se deve exclusivamente à absorção de calor latente associada à evaporação de água líquida até à saturação.

O psicrómetro consiste num par de termómetros idênticos:

um **termómetro seco** e um **termómetro molhado**. Este último é mantido em contacto permanente com um reservatório de água destilada, estando ambos os termómetros num local à sombra, muito bem ventilado, por exemplo num abrigo meteorológico

adiabático: $\delta Q = 0$

$$\frac{\delta Q}{m} \approx c_p dT + l_v dr = 0$$



O processo seguido pelo termómetro molhado é representado pela **reta psicrométrica** apresentada na Figura 2-6. A condição de que o processo seguido é adiabático impõe-se igualando a zero o primeiro membro da equação (2-13):

$$c_p dT + l_v dr = 0 \quad (2-15)$$

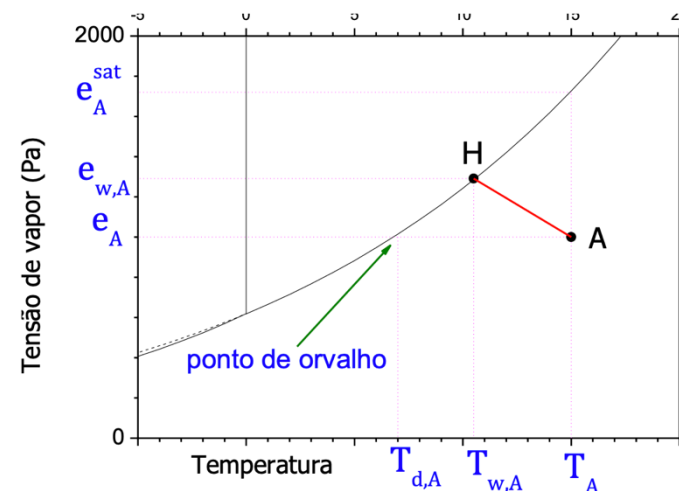
o que é equivalente a dizer que o calor latente necessário para evaporar a água líquida até à saturação é retirado do ar seco e se traduz no seu arrefecimento. Admitindo que c_p e l_v são constantes, pode escrever-se:

$$c_p dT + l_v dr = 0 \Rightarrow c_p(T_w - T) = -l_v(r_w - r) \Rightarrow$$

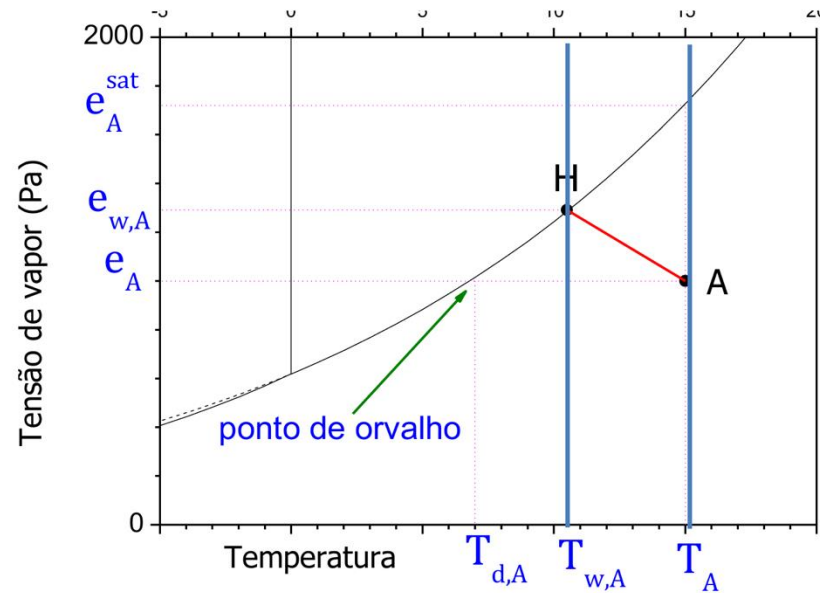
$$c_p(T_w - T) = -\frac{l_v \varepsilon}{p}(e_w - e)$$

(2-16)

A expressão (2-16) constitui a **fórmula psicrométrica**, utilizada para **calcular a tensão de vapor e** , a partir dos valores observados das temperaturas do termómetro seco e do termómetro molhado (T e T_w , respetivamente) e do valor tabelado da tensão de saturação à temperatura do termómetro molhado (e_w).

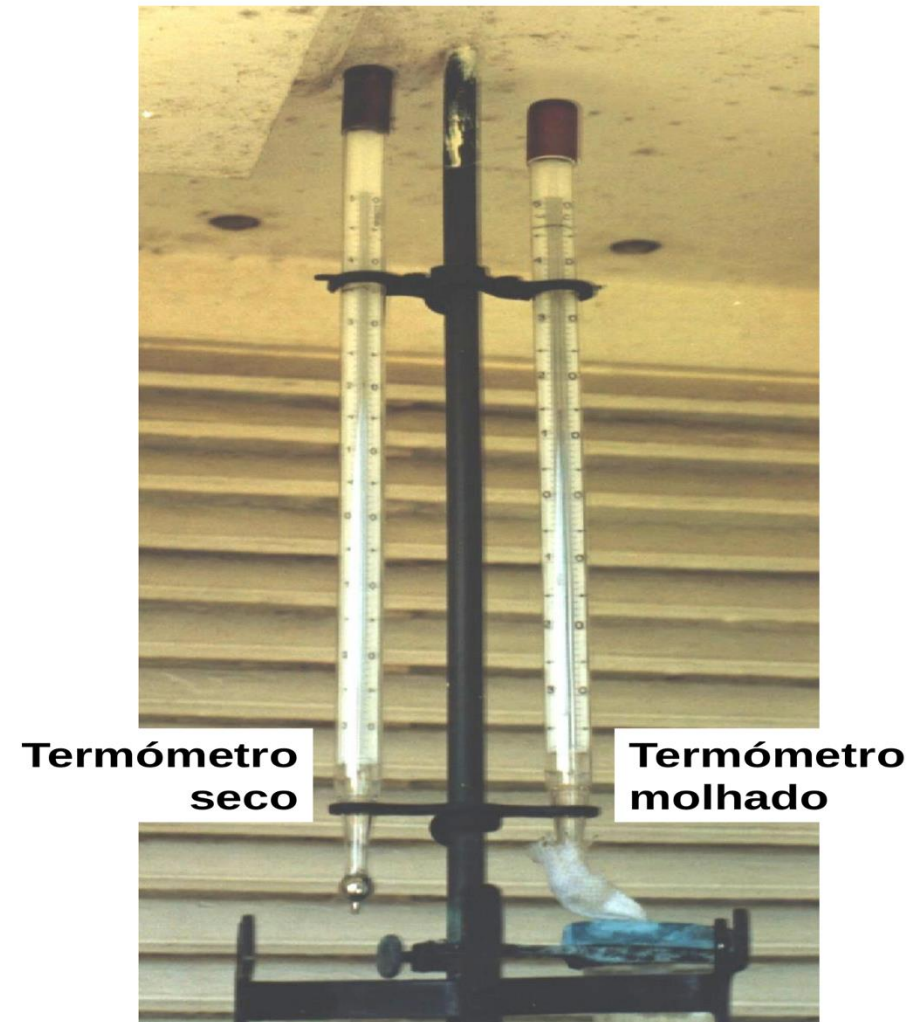


Psicrómetro



Medindo (T, T_w, p) pode
calcular-se (e, r, RH)

Temperatura do termómetro
molhado T_w (wet-bulb)



Mistura horizontal de massas de ar

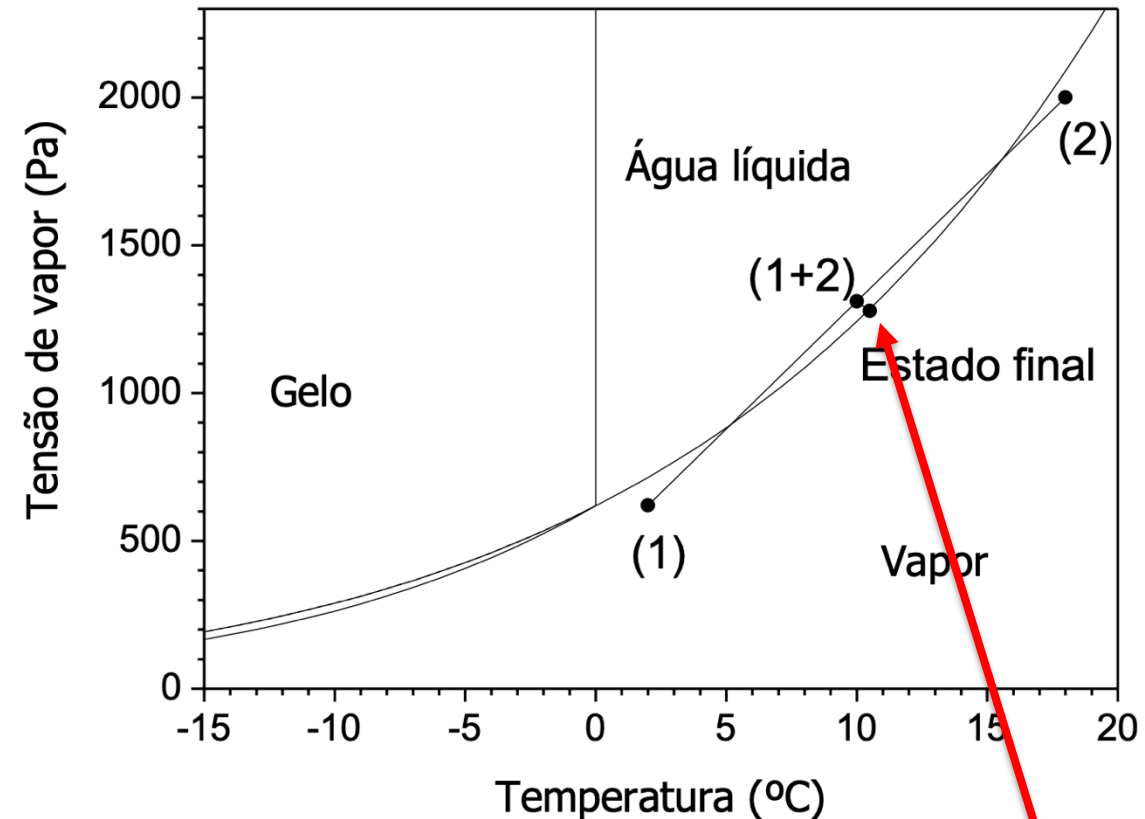
A produção de condensação no ar húmido pode ser ainda conseguida num processo de mistura isobárica e adiabática de massas de ar

A Figura representa duas partículas ((1) e (2)) de ar húmido, não saturadas (ambas se encontram abaixo da curva de saturação). Se estas partículas se misturarem a pressão constante e sem trocas de calor com o exterior, tem-se:

$$m = m_1 + m_2$$

$$T = \frac{m_1 T_1 + m_2 T_2}{m_1 + m_2}$$

$$r = \frac{m_1 r_1 + m_2 r_2}{m_1 + m_2}$$



a partícula misturada

Mistura horizontal (ou isentálpica)

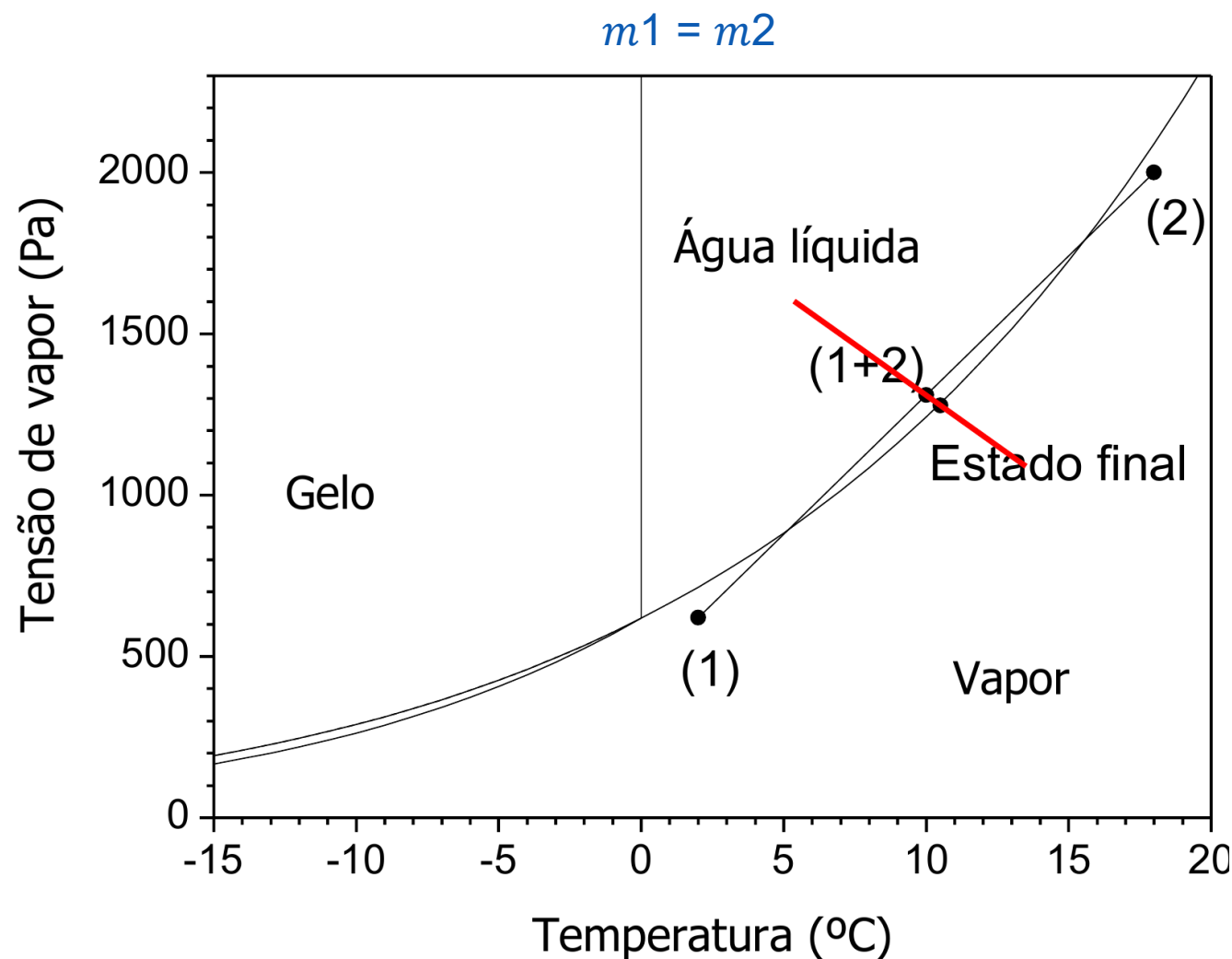
Em partes iguais:

$$\bar{r} = \frac{r_1 + r_2}{2}; \bar{e} = \frac{e_1 + e_2}{2}$$

$$\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

Se este estado estiver acima da curva, o estado final (T_w, e_w) calcula-se com a **fórmula psicrométrica**:

$$c_p (T_w - \bar{T}) = -\frac{l_v \varepsilon}{p} (e_w - \bar{e})$$



Na mistura isentálpica

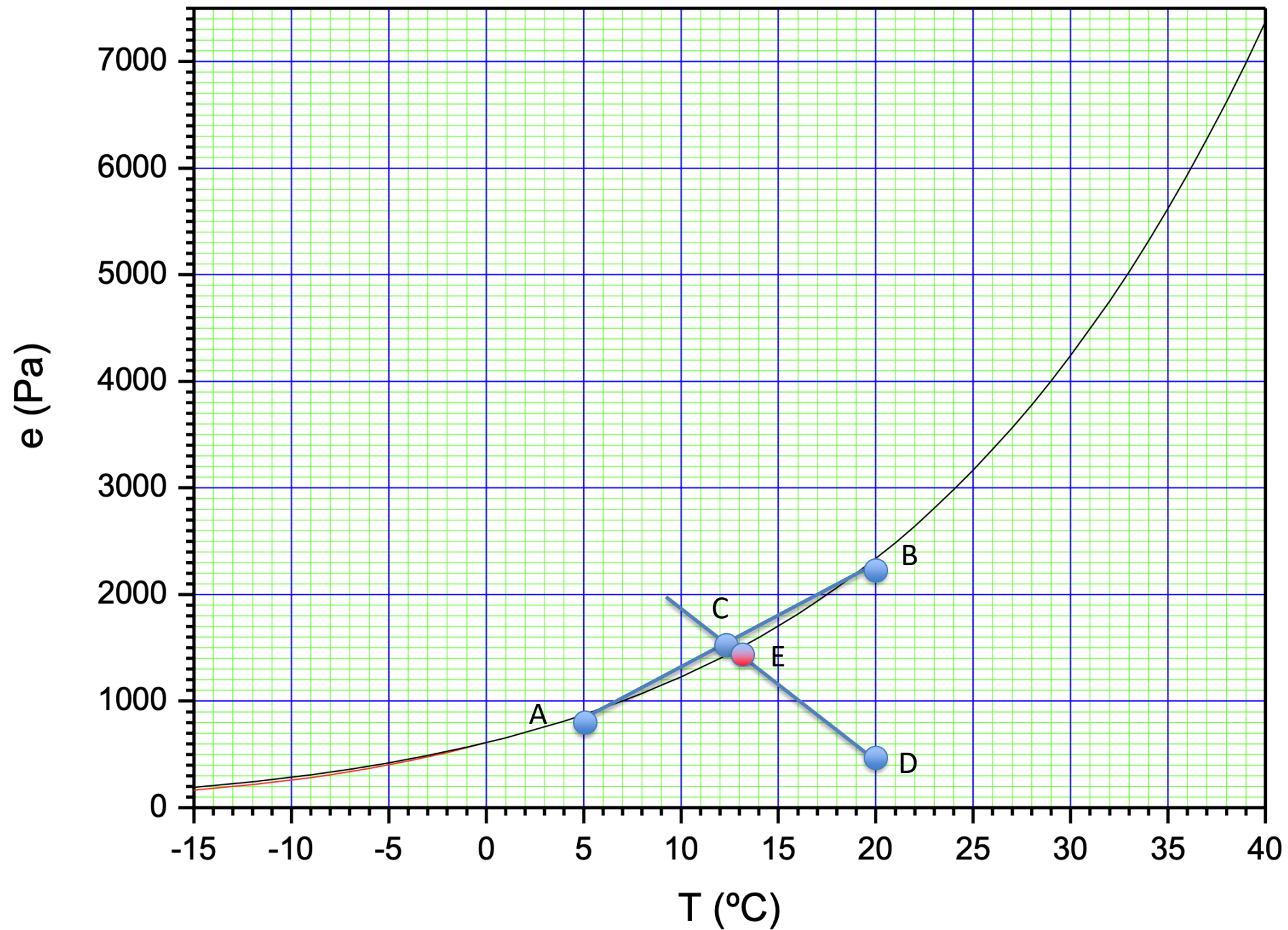
A mistura adiabática de duas massa de ar não saturadas, pode produzir uma massa de ar sobre-saturada (uma nuvem).

Exemplo comum: bafejar num dia frio.

Exemplo meteorológico: alguns nevoeiros em zonas de grande gradiente horizontal de temperatura.

Exercício 2-7. Duas massas de ar, com temperaturas de 5°C e 20°C e umidade relativa de 95% misturam-se em partes iguais à pressão de 1005.2 hPa . Determine o estado final da massa de ar.

T1 = 5 °C
T2 = 20 °C
p = 1005.2 hPa



Utiliza-se o diagrama de fases. A e B representam o estado inicial das duas massas de ar. C representa o estado da massa de ar misturada, sobressaturada antes da condensação (temperatura e tensão de vapor são as médias das duas massas de ar). Determina-se a recta psicrométrica que passa pelo ponto C:

$$c_p(T_C - T_D) = -\frac{l_v \varepsilon}{p}(e_C - e_D)$$

São conhecidos $T_C = 12.5^\circ\text{C}$ e $e_C \approx 1525 \text{ Pa}$ (lido no diagrama ampliado). Escolhe-se um valor arbitrário para T , por exemplo $T_D = 20^\circ\text{C}$, e calcula-se o valor correspondente de e_D (atenção à necessidade de utilizar unidades SI neste cálculo). Unindo C e D obtém-se a recta psicrométrica. Na intersecção entre essa recta e a curva de saturação está o estado final (ponto E). Por leitura no diagrama conclui-se que a temperatura final é $T_E \approx 13^\circ\text{C}$. A tensão de vapor final é $e_E \approx 1500 \text{ Pa}$. A redução da tensão de vapor entre C e E implicou a conversão de uma parte desse vapor em gotículas. Pode estimar-se por conservação da água total que o nevoeiro formado (nevoeiro de mistura) tem uma razão de mistura de água líquida de:

$$r_l = \frac{\varepsilon(e_C - e_E)}{p} \approx 0.15 \text{ g kg}^{-1}$$