

TEA018 - Hidrologia Ambiental

Aula sobre radiação e vapor d'água na atmosfera

Emílio G. F. Mercuri

www.ambiental.ufpr.br/professores/mercuri

Professor DEA / UFPR



CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA AMBIENTAL - UFPR

AGENDA

INTRODUÇÃO

Objetivos

Motivação

RADIAÇÃO

Leis da Radiação

Exemplo 1: Lei de Wien

Radiação líquida e definição de albedo

VAPOR D'ÁGUA NA ATMOSFERA

Saturação

Relações matemáticas - vapor d'água

Exemplo 2: Relação entre e , p e q_v

Pressão de vapor de saturação (e_s)

Umidade Relativa (R_h)

Temperatura do ponto de orvalho (T_d)

Exercício

EXPERIMENTO EM SALA

Medindo a Umidade Relativa

Calculando a Temperatura do Ponto de Orvalho

OBJETIVOS

São objetivos desta aula:

Revisar as leis de radiação

OBJETIVOS

São objetivos desta aula:

Revisar as leis de radiação

Entender as diferenças entre as métricas para quantificar vapor d'água

OBJETIVOS

São objetivos desta aula:

Revisar as leis de radiação

Entender as diferenças entre as métricas para quantificar vapor d'água

Exercícios/Exemplos da aplicação e fixação dos conceitos

OBJETIVOS

São objetivos desta aula:

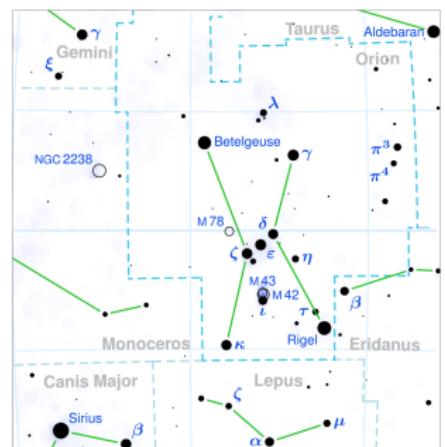
Revisar as leis de radiação

Entender as diferenças entre as métricas para quantificar vapor d'água

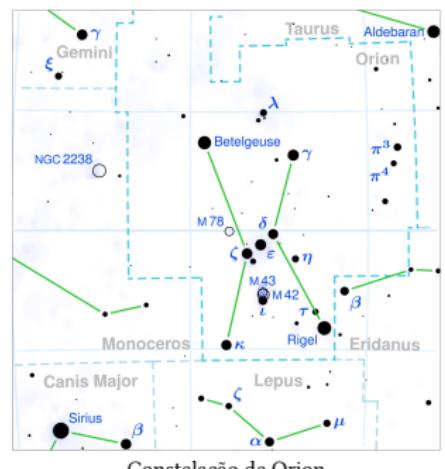
Exercícios/Exemplos da aplicação e fixação dos conceitos

Como medir umidade relativa → psicrômetro

PORQUÊ AS ESTRELAS TÊM CORES DIFERENTES?



PORQUÊ AS ESTRELAS TÊM CORES DIFERENTES?



Constelação de Orion
3 estrelas centrais = cinturão de Orion (3 Marias)

A cor de uma estrela é determinada pela sua temperatura, de acordo com a **lei de Wien**. Na constelação de Orion, pode-se comparar Betelgeuse ($T \approx 3300$ K, superior esquerdo), Rigel ($T \approx 12100$ K, inferior direito), Bellatrix ($T \approx 22000$ K, superior direito) e Mintaka ($T \approx 31800$ K, mais à direita das 3 “estrelas do cinto” no meio).

RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

Radiação do corpo negro é a radiação eletromagnética/térmica emitida por um corpo negro (um corpo opaco e não reflexivo idealizado).

Essa radiação possui um espectro específico de comprimentos de onda que depende da temperatura T do corpo. Por simplicidade vamos assumir que T é uniforme e constante.

A intensidade espectral da radiação do corpo negro atinge o pico em uma frequência que aumenta com a temperatura do corpo emissor:

RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

Radiação do corpo negro é a radiação eletromagnética/térmica emitida por um corpo negro (um corpo opaco e não reflexivo idealizado).

Essa radiação possui um espectro específico de comprimentos de onda que depende da temperatura T do corpo. Por simplicidade vamos assumir que T é uniforme e constante.

A intensidade espectral da radiação do corpo negro atinge o pico em uma frequência que aumenta com a temperatura do corpo emissor:

- ▶ objetos em temperatura ambiente (aproximadamente 300 K) emitem radiação com intensidade de pico no infravermelho (Angstrom: $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$)

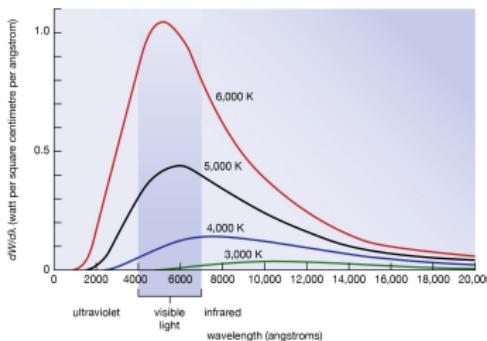
RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

Radiação do corpo negro é a radiação eletromagnética/térmica emitida por um corpo negro (um corpo opaco e não reflexivo idealizado).

Essa radiação possui um espectro específico de comprimentos de onda que depende da temperatura T do corpo. Por simplicidade vamos assumir que T é uniforme e constante.

A intensidade espectral da radiação do corpo negro atinge o pico em uma frequência que aumenta com a temperatura do corpo emissor:

- objetos em temperatura ambiente (aproximadamente 300 K) emitem radiação com intensidade de pico no infravermelho (Angstrom: $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$)



© Encyclopædia Britannica, Inc.

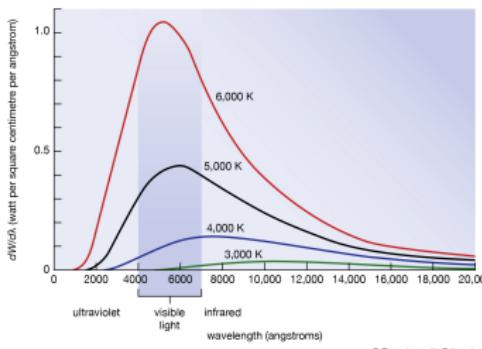
RADIAÇÃO DE CORPO NEGRO

Radiação do corpo negro é a radiação eletromagnética/térmica emitida por um corpo negro (um corpo opaco e não reflexivo idealizado).

Essa radiação possui um espectro específico de comprimentos de onda que depende da temperatura T do corpo. Por simplicidade vamos assumir que T é uniforme e constante.

A intensidade espectral da radiação do corpo negro atinge o pico em uma frequência que aumenta com a temperatura do corpo emissor:

- objetos em temperatura ambiente (aproximadamente 300 K) emitem radiação com intensidade de pico no infravermelho (Angstrom: $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$)



- a superfície do Sol (6.000 K) emite radiação do corpo negro que atinge o pico no centro da faixa visível.

LEIS DA RADIAÇÃO

Lei de deslocamento de Wien

LEIS DA RADIAÇÃO

Lei de deslocamento de Wien

A lei afirma que o comprimento de onda do pico de emissão para um corpo negro λ_{\max} (μm) com temperatura T (K) é dado por

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,6}{T}$$

LEIS DA RADIAÇÃO

Lei de deslocamento de Wien

A lei afirma que o comprimento de onda do pico de emissão para um corpo negro λ_{\max} (μm) com temperatura T (K) é dado por

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,6}{T}$$

A luz visível está na extensão entre 0,4 e 0,7 μm do espectro de comprimentos de onda.

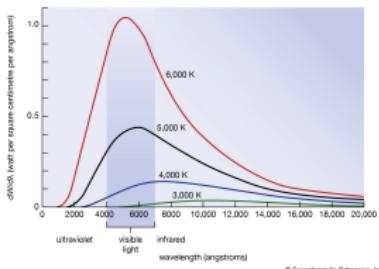
LEIS DA RADIAÇÃO

Lei de deslocamento de Wien

A lei afirma que o comprimento de onda do pico de emissão para um corpo negro λ_{\max} (μm) com temperatura T (K) é dado por

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,6}{T}$$

A luz visível está na extensão entre 0,4 e 0,7 μm do espectro de comprimentos de onda.



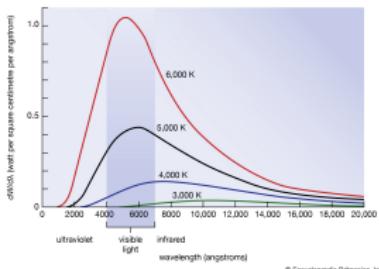
LEIS DA RADIAÇÃO

Lei de deslocamento de Wien

A lei afirma que o comprimento de onda do pico de emissão para um corpo negro λ_{\max} (μm) com temperatura T (K) é dado por

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,6}{T}$$

A luz visível está na extensão entre 0,4 e 0,7 μm do espectro de comprimentos de onda.



Quanto maior a temperatura de um corpo:

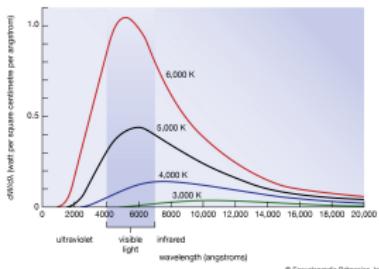
LEIS DA RADIAÇÃO

Lei de deslocamento de Wien

A lei afirma que o comprimento de onda do pico de emissão para um corpo negro λ_{\max} (μm) com temperatura T (K) é dado por

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,6}{T}$$

A luz visível está na extensão entre 0,4 e 0,7 μm do espectro de comprimentos de onda.



Quanto maior a temperatura de um corpo:

- maior é a quantidade de radiação que é emitida em qualquer comprimento de onda e em todo o espectro de comprimentos de onda (área abaixo da curva).

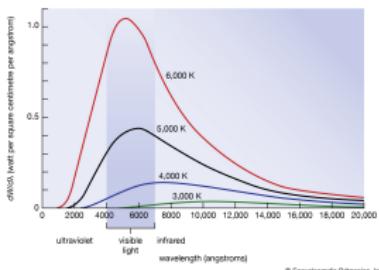
LEIS DA RADIAÇÃO

Lei de deslocamento de Wien

A lei afirma que o comprimento de onda do pico de emissão para um corpo negro λ_{max} (μm) com temperatura T (K) é dado por

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{2897,6}{T}$$

A luz visível está na extensão entre 0,4 e 0,7 μm do espectro de comprimentos de onda.



Quanto maior a temperatura de um corpo:

- maior é a quantidade de radiação que é emitida em qualquer comprimento de onda e em todo o espectro de comprimentos de onda (área abaixo da curva).
- o pico da radiação é deslocado para a esquerda.

EXEMPLO 1: LEI DE WIEN

Calcule o comprimento de onda (em μm) onde a intensidade da radiação eletromagnética é a máxima para o Sol (temperatura média de 6000 K) e para a Terra (temperatura média de 288 K = 15°C).

EXEMPLO 1: LEI DE WIEN

Calcule o comprimento de onda (em μm) onde a intensidade da radiação eletromagnética é a máxima para o Sol (temperatura média de 6000 K) e para a Terra (temperatura média de 288 K = 15°C).

Para o Sol: (radiação de onda curta)

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,6}{6000} \approx 0,48 \mu\text{m}$$

EXEMPLO 1: LEI DE WIEN

Calcule o comprimento de onda (em μm) onde a intensidade da radiação eletromagnética é a máxima para o Sol (temperatura média de 6000 K) e para a Terra (temperatura média de 288 K = 15°C).

Para o Sol: (radiação de onda curta)

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,6}{6000} \approx 0,48 \mu\text{m}$$

aproximadamente no centro do espectro da luz visível ao olho humano.

EXEMPLO 1: LEI DE WIEN

Calcule o comprimento de onda (em μm) onde a intensidade da radiação eletromagnética é a máxima para o Sol (temperatura média de 6000 K) e para a Terra (temperatura média de 288 K = 15°C).

Para o Sol: (radiação de onda curta)

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,6}{6000} \approx 0,48 \mu\text{m}$$

aproximadamente no centro do espectro da luz visível ao olho humano.

Para a Terra: (radiação de onda longa)

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,6}{288} \approx 10,0 \mu\text{m}$$

EXEMPLO 1: LEI DE WIEN

Calcule o comprimento de onda (em μm) onde a intensidade da radiação eletromagnética é a máxima para o Sol (temperatura média de 6000 K) e para a Terra (temperatura média de 288 K = 15°C).

Para o Sol: (radiação de onda curta)

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,6}{6000} \approx 0,48 \mu\text{m}$$

aproximadamente no centro do espectro da luz visível ao olho humano.

Para a Terra: (radiação de onda longa)

$$\lambda_{\max} = \frac{2897,6}{288} \approx 10,0 \mu\text{m}$$

o pico da radiação emitida pela Terra está no espectro do infravermelho.

LEIS DA RADIAÇÃO

Lei de Stefan-Boltzmann

LEIS DA RADIAÇÃO

Lei de Stefan-Boltzmann

Descreve a potência irradiada de um corpo negro em termos de temperatura.

LEIS DA RADIAÇÃO

Lei de Stefan-Boltzmann

Descreve a potência irradiada de um corpo negro em termos de temperatura.

A potência total E irradiada por unidade de superfície de um corpo negro em todos os comprimentos de onda por unidade de tempo (também conhecida como emissão radiante do corpo) é diretamente proporcional à quarta potência da temperatura termodinâmica T do corpo negro.

$$E = \frac{\text{Potência}}{\text{Área}} = \sigma T^4$$

LEIS DA RADIAÇÃO

Lei de Stefan-Boltzmann

Descreve a potência irradiada de um corpo negro em termos de temperatura.

A potência total E irradiada por unidade de superfície de um corpo negro em todos os comprimentos de onda por unidade de tempo (também conhecida como emissão radiante do corpo) é diretamente proporcional à quarta potência da temperatura termodinâmica T do corpo negro.

$$E = \frac{\text{Potência}}{\text{Área}} = \sigma T^4$$

sendo σ a constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,67037\dots \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$.

LEIS DA RADIAÇÃO

Lei de Stefan-Boltzmann

Descreve a potência irradiada de um corpo negro em termos de temperatura.

A potência total E irradiada por unidade de superfície de um corpo negro em todos os comprimentos de onda por unidade de tempo (também conhecida como emissão radiante do corpo) é diretamente proporcional à quarta potência da temperatura termodinâmica T do corpo negro.

$$E = \frac{\text{Potência}}{\text{Área}} = \sigma T^4$$

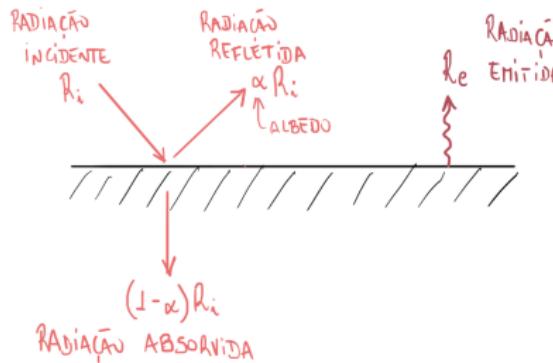
sendo σ a constante de Stefan-Boltzmann, $\sigma = 5,67037\dots \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$.

Um corpo que não absorve toda a radiação incidente (também chamado de corpo cinza) emite menos energia total que um corpo negro e é caracterizado por uma emissividade $\varepsilon < 1$:

$$E = \varepsilon \sigma T^4$$

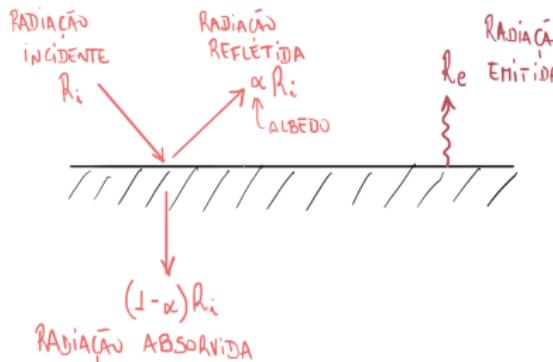
RADIAÇÃO

Radiação atinge uma superfície → reflexão e absorção



RADIAÇÃO

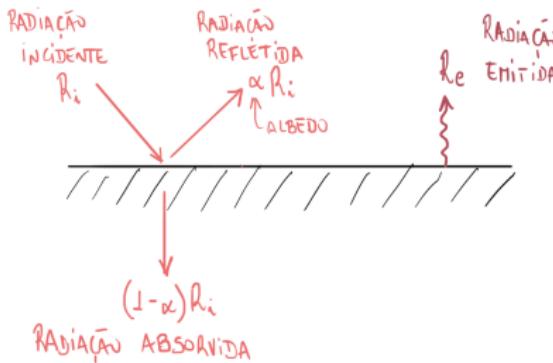
Radiação atinge uma superfície → reflexão e absorção



Albedo é a fração da radiação refletida em uma superfície. $\alpha = \frac{\text{rad. refletida}}{\text{rad. incidente}}$
 $(0 \leq \alpha \leq 1)$

RADIAÇÃO

Radiação atinge uma superfície → reflexão e absorção

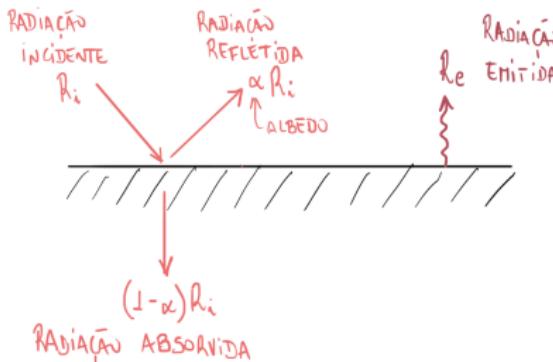


Albedo é a fração da radiação refletida em uma superfície. $\alpha = \frac{\text{rad. refletida}}{\text{rad. incidente}}$
 $(0 \leq \alpha \leq 1)$

- Árvores caducifólias $0,15 \leq \alpha \leq 0,18$

RADIAÇÃO

Radiação atinge uma superfície → reflexão e absorção

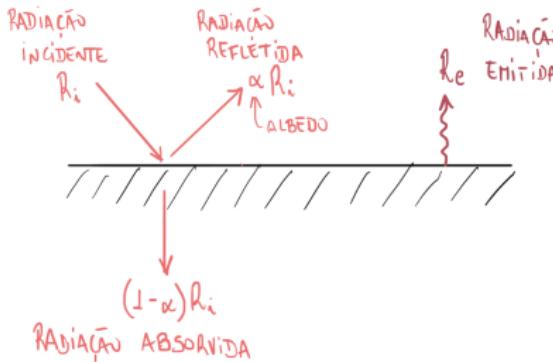


Albedo é a fração da radiação refletida em uma superfície. $\alpha = \frac{\text{rad. refletida}}{\text{rad. incidente}}$
 $(0 \leq \alpha \leq 1)$

- Árvores caducifólias $0,15 \leq \alpha \leq 0,18$
- Solo nu $\alpha = 0,17$

RADIAÇÃO

Radiação atinge uma superfície → reflexão e absorção

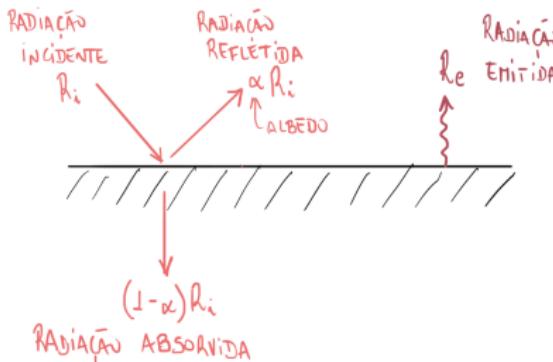


Albedo é a fração da radiação refletida em uma superfície. $\alpha = \frac{\text{rad. refletida}}{\text{rad. incidente}}$
 $(0 \leq \alpha \leq 1)$

- Árvores caducifólias $0,15 \leq \alpha \leq 0,18$
- Solo nu $\alpha = 0,17$
- Grama verde $\alpha = 0,25$

RADIAÇÃO

Radiação atinge uma superfície → reflexão e absorção

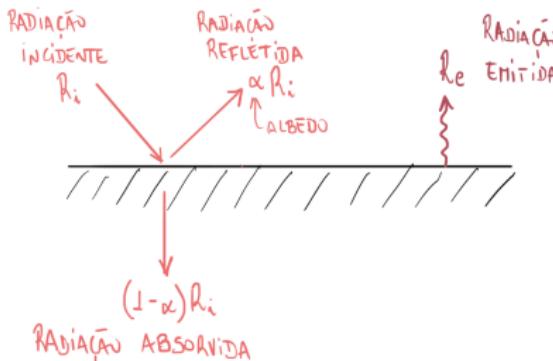


Albedo é a fração da radiação refletida em uma superfície. $\alpha = \frac{\text{rad. refletida}}{\text{rad. incidente}}$
 $(0 \leq \alpha \leq 1)$

- Árvores caducifólias $0,15 \leq \alpha \leq 0,18$
- Solo nu $\alpha = 0,17$
- Grama verde $\alpha = 0,25$
- Neve recente $0,80 \leq \alpha \leq 0,90$

RADIAÇÃO

Radiação atinge uma superfície → reflexão e absorção



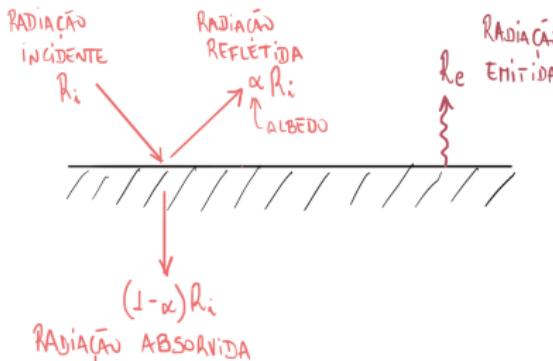
Albedo é a fração da radiação refletida em uma superfície. $\alpha = \frac{\text{rad. refletida}}{\text{rad. incidente}}$
 $(0 \leq \alpha \leq 1)$

- Árvores caducifólias $0,15 \leq \alpha \leq 0,18$
- Solo nu $\alpha = 0,17$
- Grama verde $\alpha = 0,25$
- Neve recente $0,80 \leq \alpha \leq 0,90$

Radiação Líquida R_n (resultante, que está sendo absorvida)

RADIAÇÃO

Radiação atinge uma superfície → reflexão e absorção



Albedo é a fração da radiação refletida em uma superfície. $\alpha = \frac{\text{rad. refletida}}{\text{rad. incidente}}$
 $(0 \leq \alpha \leq 1)$

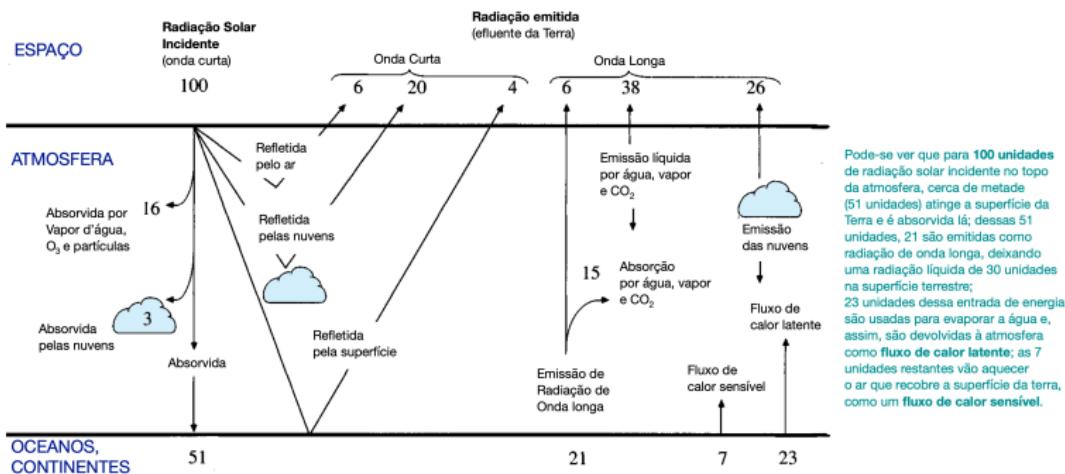
- Árvores caducifólias $0,15 \leq \alpha \leq 0,18$
- Solo nu $\alpha = 0,17$
- Grama verde $\alpha = 0,25$
- Neve recente $0,80 \leq \alpha \leq 0,90$

Radiação Líquida R_n (resultante, que está sendo absorvida)

$$R_n = R_i(1 - \alpha) - R_e$$

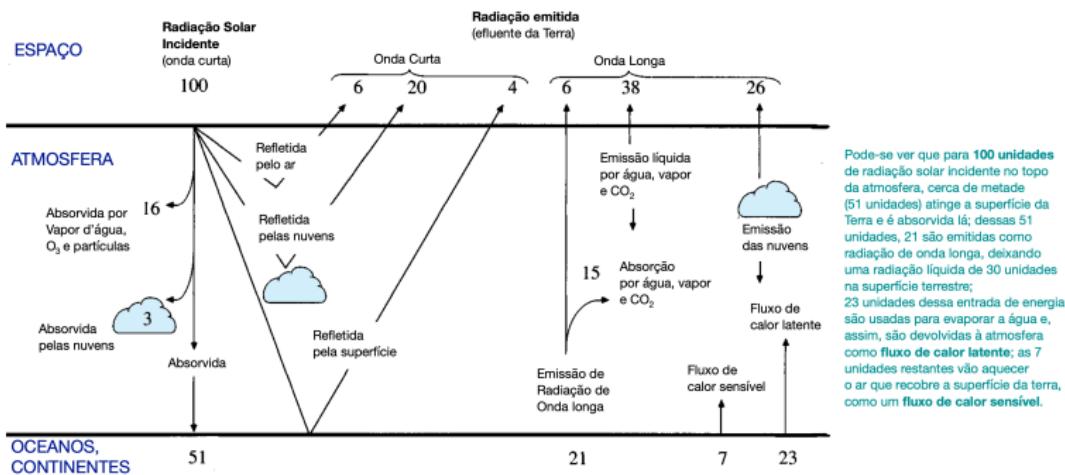
RADIAÇÃO

Radiação líquida na superfície da Terra



RADIAÇÃO

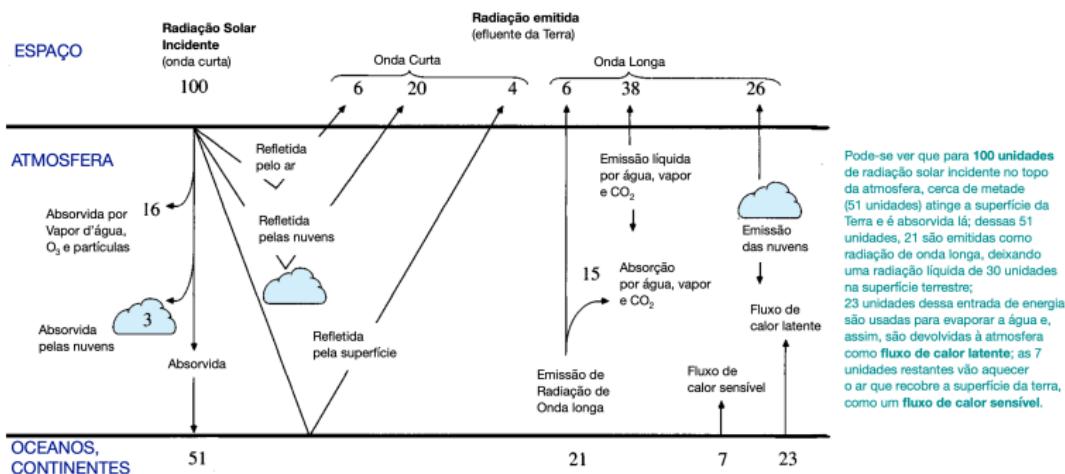
Radiação líquida na superfície da Terra



Radiação Líquida R_n (resultante, que está sendo absorvida)

RADIAÇÃO

Radiação líquida na superfície da Terra

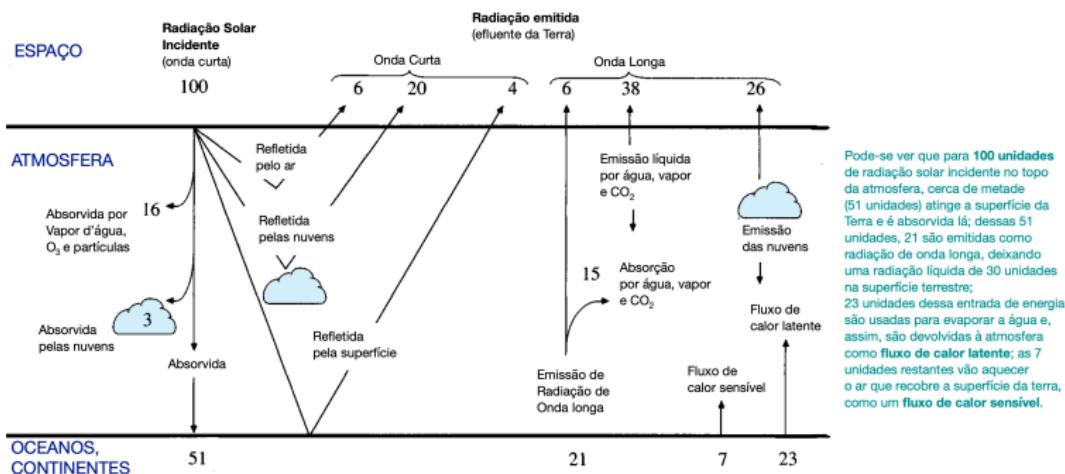


Radiação Líquida R_n (resultante, que está sendo absorvida)

$$R_n = (R_S + R_L)(1 - \alpha) - R_e$$

RADIAÇÃO

Radiação líquida na superfície da Terra



Radiação Líquida R_n (resultante, que está sendo absorvida)

$$R_n = (R_S + R_L)(1 - \alpha) - R_e$$

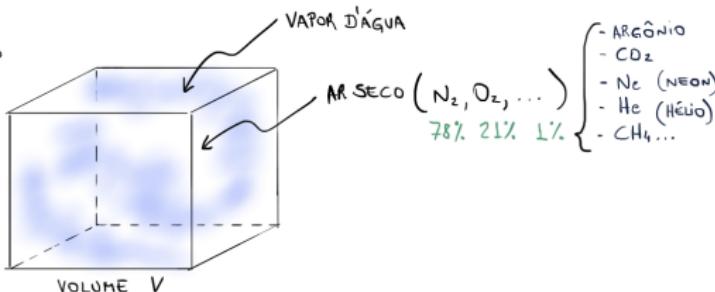
R_S (onda curta), R_L (onda longa)

MEDIDAS PARA VAPOR D'ÁGUA NA ATMOSFERA

MASSA DE AR ÚMIDO (m_a)

$$m_a = m_{v,a} + m_d$$

↑ MASSA DE AR SECO
↓ MASSA DE VAPOR D'ÁGUA



Umidade absoluta UA

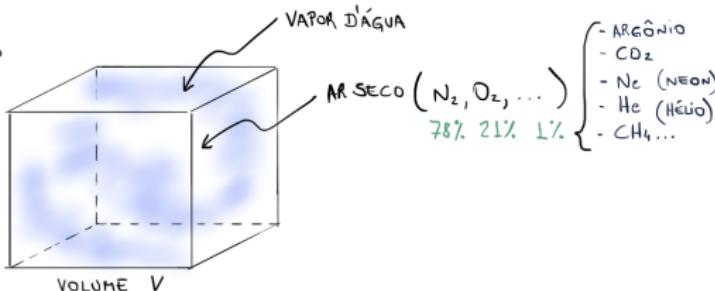
$$UA = \frac{m_v}{V} \quad (1)$$

MEDIDAS PARA VAPOR D'ÁGUA NA ATMOSFERA

MASSA DE AR ÚMIDO (m_a)

$$m_a = m_{v,d} + m_d$$

↑ MASSA DE AR SECO
↓ MASSA DE VAPOR D'ÁGUA



Umidade absoluta UA

$$UA = \frac{m_v}{V} \quad (1)$$

Razão de mistura w

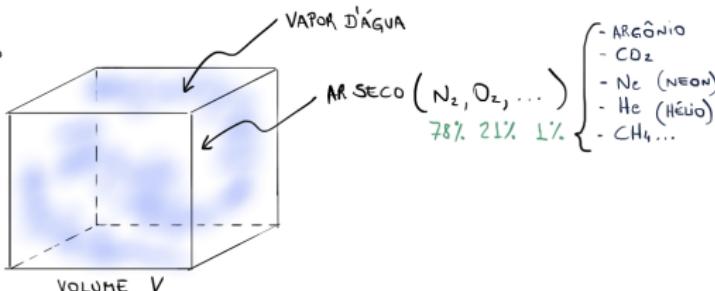
$$w = \frac{m_v}{m_d} \quad (2)$$

MEDIDAS PARA VAPOR D'ÁGUA NA ATMOSFERA

MASSA DE AR ÚMIDO (m_a)

$$m_a = m_{v,d} + m_d$$

↑ MASSA DE AR SECO
↓ MASSA DE VAPOR D'ÁGUA



Umidade absoluta UA

$$UA = \frac{m_v}{V} \quad (1)$$

Razão de mistura w

$$w = \frac{m_v}{m_d} \quad (2)$$

Umidade específica q_v

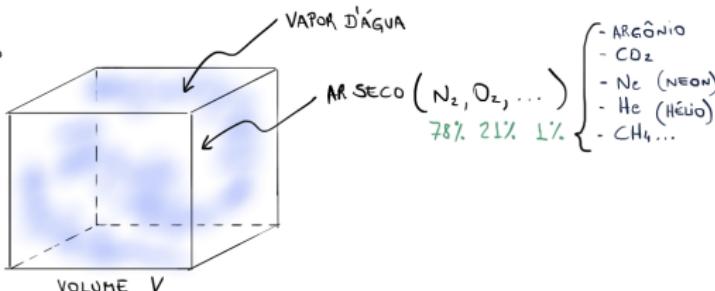
$$q_v = \frac{m_v}{m_a} = \frac{m_v}{m_d + m_v} \quad (3)$$

MEDIDAS PARA VAPOR D'ÁGUA NA ATMOSFERA

MASSA DE AR ÚMIDO (m_a)

$$m_a = m_v + m_d$$

↑ MASSA DE AR SECO
↓ MASSA DE VAPOR D'ÁGUA



Umidade absoluta UA

$$UA = \frac{m_v}{V} \quad (1)$$

Razão de mistura w

$$w = \frac{m_v}{m_d} \quad (2)$$

Umidade específica q_v

$$q_v = \frac{m_v}{m_a} = \frac{m_v}{m_d + m_v} \quad (3)$$

Geralmente $m_v < 4\% m_a \quad \therefore \quad q_v$ não difere de w por mais de 2%.

INTERFACE AR-ÁGUA



Há troca de moléculas de água nos dois sentidos, na interface água-ar (ou gelo-ar).

INTERFACE AR-ÁGUA



Há troca de moléculas de água nos dois sentidos, na interface água-ar (ou gelo-ar).
As moléculas de água estão em contínuo fluxo entre as fases líquida e gasosa.

INTERFACE AR-ÁGUA

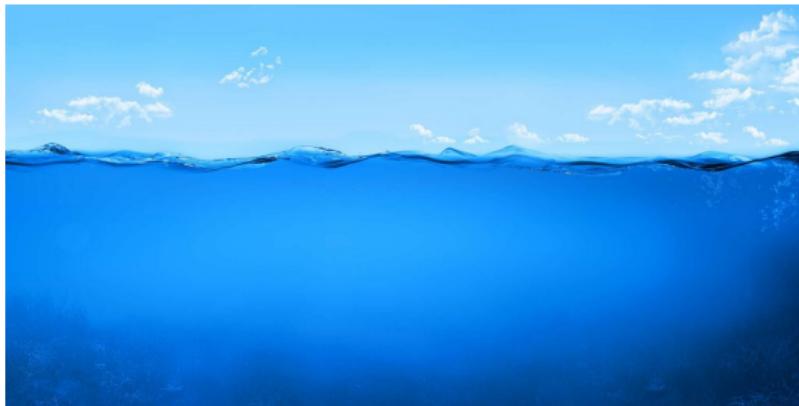


Há troca de moléculas de água nos dois sentidos, na interface água-ar (ou gelo-ar).

As moléculas de água estão em contínuo fluxo entre as fases líquida e gasosa.

- ▶ Evaporação, mais moléculas passam para a fase de vapor que retornam à fase líquida.

INTERFACE AR-ÁGUA

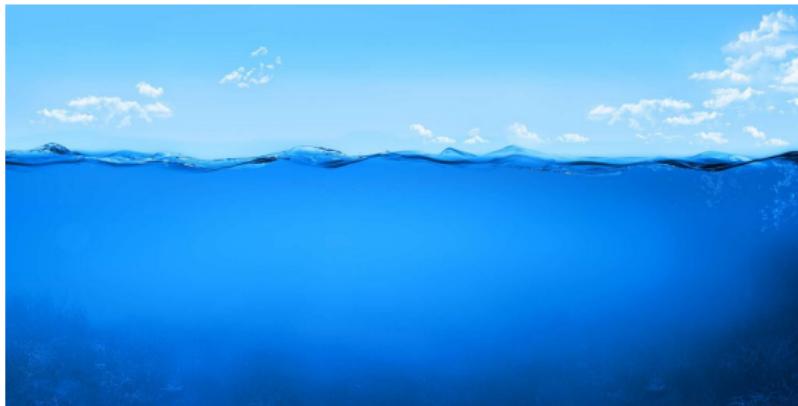


Há troca de moléculas de água nos dois sentidos, na interface água-ar (ou gelo-ar).

As moléculas de água estão em contínuo fluxo entre as fases líquida e gasosa.

- ▶ Evaporação, mais moléculas passam para a fase de vapor que retornam à fase líquida.
- ▶ Condensação, mais moléculas retornam à fase líquida que entram na fase de vapor.

INTERFACE AR-ÁGUA



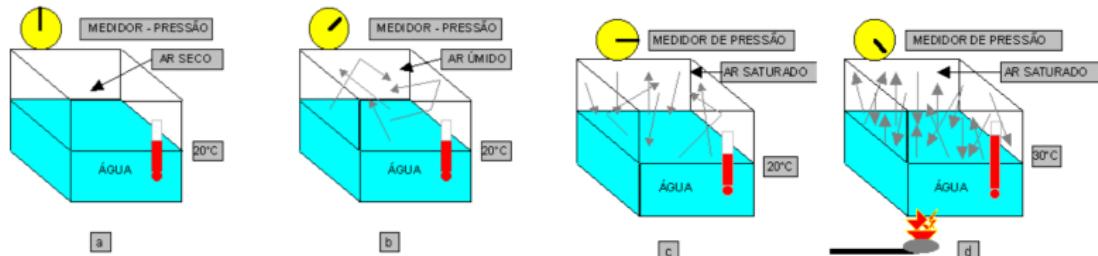
Há troca de moléculas de água nos dois sentidos, na interface água-ar (ou gelo-ar).

As moléculas de água estão em contínuo fluxo entre as fases líquida e gasosa.

- ▶ Evaporação, mais moléculas passam para a fase de vapor que retornam à fase líquida.
- ▶ Condensação, mais moléculas retornam à fase líquida que entram na fase de vapor.
- ▶ **Equilíbrio** → pressão exercida pelo vapor d'água é a **pressão de vapor de saturação**.

SATURAÇÃO

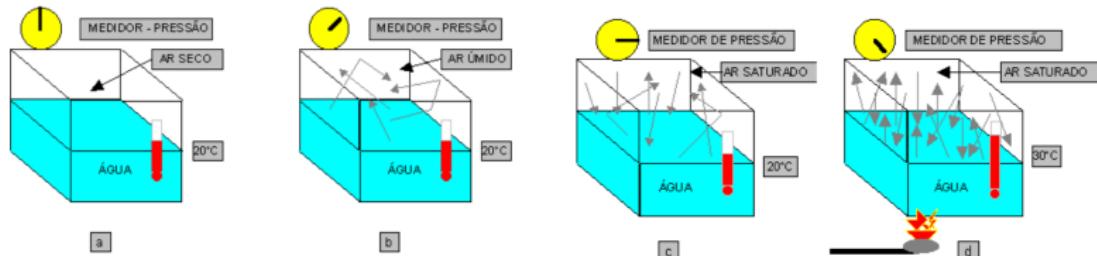
Imagine uma caixa fechada contendo metade do volume em água e metade em ar seco.



- Quando a água começa a evaporar, detecta-se um pequeno aumento na pressão do ar, como resultado do movimento das moléculas do vapor de água adicionadas ao ar pela evaporação (**pressão de vapor**).

SATURAÇÃO

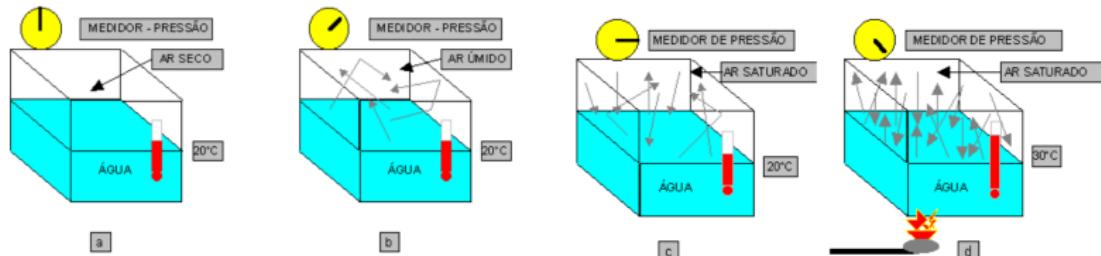
Imagine uma caixa fechada contendo metade do volume em água e metade em ar seco.



- Quando a água começa a evaporar, detecta-se um pequeno aumento na pressão do ar, como resultado do movimento das moléculas do vapor de água adicionadas ao ar pela evaporação (**pressão de vapor**).
- Eventualmente o número de moléculas de vapor retornando à superfície equilibrará o número das que a deixam. Neste ponto o ar está saturado (**Fig. 5.3c**).

SATURAÇÃO

Imagine uma caixa fechada contendo metade do volume em água e metade em ar seco.



- Quando a água começa a evaporar, detecta-se um pequeno aumento na pressão do ar, como resultado do movimento das moléculas do vapor de água adicionadas ao ar pela evaporação (**pressão de vapor**).
- Eventualmente o número de moléculas de vapor retornando à superfície equilibrará o número das que a deixam. Neste ponto o ar está saturado (**Fig. 5.3c**).
- Se a temperatura da água for aumentada, (**Fig. 5.3d**), a energia cinética das moléculas aumenta e elas poderão escapar da superfície de água como vapor mais facilmente. Inicialmente a evaporação prevalece, mas eventualmente um novo estado de equilíbrio é atingido. Mas agora, numa temperatura mais alta que antes, a concentração de vapor d'água é maior de forma que a pressão de vapor de saturação é maior.

Grimm (apostila de meteorologia)

RELAÇÕES MATEMÁTICAS - VAPOR D'ÁGUA

p = pressão total do ar

ρ_a = densidade do ar úmido

$R_a = R_d(1 + 0,608q_v)$ cte do ar úmido

e = pressão parcial do vapor d'água

ρ_v = densidade do vapor d'água

$R_v = R_d/0,622$ cte do vapor d'água

d = pressão parcial do ar seco

ρ_d = densidade do ar seco

$R_d = 287 \text{ J/(kg K)}$ cte do ar seco

Lei de Dalton: cada componente da mistura comporta-se como um gás ideal como se estivesse sozinho à temperatura T e no volume V da mistura. ∴ pressões parciais: $p = \sum p_i$

$$\underbrace{p}_{\substack{\text{pressão total} \\ \text{do ar}}} = \underbrace{e}_{\substack{\text{pressão parcial} \\ \text{do vapor d'água}}} + \underbrace{d}_{\substack{\text{pressão parcial} \\ \text{do ar seco}}} \quad (4)$$

RELAÇÕES MATEMÁTICAS - VAPOR D'ÁGUA

 p = pressão total do ar ρ_a = densidade do ar úmido $R_a = R_d(1 + 0,608q_v)$ cte do ar úmido e = pressão parcial do vapor d'água ρ_v = densidade do vapor d'água $R_v = R_d/0,622$ cte do vapor d'água d = pressão parcial do ar seco ρ_d = densidade do ar seco $R_d = 287 \text{ J/(kg K)}$ cte do ar seco

Lei de Dalton: cada componente da mistura comporta-se como um gás ideal como se estivesse sozinho à temperatura T e no volume V da mistura. ∴ pressões parciais: $p = \sum p_i$

$$\underbrace{p}_{\substack{\text{pressão total} \\ \text{do ar}}} = \underbrace{e}_{\substack{\text{pressão parcial} \\ \text{do vapor d'água}}} + \underbrace{d}_{\substack{\text{pressão parcial} \\ \text{do ar seco}}} \quad (4)$$

Lei dos gases ideais (ar úmido, vapor d'água e ar seco), T = temperatura absoluta:

$$p = \rho_a R_a T \quad (5)$$

$$e = \rho_v R_v T \quad (6)$$

$$d = \rho_d R_d T \quad (7)$$

RELAÇÕES MATEMÁTICAS - VAPOR D'ÁGUA

 p = pressão total do ar ρ_a = densidade do ar úmido $R_a = R_d(1 + 0,608q_v)$ cte do ar úmido e = pressão parcial do vapor d'água ρ_v = densidade do vapor d'água $R_v = R_d/0,622$ cte do vapor d'água d = pressão parcial do ar seco ρ_d = densidade do ar seco $R_d = 287 \text{ J/(kg K)}$ cte do ar seco

Lei de Dalton: cada componente da mistura comporta-se como um gás ideal como se estivesse sozinho à temperatura T e no volume V da mistura. \therefore pressões parciais: $p = \sum p_i$

$$\underbrace{p}_{\substack{\text{pressão total} \\ \text{do ar}}} = \underbrace{e}_{\substack{\text{pressão parcial} \\ \text{do vapor d'água}}} + \underbrace{d}_{\substack{\text{pressão parcial} \\ \text{do ar seco}}} \quad (4)$$

Lei dos gases ideais (ar úmido, vapor d'água e ar seco), T = temperatura absoluta:

$$p = \rho_a R_a T \quad (5)$$

$$e = \rho_v R_v T \quad (6)$$

$$d = \rho_d R_d T \quad (7)$$

Isolando d na Eq. (4) e subst. na Lei dos gases ideais (para ar seco) Eq. (7)

$$p - e = \rho_d R_d T \quad (8)$$

RELAÇÕES MATEMÁTICAS - VAPOR D'ÁGUA

 p = pressão total do ar ρ_a = densidade do ar úmido $R_a = R_d(1 + 0,608q_v)$ cte do ar úmido e = pressão parcial do vapor d'água ρ_v = densidade do vapor d'água $R_v = R_d/0,622$ cte do vapor d'água d = pressão parcial do ar seco ρ_d = densidade do ar seco $R_d = 287 \text{ J/(kg K)}$ cte do ar seco

Lei de Dalton: cada componente da mistura comporta-se como um gás ideal como se estivesse sozinho à temperatura T e no volume V da mistura. \therefore pressões parciais: $p = \sum p_i$

$$\underbrace{p}_{\substack{\text{pressão total} \\ \text{do ar}}} = \underbrace{e}_{\substack{\text{pressão parcial} \\ \text{do vapor d'água}}} + \underbrace{d}_{\substack{\text{pressão parcial} \\ \text{do ar seco}}} \quad (4)$$

Lei dos gases ideais (ar úmido, vapor d'água e ar seco), T = temperatura absoluta:

$$p = \rho_a R_a T \quad (5)$$

$$e = \rho_v R_v T \quad (6)$$

$$d = \rho_d R_d T \quad (7)$$

Isolando d na Eq. (4) e subst. na Lei dos gases ideais (para ar seco) Eq. (7)

$$p - e = \rho_d R_d T \quad (8)$$

A densidade do ar úmido é:

$$\underbrace{\rho_a}_{\substack{\text{densidade ar}}} = \underbrace{\rho_v}_{\substack{\text{densidade vapor}}} + \underbrace{\rho_d}_{\substack{\text{densidade ar seco}}} \quad (9)$$

RELAÇÃO ENTRE e , p E q_v

Substituindo $R_v = R_d/0,622$ na Eq. (6):

$$e = \rho_v \frac{R_d}{0,622} T \quad (10)$$

RELAÇÃO ENTRE e , p E q_v

Substituindo $R_v = R_d/0,622$ na Eq. (6):

$$e = \rho_v \frac{R_d}{0,622} T \quad (10)$$

Substituindo a Eq. (10) na Eq. (8) ($p - e = \rho_d R_d T$), obtemos :

$$p - \rho_v \frac{R_d}{0,622} T = \rho_d R_d T \quad \rightarrow \quad p = \left(\frac{\rho_v}{0,622} + \rho_d \right) R_d T \quad (11)$$

RELAÇÃO ENTRE e , p E q_v

Substituindo $R_v = R_d/0,622$ na Eq. (6):

$$e = \rho_v \frac{R_d}{0,622} T \quad (10)$$

Substituindo a Eq. (10) na Eq. (8) ($p - e = \rho_d R_d T$), obtemos :

$$p - \rho_v \frac{R_d}{0,622} T = \rho_d R_d T \quad \rightarrow \quad p = \left(\frac{\rho_v}{0,622} + \rho_d \right) R_d T \quad (11)$$

Dividindo a Eq. (11) pela Eq. (10):

$$\frac{p}{e} = \frac{\left(\frac{\rho_v}{0,622} + \rho_d \right) R_d T}{\rho_v \frac{R_d}{0,622} T} = 1 + \frac{\rho_d}{\rho_v} 0,622 \quad (12)$$

RELAÇÃO ENTRE e , p E q_v

Substituindo $R_v = R_d/0,622$ na Eq. (6):

$$e = \rho_v \frac{R_d}{0,622} T \quad (10)$$

Substituindo a Eq. (10) na Eq. (8) ($p - e = \rho_d R_d T$), obtemos :

$$p - \rho_v \frac{R_d}{0,622} T = \rho_d R_d T \quad \rightarrow \quad p = \left(\frac{\rho_v}{0,622} + \rho_d \right) R_d T \quad (11)$$

Dividindo a Eq. (11) pela Eq. (10):

$$\frac{p}{e} = \frac{\left(\frac{\rho_v}{0,622} + \rho_d \right) R_d T}{\rho_v \frac{R_d}{0,622} T} = 1 + \frac{\rho_d}{\rho_v} 0,622 \quad (12)$$

Substituindo $\rho_d = \rho_a - \rho_v$ na Eq. (12) e usando $q_v = \rho_v / \rho_a$:

$$\frac{p}{e} = 1 + \frac{(\rho_a - \rho_v)}{\rho_v} 0,622 = 1 + \frac{\rho_a}{\rho_v} 0,622 - 0,622 = \frac{0,622}{q_v} + 0,378 \quad (13)$$

RELAÇÃO ENTRE e , p E q_v

Substituindo $R_v = R_d/0,622$ na Eq. (6):

$$e = \rho_v \frac{R_d}{0,622} T \quad (10)$$

Substituindo a Eq. (10) na Eq. (8) ($p - e = \rho_d R_d T$), obtemos :

$$p - \rho_v \frac{R_d}{0,622} T = \rho_d R_d T \quad \rightarrow \quad p = \left(\frac{\rho_v}{0,622} + \rho_d \right) R_d T \quad (11)$$

Dividindo a Eq. (11) pela Eq. (10):

$$\frac{p}{e} = \frac{\left(\frac{\rho_v}{0,622} + \rho_d \right) R_d T}{\rho_v \frac{R_d}{0,622} T} = 1 + \frac{\rho_d}{\rho_v} 0,622 \quad (12)$$

Substituindo $\rho_d = \rho_a - \rho_v$ na Eq. (12) e usando $q_v = \rho_v / \rho_a$:

$$\frac{p}{e} = 1 + \frac{(\rho_a - \rho_v)}{\rho_v} 0,622 = 1 + \frac{\rho_a}{\rho_v} 0,622 - 0,622 = \frac{0,622}{q_v} + 0,378 \quad (13)$$

$$\frac{p}{e} = \frac{0,622}{q_v} + 0,378 \quad (14)$$

EXEMPLO 2: RELAÇÃO ENTRE e , p E q_v

Na temperatura $T = 0^\circ\text{C} = 275,15\text{ K}$ e pressão $p = 10^5\text{ Pa} \approx 1\text{ atm}$, tem-se que:

- $\rho_d = 1,27\text{ g/L}$
- $\rho_v = 4,85\text{ mg/L}$ (vapor d'água é menos denso que o ar seco \rightarrow empuxo)

Analise a ordem de grandeza de cada termo da equação: $\frac{p}{e} = \frac{0,622}{q_v} + 0,378$

É possível fazermos simplificações?

EXEMPLO 2: RELAÇÃO ENTRE e , p E q_v

Na temperatura $T = 0^\circ\text{C} = 275,15\text{ K}$ e pressão $p = 10^5\text{ Pa} \approx 1\text{ atm}$, tem-se que:

- $\rho_d = 1,27\text{ g/L}$
- $\rho_v = 4,85\text{ mg/L}$ (vapor d'água é menos denso que o ar seco \rightarrow empuxo)

Analise a ordem de grandeza de cada termo da equação: $\frac{p}{e} = \frac{0,622}{q_v} + 0,378$

É possível fazermos simplificações?

Solução: Conhecemos p , vamos calcular q_v , $e \rightarrow$ substituir na equação

$$q_v = \frac{\rho_v}{\rho_a} = \frac{0,00485}{1,27 + 0,00485} = 3,82 \times 10^{-3}$$

$$e = \rho_v \frac{R_d}{0,622} T = 610\text{ Pa}$$

EXEMPLO 2: RELAÇÃO ENTRE e , p E q_v

Na temperatura $T = 0^\circ\text{C} = 275,15\text{ K}$ e pressão $p = 10^5\text{ Pa} \approx 1\text{ atm}$, tem-se que:

- $\rho_d = 1,27\text{ g/L}$
- $\rho_v = 4,85\text{ mg/L}$ (vapor d'água é menos denso que o ar seco \rightarrow empuxo)

Analise a ordem de grandeza de cada termo da equação: $\frac{p}{e} = \frac{0,622}{q_v} + 0,378$

É possível fazermos simplificações?

Solução: Conhecemos p , vamos calcular q_v , $e \rightarrow$ substituir na equação

$$q_v = \frac{\rho_v}{\rho_a} = \frac{0,00485}{1,27 + 0,00485} = 3,82 \times 10^{-3}$$

$$e = \rho_v \frac{R_d}{0,622} T = 610\text{ Pa}$$

Substituindo:

$$\frac{p}{e} = \frac{0,622}{q_v} + 0,378 \rightarrow \frac{10^5}{610} = \frac{0,622}{3,82 \times 10^{-3}} + 0,378 \rightarrow 163,93 = 162,8 + 0,378$$

EXEMPLO 2: RELAÇÃO ENTRE e , p E q_v

Na temperatura $T = 0^\circ\text{C} = 275,15\text{ K}$ e pressão $p = 10^5\text{ Pa} \approx 1\text{ atm}$, tem-se que:

- $\rho_d = 1,27\text{ g/L}$
- $\rho_v = 4,85\text{ mg/L}$ (vapor d'água é menos denso que o ar seco \rightarrow empuxo)

Analise a ordem de grandeza de cada termo da equação: $\frac{p}{e} = \frac{0,622}{q_v} + 0,378$

É possível fazermos simplificações?

Solução: Conhecemos p , vamos calcular q_v , $e \rightarrow$ substituir na equação

$$q_v = \frac{\rho_v}{\rho_a} = \frac{0,00485}{1,27 + 0,00485} = 3,82 \times 10^{-3}$$

$$e = \rho_v \frac{R_d}{0,622} T = 610\text{ Pa}$$

Substituindo:

$$\frac{p}{e} = \frac{0,622}{q_v} + 0,378 \rightarrow \frac{10^5}{610} = \frac{0,622}{3,82 \times 10^{-3}} + 0,378 \rightarrow 163,93 = 162,8 + 0,378$$

Conclusão: para condições atmosféricas padrões é possível usar a simplificação:

$$\frac{p}{e} = \frac{0,622}{q_v} \rightarrow q_v = 0,622 \frac{e}{p} \blacksquare \quad (15)$$

PRESSÃO DE VAPOR DE SATURAÇÃO (e_s)

A pressão de vapor de saturação a uma certa temperatura T pode ser encontrada pela **Equação de Arden Buck:**

$$e_s = 611 \exp \left(\frac{17,27 T}{237,3 + T} \right) \quad (16)$$

PRESSÃO DE VAPOR DE SATURAÇÃO (e_s)

A pressão de vapor de saturação a uma certa temperatura T pode ser encontrada pela **Equação de Arden Buck:**

$$e_s = 611 \exp \left(\frac{17,27 T}{237,3 + T} \right) \quad (16)$$

T = temperatura do ar - em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$)

PRESSÃO DE VAPOR DE SATURAÇÃO (e_s)

A pressão de vapor de saturação a uma certa temperatura T pode ser encontrada pela **Equação de Arden Buck:**

$$e_s = 611 \exp \left(\frac{17,27 T}{237,3 + T} \right) \quad (16)$$

T = temperatura do ar - em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$)

e_s = pressão de vapor de saturação - em Pascal (Pa)

UMIDADE RELATIVA (R_h)

É definida como:

$$R_h = \frac{e}{e_s} \quad (17)$$

UMIDADE RELATIVA (R_h)

É definida como:

$$R_h = \frac{e}{e_s} \quad (17)$$

Também pode ser escrita em termos das razões da mistura (real e de saturação)

$$R_h = \frac{w}{w_s} \quad (18)$$

UMIDADE RELATIVA (R_h)

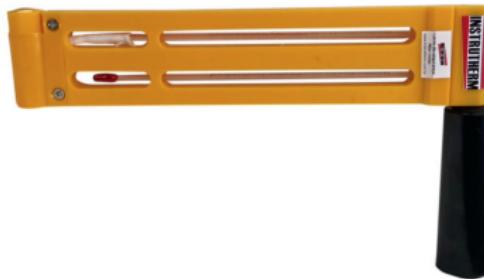
É definida como:

$$R_h = \frac{e}{e_s} \quad (17)$$

Também pode ser escrita em termos das razões da mistura (real e de saturação)

$$R_h = \frac{w}{w_s} \quad (18)$$

Vamos medir a **Umidade Relativa** desta sala no final da aula: **Psicrômetro!**



TEMPERATURA DO PONTO DE ORVALHO (T_d)

Temperatura na qual o vapor de água do ar passa ao estado líquido na forma de pequenas gotas por via da condensação, o chamado orvalho.

Formação do orvalho:



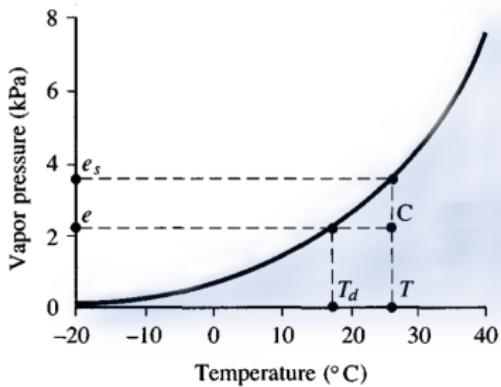
TEMPERATURA DO PONTO DE ORVALHO (T_d)

$$T_d = T_{\text{ar saturado de vapor d'água}}$$

TEMPERATURA DO PONTO DE ORVALHO (T_d)

$$T_d = T_{\text{ar saturado de vapor d'água}}$$

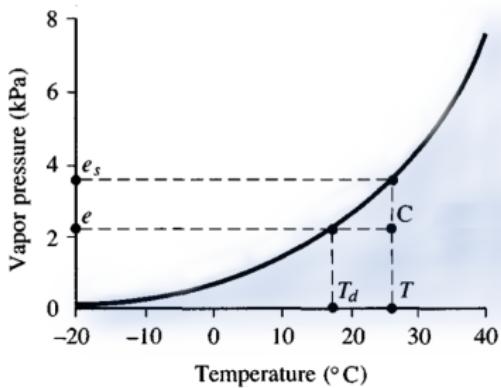
Equação de Arden-Buck:



TEMPERATURA DO PONTO DE ORVALHO (T_d)

$$T_d = T_{\text{ar saturado de vapor d'água}}$$

Equação de Arden-Buck:

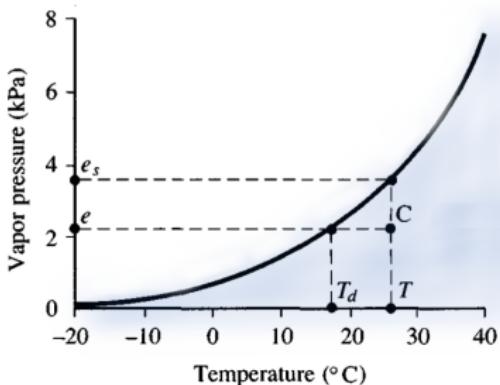


- Quanto mais quente o ar, mais vapor d'água ele consegue reter

TEMPERATURA DO PONTO DE ORVALHO (T_d)

$$T_d = T_{\text{ar saturado de vapor d'água}}$$

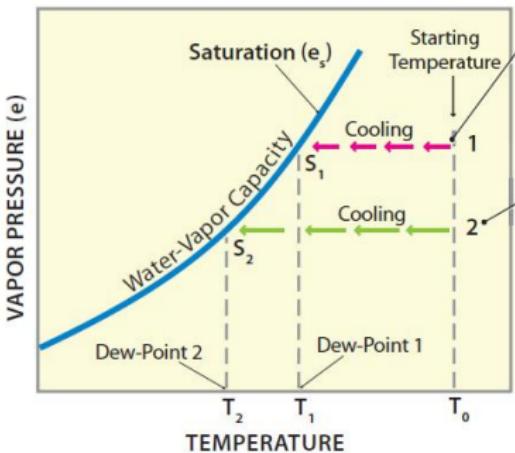
Equação de Arden-Buck:



- Quanto mais quente o ar, mais vapor d'água ele consegue reter
- A região de estados possíveis está abaixo da curva (em azul). Ar supersaturado de vapor d'água é possível teoricamente, mas na prática pequenas partículas no ar geram condensação.

TEMPERATURA DO PONTO DE ORVALHO (T_d)

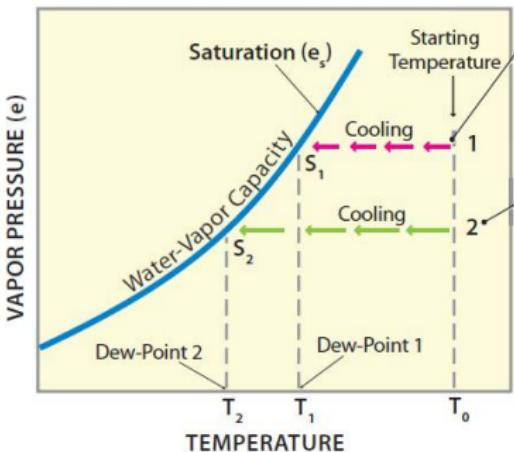
Resfriamento pode causar formação de orvalho. Linha azul: ar saturado em vapor d'água (e_s).



Estado 1: $(T_0, e_1) \rightarrow$ resfriamento isobárico \rightarrow **Estado saturado S_1** ($R_h = 100\%$)

TEMPERATURA DO PONTO DE ORVALHO (T_d)

Resfriamento pode causar formação de orvalho. Linha azul: ar saturado em vapor d'água (e_s).

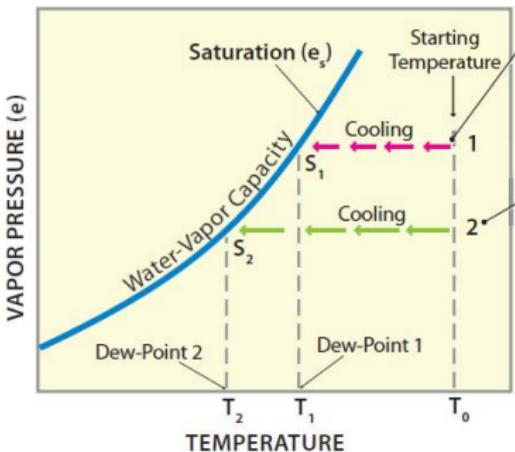


Estado 1: $(T_0, e_1) \rightarrow$ resfriamento isobárico \rightarrow **Estado saturado S_1** ($R_h = 100\%$)

T_1 é a temperatura de ponto de orvalho dessa massa de ar.

TEMPERATURA DO PONTO DE ORVALHO (T_d)

Resfriamento pode causar formação de orvalho. Linha azul: ar saturado em vapor d'água (e_s).



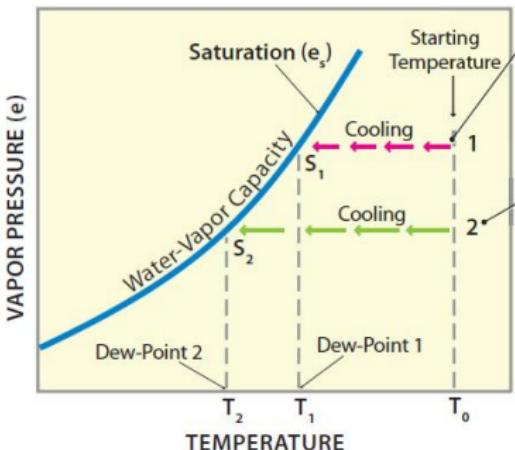
Estado 1: $(T_0, e_1) \rightarrow$ resfriamento isobárico \rightarrow **Estado saturado S_1** ($R_h = 100\%$)

T_1 é a temperatura de ponto de orvalho dessa massa de ar.

Estado 2: $(T_0, e_2) \rightarrow$ resfriamento isobárico \rightarrow **Estado saturado S_2** ($R_h = 100\%$)

TEMPERATURA DO PONTO DE ORVALHO (T_d)

Resfriamento pode causar formação de orvalho. Linha azul: ar saturado em vapor d'água (e_s).



Estado 1: $(T_0, e_1) \rightarrow$ resfriamento isobárico \rightarrow **Estado saturado S_1** ($R_h = 100\%$)

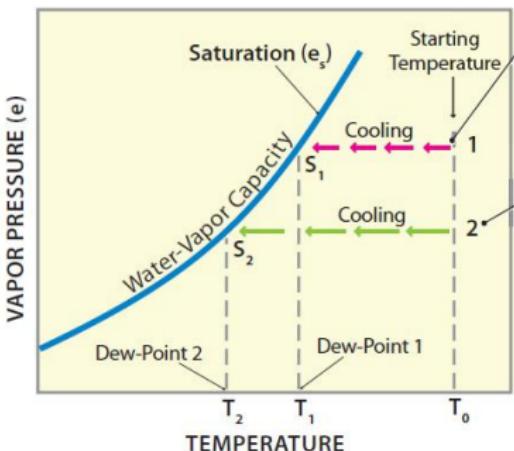
T_1 é a temperatura de ponto de orvalho dessa massa de ar.

Estado 2: $(T_0, e_2) \rightarrow$ resfriamento isobárico \rightarrow **Estado saturado S_2** ($R_h = 100\%$)

T_2 é a temperatura de ponto de orvalho dessa massa de ar.

TEMPERATURA DO PONTO DE ORVALHO (T_d)

Resfriamento pode causar formação de orvalho. Linha azul: ar saturado em vapor d'água (e_s).



Estado 1: $(T_0, e_1) \rightarrow$ resfriamento isobárico \rightarrow **Estado saturado S_1** ($R_h = 100\%$)

T_1 é a temperatura de ponto de orvalho dessa massa de ar.

Estado 2: $(T_0, e_2) \rightarrow$ resfriamento isobárico \rightarrow **Estado saturado S_2** ($R_h = 100\%$)

T_2 é a temperatura de ponto de orvalho dessa massa de ar.

- A massa de ar 2 tem menos vapor de água do que a massa de ar 1 e, como resultado, tem uma temperatura de ponto de orvalho mais baixa.

EXERCÍCIO

Em uma estação meteorológica foram realizadas as seguintes medições:

- $p = 100 \text{ kPa}$, $T_{\text{ar}} = 20^\circ\text{C}$, $T_d = 16^\circ\text{C}$ (Temperatura de ponto de orvalho)

Calcule:

1. e (pressão de vapor)

EXERCÍCIO

Em uma estação meteorológica foram realizadas as seguintes medições:

- $p = 100 \text{ kPa}$, $T_{\text{ar}} = 20^\circ\text{C}$, $T_d = 16^\circ\text{C}$ (Temperatura de ponto de orvalho)

Calcule:

1. e (pressão de vapor)
2. R_h (umidade relativa)

EXERCÍCIO

Em uma estação meteorológica foram realizadas as seguintes medições:

- $p = 100 \text{ kPa}$, $T_{\text{ar}} = 20^\circ\text{C}$, $T_d = 16^\circ\text{C}$ (Temperatura de ponto de orvalho)

Calcule:

1. e (pressão de vapor)
2. R_h (umidade relativa)
3. q_v (umidade específica)

EXERCÍCIO

Em uma estação meteorológica foram realizadas as seguintes medições:

- $p = 100 \text{ kPa}$, $T_{\text{ar}} = 20^\circ\text{C}$, $T_d = 16^\circ\text{C}$ (Temperatura de ponto de orvalho)

Calcule:

1. e (pressão de vapor)
2. R_h (umidade relativa)
3. q_v (umidade específica)
4. ρ_{ar} (densidade do ar úmido)

EXERCÍCIO

Em uma estação meteorológica foram realizadas as seguintes medições:

- $p = 100 \text{ kPa}$, $T_{\text{ar}} = 20^\circ\text{C}$, $T_d = 16^\circ\text{C}$ (Temperatura de ponto de orvalho)

Solução:

1. e (pressão de vapor)

EXERCÍCIO

Em uma estação meteorológica foram realizadas as seguintes medições:

- $p = 100 \text{ kPa}$, $T_{\text{ar}} = 20^\circ\text{C}$, $T_d = 16^\circ\text{C}$ (Temperatura de ponto de orvalho)

Solução:

1. e (pressão de vapor)

$$e = 611 \exp \left(\frac{17,27 T_d}{237,3 + T_d} \right) = 611 \exp \left(\frac{17,27 (16)}{237,3 + (16)} \right) = 1819 \text{ Pa}$$

EXERCÍCIO

Em uma estação meteorológica foram realizadas as seguintes medições:

- $p = 100 \text{ kPa}$, $T_{\text{ar}} = 20^\circ\text{C}$, $T_d = 16^\circ\text{C}$ (Temperatura de ponto de orvalho)

Solução:

1. e (pressão de vapor)

$$e = 611 \exp \left(\frac{17,27 T_d}{237,3 + T_d} \right) = 611 \exp \left(\frac{17,27 (16)}{237,3 + (16)} \right) = 1819 \text{ Pa}$$

2. R_h (umidade relativa)

EXERCÍCIO

Em uma estação meteorológica foram realizadas as seguintes medições:

- $p = 100 \text{ kPa}$, $T_{\text{ar}} = 20^\circ\text{C}$, $T_d = 16^\circ\text{C}$ (Temperatura de ponto de orvalho)

Solução:

1. e (pressão de vapor)

$$e = 611 \exp \left(\frac{17,27 T_d}{237,3 + T_d} \right) = 611 \exp \left(\frac{17,27 (16)}{237,3 + (16)} \right) = 1819 \text{ Pa}$$

2. R_h (umidade relativa)

$$e_s = 611 \exp \left(\frac{17,27 T}{237,3 + T} \right) = 611 \exp \left(\frac{17,27 (20)}{237,3 + (20)} \right) = 2339 \text{ Pa}$$

EXERCÍCIO

Em uma estação meteorológica foram realizadas as seguintes medições:

- $p = 100 \text{ kPa}$, $T_{\text{ar}} = 20^\circ\text{C}$, $T_d = 16^\circ\text{C}$ (Temperatura de ponto de orvalho)

Solução:

1. e (pressão de vapor)

$$e = 611 \exp \left(\frac{17,27 T_d}{237,3 + T_d} \right) = 611 \exp \left(\frac{17,27 (16)}{237,3 + (16)} \right) = 1819 \text{ Pa}$$

2. R_h (umidade relativa)

$$e_s = 611 \exp \left(\frac{17,27 T}{237,3 + T} \right) = 611 \exp \left(\frac{17,27 (20)}{237,3 + (20)} \right) = 2339 \text{ Pa}$$

$$R_h = \frac{e}{e_s} = \frac{1819}{2339} = 0,78 \quad \text{ou} \quad 78\%$$

EXERCÍCIO

Em uma estação meteorológica foram realizadas as seguintes medições:

- $p = 100 \text{ kPa}$, $T_{\text{ar}} = 20^\circ\text{C}$, $T_d = 16^\circ\text{C}$ (Temperatura de ponto de orvalho)

Solução:

1. e (pressão de vapor)

$$e = 611 \exp \left(\frac{17,27 T_d}{237,3 + T_d} \right) = 611 \exp \left(\frac{17,27 (16)}{237,3 + (16)} \right) = 1819 \text{ Pa}$$

2. R_h (umidade relativa)

$$e_s = 611 \exp \left(\frac{17,27 T}{237,3 + T} \right) = 611 \exp \left(\frac{17,27 (20)}{237,3 + (20)} \right) = 2339 \text{ Pa}$$

$$R_h = \frac{e}{e_s} = \frac{1819}{2339} = 0,78 \quad \text{ou} \quad 78\%$$

3. q_v (umidade específica)

EXERCÍCIO

Em uma estação meteorológica foram realizadas as seguintes medições:

- $p = 100 \text{ kPa}$, $T_{\text{ar}} = 20^\circ\text{C}$, $T_d = 16^\circ\text{C}$ (Temperatura de ponto de orvalho)

Solução:

1. e (pressão de vapor)

$$e = 611 \exp \left(\frac{17,27 T_d}{237,3 + T_d} \right) = 611 \exp \left(\frac{17,27 (16)}{237,3 + (16)} \right) = 1819 \text{ Pa}$$

2. R_h (umidade relativa)

$$e_s = 611 \exp \left(\frac{17,27 T}{237,3 + T} \right) = 611 \exp \left(\frac{17,27 (20)}{237,3 + (20)} \right) = 2339 \text{ Pa}$$

$$R_h = \frac{e}{e_s} = \frac{1819}{2339} = 0,78 \quad \text{ou} \quad 78\%$$

3. q_v (umidade específica)

$$q_v = 0,622 \frac{e}{p} = 0,622 \frac{1819}{100.000} = 0,0113 \frac{\text{kg de água}}{\text{kg de ar úmido}}$$

EXERCÍCIO

Em uma estação meteorológica foram realizadas as seguintes medições:

- $p = 100 \text{ kPa}$, $T_{\text{ar}} = 20^\circ \text{ C}$, $T_d = 16^\circ \text{ C}$ (ponto de orvalho)

Solução:

4. ρ_{ar} (densidade do ar úmido)

EXERCÍCIO

Em uma estação meteorológica foram realizadas as seguintes medições:

- $p = 100 \text{ kPa}$, $T_{\text{ar}} = 20^\circ \text{ C}$, $T_d = 16^\circ \text{ C}$ (ponto de orvalho)

Solução:

4. ρ_{ar} (densidade do ar úmido)

$$R_a = R_d(1 + 0,608q_v) = 287(1 + 0,608(0,00113)) = 289 \text{ J/(kg K)}$$

EXERCÍCIO

Em uma estação meteorológica foram realizadas as seguintes medições:

- $p = 100 \text{ kPa}$, $T_{\text{ar}} = 20^\circ \text{ C}$, $T_d = 16^\circ \text{ C}$ (ponto de orvalho)

Solução:

4. ρ_{ar} (densidade do ar úmido)

$$R_a = R_d(1 + 0,608q_v) = 287(1 + 0,608(0,00113)) = 289 \text{ J/(kg K)}$$

$$\rho_a = \frac{p}{R_a T} = \frac{100.000}{289(273,15 + 20)} = 1,18 \text{ kg/m}^3$$

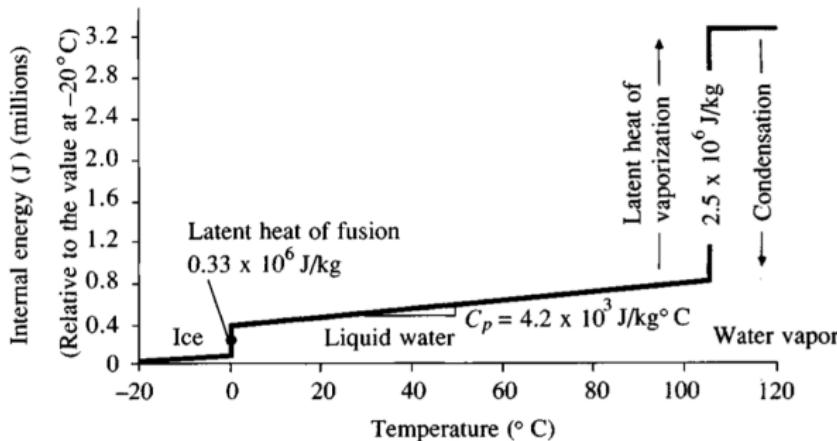
SENTINDO A EVAPORAÇÃO

Umedeça o dedo e chacoalhe: O que você sentiu? O que aconteceu?

SENTINDO A EVAPORAÇÃO

Umedeça o dedo e chacoalhe: O que você sentiu? O que aconteceu?

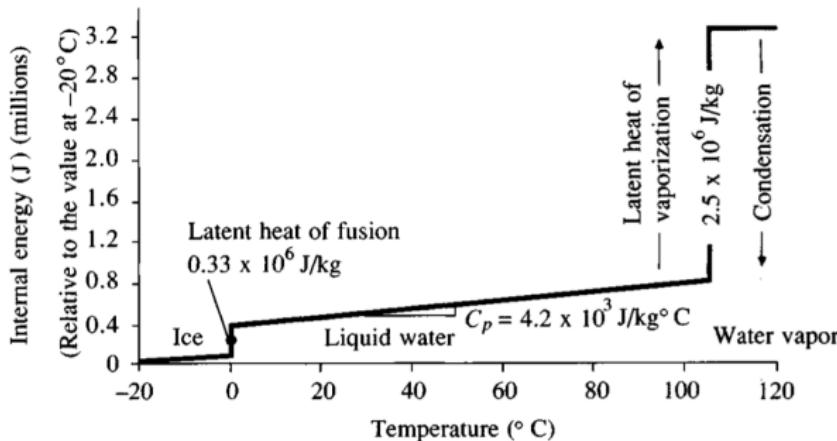
Calor específico e latente para água:



SENTINDO A EVAPORAÇÃO

Umedeça o dedo e chacoalhe: O que você sentiu? O que aconteceu?

Calor específico e latente para água:

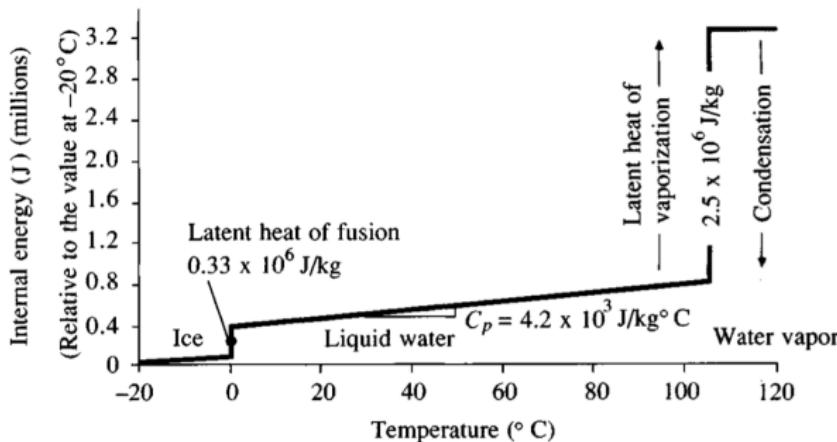


Calor latente é absorvido ou cedido para água mudar de estado (sólido, líquido ou gás).
O dedo perdeu calor que foi transferido p/ água mudar de estado (liq. → vapor)!

SENTINDO A EVAPORAÇÃO

Umedeça o dedo e chacoalhe: O que você sentiu? O que aconteceu?

Calor específico e latente para água:



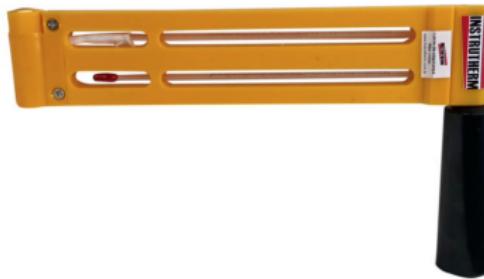
Calor latente é absorvido ou cedido para água mudar de estado (sólido, líquido ou gás).
O dedo perdeu calor que foi transferido p/ água mudar de estado (liq. → vapor)!

O calor latente de vaporização l_v varia ligeiramente com a temperatura:

$$l_v = 2,501 \times 10^6 - 2370 T \text{ (J/kg)} \quad T \text{ em } ^\circ\text{C} \quad (19)$$

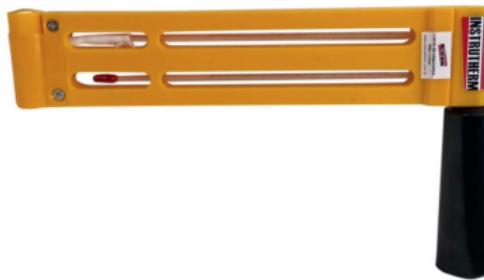
MEDINDO A UMIDADE RELATIVA

Demonstração do uso de um psicrômetro



MEDINDO A UMIDADE RELATIVA

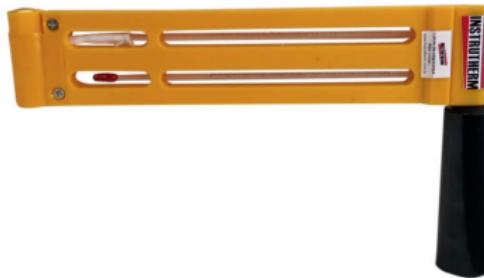
Demonstração do uso de um psicrômetro



Medir:

MEDINDO A UMIDADE RELATIVA

Demonstração do uso de um psicrômetro



Medir:

- ▶ Temperatura do bulbo seco

MEDINDO A UMIDADE RELATIVA

Demonstração do uso de um psicrômetro

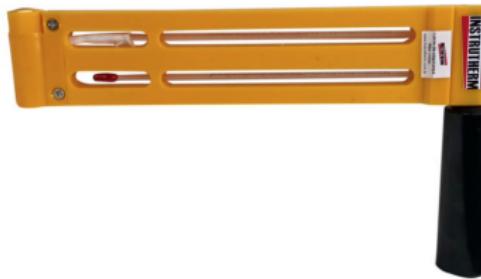


Medir:

- ▶ Temperatura do bulbo seco
- ▶ Temperatura do bulbo úmido

MEDINDO A UMIDADE RELATIVA

Demonstração do uso de um psicrômetro

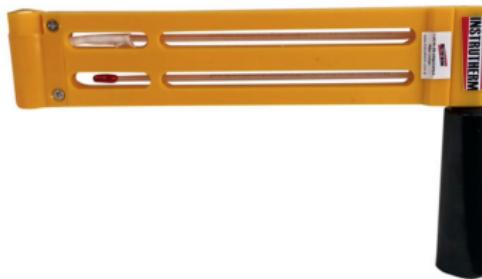


Medir:

- ▶ Temperatura do bulbo seco
- ▶ Temperatura do bulbo úmido
- ▶ Depressão do bulbo úmido

MEDINDO A UMIDADE RELATIVA

Demonstração do uso de um psicrômetro



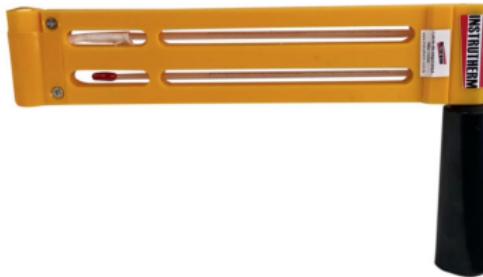
Medir:

- ▶ Temperatura do bulbo seco
- ▶ Temperatura do bulbo úmido
- ▶ Depressão do bulbo úmido

Leitura de R_h na tabela ou gráficos psicrométricos

MEDINDO A UMIDADE RELATIVA

Demonstração do uso de um psicrômetro



Medir:

- ▶ Temperatura do bulbo seco
- ▶ Temperatura do bulbo úmido
- ▶ Depressão do bulbo úmido

Leitura de R_h na tabela ou gráficos psicrométricos

Repetir 3 vezes

MEDINDO A UMIDADE RELATIVA

Tabela do Psicrômetro:

CALCULANDO A TEMPERATURA DO PONTO DE ORVALHO

Aproximação pela **fórmula de Magnus**:

- ▶ T : temperatura actual (Bulbo seco) do ar ($^{\circ}\text{C}$)
- ▶ UR: umidade relativa do ar (em percentagem)

$$\begin{aligned}\gamma(T, \text{UR}) &= \ln\left(\frac{\text{UR}}{100}\right) + \frac{bT}{c+T} \\ T_d &= \frac{c\gamma(T, \text{UR})}{b - \gamma(T, \text{UR})}\end{aligned}\tag{20}$$

$$b = 17.67; \quad c = 243.5^{\circ}\text{C}$$

Exercício para casa: Calcular a Temperatura do Ponto de Orvalho.

Há aparelhos capazes de medir o ponto de orvalho sobre uma vasta gama de temperaturas. Estes dispositivos consistem em um espelho de metal polido, que é resfriado enquanto o ar passa por ele. Assim, a temperatura na qual ocorre a formação de orvalho é, por definição, o ponto de orvalho.