

AVAC, UM MANUAL DE APOIO FUNDAMENTOS

ANTÓNIO JOSÉ DA ANUNCIADA SANTOS



AUTOR

António José da Anunciada Santos

TÍTULO

AVAC, Um Manual de Apoio: Fundamentos
Volume 1

EDIÇÃO

Publindústria, Edições Técnicas
Praça da Corujeira n.º 38 · 4300-144 PORTO
www.publindustria.pt

DISTRIBUIÇÃO

Engebook - Conteúdos de Engenharia e Gestão
Tel. 220 104 872 · Fax 220 104 871 · E-mail: apoiocliente@engebook.com · www.engebook.com

REVISÃO

Cooperativa 31

DESIGN

Cooperativa 31

IMPRESSÃO

Espanha
Agosto, 2017

DEPÓSITO LEGAL

429502/17



A **cópia ilegal** viola os direitos dos autores.
Os prejudicados somos todos nós.

Copyright © 2017 | Publindústria, Produção de Comunicação, Lda.

Todos os direitos reservados a Publindústria, Produção de Comunicação, Lda. para a língua portuguesa.

A reprodução desta obra, no todo ou em parte, por fotocópia ou qualquer outro meio, seja eletrónico, mecânico ou outros, sem prévia autorização escrita do Editor, é ilícita e passível de procedimento judicial contra o infrator.

Nenhuma parte desta publicação poderá ser reproduzida, no todo ou em parte, sob qualquer forma ou meio, seja eletrónico, mecânico, de fotocópia, de gravação ou outros sem autorização prévia por escrito do autor.

Este livro encontra-se em conformidade com o novo Acordo Ortográfico de 1990, respeitando as suas indicações genéricas e assumindo algumas opções específicas.

CDU

697 Aquecimento, ventilação e condicionamento de ar em edificações

ISBN

Papel: 978-989-723-250-3

E-book: 978-989-723-251-0

Engebook – Catalogação da publicação

Família: Refrigeração/AVAC

Subfamília: Refrigeração/AVAC

AVAC, UM MANUAL DE APOIO FUNDAMENTOS

ANTÓNIO JOSÉ DA ANUNCIADA SANTOS

ÍNDICE

1. FUNDAMENTOS DO AR CONDICIONADO	1
1.1. INTRODUÇÃO	1
1.2. PSICROMETRIA.....	1
1.2.1. Descrição	1
1.2.2. Ar atmosférico.....	1
1.2.3. Parâmetros do ar húmido.....	4
1.2.3.1. Temperatura de bolbo seco do ar	5
1.2.3.2. Humidade absoluta.....	5
1.2.3.3. Humidade relativa	6
1.2.3.4. Temperatura de orvalho do ar	8
1.2.3.5. Temperatura de bolbo húmido do ar	8
1.2.3.6. Entalpia do ar húmido	9
1.2.3.7. Volume específico do ar	10
1.2.4. Diagrama psicrométrico	10
1.2.5. Processos psicrométricos	12
1.2.5.1. Aquecimento sensível	12
1.2.5.2. Arrefecimento com desumidificação	13
1.2.5.3. Humidificação.....	15
1.2.5.4. Mistura de caudais.....	16
1.3. CONDIÇÕES EXTERIORES E INTERIORES	17
1.3.1. Descrição	17
1.3.2. Condições exteriores.....	18
1.3.3. Condições interiores	23
1.3.4. Conforto térmico	23
1.3.4.1. Descrição	23
1.3.4.2. Parâmetros de conforto	24
1.3.4.3. Balanço térmico ao corpo.....	28
1.3.4.4. Equação do conforto térmico	30
1.3.4.5. Medição do conforto térmico.....	32
1.3.5. Qualidade do ar interior.....	33
1.3.5.1. Descrição	33

1.3.5.2. Contaminantes do ar	33
1.3.5.3. Caudais de ar novo	36
1.3.6. Princípios Acústicos	37
1.3.6.1. Descrição	37
1.3.6.2. Pressão e potência sonora	37
1.3.6.3. Sensibilidade humana	39
1.3.6.4. Medição sonora	41
1.4. INTRODUÇÃO À DIFUSÃO DE AR	43
1.4.1 Princípios da distribuição do ar	43
1.4.1.1. Tipos de fluxos de ar	43
1.4.1.2. Efeito de Coandă	43
1.4.1.3. Alcance ou flexa	44
1.4.2. Métodos de difusão de ar	44
1.4.2.1. Sistema de mistura	45
1.4.2.2. Fluxo laminar	46
1.4.2.3. Difusão por deslocamento	47
2. CARGAS TÉRMICAS	49
2.1. INTRODUÇÃO	49
2.2. TIPOS DE CARGAS TÉRMICAS E MODELOS DE CÁLCULO	49
2.3. CARGAS DE AQUECIMENTO	50
2.4. CARGAS DE ARREFECIMENTO	51
2.5. CARGAS POR TRANSMISSÃO	52
2.5.1. Envolvente opaca, em contato com o ar	52
2.5.1.1. Fluxo de calor paredes	53
2.5.1.2. Fluxo de calor coberturas e pavimentos	57
2.5.2. Envolvente opaca, em contato com o terreno	59
2.5.3. Envolvente envidraçada	60
2.6. CARGAS POR AR NOVO	61
2.6.1. Infiltrações	61
2.6.2. Ventilação	62
2.7. CARGAS POR RADIAÇÃO SOLAR	63
2.7.1. Envolvente opaca	63
2.7.2. Envolvente envidraçada	66
2.8. GANHOS INTERNOS	71
2.8.1. Ocupantes	71
2.8.2. Iluminação	72
2.8.3. Equipamentos	74
2.9. CARGAS TOTAIS	76
2.10. DADOS PRÁTICOS PARA ESTIMATIVA DA CARGA DE ARREFECIMENTO	77
2.11. ESTRUTURA DE UMA FOLHA DE CÁLCULO SIMPLIFICADA	78
2.12. ARMAZENAMENTO E ZONEAMENTO TÉRMICO	81

2.13. CONDIÇÕES DE AR DE ENTRADA NO ESPAÇO	83
2.14. EXERCÍCIOS	86
3. MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS DE AVAC	91
3.1. INTRODUÇÃO	91
3.2. CONSTITUIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO BÁSICA DOS SISTEMAS.....	91
3.3. EQUIPAMENTOS AUTÓNOMOS	92
3.3.1. Descrição	92
3.3.2. Sistema de compressão mecânica	93
3.3.3. Parâmetros termodinâmicos	94
3.3.4. Equipamentos de Janela	95
3.3.4.1. Descrição	95
3.3.4.2. Constituição e funcionamento	95
3.3.4.3. Cuidados de instalação e manutenção	97
3.3.4.4. Características de seleção	99
3.3.5. Equipamentos <i>Split</i> e <i>Multisplit</i>	100
3.3.5.1. Descrição	100
3.3.5.2. Tipos e classificações.....	101
3.3.5.3. Constituição e funcionamento	102
3.3.5.4. Cuidados de instalação e manutenção	103
3.3.5.5. Características de seleção	106
3.3.6. Unidades do tipo comercial.....	108
3.3.6.1. <i>Rooftop</i> para exterior	108
3.3.6.2. Unidades interiores	110
3.4. EQUIPAMENTOS DE CENTRAL TÉRMICA	111
3.4.1. <i>Chiller</i>	111
3.4.1.1. Descrição.....	111
3.4.1.2. Tipos e classificações.....	112
3.4.1.3. Constituição e funcionamento	114
3.4.1.4. Cuidados de instalação e manutenção.....	119
3.4.1.5. Características de seleção	123
3.4.2. Bombas de calor.....	124
3.4.2.1. Descrição	124
3.4.2.2. Tipos e classificações.....	125
3.4.2.3. Constituição e princípio de funcionamento	126
3.4.3. Caldeiras.....	128
3.4.3.1. Descrição	128
3.4.3.2. Tipos e classificações.....	128
3.4.3.3. Constituição e funcionamento	129
3.4.3.4. Características de seleção	130
3.4.4. Unidades de tratamento de ar, UTA	133
3.4.4.1. Descrição	133

3.4.4.2. Tipos e classificações.....	133
3.4.4.3. Constituição e funcionamento	134
3.4.4.4. Manutenção.....	136
3.4.4.5. Características de seleção	137
3.4.5. Torre de arrefecimento	138
3.4.5.1. Descrição.....	138
3.4.5.2. Tipos e classificações.....	139
3.4.5.3. Constituição e funcionamento	140
3.4.5.4. Manutenção.....	141
3.4.5.5. Características de seleção	142
3.5. EQUIPAMENTOS TERMINAIS	143
3.5.1. Ventiloinvetores.....	143
3.5.1.1. Descrição.....	143
3.5.1.2. Tipos e classificações	143
3.5.1.3. Constituição e funcionamento	144
3.5.1.4. Manutenção.....	145
3.5.1.5. Características de seleção	146
3.5.2. Radiadores.....	147
3.5.2.1. Descrição	147
3.5.2.2. Tipos e classificações.....	147
3.5.2.3. Constituição e funcionamento	148
3.5.2.4. Características de seleção	148
3.5.3. Difusores e grelhas.....	149
3.5.3.1. Descrição	149
3.5.3.2. Tipos e classificações.....	149
3.5.3.3. Constituição e funcionamento	154
3.5.3.4. Características de seleção	156
4. EQUIPAMENTOS DE TRANSPORTE.....	159
4.1. INTRODUÇÃO	159
4.2. CONDUTAS.....	159
4.2.1. Descrição	159
4.2.2. Materiais e classificações	160
4.2.3. Formas, elementos e dimensões de condutas	161
4.2.4. Pressões e velocidades do ar em condutas	165
4.2.4.1. Evolução das pressões	165
4.2.4.2. Fugas em condutas.....	166
4.2.4.3. Velocidades do ar	167
4.2.5. Manutenção de condutas.....	169
4.2.6. Bases para o dimensionamento de condutas.....	171
4.2.6.1. Princípios.....	171
4.2.6.2. Diâmetros de cálculo	171

4.2.6.3. Métodos e princípio de dimensionamento	177
4.3. VENTILADORES.....	178
4.3.1. Descrição	178
4.3.2. Classificações	178
4.3.3. Constituição e funcionamento	180
4.3.4. Curva característica e ponto de trabalho	181
4.3.5. Manutenção	182
4.4. TUBOS E ACESSÓRIOS	183
4.4.1. Descrição	183
4.4.2. Tipos de tubos.....	183
4.4.2.1. Tubos de cobre	183
4.4.2.2. Tubos de aço negro e galvanizado	188
4.4.3. Perda de carga em tubos	190
4.5.BOMBAS CENTRÍFUGAS	192
4.5.1. Descrição	192
4.5.2. Constituição e funcionamento	193
4.5.3. Curva característica e ponto de trabalho	194
4.5.4. Cuidados de instalação e manutenção.....	196

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS DO AR CONDICIONADO

1.1. INTRODUÇÃO

A Climatização ou condicionamento do ar é um setor da refrigeração, que se dedica ao estudo das condições atmosféricas do ar, de forma a torná-lo apropriado quer para aplicações de conforto humano, como para aplicações industriais. Tomando como referência o conforto térmico humano, devido a ser a principal aplicação do ar condicionado, inicia-se este capítulo com a psicrometria por ser a base fundamental desta aplicação do frio, com a descrição dos parâmetros e dos processos básicos. Segue-se com as condições exteriores e interiores que normalmente são usadas no ar condicionado e finaliza-se com os princípios usados na difusão do ar no interior dos espaços a climatizar.

1.2. PSICROMETRIA

1.2.1. Descrição

A psicrometria é o ramo da termodinâmica que estuda as propriedades da mistura de um gás com um vapor, ou seja, do ar seco com o vapor de água (ar húmido). No âmbito do AVAC esta ciência tem uma forte aplicação uma vez que basicamente todos os processos envolvem o ar húmido. Desde o estudo das necessidades de conforto humano até aos processos de troca térmica dos vários componentes que integram as redes de AVAC, a psicrometria marca a sua presença, sendo uma “ferramenta” bastante útil na tradução e compreensão dos diversos fenómenos.

As propriedades do ar húmido são parâmetros que tem sido muito estudados ao longo dos tempos pela comunidade científica estando por isso uma vasta informação disponível, que os permitem determinar com mais ou menos rigor consoante o seu uso (exemplo Pinazo (1997) e no Capítulo 6 do manual ASHRAE (2005)). Neste livro são feitas as descrições base associadas a cada uma das variáveis, as formas de as determinar, quer em termos matemáticos como por medição, e também dos processos fundamentais que envolvem o ar húmido que estão presentes nos equipamentos de tratamento de ar.

1.2.2. Ar atmosférico

O ar atmosférico é composto por uma mistura de gases, vapor de água e uma mistura de contaminantes (fumos, poeiras e outros poluentes gasosos). Estes níveis de poluentes são mais

elevados junto dos locais industrializados e das grandes cidades e menos elevados nos campos e zonas florestais.

A mistura de gases recebe o nome de **ar seco**, e é uma massa de fluido atmosférico aproximadamente constante, apenas com pequenas variações normalmente consideradas desprezáveis. A sua composição volúmica é aproximadamente de 78% de Nitrogénio, 21% de oxigénio e 1% de outros gases. Na tabela seguinte apresenta-se uma descrição detalhada dos componentes do ar limpo e seco para uma atmosfera normal ao nível do mar.

Tabela 1.1: Composição atmosférica normal do ar seco ao nível do mar

COMPONENTE	% VOLUME	COMPONENTE	% VOLUME
Nitrogénio, N ₂	78.084	Óxido Nitroso, N ₂ O	0.00005
Oxigénio, O ₂	20.9476	Ozono, O ₃ Verão Inverno	0 a 0.000007
Árgon, Ar	0.934		0 a 0.000002
Dióxido de Carbono, CO ₂	0.0314	Anidrido Sulfuroso, SO ₂	0 a 0.0001
Néon, Ne	0.001818	Dióxido de Nitrogénio, NO ₂	0
Hélio, He	0.000524	Amoníaco, NH ₃	Resíduos
Crípton, Kr	0.000114	Monóxido de Carbono, CO	Resíduos
Xénon, Xe	0.000009	Iodo, I ₂	0 a 0.000001
Hidrogénio, H ₂	0.00005	Rádón, Rn	6 x 10 ⁻¹³
Metano, CH ₄	0.00015		

Fonte: UNE 100000

O vapor de água é uma massa de fluido contida no ar seco que varia de um valor zero, para o ar completamente seco, a um valor máximo para o ar húmido saturado. Neste último caso o ar não suporta mais vapor de água, e uma redução brusca na sua temperatura provoca a sua precipitação. Nos ambientes interiores os aumentos do vapor de água no ar resulta das evaporações da água contida nas substâncias líquidas e sólidas que existem nos espaços (produtos, pessoas, lavagens, banhos, cozinhados, etc.), e as diminuições resultam da condensação do vapor quando em contacto com as superfícies mais frias. No ambiente exterior o vapor é originado pela evaporação da água dos oceanos, lagos e rios.

Pode-se dizer que o **ar húmido** é uma mistura binária de ar seco com vapor de água, em que a massa de vapor de água pode variar desde zero até um valor máximo que depende da temperatura e da pressão.

A massa molecular do ar seco, M_a , é determinada pela ponderação dos seus constituintes gasosos, e a do vapor de água, M_v , pela soma das massas moleculares dos seus constituintes atómicos, obtendo-se:

$$M_a = 28,97 \text{ kg/kmol}; M_v = 18,02 \text{ kg/kmol}$$

A constante gasosa de cada componente é determinada pela relação da constante universal dos gases perfeitos, $R_0 = 8.314 \text{ kJ/kmol. K}$, com a massa molecular associada.

$$R = \frac{R0}{M}, R_a = \frac{8.314}{28.97} = 0.287 \text{ kJ/kg.K}; R_v = \frac{8.314}{18.02} = 0.461 \text{ kJ/kg.K}$$

Todos os componentes do ar exercem uma pressão sobre a superfície terrestre, que depende fundamentalmente da região do globo, com as condições climáticas, e com a altitude. Nos pontos mais altos o ar é mais rarefeito, tendo como tal um peso menor em relação aos pontos mais baixos onde é mais denso.

Ao nível da água do mar, a atmosfera padrão é caracterizada por uma temperatura de 15 °C e uma pressão de 101325 Pa. Para altitudes superiores na troposfera, admite-se que a temperatura diminui proporcionalmente enquanto na estratosfera assume-se que a temperatura é constante. Para uma gama de altitudes que vão de -5000 a 11000 metros a pressão varia com a altitude pela equação seguinte (ASHRAE (2005)).

$$PT = 101.325 \times (1 - 2.25577 \times 10^{-5} \times Z)^{5.2559}$$

$$T = 15 - 0.0065 \times Z$$

Onde:

PT = Pressão atmosférica total em kPa ;

Z = Altitude, em m ;

T = Temperatura em °C.

A medição da pressão atmosférica foi assunto de pesquisa de Torricelli (1608-1647) que usou um tubo de mercúrio de forma invertida numa tina aberta com o mesmo fluido. Esta experiência desenvolvida ao nível do mar permitiu obter uma altura de coluna de fluido de 76 cm, o qual corresponde ao valor da pressão atmosférica. Este equipamento experimental recebe o nome de barómetro básico, o qual é tomado como referência a estas matérias.

Outras unidades ao nível do mar, a uma temperatura de 0 °C, são:

1 atm = 76 cmHg;

1 atm = 760 mmHg;

1 atm = 10.33 mH₂O;

1 atm = 1.01325 bar;

1 atm = 1.033 kg/cm².

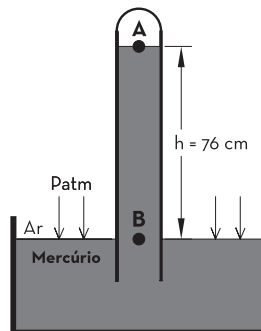


Figura 1.1: Barómetro de Mercúrio de Torricelli

De forma a quantificar a influência que cada um dos componentes do ar húmido (ar seco e vapor de água) exerce sobre a terra, usa-se a lei de Dalton. Esta estabelece que a pressão de uma mistura gasosa é igual à soma das pressões que cada um dos seus constituintes exerceria se estivesse isolado, ocupando o mesmo volume da mistura e à temperatura da mistura. Aplicando esta lei à atmosfera terrestre, considerando um dos constituintes gasosos como sendo o ar seco e o outro como sendo o vapor de água, obtém-se a pressão total como uma soma da pressão de ar seco e do vapor de água.

$$PT = Pa + Pv$$

Onde:

PT = Pressão total da mistura (ar seco + vapor) em Pa ;

Pa = Pressão do ar seco em Pa ;

Pv = Pressão de vapor de água no ar em Pa .

Conforme anteriormente referido quando a quantidade de vapor de água na atmosfera é máxima a pressão deste constituinte também é máxima. Esta variável recebe o nome de pressão de vapor saturado, e pode ser determinada de forma simplificada pelo uso de uma equação exponencial de base 10, válida para uma gama de temperaturas de 0 a 79 °C (Pinazo (1997)).

$$P_{vs} = 10^{\left(\frac{7.5 \times T_{bs}}{T_{bs} + 273.15 - 35.85}\right)^{+2.7858}}$$

Onde:

P_{vs} = Pressão de vapor saturado em Pa ;

T_{bs} = Temperatura de bolbo seco do ar em °C.

EXEMPLO

Num dia chuvoso a temperatura de bolbo seco no interior de uma sala não climatizada é de 15 °C. Nestas condições o ar está saturado de humidade e a pressão de vapor saturado é de:

$$P_{vs} = 10^{\left(\frac{7.5 \times 15}{15 + 273.15 - 35.85}\right)^{+2.7858}} = 1705 \text{ Pa}$$

Considerando que a pressão atmosférica total é de 101325 Pa, a pressão do ar seco nestas condições é de 99620 Pa.

$$PT = Pa + P_{vs} \Rightarrow Pa = PT - P_{vs} = 101325 - 1705 = 99620 \text{ Pa}$$

1.2.3. Parâmetros do ar húmido

Os parâmetros do ar húmido são propriedades termodinâmicas muito aplicadas desde as análises do conforto térmico humano até ao nível do projeto das instalações de AVAC. Em termos práticos estas propriedades podem ser referidas a valores normalizados, que se definem de acordo com a pressão atmosférica padrão anteriormente referida de 101325 Pa, e a uma temperatura de bolbo seco de 20 °C e uma humidade relativa de 50%. Com base nestes parâmetros, que se podem estabelecer como sendo de obtenção direta por meio de equipamentos de medida,

são obtidos todos os outros por meio de modelos matemáticos. Estes valores normalizados são representados na tabela seguinte, sendo os mais aplicados neste âmbito descritos de forma detalhada nos pontos seguintes.

Tabela 1.2: Composição atmosférica normal do ar seco ao nível do mar

PARÂMETRO	VALOR	PARÂMETRO	VALOR
Temperatura seca, Tbs, em °C	20	Densidade, ρ_a , em kg/m ³	1.20
Humidade relativa, Hr, em %	50	Entalpia, h_{as} , em kJ/kgas	38.56
Temperatura húmida, Tbh, em °C	13.8	Pressão parcial do vapor, P_v , em Pa	1169
Humidade específica, W, em gv /kga	7.26	Viscosidade dinâmica, μ , em $\mu\text{Pa.s}$	1.18×10^{-5}
Temperatura de orvalho, Tor, em °C	9.27	Calor específico a pressão constante, C_{pas} , em J/(kg.K)	1007

Fonte: EES

1.2.3.1. Temperatura de bolbo seco do ar

A temperatura de bolbo seco do ar é um índice que mede o grau de movimentação das partículas dos constituintes atmosféricos isentos de humidade, e logo a sua carga térmica sensível. A medição da temperatura seca do ar é feita normalmente com base em termómetros do tipo termoelectrico, que têm uma propriedade eléctrica a variar com a temperatura. Os equipamentos com sondas protegidas do tipo termistor são os mais usados para medir a temperatura do ar. Os termistores são resistências sensíveis à temperatura, construídas de um material semiconductor, que pode variar negativamente ou positivamente. No primeiro caso, o termistor tem a resistência do material a diminuir com o aumento da temperatura, e recebe o nome de NTC – *Negative Temperature Coefficient*. No segundo caso, a sonda é do tipo PTC – *Positive Temperature Coefficient* – tem a sua resistência eléctrica a aumentar com o aumento da temperatura, inversamente aos NTC.

O equipamento apresentado na Figura 1.2 tem uma sonda do tipo NTC, com uma gama de medição de -10 a 50 °C e com uma precisão de ± 0.5 °C.

1.2.3.2. Humidade absoluta

A humidade absoluta, também chamada de conteúdo de humidade, é um parâmetro que relaciona a quantidade de vapor de água por cada quilograma de ar seco.

$$W = \frac{mv}{ma} = \frac{\text{massa do vapor de água (kgv)}}{\text{massa de ar seco (kga)}}$$

O parâmetro pode ser obtido de forma directa em alguns equipamentos de medida, ou pode ser obtido por meio de uma relação com a pressão de vapor. Esta relação obtém-se a partir da aplicação da equação dos gases perfeitos ao ar seco e ao vapor de água na forma seguinte:

$$W = \frac{mv}{ma} = \frac{P_v \times V / R_v \times T}{P_a \times V / R_a \times T} = \frac{R_a}{R_v} \times \frac{P_v}{P_a}$$

Considerando válida a lei de Dalton e as constantes gasosas anteriormente referidas para o vapor e água e para o ar seco obtém-se a equação normalmente usada na quantificação deste parâmetro.

$$W = \frac{0.287}{0.461} \times \frac{P_v}{P_T - P_v} = 0.622 \times \frac{P_v}{P_T - P_v}$$

Onde P_v e P_T são as pressões do vapor de água e totais anteriormente referidas em Pa .

Para uma situação de saturação de humidade usa-se a mesma equação substituindo a pressão de vapor, P_v , pela de vapor saturado, P_{vs} .

EXEMPLO

Numa sala de ar não saturado com a temperatura de bolbo seco de 25 °C foi determinado uma pressão parcial de vapor de 1583.4 Pa. Para as condições de pressão total ao nível de mar de 101325 Pa a humidade absoluta é de:

$$W = 0.622 \times \frac{P_v}{P_T - P_v} = 0.622 \times \frac{1583.4}{101325 - 1583.4} = 0.00987 \text{ kgv/kgda}$$

1.2.3.3. Humidade relativa

A humidade relativa é um parâmetro que relaciona a quantidade de vapor contida no ar em relação ao valor máximo que este consegue levar para um determinado valor de temperatura e pressão. É comum também aproximar esta relação com os conteúdos de humidade no ar numa situação normal com a situação de saturação.

$$HR = \frac{P_v}{P_{vs}} \Big|_{T,P} = \frac{\text{Pressão de vapor}}{\text{Pressão de vapor saturado}}$$

$$HR = \frac{W_v}{W_{vs}} \Big|_{T,P} = \frac{\text{Conteúdo de humidade no ar}}{\text{Conteúdo de humidade no ar saturado}}$$

Este parâmetro é normalmente obtido a partir de equipamentos que recebem o nome de acordo com o princípio físico associado à sua medição, onde os mais comuns são: o higrómetro de cabelo, o psicrómetro, o espelho de ponto de orvalho e o sensor de humidade capacitivo.

No **higrómetro de cabelo**, a humidade ambiente faz variar as dimensões de um cabelo que atua sobre uma parte mecânica, a qual fornece uma indicação em termos de humidade relativa. Este é um método fácil de usar na engenharia de medição, com baixos custos de instalação e de aplicação. Apresenta as desvantagens de ter elevados custos de manutenção, ser necessária uma constante regeneração dos cabelos e ter uma medição lenta.

O **psicrómetro** mede a humidade a partir de uma sonda recoberta com um troço de algodão húmido, arrefecida como consequência da evaporação, e de uma segunda sonda, que mede a temperatura ambiente seca. A humidade ambiente é determinada a partir da diferença de temperaturas. Este método de utilização cuidada permite fazer medições com muita exatidão (de 2-3% Hr). É um método de uso laborioso, onde deve haver uma humidificação com água, quase antes de cada medição.

O **espelho de ponto de orvalho** é um método onde se usa o arrefecimento de um espelho até alcançar os valores da temperatura de orvalho, de forma a levar a formação da condensação. O controlo da condensação permite determinar o ponto de orvalho do ar. Como vantagens destacam-se uma ampla gama de medição e uma elevada precisão; como desvantagens apontam-se a necessidade de uma medição de temperatura de grande precisão e um tempo lento de adaptação.

O **sensor de humidade capacitivo** usa um condensador que varia a sua capacidade de acordo com a humidade ambiente. Estes sensores têm uma gama ampla de medição (de 0 a 100% Hr, de - 40 a 180 °C), são de medição rápida e precisa (até $\pm 1\%$ Hr), e têm uma estabilidade a longo prazo. Muitos equipamentos usados para medir este parâmetro no interior dos meios frios de conservação dos produtos usam o sensor capacitivo.

Para a medição da humidade relativa do ar ambiente destes espaços devem-se ter alguns cuidados, de forma a garantir que as evolventes frias não interfiram nas medições, pois com uma humidade absoluta constante, a humidade relativa é uma função da temperatura. Para isso deve manter-se uma distância mínima de parede, que deve ser aquela em que os valores da humidade e da temperatura não variem significativamente com a variação da distância.



Fonte: Testo

Figura 1.2: Medição de temperatura, com NTC, e humidade com sensor capacitivo

EXEMPLO

Sabendo que nas condições de temperatura de bolbo seco, do exemplo anterior, para uma situação de saturação de humidade, a sala tem uma pressão de vapor máxima de 3166.9 Pa.

Neste caso a humidade relativa assume o valor de 50%.

$$HR = \frac{P_v}{P_{vs}} \Big|_{T,P} = \frac{1583.4}{3166.9} = 0.50 \times 100 = 50\%$$

1.2.3.4. Temperatura de orvalho do ar

O ponto de orvalho do ar é definido como a temperatura à qual a condensação do vapor de água se inicia quando o ar é arrefecido a uma pressão constante. Este fenómeno, para além de estar presente em muitos fenómenos naturais (exemplo a condensação nos vidros das janelas, superfície exterior de uma garrafa de água fria, etc.), está também presente em muitas das superfícies frias dos equipamentos de ar condicionado (exemplos, evaporadores, e baterias de águas gelada), bem como nos equipamentos de medida de humidade relativa anteriormente referidos. A estimativa da temperatura de orvalho do ar pode ser feita de forma simplificada com recurso a equação inversa da pressão de vapor saturado anteriormente apresentada, e válida para uma gama de temperaturas de 0 a 70 °C.

$$T_{or} = \frac{35.85 \times \log P_v - 2148.496}{\log P_v - 10.2858} - 273.15$$

Ou então por uma outra equação mais simplificada, como uma função apenas da temperatura de bolbo seco e da humidade relativa, para a mesma gama de temperaturas que a anterior.

$$T_{or} = \left[\left(\frac{HR}{100} \right)^{0.1247} \times (109.8 + T_{bs}) \right] - 109.8$$

Onde:

T_{or} = Temperatura de orvalho do ar em °C;

P_v , T_{bs} e HR são as grandezas anteriormente apresentadas.

EXEMPLO

Para a sala com as condições do exemplo anterior ($T_{bs} = 25$ °C; $P_v = 1583.4$ Pa) a temperatura de orvalho do ar é de:

$$T_{or} = \frac{35.85 \times \log(1583.4) - 2148.496}{\log(1583.4) - 10.2858} - 273.15 = 14 \text{ °C}$$

O mesmo valor é obtido pela equação mais simples

$$T_{or} = \left[\left(\frac{50}{100} \right)^{0.1247} \times (109.8 + 25) \right] - 109.8 = 14 \text{ °C}$$

1.2.3.5. Temperatura de bolbo húmido do ar

A temperatura de bolbo húmido do ar pode ser definida muito simplesmente como a temperatura que marca um termómetro cujo sensor está húmido e imerso na corrente de ar. Este é um processo simples e prático, para determinar a humidade absoluta, e logo a humidade relativa do ar. Consiste em usar um termómetro de bolbo seco, coberto com uma gaze saturada de água, sujeito a uma corrente de ar. Quando pela gaze passa uma corrente de ar húmido não saturado, alguma da água evapora-se. Como consequência a temperatura da água diminui criando-se uma diferença de temperaturas entre o ar e a água, que é a força motriz para a transferência de calor. Passado algum tempo, o calor perdido pela água por evaporação iguala ao ganho de calor pelo ar, e a temperatura da água estabiliza. A temperatura lida neste ponto é a de bolbo húmido, a partir da qual é

possível determinar a humidade relativa do ar. Um psicrómetro usado para estas medições é do tipo centrífugo com um termómetro de bolbo seco e outro de bolbo húmido. Neste equipamento os sensores são rodados manualmente de forma a fazer circular o ar sobre eles com uma velocidade de 2 m/s, durante certa de 3 minutos. Finalizado este período de tempo, é normalmente alcançado uma estabilidade nas temperaturas, o que é condição de referência para a sua leitura.

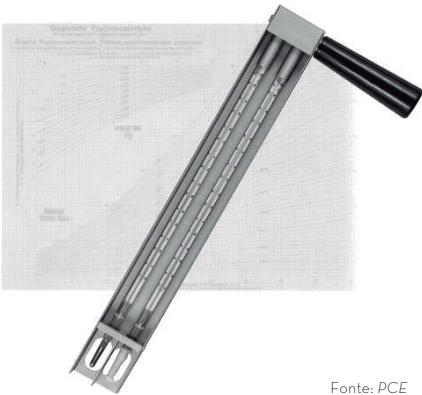
EXEMPLO

Numa sala onde a leitura de bolbo seco foi 25 °C e a de bolbo húmido de 17,87 °C, a humidade relativa é de 50%.

Tabela 1.3: Relação entre a temperatura de bolbo seco de bolbo húmido e humidade relativa

TBS (°C)	HUMIDADE RELATIVA, HR (%)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
10	1.44	2.51	3.54	4.55	5.52	6.47	7.39	8.29	9.16	10.00
15	4.58	5.93	7.22	8.46	9.66	10.81	11.91	12.98	14.01	15.00
20	7.57	9.24	10.83	12.34	13.77	15.13	16.43	17.67	18.86	20.00
25	10.43	12.48	14.40	16.19	17.87	19.46	20.96	22.37	23.72	25.00
30	13.20	15.67	17.95	20.04	21.99	23.80	25.49	27.09	28.58	30.00
35	15.89	18.84	21.50	23.91	26.13	28.16	30.05	31.81	33.45	35.00
40	18.52	22.00	25.07	27.81	30.29	32.55	34.63	36.55	38.33	40.00

Fonte: Anunciada Santos (2016)



Fonte: PCE

Figura 1.3: Medidor de humidade centrífugo

1.2.3.6. Entalpia do ar húmido

A entalpia do ar húmido é o conteúdo de energia transportado pelo ar, que se relaciona com a temperatura de bolbo seco, associada à carga térmica sensível, e com o conteúdo de humidade associado à carga térmica latente. De uma forma simples pode-se dizer que, para determinada humidade relativa, quanto maior for a sua temperatura de bolbo seco maior a energia que este transporta. A mesma situação acontece para a temperatura constante e a humidade relativa variável. Quanto maior for a humidade maior é o valor energético do ar. Normalmente

nas aplicações em ar condicionado, as equações de cálculo da entalpia do ar húmido são deduzidas a partir da referência 0 °C. Ou seja, é a quantidade de energia que foi utilizada para levar o ar desde os 0 °C, até ao valor em que ele se encontra, tendo em conta a parcela sensível e a latente. As equações práticas são:

$$hah = has + W \times hv; \quad has = 1.006 \times Tbs; \quad hv = 2501 + 1.805 \times Tbs$$

Onde:

hah = Entalpia do ar húmido em kJ/kgas;

has = Entalpia do ar seco em kJ/kgas;

hv = Entalpia do vapor de água saturado à temperatura do ar kJ/kgv;

Tbs e W são as grandezas anteriormente apresentadas, de temperatura e humidade absoluta.

EXEMPLO

Para uma temperatura de bolbo seco de 25 °C dos exemplos anteriores e para uma humidade absoluta de 0.00987 kj/kgas, obtém-se uma entalpia do ar seco de:

$$has = 1.006 \times Tbs = 1.006 \times 25 = 25.15 \text{ kJ/kgas}$$

e uma do vapor de água

$$hv = 2501 + 1.805 \times Tbs = 2501 + 1.805 \times 25 = 2546 \text{ kJ/kgas}$$

A total do ar húmido é de:

$$hah = has + W \times hv = 25.15 + 0.00987 \times 2546 = 50 \text{ kJ/kgas}$$

1.2.3.7. Volume específico do ar

O volume específico do ar húmido é definido como o volume ocupado pelo ar húmido por unidade de massa de ar seco, sendo o inverso a massa específica. Relaciona-se com a temperatura de bolbo seco e com as pressões, total e de vapor, pela equação seguinte.

$$ve = 287.055 \times \left(\frac{Tbs + 273.15}{PT - Pv} \right)$$

Onde:

ve = Volume específico em m³/kgas;

PT , Pv e Tbs são as grandezas anteriormente apresentadas.

EXEMPLO

O volume específico do ar da sala dos exemplos anteriores, com $Tbs = 25$ °C, $PT = 101325$ Pa; e $Pv = 1583.4$ Pa, é de:

$$ve = 287.055 \times \left(\frac{25 + 273.15}{101325 - 1583.4} \right) = 0.858 \text{ m}^3/\text{kgas}$$

1.2.4. Diagrama psicrométrico

O diagrama psicrométrico é um gráfico onde estão relacionados os diversos parâmetros do ar em determinadas condições de pressão atmosférica total. A ASHRAE disponibiliza um conjunto

de diagramas que abrangem uma gama de pressões e temperaturas que possibilitam a sua aplicação em diversos domínios. Por exemplo para aplicação no setor do ar condicionado é aconselhado a aplicação do diagrama n.º 1, para uma faixa de temperaturas de 0 a 50 °C. Na figura seguinte mostra-se o formato da evolução dos diversos parâmetros no diagrama.

- 1: Temperatura de bolbo seco
- 2: Humidade absoluta
- 3: Humidade relativa
- 4: Linhas de volume específico
- 5: Linhas de bolbo húmido, com inclinação semelhante às da entalpia

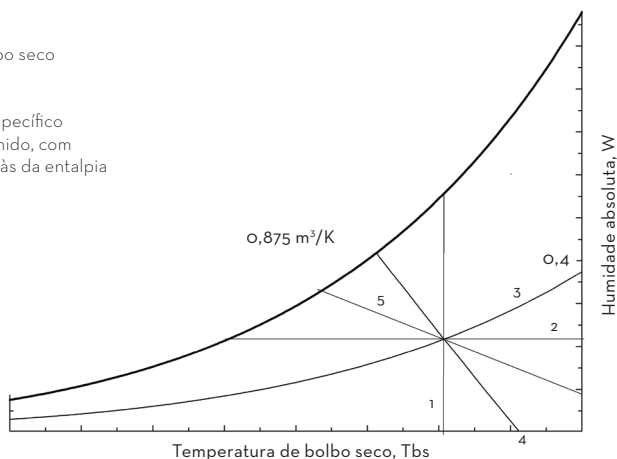


Figura 1.4: Variáveis no diagrama psicrométrico

A partir do conhecimento de dois parâmetros é possível determinar todas propriedades do ar de uma forma simples.

EXEMPLO

Para os 25 °C em temperatura de bolbo seco e para os 50% de humidade relativa chega-se a resultados semelhantes aos mostrados nos exemplos anteriores, conforme se mostra no gráfico seguinte:

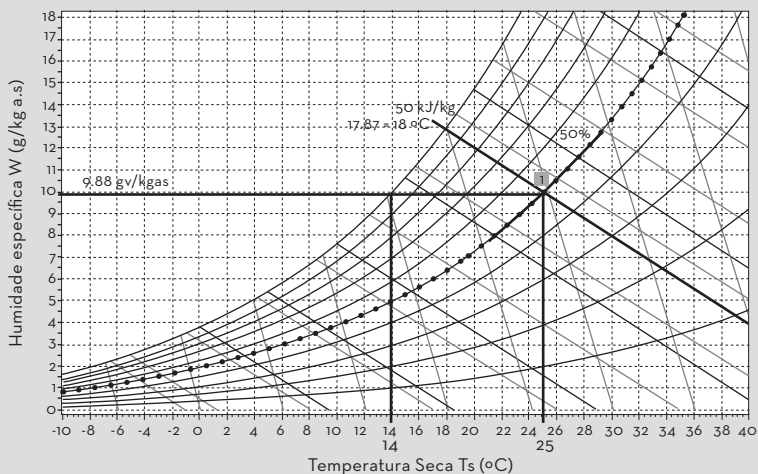


Figura 1.5: Parâmetros do ar para 25 °C e 50%

1.2.5. Processos psicrométricos

1.2.5.1. Aquecimento sensível

O aquecimento sensível é um processo onde o ar sofre um aumento na sua temperatura, mantendo o conteúdo de humidade constante. Isto acontece quando uma corrente de ar húmido contacta com uma superfície quente, como o caso das baterias de água quente nas unidades de tratamento de ar, nos aquecedores a óleo, nas resistências, ou mesmo nos condensadores das bombas de calor. Nestes processos o ar ao aquecer, diminui a sua humidade relativa e vai aumentar o seu potencial de remoção de vapor de água ao espaço a climatizar. A representação em diagrama psicrométrico é feita por uma linha paralela ao eixo dos XX, com aumento na temperatura de bolbo seco, de 1 para 2, mantendo o conteúdo de humidade constante

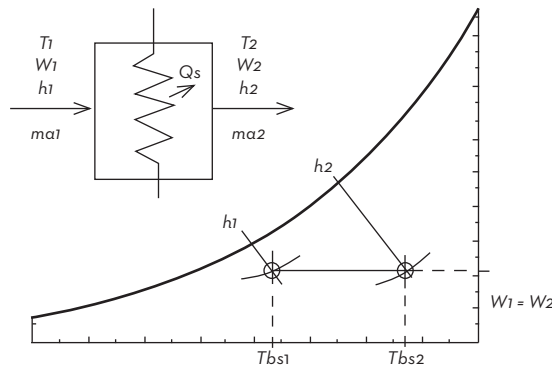


Figura 1.6: Representação de um processo de aquecimento sensível

Como se trata de um processo sensível a potência necessária ao aquecimento apenas está relacionada com as temperaturas do ar na entrada e na saída dos equipamentos aquecedores, ou também com as suas entalpias para os mesmos pontos.

$$Q_s = ma \times C_p \times (T_{bs2} - T_{bs1}) = ma \times (h_2 - h_1)$$

Onde:

Q_s = Potência térmica total (sensível) em kW;

ma = Caudal mássico de ar seco em kg/s;

C_p = Calor específico do ar em kJ/kg °C (aprox. 1.006 kJ/(kg °C));

T_{bs} e h são as grandezas anteriormente apresentadas de temperatura seca e entalpia.

EXEMPLO

Considerando que o ar da sala dos exemplos anteriores, com os 25 °C de bolbo seco e com os 50% de humidade relativa, entra numa bateria de aquecimento e é aquecido até 30 °C. Nestas condições a potência da bateria para 1 kg/s de ar é de:

$$Q_s = ma \times C_p \times (T_{bs2} - T_{bs1}) = 1 \times 1.006 \times (30 - 25) = 5 \text{ kW}$$

Ou pelas entalpias

$$Q_s = ma \times (h_2 - h_1) = 1 \times (55 - 50) = 5 \text{ kW}$$

1.2.5.2. Arrefecimento com desumidificação

O arrefecimento com desumidificação é um processo onde o ar sofre uma diminuição na sua temperatura e no seu conteúdo de humidade. Isto acontece quando o ar húmido contacta com uma superfície fria com valores de temperatura inferiores ao ponto de orvalho do ar. São exemplos nas instalações de ar condicionado, as serpentinas das baterias de arrefecimento com água gelada, ou nos evaporadores onde o fluido refrigerante muda o seu estado físico a valores baixos (exemplo +5 °C). Neste processo o ar depois de contactar com a superfície fria da bateria vai diminuir a sua temperatura num processo de arrefecimento sensível até que seja alcançado o seu ponto de orvalho, a partir daí começa então a sofrer um processo simultâneo de arrefecimento e desumidificação.

Outro exemplo de aplicação é o arrefecimento que ocorre nos chamados de lavadores de ar, em que o ar contacta com as gotas de água fria.

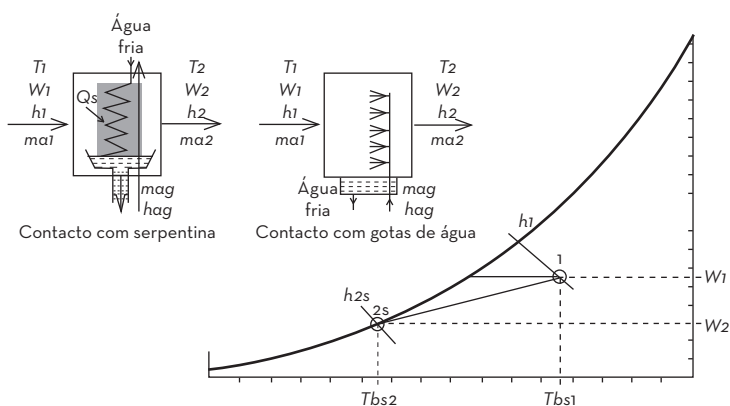


Figura 1.7: Representação de um processo de arrefecimento com desumidificação

Neste caso trata-se de um processo que envolve a remoção do calor sensível e de calor latente. Neste caso a potência necessária ao processo é determinada pela relação com a entalpia na entrada e na saída dos equipamentos.

$$Q = ma \times (h_2 - h_1)$$

Onde:

Q = Potência da bateria em kW;

ma e h são as grandezas anteriormente apresentadas de caudal de ar seco e entalpia.

Nestes processos também se torna importante conhecer o caudal de água evaporado. Este parâmetro relaciona-se com os conteúdos de humidade e com o caudal de ar seco pela equação seguinte.

$$mag = ma \times (W_2 - W_1)$$

Onde:

mag = Caudal de água condensada em kg/s

Se a corrente de ar húmido de 25 °C de temperatura de bolbo seco e 50% de humidade relativa contactar com uma bateria a 5 °C, vai arrefecer e desumidificar e sair com uma temperatura seca de 10 °C e 100% de humidade relativa. Nestas condições a potência da bateria de arrefecimento para um caudal de ar seco de 1 kg/s é de:

A massa de água condensada é de:

$$m_{aq} = m_a \times (W_2 - W_1) = 1 \times (0.00763 - 0.00987) = -0.00224 \text{ kgv/s}$$

$$BF = \frac{h_2 - h_{2s}}{h_1 - h_{2s}} = \frac{W_2 - W_{2s}}{W_1 - W_{2s}} = \frac{T_2 - T_{2s}}{T_1 - T_{2s}}$$

$$FC = \frac{h1 - h2}{h1 - h2s} = \frac{W1 - W2}{W1 - W2s} = \frac{T1 - T2}{T1 - T2s}$$

BF = Fator bypass;

FC = Fator contato.

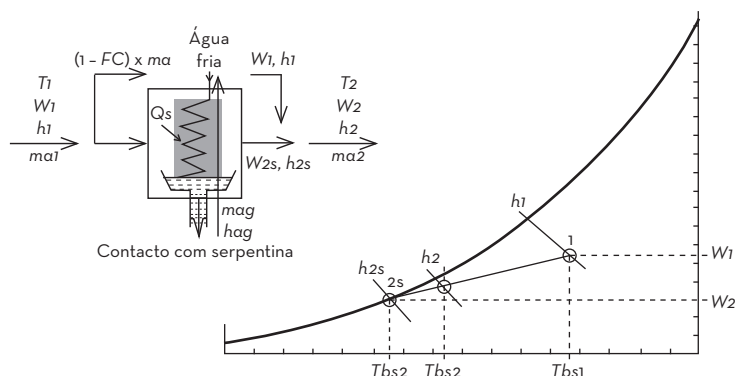


Figura 1.8: Fator contacto e bypass

1.2.5.3. Humidificação

A humidificação é um processo que consiste na adição de água ao escoamento de ar de forma a aumentar o seu conteúdo de humidade. A água pode ser adicionada no estado de vapor ou também no estado líquido.

Vapor. A adição de vapor ao escoamento de ar é normalmente feita nas unidades de tratamento de ar, onde este é gerado por meio de geradores próprios do tipo elétrico, ou em centrais térmicas por meio de caldeiras. Na figura seguinte mostra-se uma evolução de humidificação por meio da injeção de vapor, com gerador do tipo elétrico. Neste processo o ar húmido aumenta o seu conteúdo de humidade de W_1 para W_2 , devido à adição de pequenas quantidades de vapor, e a sua temperatura aumenta ligeiramente de T_{bs1} para T_{bs2} . Esta variação é muito pequena, costumando-se considerar a temperatura em 2 igual a 1, e logo um processo isotérmico em temperatura de bolbo seco ($T_{bs2} = T_{bs1}$).

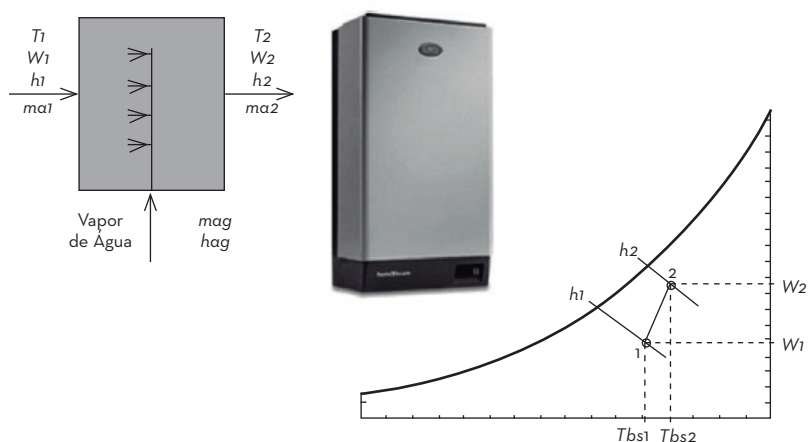


Figura 1.9: Representação de um processo de humidificação com vapor

A potência da bateria necessária à humidificação e o caudal de água evaporado são determinados por equações semelhantes às anteriormente referidas para o caso do arrefecimento com desumidificação.

EXEMPLO

Se um caudal de 1 kg/s de ar seco entrar num humidificador a vapor com uma temperatura de bolbo seco de 25 °C e uma humidade relativa de 20%, aumentar 1 °C e sair com 50% de humidade relativa, a potência necessária à humidificação é de:

$$Q = ma \times (h_2 - h_1) = 1 \times (53 - 35) = 18 \text{ kW}$$

E a quantidade de vapor adicionado ao ar é de:

$$mag = ma \times (W_2 - W_1) = 1 \times (0.0105 - 0.00391) = 0.00659 \text{ kgv/s}$$

AVAC, UM MANUAL DE APOIO

FUNDAMENTOS

SOBRE O LIVRO

O aquecimento, ventilação e ar condicionado são as três funções que se encontram associadas à palavra AVAC. Esta é reconhecida como a tecnologia usada pelo homem para criar as condições propícias ao conforto ambiental nos edifícios e meios de transporte. A maquinaria usada em AVAC é integrada em redes próprias de fluidos, de forma a transportar o calor entre meios com condições distintas, garantindo a temperatura, humidade e qualidade do ar interior.

Os princípios da termodinâmica, da transmissão do calor e da mecânica dos fluidos são temas fundamentais usados no dimensionamento das máquinas de AVAC e equipamentos de transporte de fluidos, com interesse aos técnicos do setor. Os aspetos relacionados com o funcionamento, a instalação e a manutenção destas máquinas são também assuntos fundamentais enquadrados nesta obra.

Estruturado em quatro capítulos, este livro engloba os temas mais relevantes deste setor de aplicação da mecânica e que fazem parte dos conteúdos programáticos dos cursos profissionais e universitários, e também das exigências regulamentares para a certificação dos TIM.

Este livro destina-se a todos os técnicos do setor, aos estudantes do ensino profissional e superior no apoio das disciplinas relacionadas com esta área.

SOBRE O AUTOR

António José da Anunciada Santos licenciou-se em Engenharia Mecânica - ramo Térmica - pela Universidade do Algarve, em 2002, e obteve o Doutoramento no Departamento de Engenharia Energética e Mecânica de Fluidos, pela Universidade de Sevilha, em 2008, reconhecido em Portugal, em 2016, pela Universidade de Aveiro.

Em 2017 obteve o certificado de categoria I, no Centerm, para o manuseamento de gases fluorados com efeito de estufa de acordo com o Reg (UE) 2015/2067.

Trabalhou na fabricação e assistência técnica de móveis frigoríficos, na empresa Frimóvel, e como diretor técnico na área da refrigeração comercial e industrial na empresa Qualifrio. Trabalhou em projetos de investigação e desenvolvimento ligados às questões energéticas em edifícios (hotéis, edifícios residenciais e piscinas). Fez a reconstrução e exposição de uma bancada experimental didática para refrigeração e climatização na feira Educa Angola 2013 e participou no desenvolvimento de diversos cursos de formação no setor da refrigeração.

É Formador desde 1998 nas áreas da Eletricidade, Refrigeração e Ar Condicionado, com serviço prestado no Instituto do Emprego e Formação Profissional (IEFP), em Faro, no Instituto Médio Politécnico do Sambizanga, em Luanda, no Centro de Formação Profissional para a Indústria Térmica, Energia e Ambiente (APIEF), na IXUS, Formação e Consultadoria, Lda, e na Academia de Formação da Rolear.

Publicou, ainda, vários artigos na ASME International Solar Energy Conference e na revista Tecnolimentar, e os livros "O Frio no Setor Alimentar", "Refrigeração - Manual de apoio ao ensino e à profissão (Volumes I e II)", "Bombas e Instalações Hidráulicas" e "Princípios da Rega Agrícola".

ISBN: 978-989-723-251-0

www.engebook.com

ENGEBOOK