***Refrigeração e Ar condicionado***

*Psicrometria*

*por*

*Christian Strobel*

*“Eu sei que eu não tenho sido um bom cristão, geralmente quando você está no seu blá blá blá, eu estou desenhando ou despindo mentalmente as paroquianas, mas me empresta U$40,000?”*

*- Homer J. Simpson*

# INTRODUÇÃO

A psicrometria é o estudo da mistura de ar seco e vapor de água, ou seja, do ar úmido. O termo psicrometria vem do grego “Psychro” que significa frio.

Possui inúmeras aplicações, sendo que as principais são:

- Climatização de ambientes e conforto térmico;

- Condensação em superfícies frias;

- Resfriamento evaporativo;

- Torres de Resfriamento;

- Demais aplicações que exigem o controle do conteúdo de vapor no ar.

## Composição do Ar

O ar atmosférico é composto de uma mistura de 4 componentes principais (gases), com traços de um número de outros, e vapor d'água. A composição do ar seco (apenas os 4 componentes) é relativamente constante variando levemente com o tempo, localização e altitude.

É razoável considerar todos os gases como uma substância homogênea (ar seco), mas tratar o vapor d'água separadamente porque este é passível de condensação nas condições de pressão e temperatura encontradas na atmosfera.

A composição padrão para o ar é mostrado na tabela 1.

***Tabela 1:*** *Composição Padrão para o Ar.*

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *Constituinte* | *Massa molecular* [*kg/kmol*] | *Fração molar* (%) |
| Oxigênio - O2 | 32,000 | 20,95 |
| Nitrogênio - N2 | 28,016 | 78,09 |
| Argônio - Ar | 39,944 | 0,93 |
| Dióxido de Carbono - CO2 | 44,010 | 0,03 |

Baseado na tabela acima, pode-se calcular a massa molecular do ar seco, Mar.

Onde, Mi é a massa molecular dos constituintes e Xi é a fração molar dos constituintes. Então:

Mar = 28,966 kg/kmol

A constante do gás para o ar seco, Ra, será:

Onde R = 8314,26 kJ/kmolK e é conhecida como Constante Universal dos Gases.

O vapor d'água por sua vez não é uma mistura, mas um composto químico. Desta forma, não se utiliza a técnica da proporcionalidade no cálculo da massa molecular.

 Soma-se apenas as massas dos elementos constituintes como indicado pela fórmula química. Para a H2O:

***Tabela 2:*** *Composição padrão da água.*

|  |  |
| --- | --- |
| ***Constituinte*** | ***Massa molecular [kg/kmol]*** |
| Hidrogênio - H | 1,01 |
| Oxigênio - O | 16,00 |

Então: Mvapor = 2 x 1,01 + 1 x 16,00 = 18,02 kg/kmol

A constante do gás para o vapor d'água será:

## Carta Psicrométrica/Propriedades Psicrométricas

É um diagrama que mostra o conjunto de propriedades termodinâmicas da mistura ar- vapor d'água.

Objetivos do estudo da carta:

1. Ter conhecimento dos pontos básicos da carta psicrométrica (conhecer as aproximações feitas no traçado da carta).
2. Ser capaz através do conhecimento das equações, de calcular qualquer propriedade psicrométrica para condições diferentes das condições em que a carta foi traçada. Ex.: pressão atmosférica.

A carta é feita com uma superposição de propriedades. Com um mínimo de duas propriedades, é possível obter várias outras.

## Lei dos gases

A partir de agora o ar atmosférico será considerado como uma mistura de dois gases perfeitos, ou seja,

E

A entalpia, h, é uma função somente da temperatura T. Por questão de convenção, a temperatura absoluta será representada por T e a temperatura em graus Celsius por t.

**Lei de Dalton**

No modelo de Dalton considera-se que cada componente da mistura ocupa todo o volume e está na temperatura da mistura. Considera-se também que tanto a mistura como os componentes comportam-se como gases ideais.

A Lei de Dalton diz que a pressão total de uma mistura de gases é a soma das pressões parciais de cada um dos componentes. A pressão parcial é a pressão que cada componente exerceria se, à mesma temperatura, ocupasse sozinho todo o volume da mistura. Um exemplo pode ser visualizado abaixo:



***Figura 1:*** *Lei de Dalton*

Desta forma, tem-se:

Considere uma mistura composta por dois gases ideais, A e B. Para a mistura, , onde . Para os componentes A e B tem-se, respectivamente, e . Fazendo as substituições necessárias,

Chega-se a mesma conclusão, de que . Porém, prova que esta lei só é válida para gases ideais. Desta forma, associando a lei de Dalton com a composição do ar úmido, tem-se que a pressão do ar úmido é:

Pode-se então expressar a Lei de Dalton em duas partes:

1. A pressão exercida por cada gás na mistura é independente da presença dos outros gases, e;
2. A pressão total exercida pela mistura é igual à soma das pressões parciais. O ar é considerado uma mistura de dois componentes, ar seco e vapor d'água.

***Tabela 3:*** *Exemplo de composição do ar a 101,325 kPa, TBS = 20°C e UR = 50%.*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | ***Ar seco*** | ***Vapor D'água*** | ***Ar Seco +Vapor D'água*** |
| ***T [°C]*** | 20 | 20 | 20 |
| ***mar [kg]*** | 1 | 0 | 1 |
| ***mv [kg]*** | 0 | 0,007264 | 0,007264 |
| ***par [Pa]*** | 100143 | 0 | 100143 |
| ***pv [Pa]*** | 0 | 1182 | 1182 |
| ***patm [Pa]*** | 100143 | 1182 | 101325 |

**Linha de saturação e temperatura de orvalho**

Inicialmente, traça-se em coordenadas *t* (temperatura) e *psat* (pressão de saturação do vapor d'água) para o vapor d'água puro (Tabela A-1 do livro do Stoecker ou Tabela A-2 do livro do Shapiro).



***Figura 2:*** *Gráfico t* (temperatura) versus *psat* (pressão de saturação do vapor d'água)

O vapor comporta-se como se nenhum traço de ar estivesse presente, ou seja, para uma dada pressão (pressão parcial) a condensação ocorrerá a mesma temperatura. Desta forma, o ar seco não afeta o comportamento do vapor d’água.

Devido a uma ligeira interação entre as moléculas de ar e vapor d'água, existe uma pequena diferença da ordem de 0,5% (Tabela A-2 do livro do Stoecker).

A figura anterior é considerada então válida para a mistura ar-vapor d'água. Neste caso, a ordenada deixa de ser *psat* e passa a ser *pv*  (pressão parcial do vapor d'água na mistura).

Conforme a ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineering*), têm-se as seguintes expressões válidas para o cálculo da pressão de vapor saturado do ar atmosférico:

Onde

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|   |   |   |
|   |   |   |
|   |   |   |
|   |   |   |
|   |   |   |

A temperatura de orvalho é a temperatura na qual tem início à condensação se o ar for resfriado a pressão parcial constante de maneira sensível (temperatura de saturação).

Conforme a ASHRAE, tem-se uma expressão para a temperatura de orvalho:

**Umidade Relativa (*ϕ, UR*)**

É definida como sendo a razão entre a fração molar do vapor d'água na mistura e a fração molar do vapor d'água no ar saturado à mesma temperatura e pressão total.



*pv*

***Figura 3:*** *Gráfico t* versus *psat* para outros valores de UR

**Umidade absoluta ou específica (W)**

A umidade absoluta (W) de uma amostra de ar úmido é a razão entre a massa de vapor d’água e a massa de ar seco desta amostra.

Aplicando a lei dos gases ideais para a mistura e substituindo na equação acima, tem-se:

Conhecendo a relação entre *W* e *pv* pode-se fazer uma mudança de coordenada e desta forma substituir a ordenada da carta psicrométrica por *W.*

**

***Figura 4:*** *Mudança de ordenada*

**Volume Específico (v)**

O volume específico é o volume ocupado por unidade de massa. Por se tratar de um gás ideal, há duas formas de se definir o volume específico:

Para o ar seco:

Para o vapor d’água:

Para o ar úmido então:



***Figura 5:*** *Linha de volume específico constante*

**Entalpia (H)**

A entalpia (*H*) é uma propriedade termodinâmica definida como a soma da energia interna de um sistema, (*U*) e do produto entre a pressão (p) e o volume (V) do sistema:

A entalpia tem de ser definida em relação a um ponto de referência. Na psicrometria, a pressão de referência é a pressão atmosférica e a temperatura de referência é 0°C.

Para uma mistura, tem-se:

Ou em termos específicos,

Como visto em termodinâmica, a definição para o calor específico a pressão constante para um gás ideal é dado por:

Ou seja,

Para a temperatura de referencia de 0°C,

Desta forma, a entalpia pode ser expressa por:



***Figura 6:*** *Linha de entalpia específica constante*

**Temperatura Bulbo Seco (TBS) e Temperatura Bulbo Úmido (TBU)**

A temperatura de bulbo seco (TBS) é a temperatura do ar medida com um termômetro ordinário, e não é influenciado pela umidade relativa do ar.

A temperatura de orvalho é a temperatura em que a pressão parcial de vapor d’água é igual à pressão de vapor saturado.

Já a temperatura de bulbo úmido (TBU), é a temperatura mais baixa que pode atingir o ar úmido quando é arrefecido apenas devido à evaporação de água. A temperatura do bulbo molhado é sempre inferior à temperatura do bulbo seco, exceto quando o ar está saturado, neste caso as duas temperaturas são iguais. Quanto mais seco estiver o ar, maior será a diferença entre a temperatura de bulbo seco e a de bulbo úmido.

O instrumento utilizado para realizar tais medições é chamado de psicrômetro, e uma representação pode ser visualizada abaixo:



***Figura 7:*** *Psicrômetro*

**Saturador Adiabático**

Um saturador adiabático é um dispositivo onde o ar ambiente passa por um duto onde há pulverização de água em seu interior. A área superficial de contato entre a água e o ar que está circulando pelo dispositivo é tal que o ar sai deste totalmente saturado, visto ter atingido o equilíbrio termodinâmico com a água. Não há interações de calor entre o dispositivo e o ar (adiabático) e nem trabalho sendo fornecido ao fluido. Apenas há reposição de água do saturador.



***Figura 8:*** *Saturador Adiabático*

É utilizado quando se deseja conhecer propriedades do ar ambiente tal como a umidade absoluta, conhecendo-se apenas a pressão e temperatura do ar ambiente.

Se a umidade do ambiente for menor que 100%, a água evapora. Como dito anteriormente, por se tratar de um saturador, a mistura sai com umidade relativa de 100%. Um fluxo de água é adicionada na mesma taxa na qual a água é evaporada.

Realizando um balanço de massa e de energia, temos:

- Balanço de massa de ar seco:

- Balanço de massa de água:

- Balanço de energia:

Chega-se a:

Onde *hl* é a entalpia do líquido saturado na temperatura de bulbo úmido da saída do saturador adiabático. Desta forma é possível obter a umidade absoluta do ar de entrada, ou seja, conhecer alguns parâmetros do ambiente.

**Carta Psicrométrica**

A carta psicrométrica fornece quaisquer propriedades desejadas, desde que sejam conhecidas pelo menos duas propriedades. Relembrando, as linhas de cada propriedade são mostradas a seguir, na figura 9. Nela, é possível ligar linhas que identificam um processo psicrométrico, ou seja, de mudança de uma temperatura UR para outro ponto, identificando, assim, os ganhos de energia que o fluido fornece ou ganha.



***Figura 9:*** *Carta Psicrométrica*

**Processos psicrométricos**

Os processos psicrométricos podem ser:

- Aquecimento e resfriamento sensível: Não há variação na umidade absoluta ou específica. O teor de umidade no ar não se altera, apenas a temperatura é sensibilizada. Desta forma, o processo ocorre em uma linha horizontal, paralela a linha de umidade absoluta. Há apenas troca de calor sensível.

- Umidificação e desumidificação pura: Não há variação na temperatura de bulbo seco. Apenas a umidade absoluta ou específica é alterada. Desta forma, o processo ocorre em uma linha vertical, paralela a linha de TBS. Há apenas a troca de calor latente.

- Aquecimento e Umidificação: corresponde a um processo que vai de um ponto a um ponto a nordeste do mesmo. Há troca de calor sensível e latente, sendo cada um correspondente aos catetos do triângulo formado pelo processo.

- Resfriamento e Umidificação: corresponde a um processo que vai de um ponto a um ponto a noroeste do mesmo. Há troca de calor sensível e latente, sendo cada um correspondente aos catetos do triângulo formado pelo processo.

- Aquecimento e Desumidificação: corresponde a um processo que vai de um ponto a um ponto a sudeste do mesmo. Há troca de calor sensível e latente, sendo cada um correspondente aos catetos do triângulo formado pelo processo.

- Resfriamento e Desumidificação: corresponde a um processo que vai de um ponto a um ponto a sudoeste do mesmo. Há troca de calor sensível e latente, sendo cada um correspondente aos catetos do triângulo formado pelo processo.

- Umidificação Adiabática: Quando ocorre um resfriamento e umidificação a uma entalpia constante. Desta forma, não há calor trocado.

- Desumidificação Química: Quando ocorre um aquecimento com desumidificação a uma entalpia constante. Desta forma não há calor trocado.



***Figura 10:*** *Processos psicrométricos*

*Calor total do processo:*

*Calor sensível do processo - horizontal (ponto o: ângulo reto no triângulo):*

*Calor latente do processo – vertical:*

*Massa de água vaporizada ou condensada no prcesso:*

**Exercícios**

1. Complete a tabela abaixo:

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ***UR (%)*** | 50 | 60 | 36,16 | 78,82 | 82,66 | 49,33 | 30 | 80 | 50 |
| ***W (g/kg)*** | 12 | 8,6 | 8 | 6 | 12,1 | 9,75 |  | 19 |  |
| ***TBU (°C)*** | 20,5 | 15 | 17 | 8,2 | 18 | 17,8 |  |  | 20 |
| ***TBS (°C)*** | 28 | 19,8 | 27 | 10 | 20 | 25 |  |  |  |
| ***v (m3/kg)*** | 0,87 | 0,8417 | 0,8613 | 0,81 | 0,8468 | 0,858 |  |  |  |
| ***Tor (°C)*** | 17 | 11,9 | 10,7 | 6,5 | 17 | 13,7 | 5 |  |  |
| ***h (kJ/kg)*** | 59,2 | 41,9 | 47,54 | 25,18 | 50,84 | 50 |  |  |  |

1. Ar atmosférico na vazão de 5 m3/s é resfriado da temperatura de 35°C e umidade relativa de 80% para 22°C e umidade relativa de 70%. Determine a vazão mássica de condensado formado e o calor latente retirado.
2. Ar atmosférico na vazão de 10 m3/s é aquecido a temperatura de 5°C e umidade relativa de 30% para 24°C e umidade relativa 70%. Determine a vazão mássica de água vaporizada e o calor sensível fornecido.
3. Determine as propriedades da mistura de 70% de ar atmosférico na temperatura de 35°C e 70% de umidade relativa com 30% de ar de retorno na temperatura de 20°C e 70% de umidade relativa.
4. Determine a temperatura e umidade relativa necessária no ar atmosférico para que se misture na proporção de 1:1 com ar de retorno na temperatura de 20°C e 60% de umidade relativa para que se obtenha ar na temperatura de 24°C e 75% de umidade relativa.
5. Determine a quantidade total de calor retiradoe a vazão mássica de condensado formada ao se resfriar ar atmosférico na temperatura de 35°C e umidade relativa de 60% para 22 °C e umidade relativa de 80% com 30% de ar de retorno.
6. Determine a quantidade total de calor fornecido e a vazão mássica de água vaporizada ao se aquecer ar atmosférico da temperatura de 8°C e umidade relativa de 80% para 24°C e umidade relativa de 70% com 40% de ar de retorno.