

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SEGURANÇA DO TRABALHO

SOFTWARE NUMÉRICO PARA AUXILIAR
A RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE PSICROMETRIA

por

José Cláudio da Rosa Riccardi

Orientador:
Paulo Otto Beyer

Porto Alegre, dezembro 2012

SOFTWARE NUMÉRICO PARA AUXILIAR
A RESOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE PSICROMETRIA

por

José Cláudio da Rosa Riccardi
Engenheiro Civil

Monografia submetida ao Corpo Docente do Curso de Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho, do Departamento de Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Especialista

Orientador: Prof. Dr. Paulo Otto Beyer

Prof. Dr. Sergio Viçosa Möller
Coordenador do Curso de Especialização em
Engenharia de Segurança do Trabalho

Porto Alegre, dezembro 2012

Dedico este trabalho a meus pais, João Cláudio e Carmen Lúcia, e meu irmão, Paulo Eduardo, que sempre me apoiaram e estiveram ao meu lado durante o período do meu Curso de Especialização.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Paulo O. Beyer, por ter sido meu orientador neste trabalho.

Agradeço o meu irmão e ex-colega de graduação Paulo Eduardo, pelo apoio dado durante este curso de especialização e também por ter me ajudado, corrigindo este trabalho.

Agradeço a colega Juciele L. Zilio, por ter me ajudado, não só nos trabalhos realizados ao longo do curso de especialização, como também por ter corrigido este trabalho.

RESUMO

Este trabalho versa sobre o desenvolvimento de um programa computacional para auxiliar a resolução de problemas de psicrometria e também a verificação dos limites de conforto térmico estabelecidos pela Norma Regulamentadora NR17 – Ergonomia. A partir da revisão da literatura ficou evidente a importância da psicrometria para a implantação de sistemas de condicionamento de ar que garantem o conforto térmico das pessoas ocupantes de um determinado ambiente, visto que esses sistemas podem ser representados graficamente e sua resolução depende da utilização de cartas psicrométricas, o programa desenvolvido visa substituir o uso desses gráficos. Primeiramente foram buscadas na literatura equações numéricas que possibilitem a determinação das propriedades psicrométricas de forma analítica, substituindo com isso a leitura de gráficos. Então essas equações foram programadas em uma linguagem de computador que permitisse ao usuário entrar com as informações conhecidas e o programa se encarrega de fazer os cálculos necessários. O programa foi estruturado de forma linear em que este vai requisitando as informações ao usuário uma a uma, sendo que os dados selecionados ao longo da execução da rotina computacional influenciam nos próximos dados a serem solicitados. O programa, então, calcula de forma analítica os resultados, com base nos dados informados pelo usuário. Neste programa desenvolvido não é apresentada a resolução gráfica dos problemas e o mesmo trabalha em um intervalo limitado de temperaturas. Entretanto é possível entrar com uma combinação de quaisquer propriedades psicrométricas não ficando limitado à obrigação de sempre se conhecer uma das propriedades, como a temperatura de bulbo seco. O programa apresenta os resultados tanto na tela, como também gera dois arquivos de relatório, um compatível com editores de texto e o outro com editores de planilhas eletrônicas. Este último arquivo permite ao usuário continuar trabalhando com os resultados gerados, minimizando com isso, as limitações do programa. Também foram realizados testes de verificação, em que os resultados obtidos com o programa desenvolvido foram comparados com os valores lidos na carta psicrométrica e também com outro *software* de psicrometria, a fim de verificar seu grau de precisão. Sendo que estes testes mostraram que os resultados obtidos com o programa desenvolvido são confiáveis e possuem uma boa precisão.

Palavras-chave: conforto térmico; psicrometria; NR-17; programa computacional.

ABSTRACT

“Numerical Software to Help Solving Psychometric Problems”

This work is about the development of a computer software to help the resolution of psychrometrics problems and to verify the limits for thermal comfort established by NR17 - Ergonomics. From the literature review it became evident the importance of psychrometrics for deployment of air conditioning systems that ensure thermal comfort of people occupying a particular environment, since these systems can be represented graphically and its resolution depends on the use of psychrometric charts, the program is aimed at replacing the use of these graphics. First were drawn, from the literature, numerical equations that enable the determination of these properties analytically, replacing the reading of the chart. Then a computer software was made with these equations that allows the user to enter known information and the program takes care of the necessary calculations. The program was structured in a linear way, in which the information is requested to the user one at the time, and the selected data, throughout the execution of the routine, influence the next data to be requested. The program then calculates the results in a numerical form from the data entered by the user. The developed software doesn't show the graphical resolution of the problems and also works on a limited range of temperatures. However it is possible to enter a combination of any psychrometric properties and is not limited to the requirement of knowing the dry bulb temperature. The software presents the results on the screen and generates two log files, one compatible with text editors and the other with spreadsheets editors. This last file allows the user to continue working with the results generated, thereby minimizing the limitations of the software. Tests were also carried to check the results obtained with the developed software comparing them with the values read in the psychrometric chart and also with another psychrometrics software in order to determinate it's degree of accuracy. These tests showed that results obtained with the developed software are reliable and possess a good accuracy.

Keywords: thermal comfort; psychrometrics; NR-17; software.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	01
2 OBJETIVO	04
3 COMPOSIÇÃO DO AR E SUAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS	05
3.1 Composição do Ar Atmosférico, Ar Seco e Ar Úmido	05
3.2 Propriedades Termodinâmicas	06
4 PSICROMETRIA	12
4.1 Breve Histórico da Carta Psicrométrica	12
4.2 Descrição da Carta Psicrométrica	14
4.3 Processos Psicrométricos	15
4.3.1 Aquecimento do Ar Úmido	18
4.3.2 Resfriamento do Ar Úmido	18
4.3.3 Umidificação do Ar Úmido	19
4.3.4 Desumidificação do Ar Úmido	20
4.3.5 Resfriamento Evaporativo	21
4.3.6 Desumidificação do Ar Úmido por Adsorção	22
4.3.7 Resfriamento e Desumidificação do Ar Úmido	22
4.3.8 Mistura Adiabática de Dois Fluxos de Ar Úmido	25
4.4 Exemplos de Aplicação da Carta Psicrométrica	26
4.4.1 Exemplo 1 – Determinação das Propriedades Psicrométricas de um Único Ponto.....	27
4.4.2 Exemplo 2 – Aquecimento do Ar Úmido	28
4.4.3 Exemplo 3 – Resfriamento do Ar Úmido	30
4.4.4 Exemplo 4 – Umidificação do Ar Úmido	31
4.4.5 Exemplo 5 – Desumidificação do Ar Úmido	32
4.4.6 Exemplo 6 – Resfriamento Evaporativo	33
4.4.7 Exemplo 7 – Desumidificação do Ar Úmido por Adsorção	35
4.4.8 Exemplo 8 – Resfriamento e Desumidificação do Ar Úmido	36
4.4.9 Exemplo 9 – Mistura Adiabática de Dois Fluxos de Ar Úmido	37
5 CONFORTO TÉRMICO SEGUNDO A NR-17	40
6 PROGRAMA COMPUTACIONAL DESENVOLVIDO	45
6.1 Compatibilidade	45
6.2 Características	47
6.2.1 Opções do Menu Principal	47

6.2.2 Resultados Gerados pelo Programa	52
6.2.3 Limitações do Programa	53
6.2.4 Teste de Limites	54
6.3 Resolução de Exemplos Utilizando o Programa	57
6.3.1 Exemplo 1 – Determinação das Propriedades Psicrométricas de um Único Ponto	57
6.3.2 Exemplo 2 – Aquecimento do Ar Úmido	60
6.3.3 Exemplo 3 – Resfriamento do Ar Úmido	63
6.3.4 Exemplo 4 – Umidificação do Ar Úmido	66
6.3.5 Exemplo 5 – Desumidificação do Ar Úmido	67
6.3.6 Exemplo 6 – Resfriamento Evaporativo	69
6.3.7 Exemplo 7 – Desumidificação do Ar Úmido por Adsorção	70
6.3.8 Exemplo 8 – Resfriamento e Desumidificação do Ar Úmido	72
6.3.9 Exemplo 9 – Mistura Adiabática de Dois Fluxos de Ar Úmido	73
6.3.10 Exemplo 10 – Verificação de Conforto Térmico Segundo a NR-17	75
7 RESULTADOS E COMENTÁRIOS	77
7.1 Exemplo 1 – Determinação das Propriedades Psicrométricas de um Único Ponto ...	77
7.2 Exemplo 2 – Aquecimento do Ar Úmido	78
7.3 Exemplo 3 – Resfriamento do Ar Úmido	79
7.4 Exemplo 4 – Umidificação do Ar Úmido	81
7.5 Exemplo 5 – Desumidificação do Ar Úmido	83
7.6 Exemplo 6 – Resfriamento Evaporativo	84
7.7 Exemplo 7 – Desumidificação do Ar Úmido por Adsorção	86
7.8 Exemplo 8 – Resfriamento e Desumidificação do Ar Úmido	87
7.9 Exemplo 9 – Mistura Adiabática de Dois Fluxos de Ar Úmido	89
7.10 Exemplo 10 – Verificação de Conforto Térmico Segundo a NR-17	90
7.11 Comentários dos Resultados Obtidos	91
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	93
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
APÊNDICE A – Relatórios completos gerados pelo programa	97
APÊNDICE B – Resultados e gráficos gerados pelo GRAPSI	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1	Carta Higrométrica de Willis H. Carrier	13
Figura 4.2	Carta Psicrométrica nº 1 da ASHRAE	15
Figura 4.3	Aquecimento do Ar Úmido	18
Figura 4.4	Resfriamento do Ar Úmido	19
Figura 4.5	Umidificação do Ar Úmido	20
Figura 4.6	Desumidificação do Ar Úmido	20
Figura 4.7	Resfriamento Evaporativo	21
Figura 4.8	Desumidificação do Ar Úmido por Adsorção	22
Figura 4.9	Resfriamento e Desumidificação do Ar Úmido	23
Figura 4.10	Mistura Adiabática de Dois Fluxos de Ar Úmido	25
Figura 4.11	Exemplo 1: marcação do ponto	27
Figura 4.12	Exemplo 1: obtenção dos resultados	28
Figura 4.13	Exemplo 2: marcação dos pontos e obtenção dos resultados	29
Figura 4.14	Exemplo 3: marcação dos pontos e obtenção dos resultados	30
Figura 4.15	Exemplo 4: marcação dos pontos e obtenção dos resultados	31
Figura 4.16	Exemplo 5: marcação dos pontos e obtenção dos resultados	33
Figura 4.17	Exemplo 6: marcação dos pontos e obtenção dos resultados	34
Figura 4.18	Exemplo 7: marcação dos pontos e obtenção dos resultados	35
Figura 4.19	Exemplo 8: marcação dos pontos e obtenção dos resultados	36
Figura 4.20	Exemplo 9: marcação dos pontos e determinação dos volumes específicos	38
Figura 4.21	Exemplo 9: marcação do ponto 3 e determinação de sua temperatura de bulbo úmido	39
Figura 5.1	Gráfico para determinar a temperatura efetiva	41
Figura 5.2	Determinação da temperatura efetiva	44
Figura 5.3	Determinação da umidade relativa	44
Figura 6.1	Tela de boas vindas do psicroNATOR	45
Figura 6.2	Janela de console do Windows executando o psicroNATOR	46
Figura 6.3	Menu Principal do psicroNATOR	47
Figura 6.4	Possíveis combinações de pares de propriedades psicrométricas	48
Figura 6.5	Equações utilizadas dependendo do par de propriedades psicrométricas conhecidas	49
Figura 6.6	Menu de Processos Psicrométricos	50
Figura 6.7	Menu para alteração da pressão do programa	51

Figura 6.8	Alteração da pressão do programa	51
Figura 6.9	Sobre o programa	52
Figura 6.10	Sair do programa	52
Figura 6.11	Exemplo de arquivos gerados	53
Figura 6.12	Mensagem avisando a geração dos arquivos de resultados	54
Figura 6.13	Exemplo de intervalo válido	55
Figura 6.14	Mensagem de erro	55
Figura 6.15	Valores máximo e mínimo da temperatura de bulbo úmido em relação à temperatura de bulbo seco	55
Figura 6.16	Valores máximo e mínimo das demais propriedades psicrométricas em relação à temperatura de bulbo seco	56
Figura 6.17	Exemplo 1: menu para escolha das propriedades psicrométricas conhecidas do ponto de entrada	58
Figura 6.18	Exemplo 1: temperatura de bulbo seco sendo digitada	58
Figura 6.19	Exemplo 1: temperatura de bulbo úmido sendo digitada	59
Figura 6.20	Exemplo 1: resultados – tela 1	59
Figura 6.21	Exemplo 1: resultados – tela 2	59
Figura 6.22	Exemplo 2: menu para escolha das características do fluxo de ar no ponto de entrada	60
Figura 6.23	Exemplo 2: vazão volumétrica sendo digitada	61
Figura 6.24	Exemplo 2: menu para escolha da propriedade psicrométrica conhecida do ponto de saída	61
Figura 6.25	Exemplo 2: menu para escolha das características do fluxo de ar no ponto de saída	62
Figura 6.26	Exemplo 2: resultados – tela 1	62
Figura 6.27	Exemplo 2: resultados – tela 2	62
Figura 6.28	Exemplo 2: resultados – tela 3	63
Figura 6.29	Exemplo 3: menu para escolha das características do fluxo de ar no ponto de saída	64
Figura 6.30	Exemplo 3: velocidade do fluxo de ar sendo digitada	64
Figura 6.31	Exemplo 3: menu para escolha da característica do processo psicrométrico	65
Figura 6.32	Exemplo 3: potência térmica sendo digitada	65
Figura 6.33	Exemplo 3: resultados – tela 1	65
Figura 6.34	Exemplo 3: resultados – tela 2	66
Figura 6.35	Exemplo 4: resultados	67
Figura 6.36	Exemplo 5: base da seção transversal do duto sendo digitada	68
Figura 6.37	Exemplo 5: altura da seção transversal do duto sendo digitada	68

Figura 6.38	Exemplo 5: resultados	69
Figura 6.39	Exemplo 6: resultados – tela 1	70
Figura 6.40	Exemplo 6: resultados – tela 2	70
Figura 6.41	Exemplo 7: resultados – tela 1	71
Figura 6.42	Exemplo 7: resultados – tela 2	71
Figura 6.43	Exemplo 8: resultados	73
Figura 6.44	Exemplo 9: menu para escolha das características do fluxo de ar no ponto 1	74
Figura 6.45	Exemplo 8: resultados – tela 1	74
Figura 6.46	Exemplo 8: resultados – tela 2	75
Figura 6.47	Exemplo 10: resultados – tela 1	75
Figura 6.48	Exemplo 10: resultados – tela 2	76
Figura 6.49	Exemplo 10: resultados – tela 3	76
Figura 7.1	Exemplo 1: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os lidos na carta psicrométrica	78
Figura 7.2	Exemplo 1: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os obtidos no GRAPSI	78
Figura 7.3	Exemplo 2: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os lidos na carta psicrométrica	79
Figura 7.4	Exemplo 2: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os obtidos no GRAPSI	79
Figura 7.5	Exemplo 3: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os lidos na carta psicrométrica	80
Figura 7.6	Exemplo 3: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os obtidos no GRAPSI	81
Figura 7.7	Exemplo 4: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os lidos na carta psicrométrica	82
Figura 7.8	Exemplo 4: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os obtidos no GRAPSI	82
Figura 7.9	Exemplo 5: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os lidos na carta psicrométrica	83
Figura 7.10	Exemplo 5: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os obtidos no GRAPSI	84
Figura 7.11	Exemplo 6: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os lidos na carta psicrométrica	85
Figura 7.12	Exemplo 6: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os obtidos no GRAPSI	85
Figura 7.13	Exemplo 7: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os lidos na carta psicrométrica	86

Figura 7.14	Exemplo 7: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os obtidos no GRAPSI	87
Figura 7.15	Exemplo 8: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os lidos na carta psicométrica	88
Figura 7.16	Exemplo 8: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os obtidos no GRAPSI	88
Figura 7.17	Exemplo 9: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os lidos na carta psicométrica	89
Figura 7.18	Exemplo 9: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os obtidos no GRAPSI	90
Figura 7.19	Exemplo 10: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os lidos nos gráficos	91
Figura 7.20	Exemplo 10: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os obtidos no GRAPSI	91

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da Seção Transversal	[m ²]
W	Conteúdo de Umidade	[kg _{água} / kg _{ar seco}]
W _S	Conteúdo de Umidade na Saturação	[kg _{água} / kg _{ar seco}]
W _S *	Conteúdo de Umidade na Saturação para TBU	[kg _{água} / kg _{ar seco}]
ρ	Densidade	[kg _{ar seco} / m ³]
η _S	Eficiência de Saturação	[%]
h	Entalpia	[kJ / kg _{ar seco}]
FCS	Fator de Calor Sensível	
F _C	Fator de Contato da Serpentina	
F _P	Fator de Passagem da Serpentina (<i>by-pass</i>)	
GS	Grau de Saturação	
Q	Potência Térmica	[kW]
P _{WS}	Pressão de Saturação do Vapor d'Água	[Pa]
P _{DA}	Pressão Parcial do Ar Seco	[Pa]
P _W	Pressão Parcial do Vapor d'Água	[Pa]
P	Pressão Total da Mistura	[Pa]
TBS	Temperatura de Bulbo Seco	[°C]
TBU	Temperatura de Bulbo Úmido	[°C]
TE	Temperatura Efetiva	[°C]
TO	Temperatura ou Ponto de Orvalho	[°C]
UR	Umidade Relativa	[%]
m _w	Vazão Mássica de Água	[kg _{ar seco} / s]
m _a	Vazão Mássica de Ar	[kg _{ar seco} / s]
V	Vazão Volumétrica	[m ³ /s]
u	Velocidade do Fluxo de Ar	[m/s]
v	Volume Específico	[m ³ / kg _{ar seco}]

1 INTRODUÇÃO

O ser humano sempre se preocupou com sua condição de conforto. Desde o início da humanidade, quando os primórdios do homem se abrigaram em cavernas, para se proteger das condições climáticas desfavoráveis, a fim de manter seu bem-estar. Sendo que, quando o conforto está relacionado às condições térmicas, está se tratando do **conforto térmico**. O estudo do conforto térmico sentido pelo homem é antigo. Em 1845 o engenheiro civil Walter Bernan publicou o livro *History and Art of Warming and Ventilation Rooms and Buildings*, em que o autor previa que o controle artificial da climatização de ambientes se estabelecerá como uma ciência que contribuiria para a longevidade e desenvolvimento da humanidade. Entretanto, apenas no período entre 1913 e 1923 é que ocorreram as primeiras iniciativas para se estabelecerem critérios de conforto térmico. A partir daí, vários outros estudos foram realizados em diferentes partes do mundo, sendo que nas décadas de 70 e 80, pesquisas comprovaram que o conforto térmico está intimamente ligado ao equilíbrio térmico do corpo com o ambiente, e que esta relação afeta diretamente a eficiência do trabalho desenvolvido, podendo levar inclusive a ocorrência de acidentes [Ruas, 1999]. Além disso [Macintyre, 1990]:

[...] é preciso atentar para o fato de que condições ambientais adversas de calor, traduzidas por uma temperatura e grau de umidade elevados ou uma secura excessiva do ar e baixa temperatura, podem, em prazo maior ou menor, minar e abalar a resistência do organismo, favorecendo o estabelecimento de uma série de doenças.

Sendo assim, o propósito de sistemas de aquecimento, resfriamento e ventilação é prover condições de conforto apropriadas para todos os ocupantes e trabalhadores de uma determinada edificação ou pavilhão industrial. Enquanto a ventilação está preocupada em disponibilizar uma boa quantidade de ar fresco dentro da edificação para manter a concentração de poluentes, como o CO₂, em níveis seguros a seus ocupantes, o conforto térmico se preocupa em manter a temperatura e a umidade em condições agradáveis a todos, por toda a edificação [Glicksman, 2010], visto que esses dois componentes “[...] são responsáveis pelas trocas de calor com o exterior efetuadas pelo corpo humano e determinam para o ambiente as suas características de conforto térmico.” [Costa, 1974].

Com isso, para estabelecer as condições apropriadas de conforto dentro de uma edificação é necessário considerar a **temperatura do ar** e a quantidade de **vapor d’água** contida neste. Sendo que a determinação deste último é importante porque altos níveis de vapor d’água podem gerar desconforto e o suor do corpo demora mais para evaporar. Entretanto, se o nível de vapor d’água for muito baixo as pessoas podem sofrer com a desidratação do seus sistemas

respiratórios, a pele resseca, podendo inclusive haver acúmulo de eletricidade estática, causando choques elétricos entre pessoas e também com os equipamentos de trabalho [Glicksman, 2010].

A **psicrometria** é uma subciência da física que lida com as propriedades e processos do ar úmido. O ar úmido é definido como uma mistura de dois gases: ar seco e vapor de água. Alguns autores ainda ampliaram a definição de psicrometria para cobrir também as misturas de um gás de uma substância – qualquer componente de gás seco – e o vapor de condensação de uma segunda substância. Entretanto a psicrometria não está limitada apenas na aplicação de condicionamento de ar. Também é usada na agricultura, engenharia aeronáutica, engenharia de alimentos, secagem de grãos, produtos farmacêuticos, desidratação, desumidificação, umidificação, controle de umidade e na meteorologia [Gatley, 2004].

No caso da Engenharia de Segurança do Trabalho a preocupação é tanto com o conforto térmico como com a saúde dos trabalhadores. A sensação de bem-estar sentida por eles é determinada pela temperatura efetiva do ambiente, que é a temperatura de um ambiente saturado de umidade cujo conforto térmico é semelhante, mas de maneira subjetiva, ao do ambiente analisado. O aumento da temperatura efetiva do ar, em um determinado ambiente, ocorre devido a presença de pessoas – cujo corpo libera calor e vapor d'água –, aparelhos de iluminação, funcionamento de motores elétricos e outros equipamentos. Ambientes com temperatura efetiva de 23 °C apresentam um bom conforto térmico, já para uma temperatura efetiva de 30 °C a realização de trabalhos braçais torna-se difícil e para temperatura efetiva superior a 37 °C, não há mais a ocorrência de trocas térmicas com o ambiente levando o trabalhador à morte [Costa, 1974].

A legislação brasileira, referente à segurança no trabalho, deixa evidente essa preocupação com o conforto do trabalhador. A Norma Regulamentadora NR17 – Ergonomia estabelece limites para a temperatura efetiva, velocidade do ar e umidade relativa “Nos locais de trabalho onde são executadas atividades que exijam solicitação intelectual e atenção constantes, tais como: salas de controle, laboratórios, escritórios, salas desenvolvimento ou análise de projetos, dentre outros [...]” visando com isso proporcionar ao trabalhador “[...] um máximo de conforto, segurança e desempenho eficiente.” [BRASIL, 1990].

Neste sentido, para ambientes internos, se torna necessário o condicionamento do ar no ambiente, sendo que “Em instalações de conforto ambiental e ar condicionado, a psicrometria se acha sempre presente na elaboração de projetos e na execução e manutenção das instalações.” [Macintyre, 1990]. Para realizar o condicionamento do ar, seja para o conforto térmico humano,

seja para outras finalidades, é necessário realizar operações para o tratamento deste ar. Essas operações de tratamento de ar são classificadas em [Costa, 1974]:

- a) purificação;
- b) aquecimento;
- c) umidificação;
- d) refrigeração;
- e) desumidificação;
- f) mistura.

Sendo que “Todas essas operações, com exceção da purificação, que não envolve modificação das grandezas características do ar, podem ser analisadas com o auxílio da **carta psicrométrica** [...]” [Costa, 1974, grifo nosso], que é uma ferramenta prática e útil para [Gatley, 2004]:

- a) determinar as propriedades psicrométricas do ar úmido;
- b) visualizar as mudanças de propriedades em uma sequência de processos psicrométricos.

Na época em que a carta psicrométrica foi desenvolvida, não havia programas computacionais disponíveis para determinar as propriedades psicrométricas do ar úmido, sendo necessário o uso tabelas e formulações matemáticas para solucionar esses problemas. Esse contexto mostrou a necessidade de desenvolver uma ferramenta para auxiliar nos cálculos psicrométricos de forma fácil e prática. Assim surgiu a carta psicrométrica, que em 2004 completou 100 anos de existência, sendo que seu formato original permaneceu praticamente inalterado ao longo dos anos, e seu uso perdura até os dias de hoje [Gatley, 2004]. Entretanto, ainda é necessário realizar algumas aproximações e interpolações no gráfico para determinar as propriedades psicrométricas de um ponto. Com isso a precisão dos resultados obtidos pode ser comprometida por uma leitura equivocada. Com o avanço da capacidade de processamento de computadores pessoais e de calculadoras foram desenvolvidos programas comerciais para o cálculo das propriedades psicrométricas, mitigando a imprecisão obtida pela leitura da carta psicrométrica. Destarte, este trabalho visa o desenvolvimento de um programa computacional para auxiliar a resolução de cálculos envolvendo os processos e a obtenção das propriedades psicrométricas do ar úmido.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um programa computacional para auxiliar, de forma numérica, a resolução de questões e problemas de psicrometria. Conhecendo duas propriedades do ar, como a temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, temperatura de orvalho, umidade relativa, etc., o *software* calcula as propriedades psicrométricas desse ponto, substituindo o uso da carta psicrométrica, evitando com isso, leituras imprecisas na mesma. Além disso o *software* também auxilia na resolução de problemas envolvendo oito processos psicrométricos:

- a) aquecimento do ar úmido;
- b) resfriamento do ar úmido;
- c) umidificação do ar úmido;
- d) desumidificação do ar úmido;
- e) resfriamento evaporativo;
- f) desumidificação do ar úmido por adsorção;
- g) resfriamento e desumidificação do ar úmido;
- h) mistura adiabática de dois fluxos de ar úmido.

O programa também faz a verificação se um ambiente atende ou não as condições de conforto térmico recomendadas pela NR17 – Ergonomia. Conhecendo duas propriedades psicrométricas e a velocidade do ar, o programa calcula e verifica se a temperatura efetiva, umidade relativa e velocidade do ar estão ou não de acordo com a NR-17.

O programa apresenta os resultados na tela do computador e também gera dois arquivos contendo os resultados calculados. Um deles é um relatório no formato de texto puro (extensão .TXT) e o outro no formato compatível com editores de planilhas eletrônicas (extensão .CSV). Com os resultados, em um arquivo compatível com editores de planilhas eletrônicas, o usuário pode continuar trabalhando com os resultados gerados e dar continuidade na resolução de problemas para os quais o *software* não foi projetado.

3 COMPOSIÇÃO DO AR E SUAS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

Como a “Psicrometria é a parte da termodinâmica que estuda as propriedades e os estados do ar, bem como os processos a que ele se sujeita [...]” [Rossi, 1987], inicialmente é necessário estabelecer alguns conceitos sobre a composição do ar atmosférico e noções fundamentais sobre calor e termodinâmica, antes de abordar os processos psicrométricos e o uso da carta psicrométrica na resolução de problemas.

3.1 Composição do Ar Atmosférico, Ar Seco e Ar Úmido

O **ar atmosférico** contém uma variedade de componentes gasosos, bem como vapor d’água e uma série de contaminantes, tais como, fumaça, pólen e poluentes gasosos que normalmente não estão presentes ao ar livre, longe de fontes de poluição. A temperatura e a pressão do ar atmosférico variam consideravelmente com a altitude bem como com as condições geográficas e meteorológicas de uma determinada região [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]. Ao nível do mar, o valor médio da pressão atmosférica, dita pressão atmosférica normal, vale [Costa, 1974]:

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 10332 \text{ mmH}_2\text{O} = 101325 \text{ Pa}$$

O **ar seco** é o ar atmosférico com todo o vapor d’água e contaminantes removidos. Sua composição é relativamente constante, mas pequenas variações nas quantidades dos componentes individuais podem ocorrer dependendo do tempo, localização geográfica e altitude [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]. O ar seco é composto principalmente de oxigênio e nitrogênio, cujas frações molares são respectivamente 0,2095 e 0,7809, isso quer dizer que o ar seco é composto por 78,09% de nitrogênio e 20,95% de oxigênio [Rossi, 1987].

Já o **ar úmido** é uma mistura binária de ar seco e vapor d’água. A quantidade de vapor d’água varia de zero (ar seco) até um máximo que depende da temperatura e pressão. Sendo que a **saturação** é um estado neutro de equilíbrio entre ar úmido e água em fase de condensação (líquida ou sólida) [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009].

3.2 Propriedades Termodinâmicas

A seguir são definidas as propriedades termodinâmicas utilizadas na psicrometria. São elas:

- a) temperatura de bulbo seco (TBS);
- b) temperatura de bulbo úmido (TBU);
- c) temperatura ou ponto de orvalho (TO);
- d) pressão parcial do vapor d'água (P_w);
- e) pressão de saturação do vapor d'água (P_{ws});
- f) conteúdo de umidade (W);
- g) conteúdo de umidade na saturação (W_s);
- h) grau de saturação (GS);
- i) umidade relativa (UR);
- j) entalpia (h);
- k) volume específico (v);
- l) densidade (ρ).

A **temperatura de bulbo seco** é a temperatura indicada por um termômetro comum. “A temperatura é o conceito físico que nos permite medir o estado térmico de um sistema, estabelecendo a sua maior ou menor capacidade de transmitir calor [...]” [Costa, 1974]. A **temperatura de bulbo úmido** é uma temperatura medida com um termômetro cujo bulbo está envolto em um algodão ou gaze molhado com água por onde passa uma corrente de ar. A água evapora do algodão ou gaze e eventualmente atinge uma temperatura de equilíbrio, que é a temperatura de bulbo úmido [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]. A **temperatura de orvalho** “É a temperatura sob a qual o vapor d'água contido na atmosfera condensa.” [Macintyre, 1990].

A escala mais utilizada para temperaturas é o grau Celsius ($^{\circ}\text{C}$), entretanto como esta é uma escala relativa – que usa como referência as temperaturas correspondentes aos pontos de ebulição e congelamento da água –, em alguns casos é utilizada a escala Kelvin (K), que é uma escala absoluta, ou seja, independe da substância termométrica. A escala Celsius e a Kelvin se relacionam da seguinte maneira [Costa, 1974]:

$$T = t + 273,15 \quad (3.1)$$

Onde:

T = temperatura na escala Kelvin [K];

t = temperatura na escala Celsius [$^{\circ}\text{C}$].

A **pressão parcial do vapor d'água** “[...] é a pressão parcial exercida pelas moléculas de vapor de água presentes no ar.” [Rossi, 1987]. Como o ar úmido é considerado uma mistura binária independente de gases perfeitos – ar seco e vapor d'água –, se presume que a mistura também obedeça a relação dos gases perfeitos, sendo que a pressão total (P) da mistura é dada pela soma da pressão parcial do ar seco (P_{DA}) com a pressão parcial do vapor d'água (P_{W}), como mostra a seguinte equação [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]:

$$P = P_{\text{DA}} + P_{\text{W}} \quad (3.2)$$

Onde:

P = pressão total da mistura [Pa];

P_{DA} = pressão parcial do ar seco [Pa];

P_{W} = pressão parcial do vapor d'água [Pa].

A **pressão de saturação do vapor d'água** é a pressão “Quando o ar está completamente saturado de vapor de água [...]” [Rossi, 1987] e é necessária para determinar várias propriedades do ar úmido, principalmente o conteúdo de umidade na saturação. A pressão de saturação sobre o gelo para temperaturas variando entre $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ é dado pela seguinte equação [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]:

$$\ln(P_{\text{WS}}) = C_1/T + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + C_6T^4 + C_7 \ln(T) \quad (3.3)$$

Onde:

P_{WS} = pressão de saturação do vapor d'água [Pa];

T = temperatura [K];

$C_1 = -5,6745359 \cdot 10^3$;

$C_2 = 6,3925247$;

$C_3 = -9,6778430 \cdot 10^{-3}$;

$C_4 = 6,2215701 \cdot 10^{-7}$;

$C_5 = 2,0747825 \cdot 10^{-9}$;

$C_6 = -9,4840240 \cdot 10^{-13}$;

$C_7 = 4,1635019$.

A pressão de saturação sobre a água líquida para temperaturas variando entre 0°C e 200°C é dada pela seguinte equação [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]:

$$\ln(P_{WS}) = C_8/T + C_9 + C_{10}T + C_{11}T^2 + C_{12}T^3 + C_{13} \ln(T) \quad (3.4)$$

Onde:

P_{WS} = pressão de saturação do vapor d'água [Pa];

T = temperatura [K];

$C_8 = -5,8002206 \cdot 10^3$;

$C_9 = 1,3914993$;

$C_{10} = -4,8640239 \cdot 10^{-3}$;

$C_{11} = 4,1764768 \cdot 10^{-7}$;

$C_{12} = -1,4452093 \cdot 10^{-9}$;

$C_{13} = 6,5459673 \cdot 10^{-13}$.

A temperatura utilizada nas Equações 3.3 e 3.4 pode ser tanto a temperatura de bulbo seco quanto as temperaturas de bulbo úmido e de orvalho. Sendo que se pressão de saturação do vapor d'água for calculada com a temperatura de orvalho esta se equivale a pressão parcial do vapor d'água.

O **conteúdo de umidade** é a razão da massa de vapor de água com a massa de ar em uma mistura. A vantagem de se usar o conteúdo de umidade é que se a quantidade de vapor de água contida no ar permanece inalterada, o conteúdo de umidade permanece constante [Glicksman, 2010]. O conteúdo de umidade é calculado pela seguinte equação [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]:

$$W = 0,621945 P_W / (P - P_W) \quad (3.5)$$

Onde:

W = conteúdo de umidade [$\text{kg}_{\text{água}} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$];

P = pressão total da mistura [Pa];

P_W = pressão parcial do vapor d'água [Pa].

Sendo que “Para o ar saturado de umidade, o conteúdo de umidade atinge o valor máximo.” [Costa, 1974]. O **conteúdo de umidade na saturação** é calculado pela Equação 3.5,

substituindo a pressão parcial do vapor d'água pela pressão de saturação do vapor d'água, como mostra a equação abaixo:

$$W_S = 0,621945 P_{WS} / (P - P_{WS}) \quad (3.6)$$

Onde:

W_S = conteúdo de umidade na saturação [$\text{kg}_{\text{água}} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$];

P = pressão total da mistura [Pa];

P_{WS} = pressão de saturação do vapor d'água [Pa].

O conteúdo de umidade na saturação também pode ser calculado tanto em função da temperatura de bulbo seco quanto em função da temperatura de bulbo úmido, dependendo de qual delas foi utilizada para calcular a pressão de saturação do vapor d'água. Alternativamente também é possível calcular o conteúdo de umidade com a seguinte equação [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]:

$$W = \frac{(2501 - 2,326 \text{ TBU}) W_S^* - 1,006(\text{TBS} - \text{TBU})}{(2501 + 1,86 \text{ TBS} - 4,186 \text{ TBU})} \quad (3.7)$$

Onde:

W = conteúdo de umidade [$\text{kg}_{\text{água}} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$];

W_S^* = conteúdo de umidade na saturação para temperatura de bulbo úmido [$\text{kg}_{\text{água}} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$];

TBS = temperatura de bulbo seco [$^{\circ}\text{C}$];

TBU = temperatura de bulbo úmido [$^{\circ}\text{C}$].

O **grau de saturação** é a razão entre o conteúdo de umidade e o conteúdo de umidade na saturação, a uma mesma temperatura e pressão. O grau de saturação é calculado pela seguinte equação [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]:

$$GS = W / W_S \quad (3.8)$$

Onde:

GS = grau de saturação;

W = conteúdo de umidade [$\text{kg}_{\text{água}} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$];

W_S = conteúdo de umidade na saturação [$\text{kg}_{\text{água}} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$].

A **umidade relativa** é “A relação entre o peso do vapor d’água contida por volume de ar e o peso de vapor d’água que o mesmo conteria caso estivesse saturado [...]” [Costa, 1974] a uma temperatura e pressão. A umidade relativa é dada pela seguinte equação [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]:

$$UR = 100 (P_W / P_{WS}) \quad (3.9)$$

Onde:

UR = umidade relativa [%];

P_W = pressão parcial do vapor d’água [Pa];

P_{WS} = pressão de saturação do vapor d’água [Pa].

Alternativamente a umidade relativa também pode ser calculada pela seguinte equação [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]:

$$UR = 100 \{ GS / [1 - (1 - GS) (P_W / P)] \} \quad (3.10)$$

Onde:

UR = umidade relativa [%];

GS = grau de saturação;

P = pressão total da mistura [Pa];

P_W = pressão parcial do vapor d’água [Pa].

A **entalpia** é “[...] uma função do estado de um fluido e [...] corresponde ao calor que entra na formação de um vapor, considerando-se como ponto de partida a fase líquida na zona de saturação a 0°C.” [Macintyre, 1990]. A entalpia é calculada pela seguinte equação [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]:

$$h = 1,006 TBS + W (2501 + 1,86 TBS) \quad (3.11)$$

Onde:

h = entalpia [kJ / kg_{ar seco}];

W = conteúdo de umidade [kg_{água} / kg_{ar seco}];

TBS = temperatura de bulbo seco [°C].

O **volume específico** do ar úmido é “[...] o volume ocupado pela mistura por unidade de massa de ar seco.” [Rossi, 1987]. O volume específico é dado pela seguinte equação [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]:

$$v = 0,287042 (TBS + 273,15) (1 + 1,607858 W) / P \quad (3.12)$$

Onde:

v = volume específico [$m^3 / kg_{ar\ seco}$];

P = pressão total da mistura [Pa];

W = conteúdo de umidade [$kg_{\acute{a}gua} / kg_{ar\ seco}$];

TBS = temperatura de bulbo seco [$^{\circ}C$].

A **densidade** de uma mistura de ar úmido é a razão entre a massa total e o volume total da mistura e é calculado pela seguinte equação [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]:

$$\rho = (1 / v) (1 + W) \quad (3.13)$$

Onde:

ρ = densidade [$kg_{ar\ seco} / m^3$];

v = volume específico [$m^3 / kg_{ar\ seco}$];

W = conteúdo de umidade [$kg_{\acute{a}gua} / kg_{ar\ seco}$].

4 PSICROMETRIA

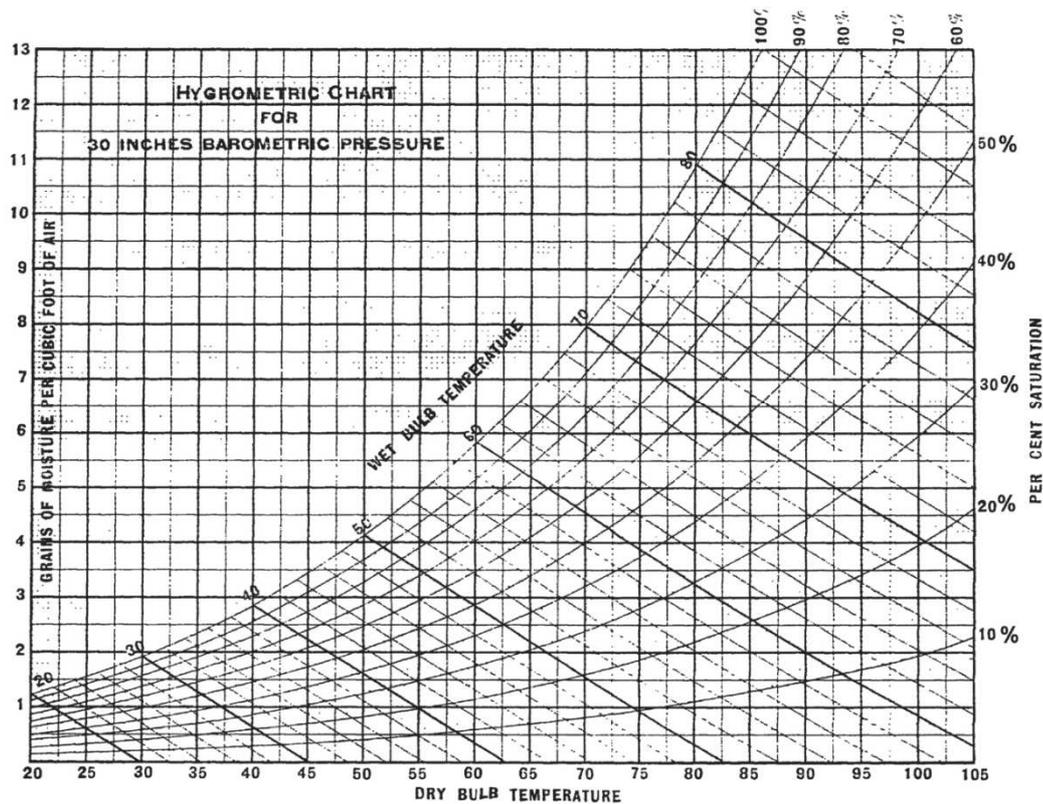
Psicrometria usa as propriedades termodinâmicas para analisar processos e a condição do ar úmido [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009], sendo a carta psicrométrica a principal ferramenta utilizada para determinar essas propriedades. A carta normalmente apresenta as seguintes grandezas [Macintyre, 1990]:

- a) temperatura lida no termômetro de bulbo seco (TBS);
- b) temperatura lida no termômetro de bulbo úmido (TBU);
- c) umidade relativa (UR);
- d) conteúdo de umidade (W);
- e) volume específico (v);
- f) entalpia (h).

4.1 Breve Histórico da Carta Psicrométrica

Antes do advento dos programas computacionais de psicrometria, a carta psicrométrica foi usada extensivamente como uma ferramenta gráfica extremamente útil para visualizar, diagnosticar e solucionar processos psicrométricos. Antes de 1900, tabelas empíricas de propriedades psicrométricas eram usadas por meteorologistas. A Tabela Higrométrica, desenvolvida por James Glaisher em 1847, foi a primeira tabela confiável a listar pressão de vapor d'água, pressão barométrica, temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco, ponto de orvalho, umidade relativa e densidade do vapor d'água, além da quantidade de água necessária para atingir a saturação. Glaisher obteve parte dessas informações de forma empírica ao longo de dois anos observando essas propriedades em Greenwich, Inglaterra. Anos mais tarde, em 1886, o meteorologista William Ferrel desenvolveu uma fórmula aperfeiçoada para calcular vapor d'água a partir da temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido e pressão barométrica. Em 1900 o *U.S. Weather Bureau* encomendou ao Professor Charles F. Marvin versões melhoradas das tabelas desenvolvidas por Glaisher e Ferrel. Em 1903, Willis H. Carrier havia terminado o primeiro sistema, concebido cientificamente, de condicionador de ar desenvolvido especificamente para controlar a umidade. Em 1904, para simplificar a tarefa de projetar condicionadores de ar, Carrier plotou as informações das tabelas desenvolvidas por Marvin, resultando num gráfico que possui o formato básico das cartas psicrométricas que se conhece hoje em dia (Figura 4.1) [Gatley, 2004].

Figura 4.1 – Carta Higrométrica de Willis H. Carrier



Fonte: Gatley, 2004

Entre 1908 e 1911, a ordenada foi alterada para o que hoje se chama **fator de umidade**. O fator de umidade também é chamado de **conteúdo de umidade** e, em algumas situações, de umidade específica ou umidade absoluta, apesar da Organização Mundial de Meteorologia, a *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE) e muitos dicionários definirem esses termos com conceitos diferentes do fator de umidade. A mudança da ordenada para o fator de umidade adicionou as seguintes características à carta psicrométrica [Gatley, 2004]:

- a) as linhas dos processos psicrométricos que representam o calor sensível ou resfriamento sensível são linhas horizontais com o conteúdo de umidade constante;
- b) as linhas dos processos psicrométricos que representam a umidificação (calor latente) ou a desumidificação (resfriamento latente) são linhas verticais com temperatura de bulbo seco constante.

Estas características funcionaram bem nos cálculos de calor ganho ou perdido que foram separados nas componentes sensível e latente. Willis Carrier continuou, durante o restante de sua vida, suas pesquisas sobre psicrometria, juntamente com seus colegas (1876 – 1950). Nos anos

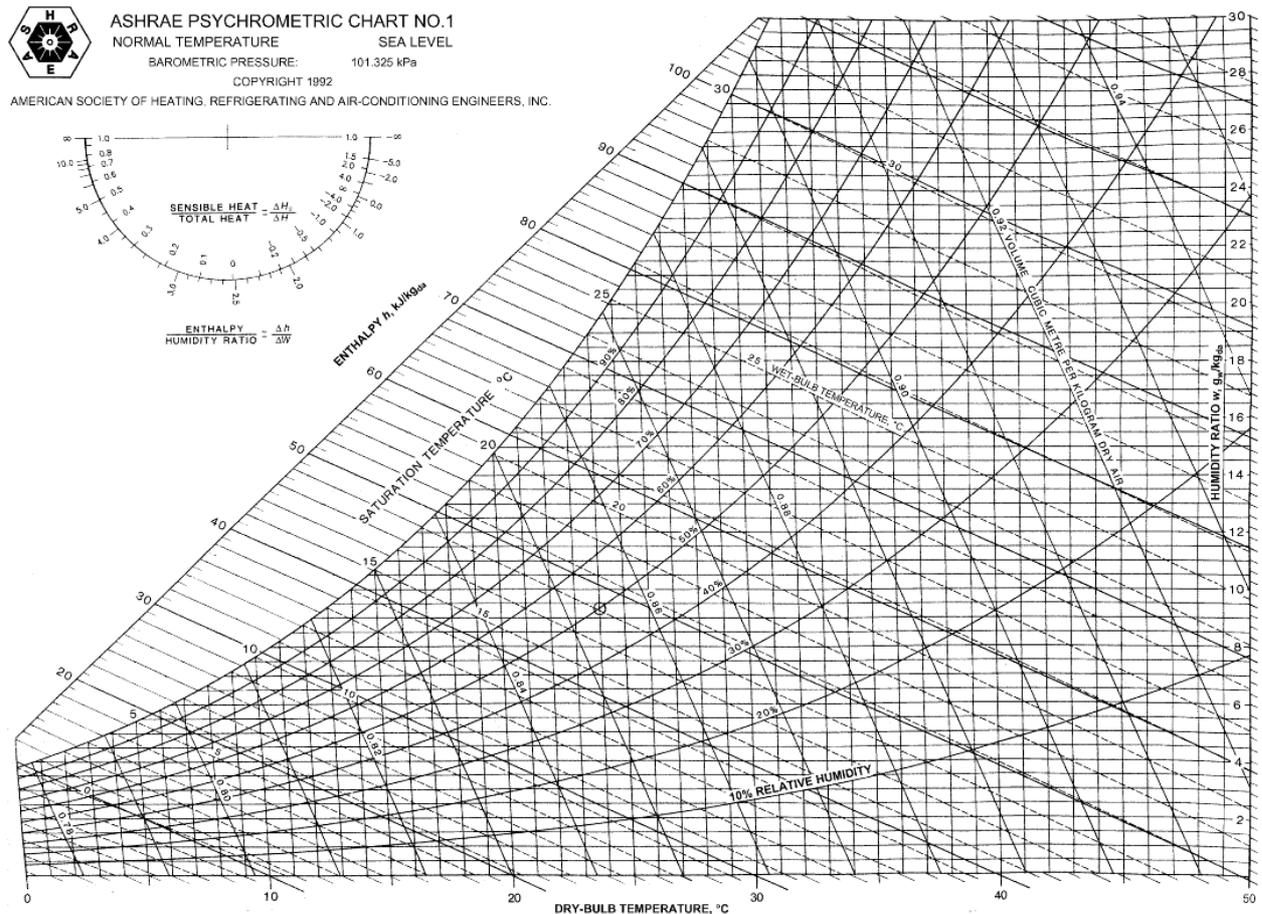
que se passaram, desde a primeira carta psicrométrica de Willis Carrier, muitas foram as mudanças feitas para aperfeiçoar sua utilidade, precisão de leitura e entrada de dados. E mesmo após todas essas mudanças, a carta continuou com sua forma básica original [Gatley, 2004].

4.2 Descrição da Carta Psicrométrica

A carta psicrométrica, como já comentado anteriormente, representa graficamente as propriedades termodinâmicas do ar úmido. Uma carta com as coordenadas de entalpia e conteúdo de umidade fornecem uma solução gráfica conveniente para a maioria dos problemas com um mínimo de aproximações necessárias. As linhas da temperatura de bulbo seco são retas, mas não precisamente paralelas entre si e levemente inclinadas da posição vertical. As linhas da temperatura de bulbo úmido são oblíquas e sua direção difere levemente das linhas que representam a entalpia, elas também são retas, mas não são precisamente paralelas entre si. A umidade relativa é apresentada em intervalos de 10%, sendo que a saturação é a linha de 100% e a linha horizontal é de 0% coincidindo com a linha horizontal de conteúdo de umidade igual à zero. As linhas do volume específico também são retas e não são exatamente paralelas entre si.

A ASHRAE desenvolveu sete cartas psicrométricas. As Cartas 1, 2, 3 e 4 são para pressões ao nível do mar ($P = 101,325$ kPa), a Carta 5 para altitudes de 750 m ($P = 92,634$ kPa), a Carta 6 para altitudes de 1500 m ($P = 84,54$ kPa) e a Carta 7 para altitudes de 2250 m ($P=77,058$ kPa). Além disso, a faixa de temperaturas de bulbo seco também difere em cada uma das cartas. As Cartas 1, 5, 6 e 7 são para a faixa de temperatura normal (0 °C até 50 °C), a Carta 2 para baixas temperaturas (-40 °C até 10 °C), a Carta 3 para altas temperaturas (10 °C até 120 °C) e a Carta 4 para temperaturas muito altas (100 °C até 200 °C) [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]. Na Figura 4.2 é apresentada a Carta Psicrométrica n° 1, elaborada pela ASHRAE, para pressão atmosférica padrão com faixa de temperatura de bulbo seco normal.

Figura 4.2 – Carta Psicrométrica nº 1 da ASHRAE



Fonte: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009

4.3 Processos Psicrométricos

Conhecendo duas propriedades psicrométricas é possível determinar o estado da mistura, entretanto, quando se fala de operações industriais ou de condicionamento do ar é possível alterar as condições do ar, variando a temperatura, conteúdo de umidade, umidade relativa. Isso pode ser obtido alterando uma propriedade de cada vez ou então mais de uma ao mesmo tempo, fazendo com que as demais propriedades também se alterem, partindo de um estado inicial até atingir um estado final do processo [Rossi, 1987].

A carta psicrométrica pode ser usada para resolver inúmeros problemas envolvendo processos com ar úmido [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009], sendo que estes são representados “[...] por uma linha reta unindo o estado inicial ao estado final.” [Rossi, 1987].

Para alterar a condição inicial do ar até uma condição final desejada, é necessário que o fluxo de ar, passando dentro de um tubo, sofra ganho ou perda de calor ou de água. A energia necessária para provocar essa alteração na condição do ar, assim como a quantidade de água

consumida ou liberada por esses processos, são determinadas por meio de fórmulas físicas, que utilizam as propriedades referentes a cada um dos pontos encontradas na carta psicrométrica. Sendo assim antes de serem descritos cada um dos processos psicrométricos, essas equações serão apresentadas a seguir.

Como o volume de ar que entra em um duto é igual ao volume de ar que sai desse mesmo duto, pode-se relacionar esse volume de ar com as velocidades e áreas das seções transversais de entrada ou saída do duto. A “[...] relação entre a velocidade e a área da seção transversal é chamada de **equação da continuidade** [...]”. A equação da continuidade também pode ser escrita em função da **Vazão Volumétrica** de ar que passa por uma seção transversal de um duto com uma determinada velocidade [Halliday et al., 2002]:

$$V = A \cdot u \quad (4.1)$$

Onde:

V = vazão volumétrica [m^3/s];

A = área da seção transversal do duto por onde passa o ar [m^2];

u = velocidade do fluxo de ar através do duto [m/s].

Se a massa específica do ar for conhecida, pode-se multiplicar essa massa específica pela vazão volumétrica para determinar a **Vazão Mássica de Ar**. Essa relação “[...] diz que a massa que escoar para dentro do [...] [duto] a cada segundo tem que ser igual à massa que escoar para fora desse [...] a cada segundo.” [Halliday et al., 2002]. Entretanto como o inverso da massa específica é o volume específico, que pode ser lido diretamente da carta psicrométrica, fica interessante expressar a vazão mássica em função desta propriedade psicrométrica, como mostra a seguinte equação:

$$m_a = V / v \quad (4.2)$$

Onde:

m_a = vazão mássica de ar [$\text{kg}_{\text{ar}} \text{seco} / \text{s}$];

V = vazão volumétrica [m^3/s];

v = volume específico [$\text{m}^3 / \text{kg}_{\text{ar}} \text{seco}$].

A **Vazão Mássica de Água** consumida ou condensada por um determinado processo é calculada pela seguinte equação [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]:

$$m_w = m_a \Delta W \quad (4.3)$$

Onde:

m_w = vazão mássica de água [$\text{kg}_{\text{água}}/\text{s}$];

m_a = vazão mássica de ar [$\text{kg}_{\text{ar seco}}/\text{s}$];

ΔW = diferença entre o conteúdo de umidade do ar, na entrada e na saída do duto [$\text{kg}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$].

A **Potência Térmica**, necessária para adicionar ou retirar calor (sensível, latente ou total) do fluxo de ar é calculado pela equação [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]:

$$Q = m_a \Delta h \quad (4.4)$$

Onde:

Q = potência térmica [kW];

m_a = vazão mássica de ar [$\text{kg}_{\text{ar seco}}/\text{s}$];

Δh = diferença entre a entalpia do ar, na entrada e na saída do duto [$\text{kJ}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$].

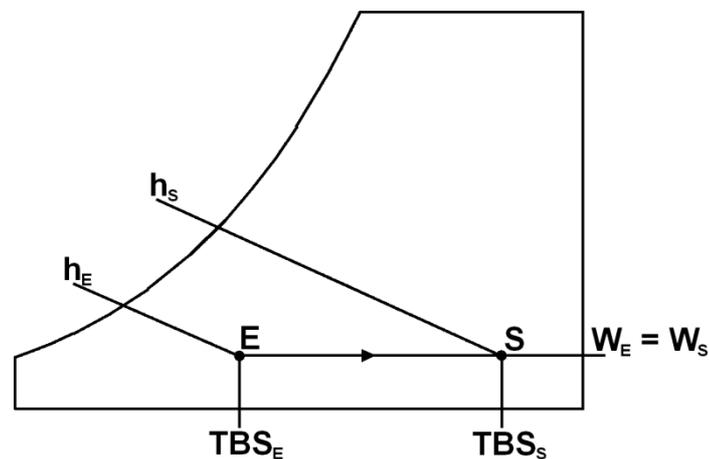
Nos próximos itens serão descritos os seguintes processos psicrométricos:

- a) aquecimento do ar úmido (conteúdo de umidade constante);
- b) resfriamento do ar úmido (conteúdo de umidade constante);
- c) umidificação do ar úmido (temperatura de bulbo seco constante);
- d) desumidificação do ar úmido (temperatura de bulbo seco constante);
- e) resfriamento evaporativo (entalpia constante);
- f) desumidificação do ar úmido por adsorção (entalpia constante);
- g) resfriamento e desumidificação do ar úmido;
- h) mistura adiabática de dois fluxos de ar úmido.

4.3.1 Aquecimento do Ar Úmido

O **aquecimento do ar úmido** consiste na adição de calor sensível ao ar úmido [Macintyre, 1990], por meio da instalação de um aquecedor dentro do duto por onde passa esse ar. O aquecedor pode ser qualquer tipo de trocador de calor que não altere o conteúdo de umidade do ar, apenas a temperatura e sua entalpia [Rossi, 1987]. Como o conteúdo de umidade não se altera, conseqüentemente a temperatura de orvalho também permanece constante, entretanto o aquecimento é realizado as custas da umidade relativa, que diminui com o aumento da temperatura. Sendo assim esse processo é representado por uma linha horizontal na carta psicrométrica, como mostra a Figura 4.3, em que o ponto **E** representa o estado inicial, ou seja, a entrada de ar no duto e o ponto **S** o estado final, ou seja, a saída de ar do duto.

Figura 4.3 – Aquecimento do Ar Úmido



Fonte: elaborado pelo autor

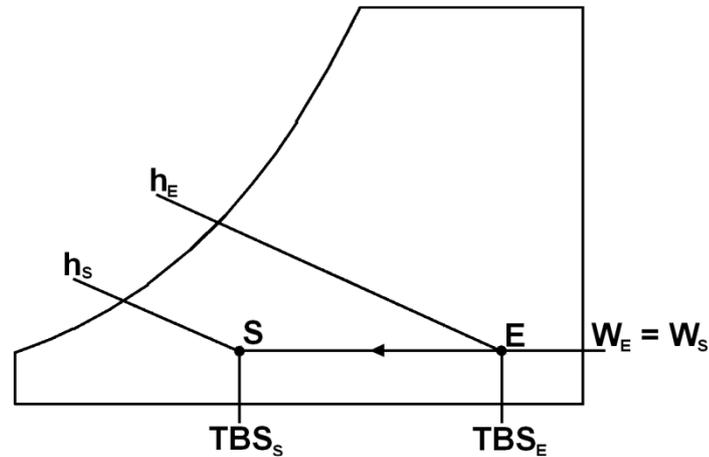
A **potência térmica** necessária para adicionar **calor sensível** ao processo é calculada pela Equação 4.4, já a **vazão mássica de ar seco** é determinada pela Equação 4.2. Como neste processo não ocorre variação do conteúdo de umidade conseqüentemente não há consumo ou condensação de água, nem ganho ou perda de calor latente.

4.3.2 Resfriamento do Ar Úmido

O inverso do processo anterior é o **resfriamento do ar úmido**, que consiste na retirada de calor sensível do ar úmido, também utilizando um trocador de calor que não altere o conteúdo de umidade do ar. Assim como no caso anterior a temperatura de orvalho permanece constante enquanto que temperatura de bulbo seco, bulbo úmido e a entalpia são alteradas assim como a

umidade relativa, que sofre um aumento, com a redução da temperatura. Na Figura 4.4 é apresentada a representação gráfica desse processo.

Figura 4.4 – Resfriamento do Ar Úmido



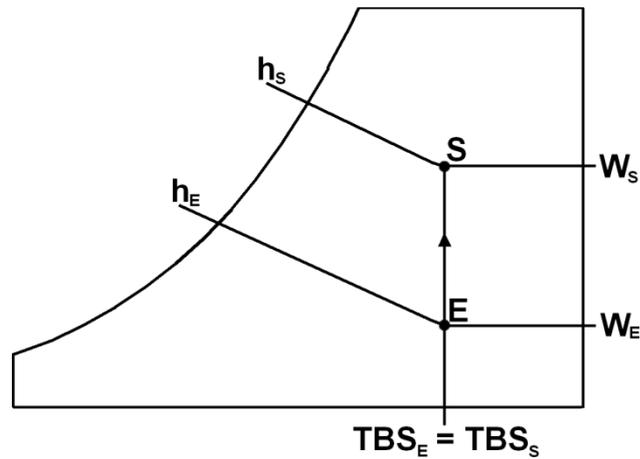
Fonte: elaborado pelo autor

Assim como no caso anterior, o **calor sensível** retirado do processo é calculado pela Equação 4.4 e a **vazão mássica de ar seco** é determinada pela Equação 4.2. Neste processo também não ocorre variação do conteúdo de umidade e, portanto, não há consumo ou condensação de água, nem ganho ou perda de calor latente.

4.3.3 Umidificação do Ar Úmido

A **umidificação do ar úmido** “[...] significa adicionar calor latente, portanto, aumentar a umidade relativa, sem aumentar a temperatura do termômetro de bulbo seco (TBS).”, e isso se faz necessário sempre que o ar estiver com baixa umidade, ou seja, muito seco [Macintyre, 1990]. Como a temperatura de bulbo seco permanece constante e há um aumento na umidade relativa o conteúdo de umidade do ar também sofre um aumento. Esse processo é obtido introduzindo vapor de água no duto por onde está passando o ar [Rossi, 1987] que ao entrar “[...] em contato com a água a uma temperatura superior à temperatura de orvalho do ar, este sofre umidificação [...]” [Costa, 1974]. Na Figura 4.5 é apresentada a representação gráfica desse processo.

Figura 4.5 – Umidificação do Ar Úmido



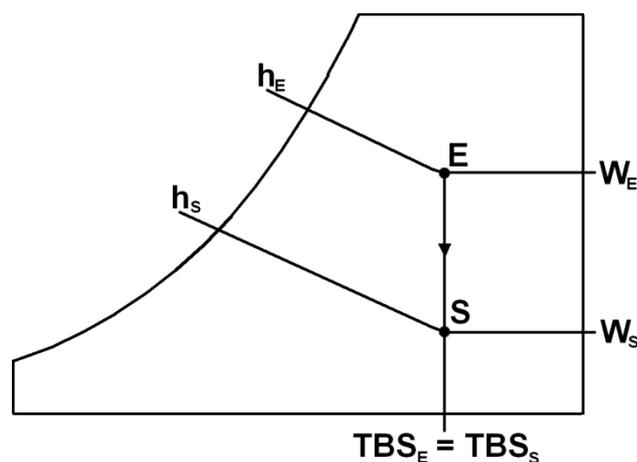
Fonte: elaborado pelo autor

A **potência térmica** necessária para adicionar **calor latente** ao processo é calculada pela Equação 4.4, a **vazão mássica de ar seco** pela Equação 4.2 e a **vazão mássica de água vaporizada** pela Equação 4.3. Neste processo não há ganho ou perda de calor sensível, visto que sua temperatura de bulbo seco permanece constante.

4.3.4 Desumidificação do Ar Úmido

A **desumidificação do ar úmido** consiste na retirada de calor latente do ar úmido, condensando sua umidade [Macintyre, 1990], reduzindo, com isso, seu conteúdo de umidade [Costa, 1974]. Para que isso aconteça o trocador de calor deve estar a uma temperatura inferior à temperatura de orvalho e, quando isso ocorre, parte do vapor de água irá condensar [Glicksman, 2010]. Na Figura 4.6 é apresentada a representação gráfica desse processo.

Figura 4.6 – Desumidificação do Ar Úmido



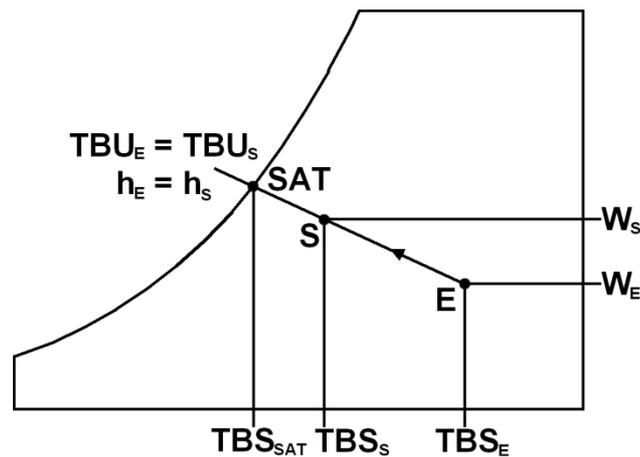
Fonte: elaborado pelo autor

A **potência térmica** necessária para retirar **calor latente** do processo é calculada pela Equação 4.4, a **vazão mássica de ar seco** pela Equação 4.2 e a **vazão mássica de água condensada** pela Equação 4.3. Neste processo não há variação da temperatura de bulbo seco, logo, também não há ganho ou perda de calor sensível.

4.3.5 Resfriamento Evaporativo

O **resfriamento evaporativo** é obtido injetando água pulverizada no fluxo de ar, passando por um duto isolado adiabaticamente, para aumentar sua umidade, sem alterar a entalpia. Com isso o ar é resfriado e umidificado [Rossi, 1987], como mostra a Figura 4.7. Isso ocorre pois “Ao atravessar a água pulverizada o ar cede calor à mesma. Esse aquecimento faz com que parte da água vaporize, e, com isso, retire o calor do ar. O ar com o vapor formado se torna mais frio e mais úmido.” [Macintyre, 1990].

Figura 4.7 – Resfriamento Evaporativo



Fonte: elaborado pelo autor

O calor necessário para vaporizar a água é calor sensível transformado em calor latente, que causa essa redução na temperatura de bulbo seco, e com isso não há calor total sendo retirado ou adicionado ao sistema [Honeywell, 1997]. A **vazão mássica de ar seco** é calculada pela Equação 4.2 e a **vazão mássica de água condensada** pela Equação 4.3. Já a **eficiência de saturação** é calculada pela seguinte equação [Beyer, 2010]:

$$\eta_s = 100 [(TBS_S - TBS_E) / (TBS_{SAT} - TBS_E)] \quad (4.5)$$

Onde:

η_s = eficiência de saturação [%];

TBS_E = temperatura de bulbo seco do ponto E [°C];

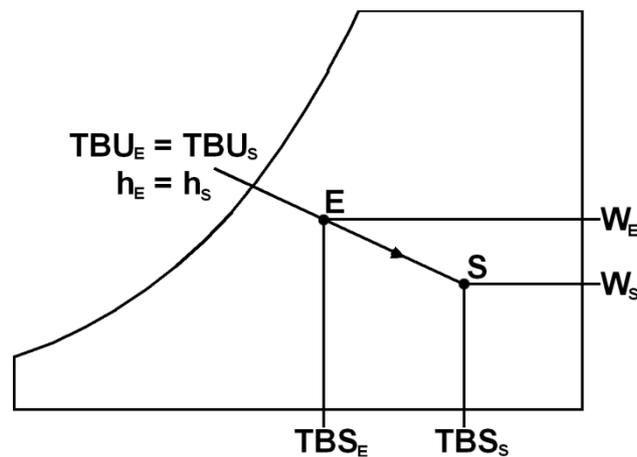
TBS_S = temperatura de bulbo seco do ponto S [°C];

TBS_{SAT} = temperatura de bulbo seco na saturação [°C].

4.3.6 Desumidificação do Ar Úmido por Adsorção

A **desumidificação do ar úmido por adsorção** “[...] consiste em fazer passar o ar em contato com substâncias higroscópicas [...] como a sílica-gel” [Costa, 1974], retendo a umidade e aumentando sua temperatura. A retenção de umidade corresponde à retirada de calor latente, já o aumento da temperatura corresponde ao recebimento de calor sensível pelo processo [Rossi, 1987]. Essa produção de calor, devido à adsorção da umidade pela sílica-gel, corresponde à condensação da água [Costa, 1974]. O processo de desumidificação do ar úmido por adsorção é representado graficamente pela Figura 4.8.

Figura 4.8 – Desumidificação do Ar Úmido por Adsorção



Fonte: elaborado pelo autor

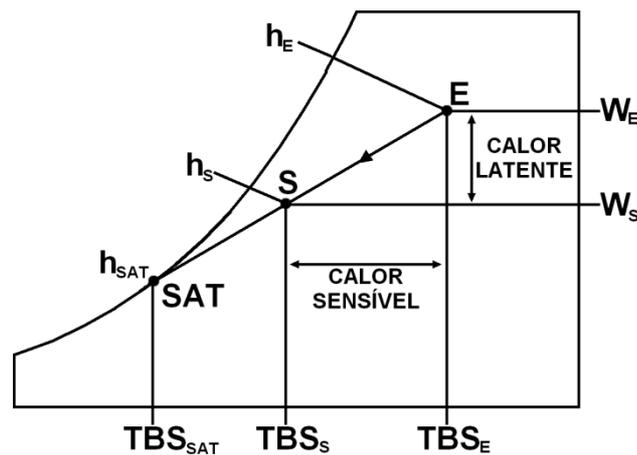
Assim, como no processo anterior, neste também não há variação da entalpia, então o **calor total** do processo também é nulo. A **vazão mássica de ar seco** é calculada pela Equação 4.2 e a **vazão mássica de água adsorvida** pela Equação 4.3.

4.3.7 Resfriamento e Desumidificação do Ar Úmido

O **resfriamento com desumidificação** pode ser alcançado em um único processo. A linha do processo na carta psicrométrica se move em uma direção em que tanto a temperatura de bulbo seco, quanto o conteúdo de umidade diminuem. Para isso é necessária a retirada de calor sensível e latente do sistema [Honeywell, 1997], como mostra a Figura 4.9. Esse processo é

utilizado em instalações de condicionador de ar e “Para conseguir o resfriamento usa-se uma serpentina de resfriamento (com água gelada em circulação, por exemplo) ou sistema de ciclo térmico de uma gás refrigerante (Freon).” [Macintyre, 1990]. A condensação da umidade ocorre quando o ar úmido é resfriado até uma temperatura inferior à da temperatura de orvalho do ponto inicial [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009].

Figura 4.9 – Resfriamento e Desumidificação do Ar Úmido



Fonte: elaborado pelo autor

A **vazão mássica de ar seco** é calculada pela Equação 4.2 e a **vazão mássica de água condensada** pela Equação 4.3. Já a **potência total** de refrigeração para retirar o calor do processo é calculada com a Equação 4.4. O **calor sensível** e o **calor latente** retirados do sistema estão representados na Figura 4.9 e também podem ser calculados pela Equação 4.4. Sendo que, alternativamente, a potência total também pode ser calculada pela soma dos calores sensível e latente, como mostra a seguinte equação [Rossi, 1987]:

$$Q_T = Q_S + Q_L \quad (4.6)$$

Onde:

Q_T = potência total [kW];

Q_S = calor sensível retirado do processo [kW];

Q_L = calor latente retirado do processo [kW].

O **Fator de Calor Sensível** é definido pela relação entre o calor sensível e o calor total, como mostra a Equação 4.7. Partindo-se do ponto de entrada (E) e seguindo por uma reta que tenha a direção indicada pelo Fator de Calor Sensível tem-se uma linha com todos os possíveis estados, ou condições, para o ar de saída. Essa reta também é chamada de **Linha das Condições** [Beyer, 2010].

$$FCS = Q_S / Q_T \quad (4.7)$$

Onde:

FCS = fator de calor sensível;

Q_T = potência total [kW];

Q_S = calor sensível retirado do processo [kW];

O **Fator de Contato da Serpentina (eficiência da serpentina)** é definido como a “[...] quantidade de ar que efetivamente troca calor com a serpentina.” e é calculada pela seguinte equação [Beyer, 2010]:

$$F_C = (TBS_S - TBS_E) / (TBS_{SAT} - TBS_E) \quad (4.8)$$

Onde:

F_C = fator de contato da serpentina (eficiência de saturação);

TBS_E = temperatura de bulbo seco do ponto E [°C];

TBS_S = temperatura de bulbo seco do ponto S [°C];

TBS_{SAT} = temperatura de bulbo seco na saturação [°C].

O **Fator de Passagem (*by-pass*) da Serpentina**, que é definido como “[...] a quantidade de ar que não troca calor com a serpentina.” e é calculado pela seguinte equação [Beyer, 2010]:

$$F_P = 1 - F_C \quad (4.9)$$

Onde:

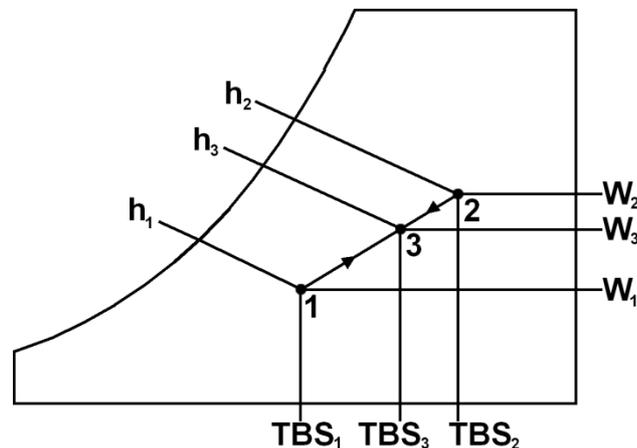
F_P = fator de passagem da serpentina (*by-pass*);

F_C = fator de contato da serpentina (eficiência de saturação).

4.3.8 Mistura Adiabática de Dois Fluxos de Ar Úmido

Um processo comum em sistemas de condicionadores de ar é a **mistura adiabática de dois fluxos de ar úmido** [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]. Esse processo é utilizado para evitar desconforto devido a correntes de ar frio perto dos difusores de saída de ar, misturando o ar quente da sala com o ar frio do condicionador de ar [Glicksman, 2010]. O ponto final, resultante da mistura, fica sobre a linha que conecta os dois pontos referentes aos dois fluxos de ar que são misturados. O ponto final divide essa linha em dois segmentos proporcionais às massas de ar seco de cada um dos fluxos de ar [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009], como mostra a Figura 4.10.

Figura 4.10 – Mistura Adiabática de Dois Fluxos de Ar Úmido



Fonte: elaborado pelo autor

As **vazões mássicas de ar seco** dos pontos 1 e 2 são calculadas pela Equação 4.2. Já vazão mássica de ar seco do ponto 3 é calculada pela soma das vazões mássicas destes dois pontos, como mostra a equação abaixo [Beyer, 2010]:

$$m_{a3} = m_{a1} + m_{a2} \quad (4.10)$$

Onde:

m_{a1} = vazão mássica de ar seco do ponto 1 [$\text{kg}_{\text{ar seco}}/\text{s}$];

m_{a2} = vazão mássica de ar seco do ponto 2 [$\text{kg}_{\text{ar seco}}/\text{s}$];

m_{a3} = vazão mássica de ar seco do ponto 3 [$\text{kg}_{\text{ar seco}}/\text{s}$].

Tendo a vazão mássica do ponto 3, é possível determinar a temperatura de bulbo seco e a entalpia desse ponto através das equações abaixo [Beyer, 2010]:

$$TBS_3 = (TBS_1 m_{a1} + TBS_2 m_{a2}) / m_{a3} \quad (4.11)$$

Onde:

TBS_1 = temperatura de bulbo seco do ponto 1 [$^{\circ}C$];

TBS_2 = temperatura de bulbo seco do ponto 2 [$^{\circ}C$];

TBS_3 = temperatura de bulbo seco do ponto 3 [$^{\circ}C$];

m_{a1} = vazão mássica de ar seco do ponto 1 [$kg_{ar\ seco} / s$];

m_{a2} = vazão mássica de ar seco do ponto 2 [$kg_{ar\ seco} / s$];

m_{a3} = vazão mássica de ar seco do ponto 3 [$kg_{ar\ seco} / s$].

$$h_3 = (h_1 m_{a1} + h_2 m_{a2}) / m_{a3} \quad (4.12)$$

Onde:

h_1 = entalpia do ponto 1 [$kJ / kg_{ar\ seco}$];

h_2 = entalpia do ponto 2 [$kJ / kg_{ar\ seco}$];

h_3 = entalpia do ponto 3 [$kJ / kg_{ar\ seco}$];

m_{a1} = vazão mássica de ar seco do ponto 1 [$kg_{ar\ seco} / s$];

m_{a2} = vazão mássica de ar seco do ponto 2 [$kg_{ar\ seco} / s$];

m_{a3} = vazão mássica de ar seco do ponto 3 [$kg_{ar\ seco} / s$].

De posse da temperatura de bulbo seco ou da entalpia do ponto 3 é possível determinar as outras propriedades do ponto utilizando a carta psicrométrica. Para isso, basta marcar a temperatura ou a entalpia calculada sobre a reta que une os pontos 1 e 2.

4.4 Exemplos de Aplicação da Carta Psicrométrica

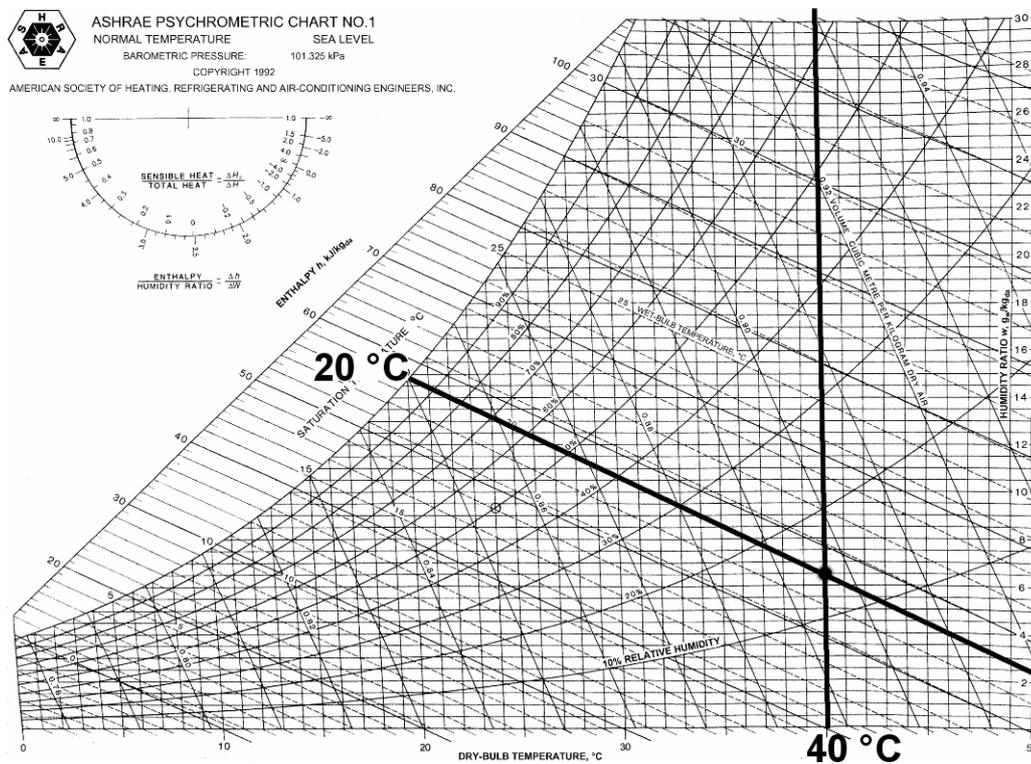
A seguir são apresentados exemplos que ilustram a utilização da carta psicrométrica para determinação das propriedades de um único ponto e também para resolução de problemas envolvendo os processos psicrométricos descritos anteriormente. Os exemplos apresentados neste item também foram resolvidos com o programa desenvolvido, com o objetivo de comparar tanto os procedimentos necessários para resolver esses problemas como os resultados obtidos em cada uma dessas maneiras. A resolução dos exemplos, utilizando o programa desenvolvido, encontra-se no **Capítulo 6 – Programa Computacional Desenvolvido**.

4.4.1 Exemplo 1 – Determinação das Propriedades Psicrométricas de um Único Ponto

Determinar as propriedades termodinâmicas do ar úmido, sabendo que este possui temperatura de bulbo seco igual à 40 °C, temperatura de bulbo úmido igual à 20 °C e pressão de 101,325 kPa. [Beyer, 2010].

Inicialmente é localizado o ponto de interseção entre a temperatura de bulbo seco (TBS = 40 °C) e a temperatura de bulbo úmido (TBU = 20 °C) em uma carta psicrométrica com pressão $P = 101325$ Pa, como mostra a Figura 4.11.

Figura 4.11 – Exemplo 1: marcação do ponto



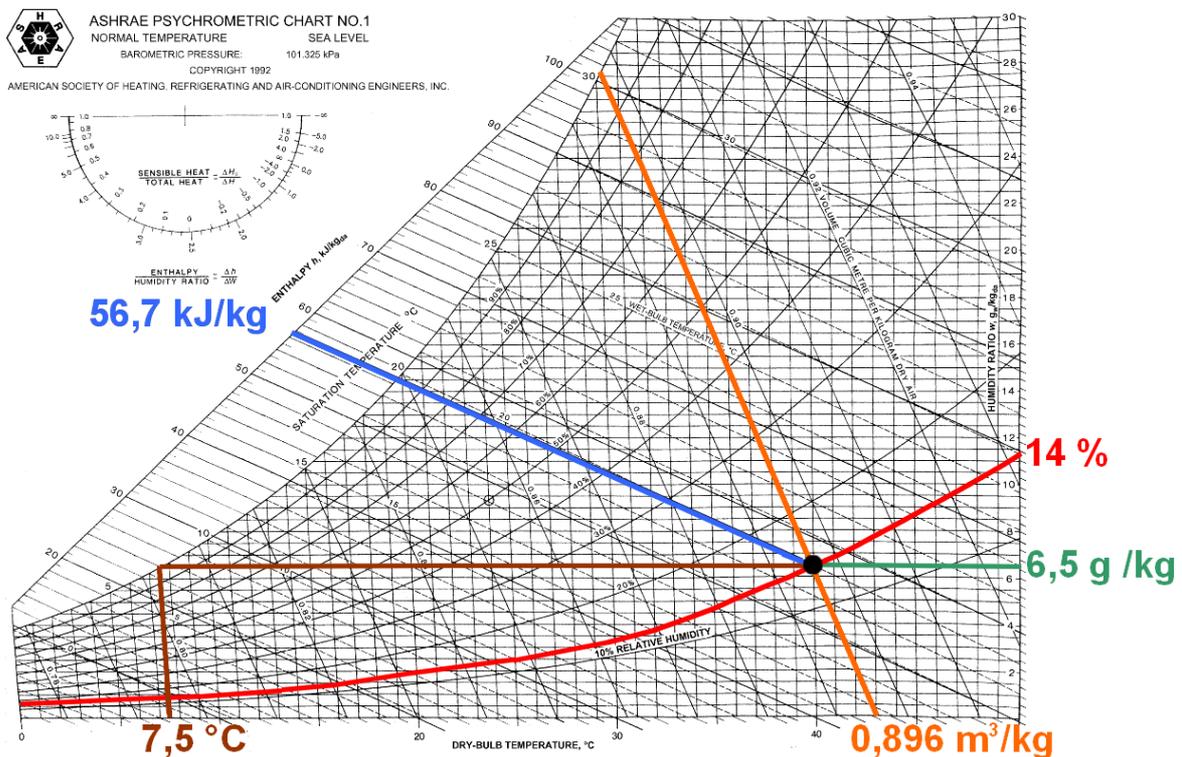
Fonte: adaptado de American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009

O conteúdo de umidade (W) e a entalpia (h) podem ser lidos diretamente no gráfico. A temperatura de orvalho (TO) é obtida pela interseção entre o conteúdo de umidade e a curva de saturação. A umidade relativa (UR) é obtida interpolando linearmente a posição do ponto no gráfico com as curvas de umidade relativa imediatamente acima e abaixo. O volume específico (v) também é encontrado de forma semelhante, interpolando linearmente as retas imediatamente a direita e a esquerda do ponto marcado no gráfico.

A Figura 4.12 mostra como cada uma dessas propriedades foram determinadas, obtendo, com isso, os seguintes resultados [Beyer, 2010]:

- conteúdo de umidade: $W = 6,5 \text{ g}_{\text{água}} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$;
- entalpia: $h = 56,7 \text{ kJ} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$;
- temperatura de orvalho: $TO = 7,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$;
- umidade relativa: $UR = 14 \text{ \%}$;
- volume específico: $v = 0,896 \text{ m}^3 / \text{kg}_{\text{ar seco}}$.

Figura 4.12 – Exemplo 1: obtenção dos resultados



Fonte: adaptado de American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009

4.4.2 Exemplo 2 – Aquecimento do Ar Úmido

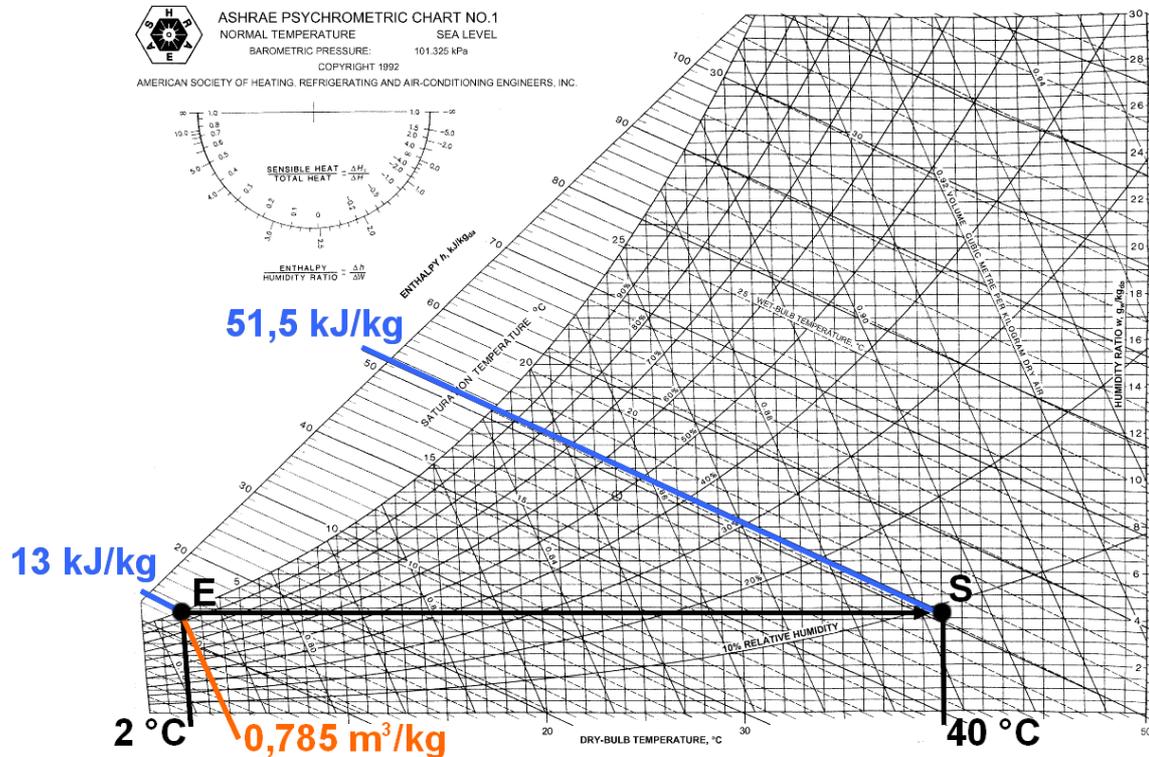
Determinar a potência necessária para aquecer um fluxo de ar úmido, saturado com temperatura igual à $2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, que entra numa serpentina de aquecimento com vazão volumétrica de $10 \text{ m}^3/\text{s}$, e sai desta com temperatura igual à $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009].

Inicialmente são marcados os pontos conhecidos na carta psicrométrica:

- ponto de entrada: $TBS_E = 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $UR_E = 100\%$ (ar saturado);
- ponto de saída: $TBS_S = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ e $W_S = W_E$.

Em seguida é feita a leitura das entalpias de cada ponto, e determinado o valor do volume específico do ponto de entrada, como mostra a Figura 4.13:

Figura 4.13 – Exemplo 2: marcação dos pontos e obtenção dos resultados



Fonte: adaptado de American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009

Conhecendo a vazão volumétrica ($V_E = 10 \text{ m}^3/\text{s}$) e o volume específico do ponto de entrada ($v_E = 0,785 \text{ m}^3 / \text{kg}_{\text{ar seco}}$), é calculada a vazão mássica por meio da Equação 4.2 [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]:

$$m_a = 10 / 0,785 = 12,74 \text{ kg}_{\text{ar seco}} / \text{s}$$

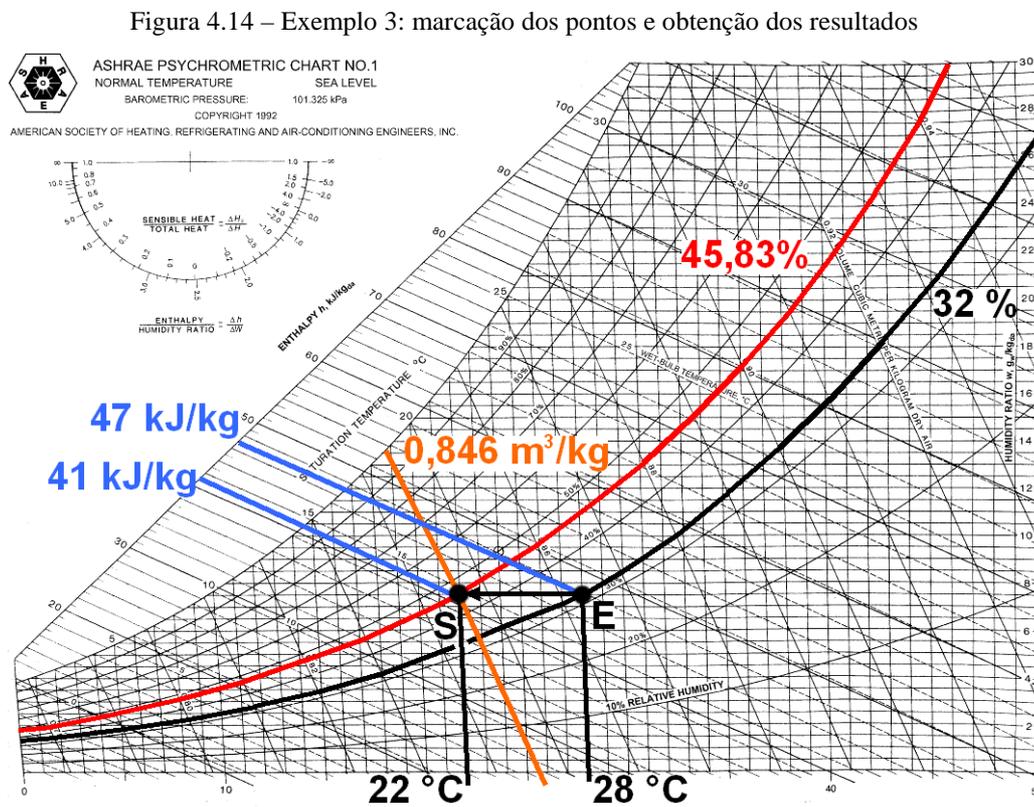
Entrando com a vazão mássica calculada e as entalpias lidas na carta psicrométrica, a potência térmica necessária para adicionar calor sensível ao processo é determinada pela aplicação da Equação 4.4 [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]:

$$Q = 12,74 \times (51,5 - 13) = 490 \text{ kW}$$

4.4.3 Exemplo 3 – Resfriamento do Ar Úmido

O seguinte exemplo foi adaptado de Beyer [2010]. O ar com temperatura de bulbo seco igual à 28 °C e umidade relativa igual à 32% é resfriado até ficar com temperatura de bulbo seco igual à 22 °C. O calor sensível retirado do processo requer uma potência térmica de 4,5 kW e a velocidade do fluxo do ar na saída é de 2 m/s. Determinar a vazão volumétrica, a umidade relativa e a área transversal do duto na saída.

A Figura 4.14 mostra a marcação dos pontos de entrada ($T_{BS_E} = 28 \text{ °C}$ e $UR_E = 32\%$) e saída ($T_{BS_S} = 22 \text{ °C}$ e $W_S = W_E$), a determinação gráfica das entalpias de entrada ($h_E = 47 \text{ kJ/kg}_{\text{ar seco}}$) e saída ($h_S = 41 \text{ kJ/kg}_{\text{ar seco}}$), o volume específico ($v_S = 0,846 \text{ m}^3/\text{kg}_{\text{ar seco}}$) e umidade relativa ($UR_S = 45,83\%$) do ponto de saída.



Fonte: adaptado de American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009

O próximo passo é aplicar a Equação 4.4, isolando a vazão mássica:

$$m_a = 4,5 / (47 - 41) = 0,75 \text{ kg}_{\text{ar seco}} / \text{s}$$

Conhecendo a vazão mássica e o volume específico do ponto de saída é possível calcular a vazão volumétrica, isolando esta variável na Equação 4.2:

$$V_S = 0,75 \times 0,846 = 0,63 \text{ m}^3/\text{s}$$

Agora basta aplicar a Equação 4.1, para determinar a área da seção transversal do tudo:

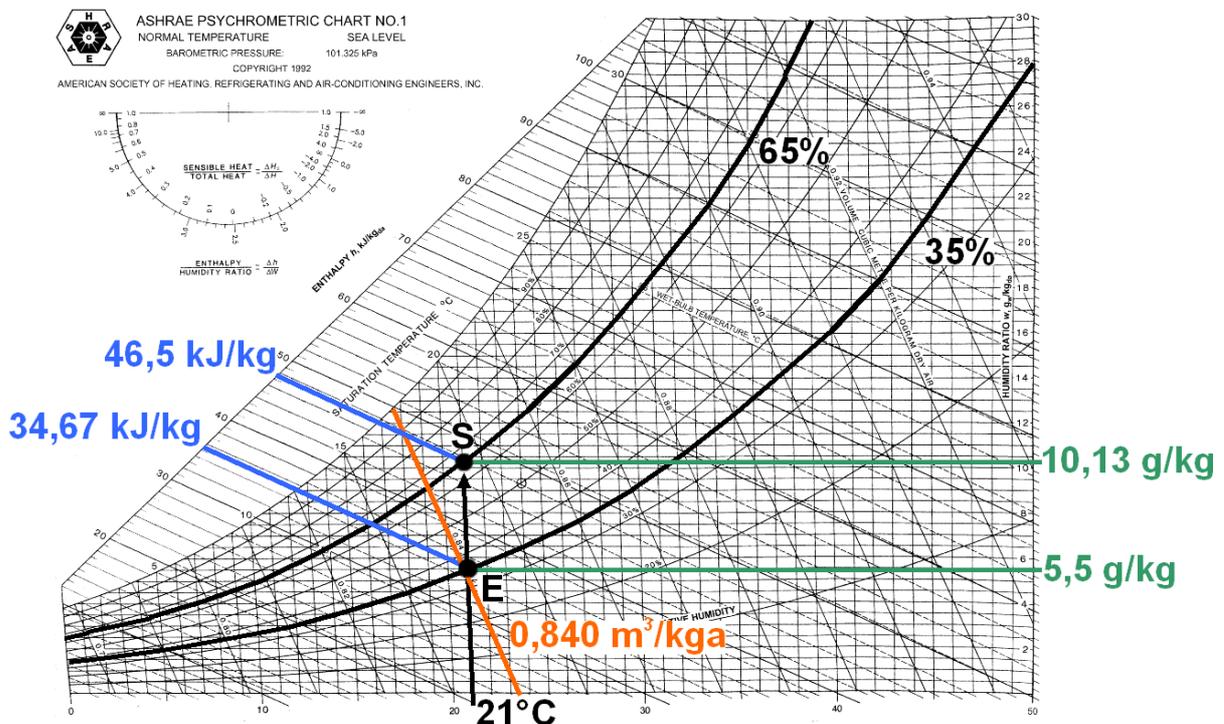
$$A_S = 0,63 / 2 = 0,32 \text{ m}^2$$

4.4.4 Exemplo 4 – Umidificação do Ar Úmido

Uma vazão de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ entra em um umidificador a vapor com temperatura de bulbo seco igual à $21 \text{ }^\circ\text{C}$ e umidade relativa igual à 35% e sai deste com umidade relativa de 65% . Determinar o consumo de água e a potência de vaporização [Beyer, 2010].

Inicialmente são marcados os pontos de entrada ($T_{BS_E} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$ e $UR_E = 35\%$) e saída ($T_{BS_S} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$ e $UR_S = 65\%$). Com isso é possível determinar os conteúdos de umidade dos pontos de entrada ($W_E = 5,5 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$) e saída ($W_S = 10,13 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$), as entalpias de entrada ($h_E = 34,67 \text{ kJ}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$) e saída ($h_S = 46,50 \text{ kJ}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$) e o volume específico do ponto de entrada ($v_{E} = 0,840 \text{ m}^3/\text{kg}_{\text{ar seco}}$), como mostra a Figura 4.15:

Figura 4.15 – Exemplo 4: marcação dos pontos e obtenção dos resultados



Fonte: adaptado de American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009

Em seguida é necessário calcular a vazão mássica através da Equação 4.2:

$$m_a = 0,2 / 0,840 = 0,238 \text{ kg}_{\text{ar seco}} / \text{s}$$

O consumo de água é determinado pela aplicação da Equação 4.3:

$$m_w = 0,238 \times (10,13 - 5,5) = 1,10 \text{ g}_{\text{água}} / \text{s}$$

A potência de vaporização é calculada pela Equação 4.4:

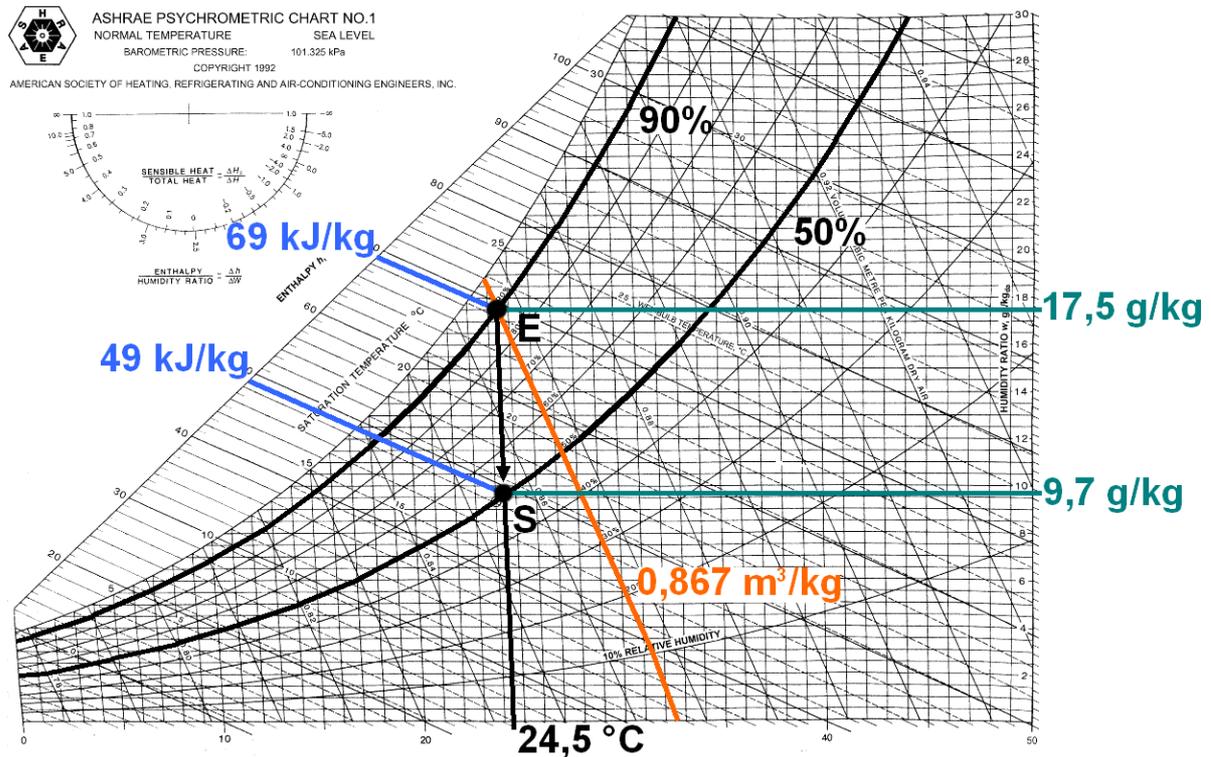
$$Q = 0,238 \times (46,5 - 34,67) = 2,82 \text{ kW}$$

4.4.5 Exemplo 5 – Desumidificação do Ar Úmido

O seguinte exemplo foi adaptado de Beyer [2010]. Um fluxo de ar com vazão igual à 0,2 m³/s entra por um duto com dimensão de 0,45 x 0,4 m. O ar entra com temperatura de bulbo seco igual à 24,5 °C e umidade relativa igual à 90% e sofre desumidificação, saindo com umidade relativa de 50%. Determinar a potência necessária para retirar o calor latente e a quantidade de água condensada no processo.

Primeiramente são marcados os pontos de entrada ($TBS_E = 24,5 \text{ °C}$ e $UR_E = 90\%$) e saída ($TBS_S = 24,5 \text{ °C}$ e $UR_S = 50\%$). Então são determinados os conteúdos de umidade dos pontos de entrada ($W_E = 17,5 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$) e saída ($W_S = 9,7 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$), as entalpias de entrada ($h_E = 69 \text{ kJ}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$) e saída ($h_S = 49 \text{ kJ}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$) e o volume específico do ponto de entrada ($v_E = 0,867 \text{ m}^3 / \text{kg}_{\text{ar seco}}$), como mostra a Figura 4.16:

Figura 4.16 – Exemplo 5: marcação dos pontos e obtenção dos resultados



Fonte: adaptado de American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009

A vazão mássica é calculada com a Equação 4.2:

$$m_a = 0,2 / 0,867 = 0,231 \text{ kg}_{\text{ar seco}} / \text{s}$$

A água condensada é determinada pela aplicação da Equação 4.3:

$$m_w = 0,231 \times (17,5 - 9,7) = 1,80 \text{ g}_{\text{água}} / \text{s}$$

A potência de vaporização é calculada pela Equação 4.4:

$$Q = 0,231 \times (69 - 49) = 4,62 \text{ kW}$$

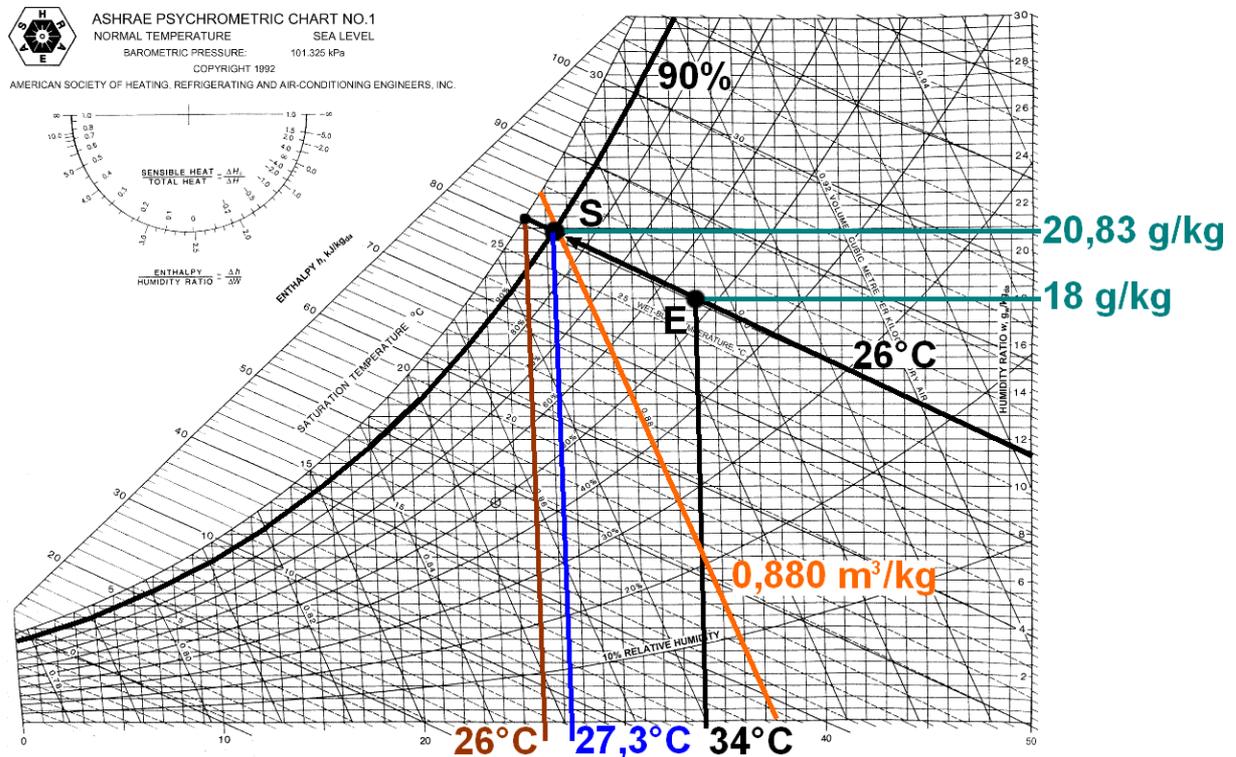
4.4.6 Exemplo 6 – Resfriamento Evaporativo

Uma vazão de ar entra com temperatura de bulbo seco igual à 34 °C e de bulbo úmido igual à 26 °C em um lavador, onde é umidificada com água esguichada até sair com UR = 90%.

Encontre a temperatura de saída, o consumo de água e a eficiência de saturação, se a vazão de saída for de $2,7 \text{ m}^3/\text{s}$ [Beyer, 2010].

A Figura 4.17 apresenta a marcação dos pontos de entrada ($T_{BS_E}=34^\circ\text{C}$ e $T_{BU_E}=26^\circ\text{C}$) e saída ($T_{BU_S}=26^\circ\text{C}$ e $UR_S=90\%$) e a determinação das temperaturas de bulbo seco na saída ($T_{BS_S}=27,33^\circ\text{C}$) e de saturação ($T_{BS_{SAT}}=26^\circ\text{C}$), o volume específico na saída ($v_S=0,88 \text{ m}^3/\text{kg}_{\text{ar seco}}$) e os conteúdos de umidade na entrada ($W_E=18 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$) e saída ($W_S=20,83 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$):

Figura 4.17 – Exemplo 6: marcação dos pontos e obtenção dos resultados



Fonte: adaptado de American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009

Inicialmente é necessário calcular a vazão mássica através da Equação 4.2:

$$m_a = 2,7 / 0,88 = 3,068 \text{ kg}_{\text{ar seco}} / \text{s}$$

O consumo de água é determinado pela aplicação da Equação 4.3:

$$m_w = 3,068 \times (20,83 - 18) = 8,68 \text{ g}_{\text{água}} / \text{s}$$

Já a eficiência de saturação é calculada pela Equação 4.5:

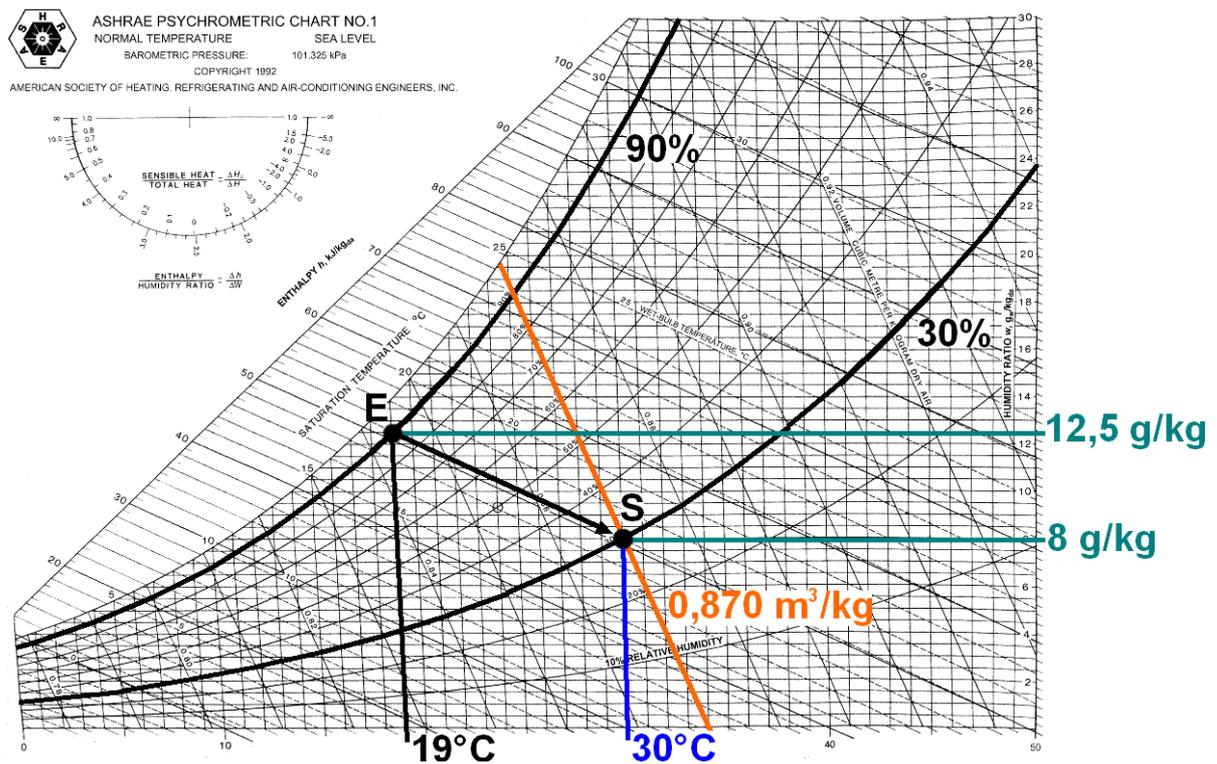
$$\eta_s = 100 \times [(27,33 - 34) / (26 - 34)] = 83,38\%$$

4.4.7 Exemplo 7 – Desumidificação do Ar Úmido por Adsorção

Uma vazão de ar entra com temperatura de bulbo seco igual à 19 °C e umidade relativa igual à 90% passando por um sal higroscópico onde é desumidificado até sair com umidade relativa igual à 30%. Encontre a temperatura de saída e a quantidade de água adsorvida, se a vazão de saída for 1 m³/s.

Na Figura 4.18 é apresentada a resolução gráfica do problema, com os pontos de entrada (TBS_E = 19 °C e UR_E = 90%) e saída (UR_S = 30% e TBU_S = TBU_E) marcados na carta psicrométrica. Também estão representados a temperatura de bulbo seco (TBS_S = 30 °C) e o volume específico na saída (v_S = 0,870 m³ / kg_{ar seco}) e os conteúdos de umidade na entrada (W_E = 12,5 g_{água}/kg_{ar seco}) e na saída (W_S = 8 g_{água}/kg_{ar seco}):

Figura 4.18 – Exemplo 7: marcação dos pontos e obtenção dos resultados



Fonte: adaptado de American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009

A vazão mássica é calculada com a Equação 4.2:

$$m_a = 1 / 0,870 = 1,149 \text{ kg}_{\text{ar seco}} / \text{s}$$

Já a água adsorvida é determinada pela aplicação da Equação 4.3:

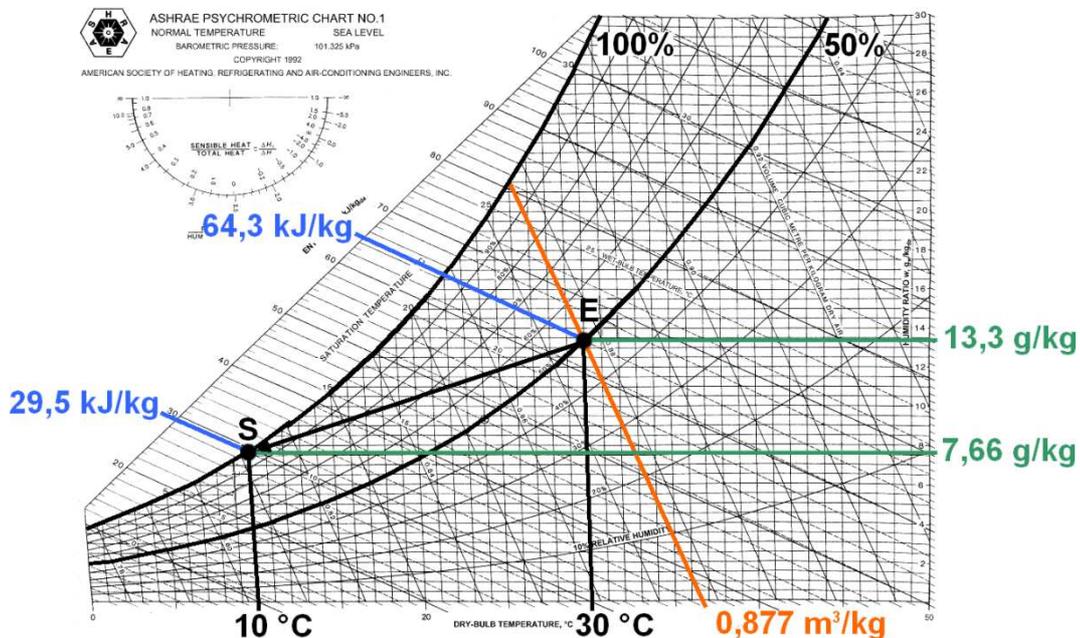
$$m_w = 1,149 \times (12,5 - 8) = 5,17 \text{ g}_{\text{água}} / \text{s}$$

4.4.8 Exemplo 8 – Resfriamento e Desumidificação do Ar Úmido

Encontrar a potência de refrigeração necessária para processar um fluxo de ar com temperatura de bulbo seco igual à 30 °C e umidade relativa igual à 50 %. O ar passa por uma serpentina de refrigeração com vazão volumétrica igual à 5 m³/s e é processado até uma condição final de saturação com temperatura de bulbo seco igual à 10 °C [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]. Determinar também a vazão de água retirada.

A Figura 4.19 mostra a solução esquemática do problema. O ponto de entrada está localizado na interseção de TBS_E = 30 °C com UR_E = 50%, portanto h_E = 64,3 kJ/kg_{ar seco}, W_E = 13,3 g_{água}/kg_{ar seco} e v_E = 0,877 m³/kg_{ar seco}. O ponto de saída está localizado sobre a curva de saturação com TBS_S = 10 °C, portanto h_S = 29,5 kJ/kg_{ar seco} e W_S = 7,66 g_{água}/kg_{ar seco} [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009].

Figura 4.19 – Exemplo 8: marcação dos pontos e obtenção dos resultados



Fonte: adaptado de American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009

A vazão mássica de ar seco é calculada com a Equação 4.2 [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]:

$$m_a = 5 / 0,877 = 5,70 \text{ kg}_{\text{ar seco}}/\text{s}$$

Com a Equação 4.4 é calculada a potência total de refrigeração:

$$Q_T = 5,70 \times (64,3 - 29,5) = 198,36 \text{ kW}$$

Já a vazão de água retirada é calculada com a Equação 4.3:

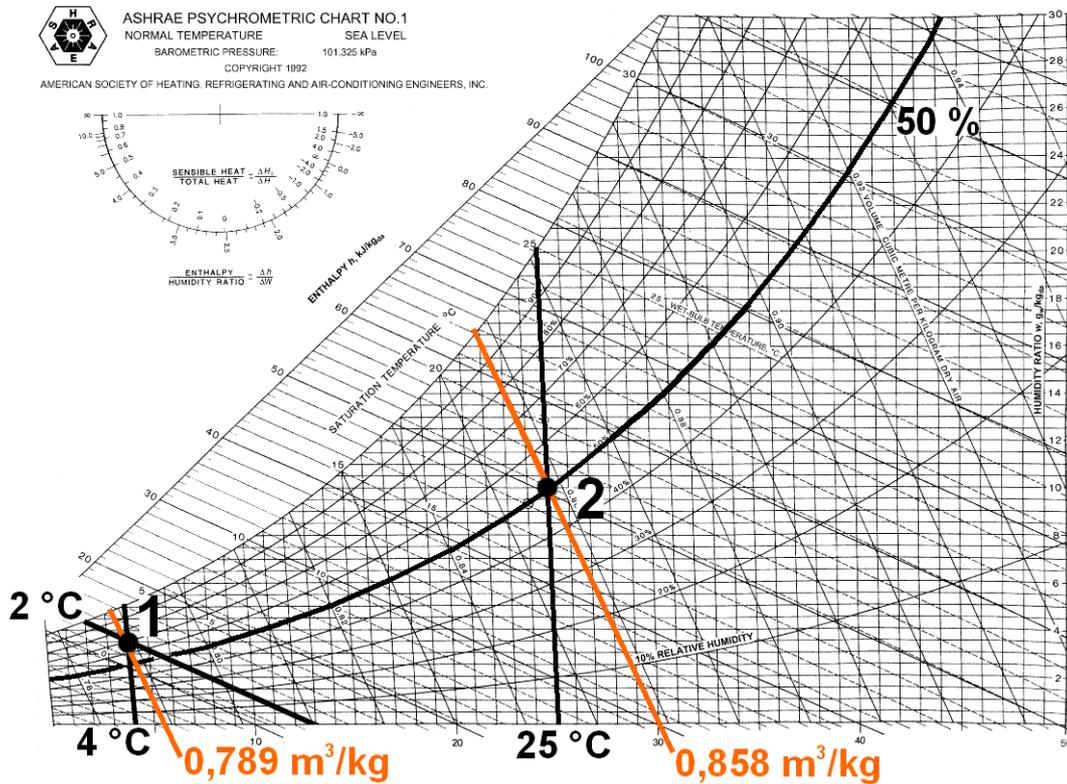
$$m_w = 5,70 \times (13,3 - 7,66) = 32,15 \text{ g}_{\text{água}}/\text{s}$$

4.4.9 Exemplo 9 – Mistura Adiabática de Dois Fluxos de Ar Úmido

Uma corrente de ar exterior com vazão volumétrica igual à $2 \text{ m}^3/\text{s}$, temperatura de bulbo seco igual à $4 \text{ }^\circ\text{C}$ e temperatura de bulbo úmido igual à $2 \text{ }^\circ\text{C}$ é misturada adiabaticamente com ar recirculado com vazão volumétrica igual à $6,25 \text{ m}^3/\text{s}$, temperatura de bulbo seco igual à $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e umidade relativa igual à 50% . Determinar as temperaturas de bulbo seco e úmido da mistura resultante [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009].

Primeiramente são marcados os pontos 1 e 2 na carta psicrométrica e determinado os volumes específicos de cada ponto, como mostra a Figura 4.20.

Figura 4.20 – Exemplo 9: marcação dos pontos e determinação dos volumes específicos



Fonte: adaptado de American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009

De posse dos volumes específicos e vazões volumétricas de cada ponto é possível determinar a vazão mássica de cada um deles, com a Equação 4.2 [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]:

$$m_{a1} = 2 / 0,789 = 2,535 \text{ kg}_{\text{ar seco}} / \text{s}$$

$$m_{a2} = 6,25 / 0,858 = 7,284 \text{ kg}_{\text{ar seco}} / \text{s}$$

A soma das vazões mássicas dos pontos 1 e 2 resulta na vazão mássica do ponto 3 [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]:

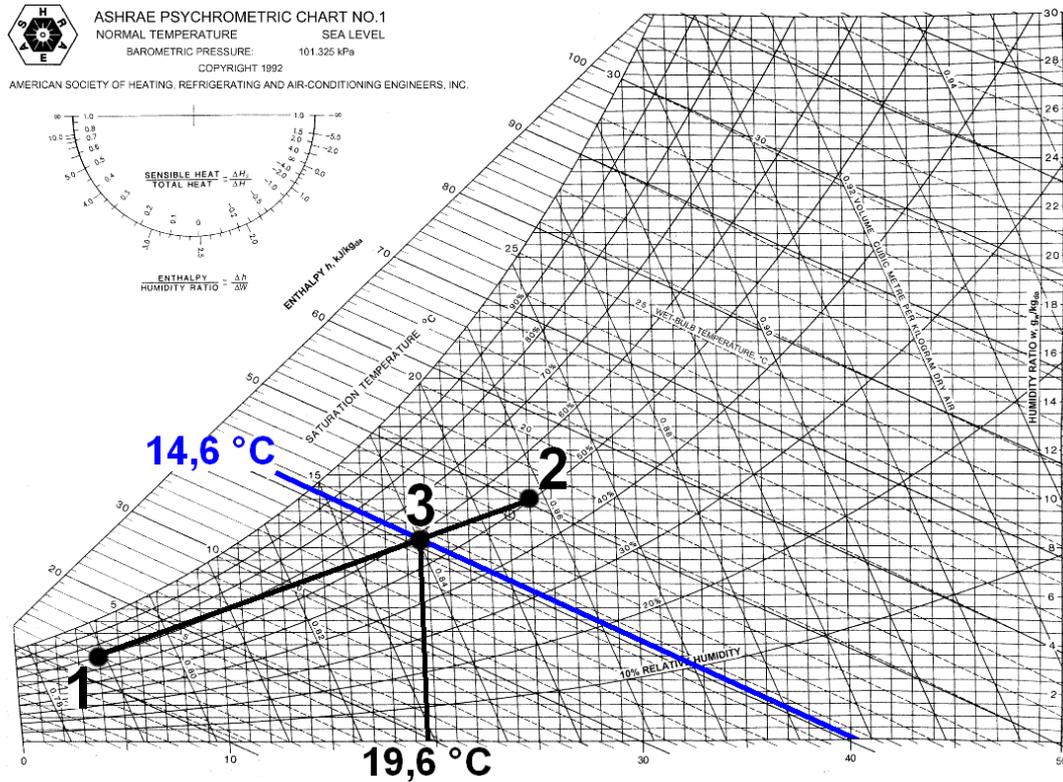
$$m_{a3} = 2,535 + 7,284 = 9,819 \text{ kg}_{\text{ar seco}} / \text{s}$$

Então é determinada a temperatura de bulbo seco, aplicando a Equação 4.11:

$$TBS_3 = (4 \times 2,535 + 25 \times 7,284) / 9,819 = 19,6 \text{ °C}$$

Tendo a temperatura, basta marcá-la sobre a reta que une os pontos 1 e 2 para determinar a temperatura de bulbo úmido ($TBU_3 = 14,6 \text{ }^\circ\text{C}$) [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009], como mostra a Figura 4.21:

Figura 4.21 – Exemplo 9: marcação do ponto 3 e determinação de sua temperatura de bulbo úmido



Fonte: adaptado de American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009

5 CONFORTO TÉRMICO SEGUNDO A NR-17

Conforto térmico é definido, segundo a ASHRAE, como o estado da mente em que a pessoa sente satisfação em relação a temperatura do ambiente [Auliciems; Szokolay, 2007], com isso, o principal propósito dos processos psicrométricos apresentados anteriormente e de sistemas de condicionamento de ar é fornecer condições favoráveis ao conforto térmico humano. Com esse propósito a Norma Regulamentadora NR 17 – Ergonomia “[...] visa estabelecer parâmetros que permitam a adaptação das condições de trabalho às características psicofisiológicas dos trabalhadores, de modo a proporcionar um máximo de conforto, segurança e desempenho eficiente.” [Brasil, 1990].

Os seres humanos são “[...] verdadeiras fontes de calor, necessitando, para desenvolver sua atividade vital, um desnível térmico em relação ao meio externo.” [Costa, 1974], sendo que as variáveis que afetam a dissipação de calor pelo corpo e, conseqüentemente, o conforto térmico, podem ser agrupadas em três categorias [Auliciems; Szokolay, 2007]:

- a) fatores ambientais: temperatura do ar, movimento do ar, umidade e radiação;
- b) fatores pessoais: metabolismo (nível de atividade física) e quantidade de roupas;
- c) fatores contributivos: comida e bebida, aclimatação, forma física, gordura subcutânea, idade, sexo e estado de saúde.

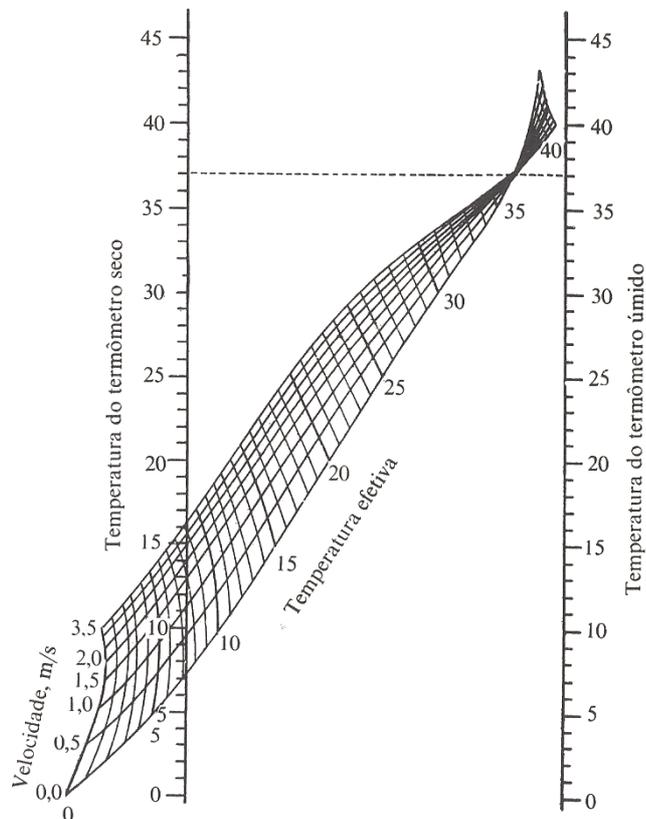
Destas três categorias, apenas os fatores ambientais são abordados pela NR-17, visto que, como comentado anteriormente, esta norma se refere às condições de trabalho, que “[...] incluem aspectos relacionados ao levantamento, transporte e descarga de materiais, ao mobiliário, aos equipamentos e às **condições ambientais** do posto de trabalho e à própria organização do trabalho.” [Brasil, 1990, grifo nosso]. E, dos fatores ambientais, a temperatura do ar é um dos mais importantes, e é medida pela temperatura de bulbo seco [Auliciems; Szokolay, 2007]. Sendo que esta, “[...] juntamente com a umidade são os responsáveis pelas trocas de calor, com o exterior, efetuadas pelo corpo humano e determinam para o ambiente as suas características de conforto térmico [...]” [Costa, 1974]. Além disso, “É sabido que o movimento do ar alivia a sensação de calor, uma vez que o mesmo abaixa a temperatura da pele.” [Macintyre, 1990]. Com relação a esses fatores, a NR-17 (item 17.5.2) estabelece os seguintes limites para “[...] locais de trabalho onde são executadas atividades que exijam solicitação intelectual e atenção constantes, tais como salas de controle, laboratórios, escritórios, salas de desenvolvimento ou análise de projetos, dentre outros [...]” [Brasil, 1990]:

- a) índice de temperatura efetiva entre 20 °C e 23 °C;

- b) velocidade do ar não superior a 0,75 m/s;
- c) umidade relativa do ar não inferior a 40 %.

No caso da NR-17, esta optou por adotar como referência o **índice de temperatura efetiva**, já que esta “[...] é uma grandeza empírica capaz de exprimir em um único índice a sensação de calor, combinando a temperatura do ar, a umidade relativa do mesmo e sua velocidade.” [Macintyre, 1990]. Ela é definida como a temperatura do ar saturado e praticamente sem movimento, ou seja com velocidade do ar muito baixa, que produz, na ausência de radiação, o mesmo efeito que a condição do ar em questão [Auliciems; Szokolay, 2007]. A temperatura efetiva, entretanto, “[...] não pode ser medida diretamente com instrumentos. Utilizam-se, para sua determinação, diagramas, nos quais, entrando-se com os valores das temperaturas dos termômetros de bulbo seco e de bulbo úmido e da velocidade do ar, obtém-se o valor temperatura efetiva.” [Macintyre, 1990]. Com isso fica ainda mais evidente a importância do estudo da psicrometria e de ferramentas para auxiliar a resolução de problemas psicrométricos. A Figura 5.1 apresenta o gráfico para se determinar a temperatura efetiva, para pessoas normalmente vestidas:

Figura 5.1 – Gráfico para determinar a temperatura efetiva



Alternativamente a temperatura efetiva (TE) também pode ser calculada por meio de equações. A primeira delas é válida para velocidade do ar igual ou inferior à 1 m/s [Krawczyk, 1975 apud Teodoreanu; Bunescu, 2007]:

$$TE = TBS - 0,4 (TBS - 10) (1 - UR/100) \quad (5.1)$$

Onde:

TE = temperatura efetiva [°C];

TBS = temperatura de bulbo seco [°C];

UR = umidade relativa [%].

Para temperaturas superiores à 1 m/s, a temperatura efetiva é calculada com a seguinte equação [Krawczyk, 1975 apud Teodoreanu; Bunescu, 2007]:

$$TE = 37 - \{(37 - TBS) / [0,68 + 0,00014 UR + 1 / (1,76 + 1,4 u^{0,75})]\} - 0,29 TBS (1 - UR/100) \quad (5.2)$$

Onde:

TE = temperatura efetiva [°C];

TBS = temperatura de bulbo seco [°C];

UR = umidade relativa [%];

u = velocidade do ar [m/s].

Percebe-se que as equações 5.1 e 5.2 não utilizam a temperatura de bulbo úmido, como o gráfico, mas sim a **umidade relativa**, que também é um dos fatores analisados pela NR-17. A umidade exerce uma grande influência em fatores ambientais e fisiológicos. Níveis de umidade impróprios, sejam eles muito altos ou muito baixos, podem causar desconforto nas pessoas. Entretanto, é importante ressaltar que a umidade é talvez o fator menos evidente à percepção humana. A maioria das pessoas irá perceber e reagir mais rapidamente a mudanças de temperatura ou correntes de ar. E, já que a umidade relativa está inter-relacionada com essas variáveis, ela se torna um ingrediente vital para uma condição ambiental de conforto térmico [Armstrong, 1995].

O outro fator analisado pela NR-17 é a **velocidade do ar**. É comum experimentar um efeito refrescante devido ao movimento do ar, seja ele natural ou gerado por um ventilador. Este efeito depende muito da velocidade com que o ar está se movendo. Em condições diárias

normais, um sujeito comum tem as seguintes sensações devido a velocidade do ar [Auliciems; Szokolay, 2007]:

- a) imperceptível: velocidade do ar inferior à 0,25 m/s;
- b) agradável: velocidade do ar entre 0,25 m/s e 0,50 m/s;
- c) percepção do movimento do ar: velocidade entre 0,50 m/s e 1,00 m/s;
- d) frio: velocidade do ar entre 1,00 m/s e 1,50 m/s;
- e) frio desconfortável: velocidade do ar maior que 1,50 m/s.

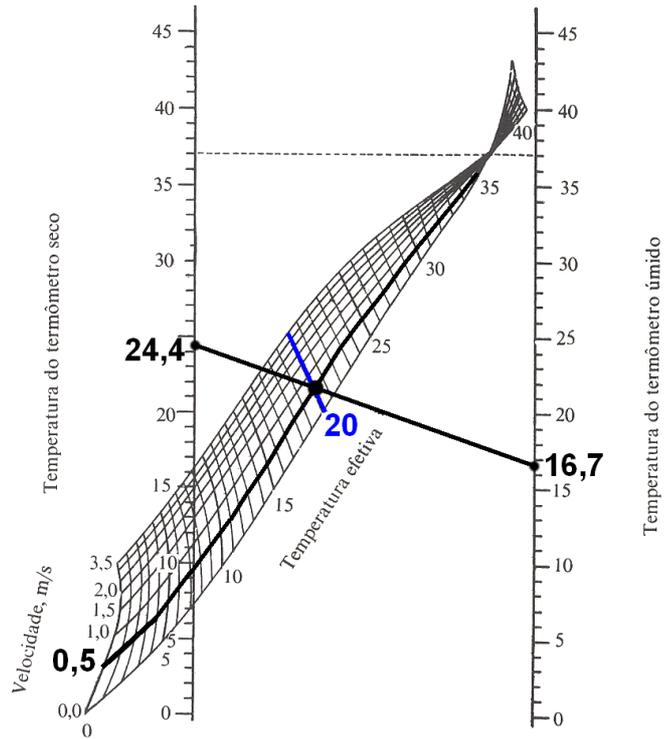
Essas reações, entretanto, dependem da temperatura do ar. Sob condições de forte calor, o ar com uma velocidade de 1 m/s pode ser agradável e, em ambiente fechados, velocidades do ar de até 1,5 m/s são aceitáveis. Sob condições de frio, numa sala aquecida, a velocidade do ar não dever ser superior à 0,25 m/s [Auliciems; Szokolay, 2007].

Para ilustrar a aplicação dos limites estabelecidos pela NR-17 para conforto térmico e também a utilização do gráfico da Figura 5.1 é apresentado o seguinte exemplo: determinar “[...] a temperatura efetiva, sabendo-se que a temperatura de bulbo seco é 24,4 °C [...] e a do termômetro de bulbo úmido é 16,7 °C [...], admitindo uma velocidade do ar de 0,5 m/s [...]” [Macintyre, 1990]. Verificar se essa situação atende a NR-17.

Inicialmente ligam-se os pontos referentes às temperaturas de bulbo seco ($TBS = 24,4^{\circ}\text{C}$) e de bulbo úmido ($TBU = 16,7^{\circ}\text{C}$) com uma reta. Na interseção dessa reta com a curva da velocidade de 0,5 m/s, marca-se o ponto que pertence a reta da temperatura efetiva de 20 °C [Macintyre, 1990], como mostra a Figura 5.2. Conhecendo a temperatura de bulbo seco ($TBS=24,4^{\circ}\text{C}$) e a de bulbo úmido ($TBU = 16,7^{\circ}\text{C}$) determina-se a umidade relativa ($UR=46\%$) utilizando a carta psicrométrica (Figura 5.3). Com isso, a situação apresentada pelo exemplo atende as recomendações da NR-17, para o conforto térmico, visto que:

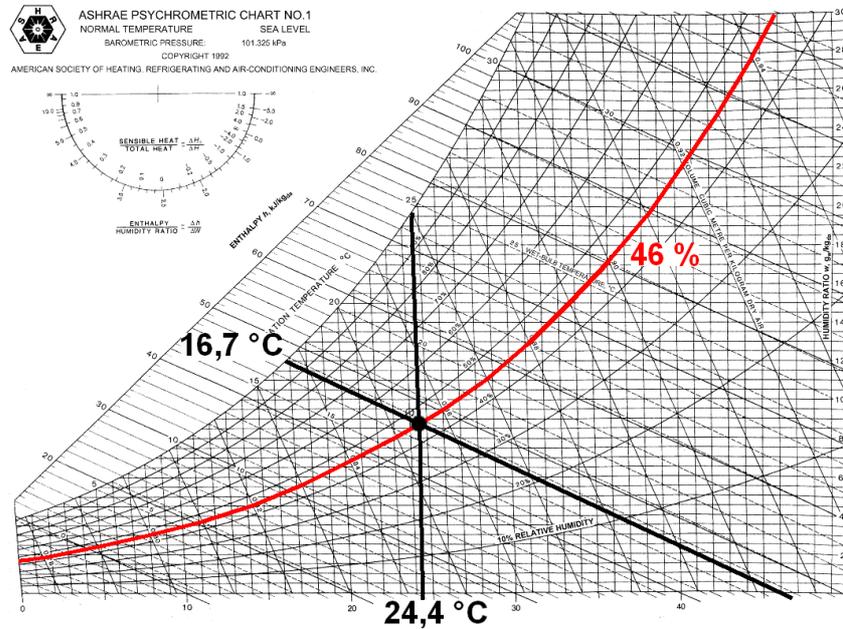
- a) temperatura efetiva: $TE = 20^{\circ}\text{C}$, entre 20 °C e 23 °C;
- b) velocidade do ar: $u = 0,5\text{ m/s}$, inferior à 0,75 m/s;
- c) umidade relativa: $UR = 46\%$, superior à 40%.

Figura 5.2 – Determinação da temperatura efetiva



Fonte: adaptado de Costa, 1974

Figura 5.3 – Determinação da umidade relativa



Fonte: adaptado de American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009

6 PROGRAMA COMPUTACIONAL DESENVOLVIDO

O programa computacional para auxiliar a resolução de problemas psicrométricos e verificação de conforto térmico segundo a NR-17 foi denominado psicronATOR, que é o acrônimo de *Psychrometic* (**psicrométrico**) *Numeric calculATOR*, ou seja, Calculadora Numérica Psicrométrica, visto que o programa resolve os problemas apenas de forma numérica sem apresentar a representação gráfica na carta psicrométrica. O programa foi desenvolvido na linguagem C/C++ utilizando o Dev-C++¹, versão 4.9.9.2, da Bloodshed Software. Na Figura 6.1 é apresentada a tela de boas vindas do psicronATOR.

Figura 6.1 – Tela de boas vindas do psicronATOR



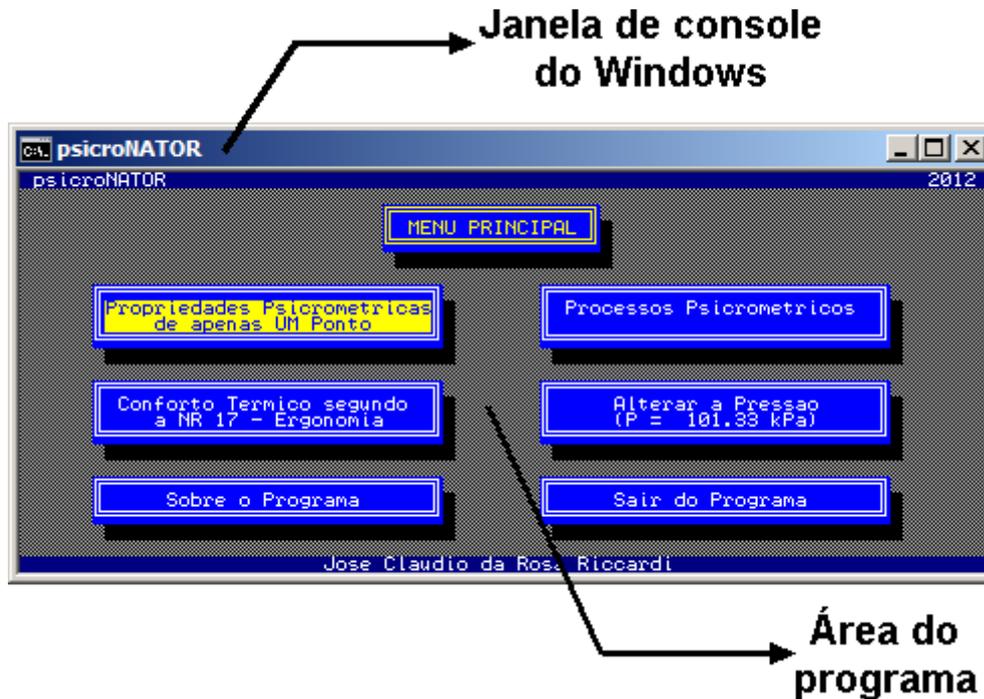
Fonte: elaborado pelo autor

6.1 Compatibilidade

O programa desenvolvido, apesar de ter uma interface que remete aos antigos programas de MS-DOS, é nativo do ambiente Windows e é executado na janela de console deste (Figura 6.2). O programa é 100% compatível com sistemas operacionais Windows XP ou superiores, não sendo compatível, portanto, com outros sistemas que não são da família Windows.

¹ <http://www.bloodshed.net/devcpp.html>

Figura 6.2 – Janela de console do Windows executando o psicroNATOR



Fonte: elaborado pelo autor

O programa foi testado em três computadores diferentes, com as seguinte configurações:

- computador 1: processador Intel Core 2 Duo 2,40 GHz, memória RAM de 6,00 GB, sistema operacional Windows Vista Home Premium – 64 bits;
- computador 2: processador Intel Pentium 1,87 GHz, memória RAM de 4,00 GB, sistema operacional Windows 7 Home Premium – 64 bits;
- computador 3: processador Intel Celeron 3,06 GHz, memória RAM de 1,21 GB, sistema operacional Windows XP Home Edition – 32 bits.

Nos testes realizados, com os três computadores citados anteriormente, o programa foi executado sem apresentar qualquer tipo de problema ou comportamento instável. No computador 1, também estavam instalados o MS-DOS 6.22, o Windows 98 e o Windows XP. Esses sistemas operacionais estavam sendo rodados em máquinas virtuais, criadas pelo VMware Player², versão 4.0.4-build-744019. Ao ser testado no MS-DOS 6.22 o programa não foi iniciado, como já era esperado, visto que ele é um programa de Windows. No Windows 98 o programa foi executado, mas apresentou alguma instabilidade durante o uso, com isso é possível usar o programa nesse sistema operacional, mas com uma certa ressalva. No Windows XP o programa foi executado sem problema, o que já era esperado, visto que já havia sido testado nesse sistema operacional, operando de forma nativa, no computador 3.

² <http://www.vmware.com/products/player/overview.html>

6.2 Características

O psicronATOR foi desenvolvido, inicialmente, para auxiliar a resolução de problemas de psicrometria. Ao longo do seu desenvolvimento foi acrescentada a opção para verificação de conforto térmico segundo a NR-17, aproveitando, com isso, os recursos de cálculos psicrométricos presentes no programa, para determinação dos índices utilizados por essa norma. Na Figura 6.3 é apresentada a tela do menu inicial do programa, em que se pode visualizar suas funções:

Figura 6.3 – Menu Principal do psicronATOR



Fonte: elaborado pelo autor

6.2.1 Opções do Menu Principal

A navegação pelo menu é feita com as setas direcionais do teclado e para selecionar uma opção basta pressionar a tecla *ENTER*. Em algumas opções e menus também é possível utilizar a tecla *ESC* para voltar a um menu anterior, dependendo do caso. Na opção **Propriedades Psicrométricas de apenas UM ponto** são calculadas as propriedades psicrométricas de um ponto, conhecendo quaisquer duas propriedades deste. No quadro da Figura 6.4 são apresentadas as possíveis combinações de pares de propriedades psicrométricas que possibilitam calcular as outras propriedades.

Figura 6.4 – Possíveis combinações de pares de propriedades psicrométricas

	Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	Temperatura de Bulbo Úmido (TBU)	Temperatura de Orvalho (TO)	Conteúdo de Umidade (W)	Entalpia (h)	Volume Específico (v)	Umidade Relativa (UR)
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)		✓	✓	✓	✓	✓	✓
Temperatura de Bulbo Úmido (TBU)	✓		✓	✓	✗	✓	✓
Temperatura de Orvalho (TO)	✓	✓		✗	✓	✓	✓
Conteúdo de Umidade (W)	✓	✓	✗		✓	✓	✓
Entalpia (h)	✓	✗	✓	✓		✓	✓
Volume Específico (v)	✓	✓	✓	✓	✓		✓

Fonte: elaborado pelo autor

Então, conhecendo um dos pares apresentados no quadro da Figura 6.4, é possível calcular as propriedades psicrométricas de um ponto utilizando as equações descritas no Capítulo 3. No quadro da Figura 6.5 são apresentadas as equações utilizadas, dependendo do par de propriedades conhecidas.

Figura 6.5 – Equações utilizadas dependendo do par de propriedades psicrométricas conhecidas

Propriedades Conhecidas	Propriedades a serem Calculadas						
	TBS	TBU	TO	UR	W	h	v
TBS e TBU			Eq. 3.3 ou 3.4 e Eq. 3.5 (*)	Eq. 3.9	Eq. 3.7		
TBS e TO					Eq. 3.5	Eq. 3.11	Eq. 3.12
TBS e UR		Eq. 3.3 ou 3.4, Eq. 3.6 e Eq. 3.7 (*)	Eq. 3.3 ou 3.4 e Eq. 3.5 (*)				
TBS e W							
TBS e h				Eq. 3.9	Eq. 3.11		
TBS e v					Eq. 3.12		
TBU e TO	Eq. 3.7				Eq. 3.5		
TBU e UR	Eq. 3.3 ou 3.4, Eq. 3.5 e Eq. 3.7 (*)		Eq. 3.3 ou 3.4 e Eq. 3.5 (*)		Eq. 3.7		Eq. 3.12
TBU e W	Eq. 3.7					Eq. 3.11	
TBU e v	Eq. 3.3 ou 3.4, Eq. 3.7 e Eq. 3.12 (*)			Eq. 3.9	Eq. 3.7		
TO e UR	Eq. 3.3 ou 3.4 e Eq. 3.9 (*)				Eq. 3.5		Eq. 3.12
TO e h	Eq. 3.11			Eq. 3.9			
TO e v	Eq. 3.12						
W e UR	Eq. 3.3 ou 3.4 e Eq. 3.9 (*)					Eq. 3.11	Eq. 3.12
W e h	Eq. 3.11						
W e v	Eq. 3.12	Eq. 3.3 ou 3.4, Eq. 3.6 e Eq. 3.7 (*)		Eq. 3.9		Eq. 3.11	
h e UR	Eq. 3.3 ou 3.4, Eq. 3.5 Eq. 3.9 e Eq. 3.11 (*)		Eq. 3.3 ou 3.4 e Eq. 3.5 (*)		Eq. 3.5		Eq. 3.12
h e v	Eq. 3.11 e Eq. 3.12 (*)			Eq. 3.9	Eq. 3.12		
v e UR	Eq. 3.3 ou 3.4, Eq. 3.5 Eq. 3.9 e Eq. 3.12 (*)				Eq. 3.5	Eq. 3.11	

(*) equações utilizadas de forma iterativa

Fonte: elaborado pelo autor

A opção **Processos Psicrométricos** leva a um segundo menu em que se pode escolher entre oito processos psicrométricos a serem calculados (Figura 6.6).

Figura 6.6 – Menu de Processos Psicrométricos

Aquecimento do Ar Úmido (com Conteúdo de Umidade constante)	Resfriamento do Ar Úmido (com Conteúdo de Umidade constante)
Umidificação do Ar Úmido (com TBS constante)	Desumidificação do Ar Úmido (com TBS constante)
Resfriamento Evaporativo	Desumidificação do Ar Úmido por Adsorção
Resfriamento e Desumidificação do Ar Úmido	Mistura Adiabática de Dois Fluxos de Ar Úmido
Pressione "ESC" para voltar ao MENU PRINCIPAL	

Fonte: elaborado pelo autor

Ao escolher um destes oito processos psicrométricos, o programa, além das propriedades psicrométricas dos pontos de entrada e saída, também calcula:

- vazão volumétrica de cada ponto;
- velocidade e área do duto, dependendo do caso;
- vazão mássica de ar seco;
- vazão mássica de água, dependendo do processo escolhido;
- calor total, sensível e latente, adicionado ou retirado do sistema, dependendo do processo escolhido;
- propriedades psicrométricas e vazão volumétrica da mistura no caso da opção **Mistura Adiabática de Dois Fluxos de Ar Úmido**.

As equações para calcular as propriedades citadas anteriormente são as mesmas abordadas no Capítulo 4.

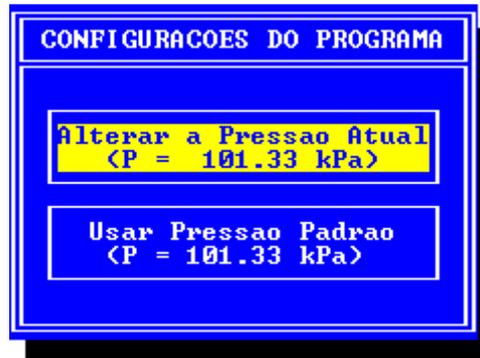
Na opção **Conforto Térmico segundo a NR 17 – Ergonomia** é feita a verificação se uma situação atende ou não os limites estabelecidos pela NR-17. Para isso basta conhecer quaisquer duas propriedades psicrométricas e a velocidade do ar para o programa calcular a temperatura efetiva e a umidade relativa, se esta não for informada, e comparar esses valores com os limites estabelecidos pela norma. A umidade relativa é calculada com as equações apresentadas no Capítulo 3, de acordo com o quadro da Figura 6.5. Já temperatura efetiva é calculada com as equações apresentadas no Capítulo 5.

As opções **Propriedades Psicrométricas de apenas UM ponto, Processos Psicrométricos e Conforto Térmico segundo a NR 17 – Ergonomia** são abordadas em detalhes, mas adiante, no item referente à resolução de exemplos utilizando o programa.

O programa, por padrão, utiliza a pressão atmosférica padrão ($P = 101,325$ kPa), mas com a opção **Alterar a Pressão**, é permitido ao usuário alterar a pressão atual, utilizada para os

cálculos. Esta opção abre um menu (Figura 6.7) em que é possível escolher entre alterar a pressão ou voltar a condição inicial do programa, utilizando a pressão atmosférica padrão.

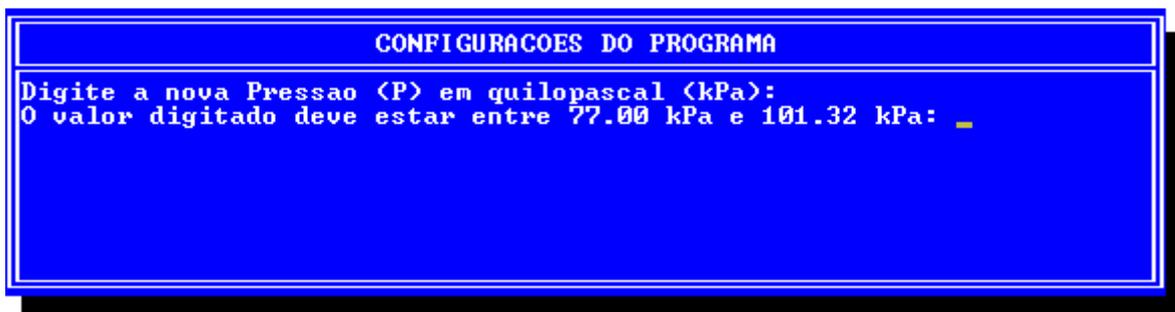
Figura 6.7 – Menu para alteração da pressão do programa



Fonte: elaborado pelo autor

Caso seja selecionada a opção **Alterar a Pressão Atual**, a seguinte caixa de diálogo (Figura 6.8) será aberta, requisitando ao usuário que digite a nova pressão a ser utilizada pelo programa.

Figura 6.8 – Alteração da pressão do programa

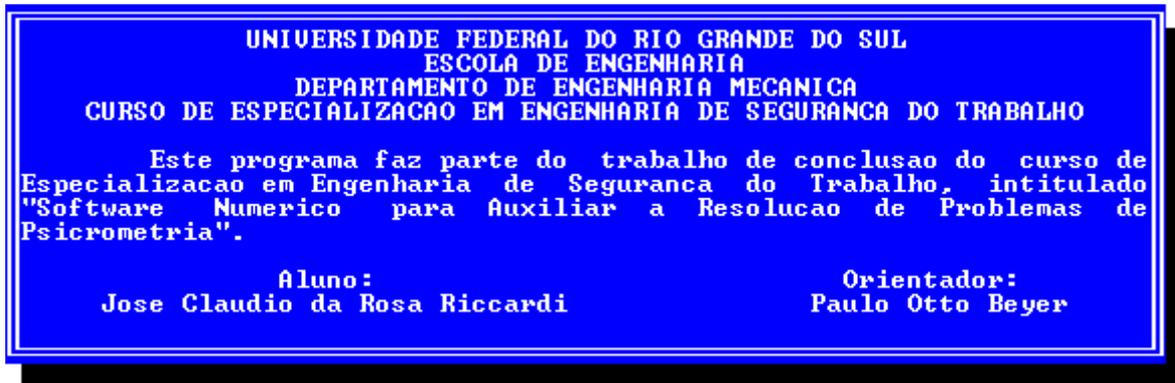


Fonte: elaborado pelo autor

O intervalo válido de pressões aceitas pelo programa varia de 77 kPa até 101,325 kPa, como mostra a Figura 6.8. Esse intervalo foi escolhido por compreender os valores de pressões das cartas psicrométricas utilizadas pela ASHRAE (descritas no Capítulo 4) em que as Cartas 1, 2, 3 e 4 são para pressão ao nível do mar ($P = 101,325$ kPa), a Carta 5 é para altitudes de 750 m ($P = 92,634$ kPa), a Carta 6 para altitudes de 1500 m ($P = 84,54$ kPa) e a Carta 7 para altitudes de 2250 m ($P = 77,058$ kPa) [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009].

A opção **Sobre o Programa** apresenta os dados de identificação de autoria do programa, como mostra a Figura 6.9:

Figura 6.9 – Sobre o programa



Fonte: elaborado pelo autor

Caso o usuário deseje sair do programa, basta selecionar a opção **Sair do Programa**. Será apresentada uma caixa de diálogo (Figura 6.10), em que o usuário poderá selecionar **SIM**, para sair do programa ou **NÃO**, para retornar ao Menu Principal.

Figura 6.10 – Sair do programa

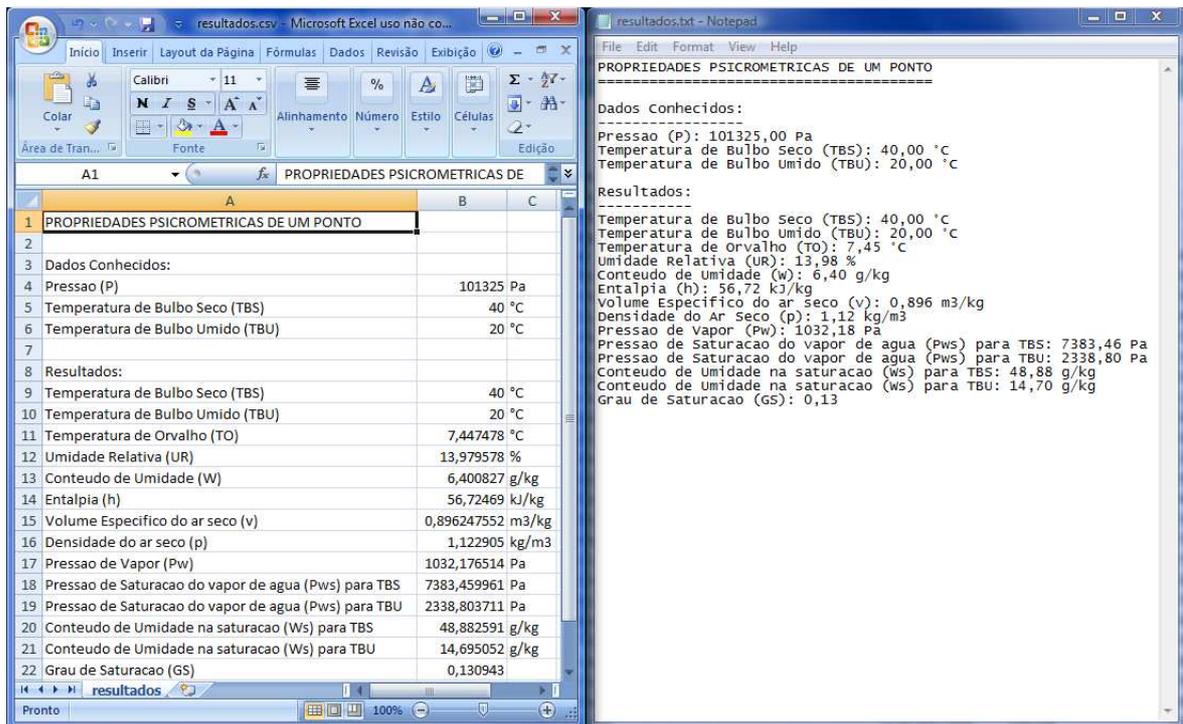


Fonte: elaborado pelo autor

6.2.2 Resultados Gerados pelo Programa

O programa também grava, automaticamente, os resultados em dois arquivos: um com extensão TXT, que pode ser aberto em editores de texto e o outro com extensão CSV, que pode ser aberto em editores de planilhas eletrônicas. Na Figura 6.11 são apresentados os resultados gerados pelo programa, abertos no Microsoft Excel (arquivo CSV) e no Bloco de Notas (arquivo TXT).

Figura 6.11 – Exemplo de arquivos gerados



Fonte: elaborado pelo autor

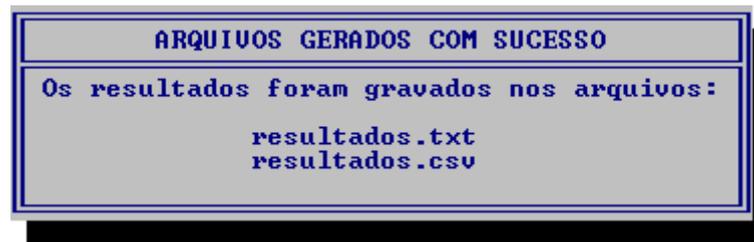
6.2.3 Limitações do Programa

As limitações do programa podem ser divididas em três grupos:

- a) interface;
- b) resultados gerados;
- c) intervalo de valores aceitos.

A **interface** do programa pode ser considerada uma limitação, visto que este não permite a utilização de *mouse* e a entrada de dados deve ser feita de maneira sequencial, não sendo possível voltar a menus anteriores. O programa, por ser apenas para resolução numérica, também não gera o gráfico psicrométrico com o(s) ponto(s) calculado(s), sendo esta uma de suas limitações quanto aos **resultados gerados**. A outra limitação se refere à impossibilidade do usuário escolher o nome dos arquivos gerados pelo programa, já que este gera automaticamente os dois arquivos com o nome: **resultados**; não sendo possível, através do programa, alterar esse nome. A Figura 6.12 mostra a mensagem apresentada pelo programa avisando o usuário que os arquivos foram gerados e seus respectivos nomes.

Figura 6.12 – Mensagem avisando a geração dos arquivos de resultados



Fonte: elaborado pelo autor

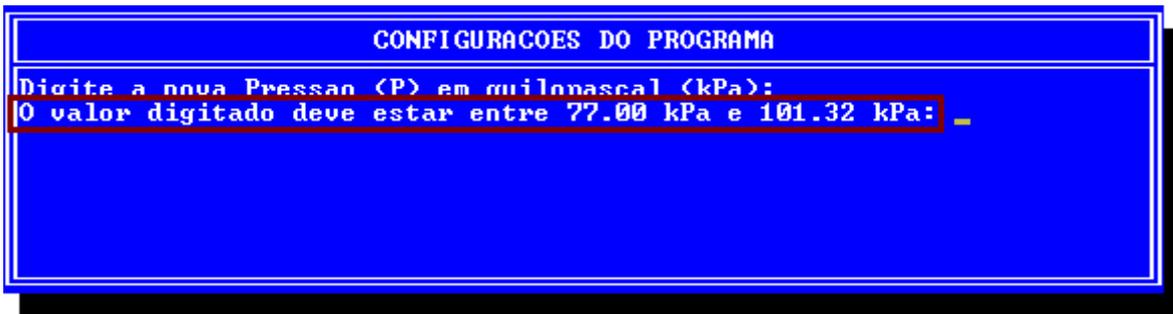
Com relação ao **intervalo de valores aceitos**, o programa trabalha com um intervalo de temperaturas (bulbo seco e bulbo úmido) variando de -100 °C até 90 °C . Este ficou limitado à 90 °C , pois as versões de teste apresentaram instabilidade e resultados incoerentes para temperaturas superiores a esta. Para a umidade relativa o valor máximo permitido é $UR = 100\%$ que corresponde ao estado de saturação do ar, já seu valor mínimo deve ser superior à $UR = 0\%$, para evitar, com isso, divisão por zero na resolução numérica dos cálculos. Conseqüentemente, o conteúdo de umidade também deve ter valor superior à zero, sendo, portanto, adotado o valor mínimo de $W = 0,000000001\text{ kg}_{\text{água}} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$. Seu valor máximo é calculado com $TBS = 90\text{ °C}$ e $UR = 100\%$. Já os limites, inferiores e superiores, da entalpia e volume específico também são calculados com os valores mínimos e máximos aceitos pela temperatura de bulbo seco e conteúdo de umidade.

No caso da opção **Conforto Térmico segundo a NR 17 – Ergonomia** o intervalo de temperaturas vai de 0 °C até 40 °C , enquanto que para a velocidade do ar o intervalo válido vai de 0 m/s até $3,5\text{ m/s}$. Sendo que esses valores foram adotados simplesmente por serem os mesmos do gráfico para determinação da temperatura efetiva, apresentado na Figura 5.1.

6.2.4 Teste de Limites

Como comentado no item anterior o programa trabalha dentro de uma faixa de valores para cada uma das propriedades psicrométricas, então para evitar que o usuário entre com valores fora desse intervalo é feita uma verificação de consistência nos dados de entrada. O programa também apresenta o intervalo válido (Figura 6.13), na caixa de diálogo, mas, se mesmo assim o usuário digitar um valor fora desse intervalo, uma mensagem de erro é apresentada (Figura 6.14).

Figura 6.13 – Exemplo de intervalo válido



Fonte: elaborado pelo autor

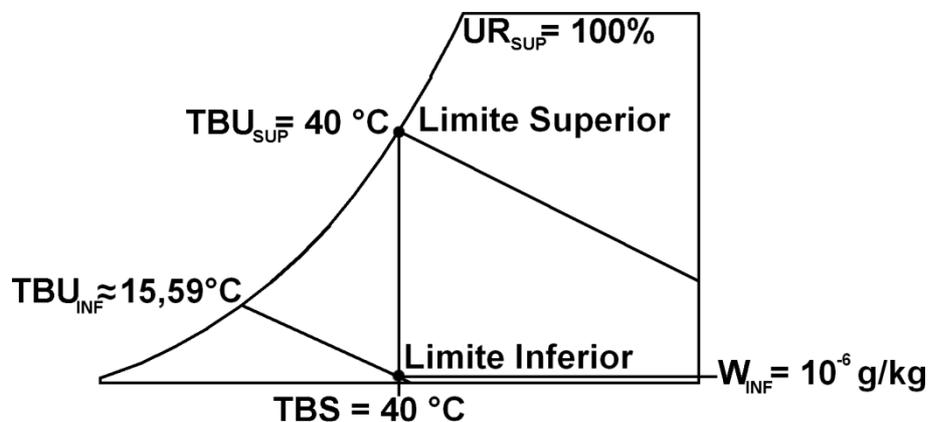
Figura 6.14 – Mensagem de erro



Fonte: elaborado pelo autor

A faixa de valores aceita pelo programa, para uma determinada propriedade psicrométrica, também varia dependendo do valor digitado para uma propriedade digitada anteriormente. Por exemplo, para se determinar as propriedades psicrométricas de um ponto é necessário conhecer pelo menos duas delas, digamos, a temperatura de bulbo seco e bulbo úmido, que variam de $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ até $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se a temperatura de bulbo seco conhecida for $TBS = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ existe um intervalo válido de temperaturas de bulbo úmido que são aceitas para essa temperatura de bulbo seco, como mostra a Figura 6.15:

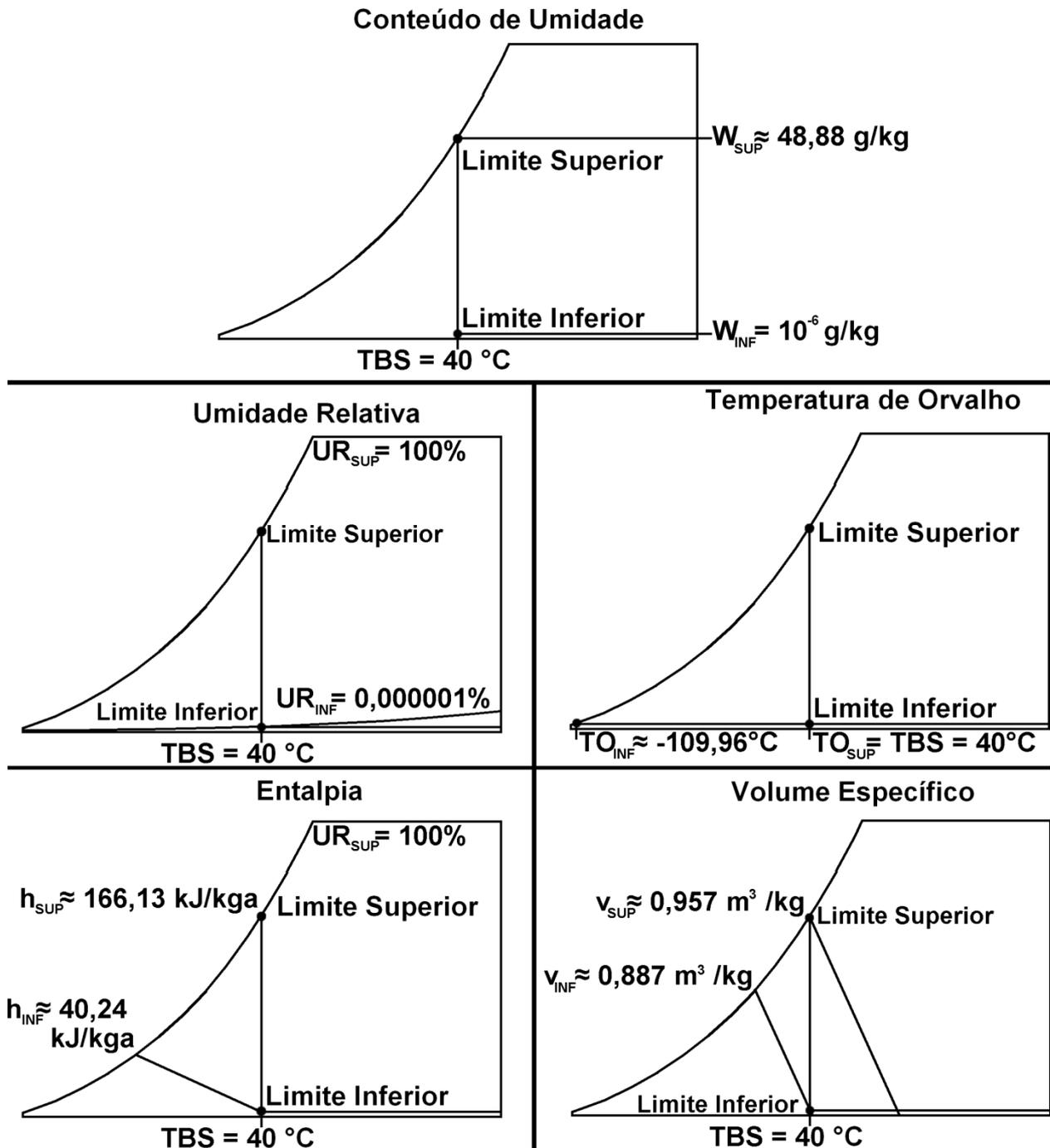
Figura 6.15 – Valores máximo e mínimo da temperatura de bulbo úmido em relação à temperatura de bulbo seco



Fonte: elaborado pelo autor

A mesma coisa é feita para as outras propriedades psicrométricas. A Figura 6.16 apresenta esses limites em relação a temperatura de bulbo seco.

Figura 6.16 – Valores máximo e mínimo das demais propriedades psicrométricas em relação à temperatura de bulbo seco



Fonte: elaborado pelo autor

Entretanto alguns valores a serem digitados pelo usuário não possuem valor máximo e mínimo estabelecido, como por exemplo, a velocidade, área, potência, etc., nesses casos a única exigência é que os valores digitados devem ser maiores que zero.

6.3 Resolução de Exemplos Utilizando o Programa

A seguir são apresentados exemplos que ilustram a utilização do programa para determinação das propriedades de um único ponto e também para resolução de problemas envolvendo os processos psicrométricos descritos no Capítulo 4. Os problemas apresentados neste item são os mesmos resolvidos anteriormente, utilizando a carta psicrométrica, e com isso é possível comparar os procedimentos necessários para resolver esses problemas, via gráfico e via programa. A comparação e comentários dos resultados obtidos com essas duas maneiras é feita, a parte, no **Capítulo 7 – Resultados e Comentários**. Os relatórios completos, gerados pelo programa, para cada um destes exemplos, podem ser lidos no apêndice A.

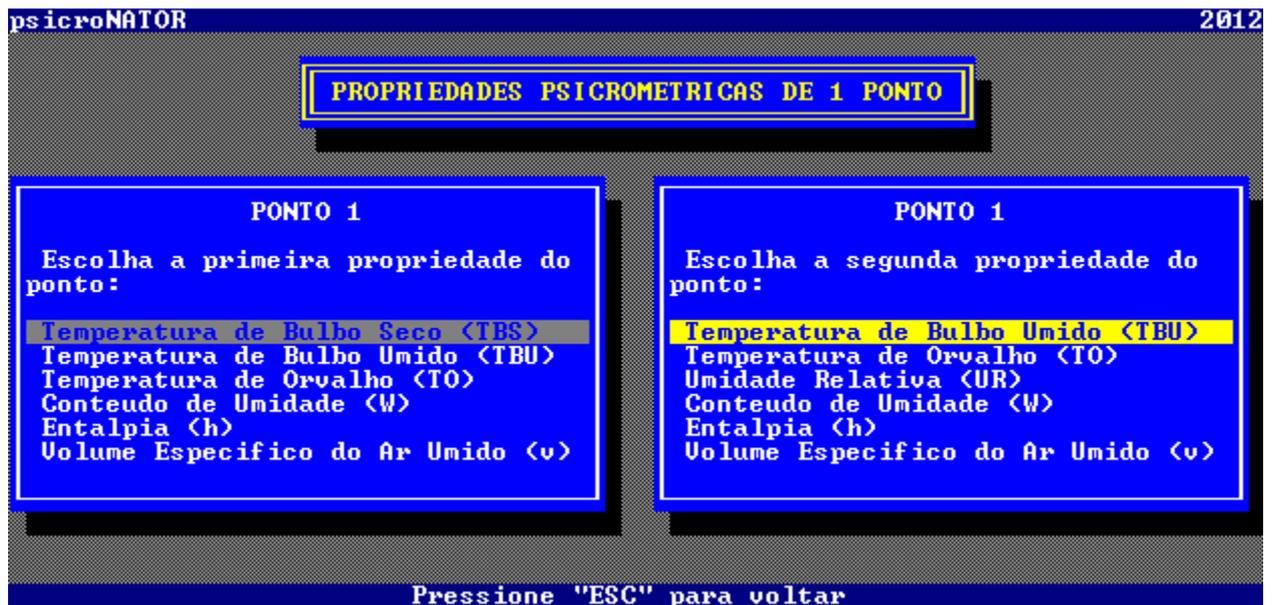
6.3.1 Exemplo 1 – Determinação das Propriedades Psicrométricas de um Único Ponto

Determinar as propriedades do ar úmido sabendo que [Beyer, 2010]:

- a) temperatura de bulbo seco: $TBS = 40 \text{ }^\circ\text{C}$;
- b) temperatura de bulbo úmido: $TBU = 20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- c) pressão: $P = 101325 \text{ Pa}$.

No Menu Principal, selecionar a opção **Propriedades Psicrométricas de apenas UM ponto**. Em seguida são apresentados dois menus, dispostos lado a lado, em que é feita a escolha de quais propriedades psicrométricas são conhecidas. No caso do exemplo foram selecionados **Temperatura de Bulbo Seco (TBS)**, no menu da esquerda, e **Temperatura de Bulbo Úmido (TBU)**, no menu da direita, como mostra a Figura 6.17:

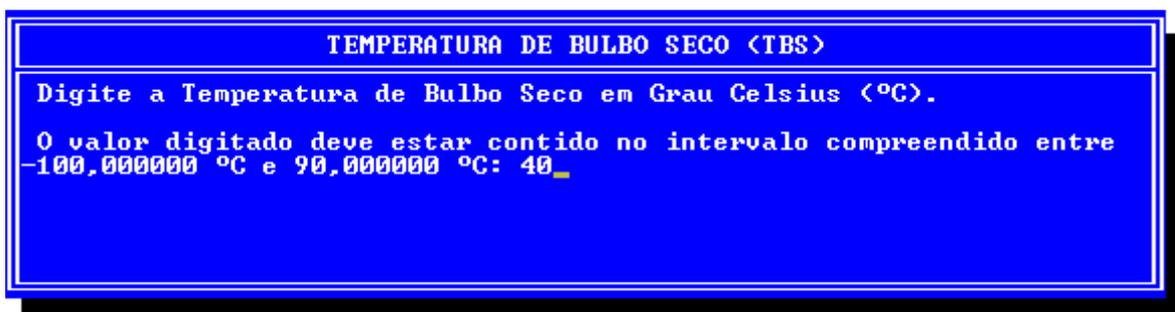
Figura 6.17 – Exemplo 1: menu para escolha das propriedades psicrométricas conhecidas do ponto de entrada



Fonte: elaborado pelo autor

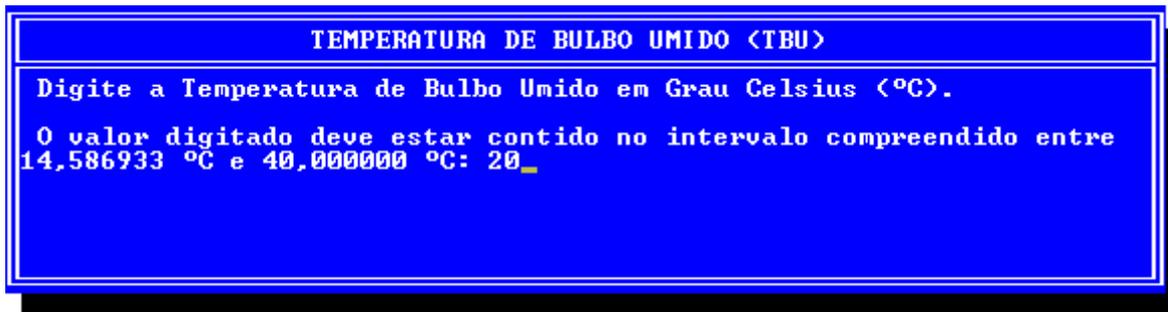
Então são apresentadas as caixas de diálogos para serem digitadas as propriedades selecionadas. Primeiramente é pedido a propriedade selecionada no menu da esquerda e depois a propriedade selecionada no menu da direita. No caso do exemplo é digitado 40 na primeira caixa de diálogo, referente a temperatura de bulbo seco (Figura 6.18) e 20 na segunda, referente a temperatura de bulbo úmido (Figura 6.19).

Figura 6.18 – Exemplo 1: temperatura de bulbo seco sendo digitada



Fonte: elaborado pelo autor

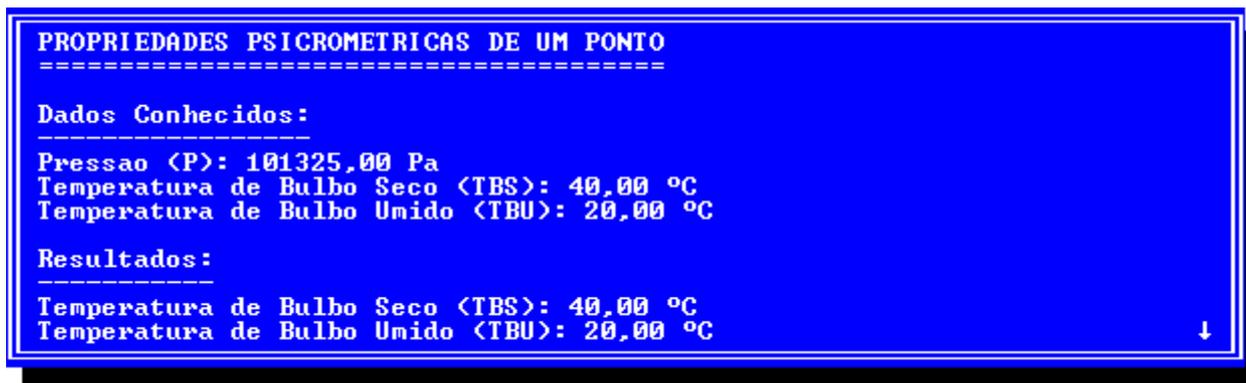
Figura 6.19 – Exemplo 1: temperatura de bulbo úmido sendo digitada



Fonte: elaborado pelo autor

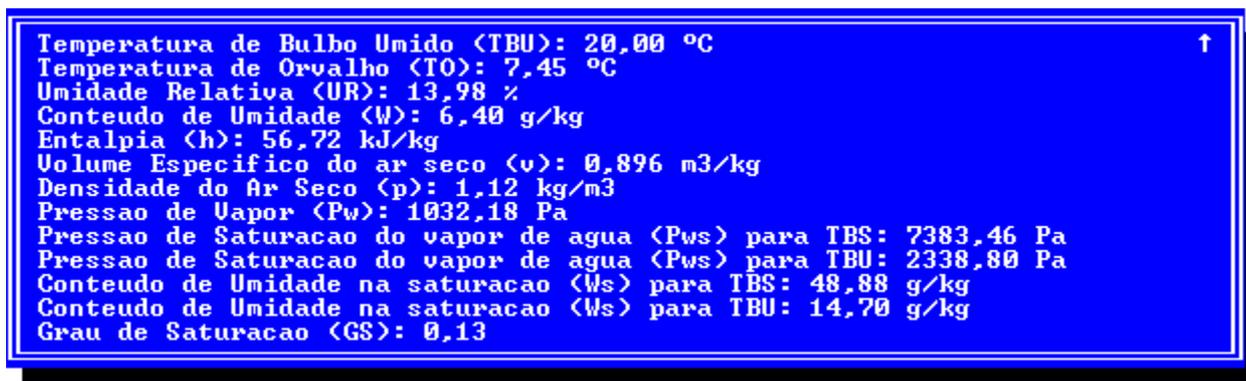
Após a entrada dos dados, o programa calcula as propriedades psicrométricas do ponto, e apresenta os resultados, em uma nova janela, juntamente com os dados de entrada, como mostram as Figuras 6.20 e 6.21.

Figura 6.20 – Exemplo 1: resultados – tela 1



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 6.21 – Exemplo 1: resultados – tela 2



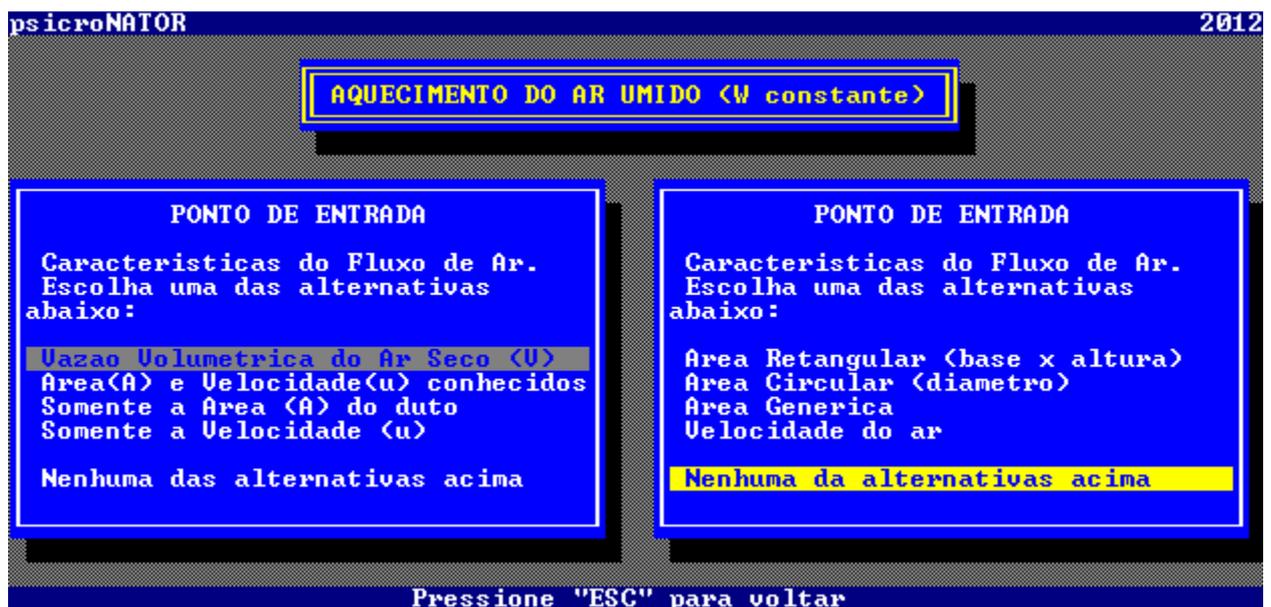
Fonte: elaborado pelo autor

6.3.2 Exemplo 2 – Aquecimento do Ar Úmido

Determinar a potência necessária para aquecer um fluxo de ar úmido, saturado com temperatura igual à 2 °C, que entra numa serpentina de aquecimento com vazão volumétrica de 10 m³/s, e sai desta com temperatura igual à 40 °C [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009].

No Menu Principal, selecionar a opção **Processos Psicrométricos** e, em seguida, **Aquecimento do Ar Úmido**. Na tela seguinte é feita a escolha das propriedades psicrométricas conhecidas do ponto de entrada, sendo que no caso do exemplo foram selecionados **Temperatura de Bulbo Seco (TBS)** e **Umidade Relativa (UR)**, da mesma maneira como foi descrita no exemplo anterior, e na sequência são digitados os valores referentes a essas propriedades (TBS = 2 e UR = 100). Na próxima tela são feitas as escolhas referentes às características do fluxo de ar (Figura 6.22). Neste caso são selecionadas **Vazão Volumétrica do Ar Seco (V)**, no menu da esquerda, e **Nenhuma das alternativas acima**, no menu da direita.

Figura 6.22 – Exemplo 2: menu para escolha das características do fluxo de ar no ponto de entrada



Fonte: elaborado pelo autor

Então é apresentada a caixa de diálogo para que seja digitada a Vazão Volumétrica, que no caso é 10 (Figura 6.23).

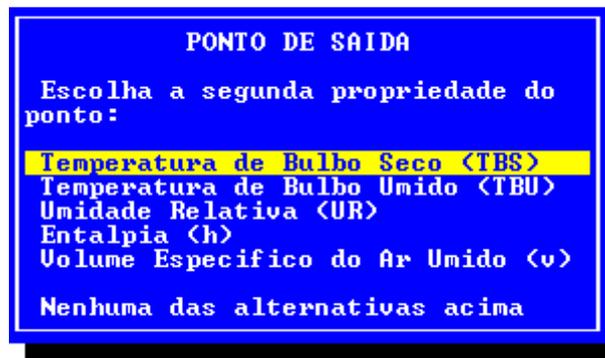
Figura 6.23 – Exemplo 2: vazão volumétrica sendo digitada



Fonte: elaborado pelo autor

O próximo menu a ser apresentando é das propriedades psicrométricas do ponto de saída. Neste caso, como o conteúdo de umidade é constante, basta selecionar apenas uma propriedade, que no exemplo é a **Temperatura de Bulbo Seco** (Figura 6.24).

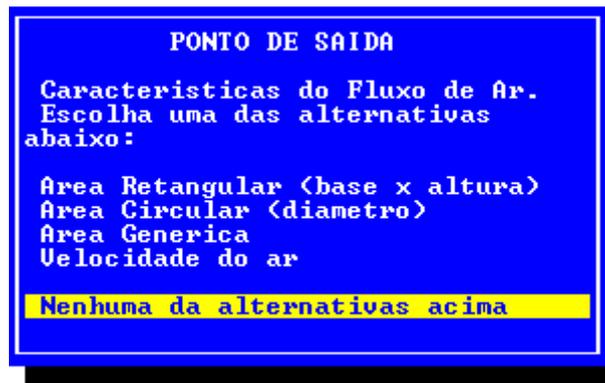
Figura 6.24 – Exemplo 2: menu para escolha da propriedade psicrométrica conhecida do ponto de saída



Fonte: elaborado pelo autor

Em seguida é digitada a temperatura de bulbo seco ($TBS = 40$) na caixa de diálogo que irá aparecer. Na próxima tela são feitas as escolhas referentes às características do fluxo de ar no ponto de saída, caso estas sejam conhecidas. Neste exemplo não são conhecidas as características do fluxo de ar no ponto de saída então é selecionada a opção **Nenhuma das alternativas acima** (Figura 6.25).

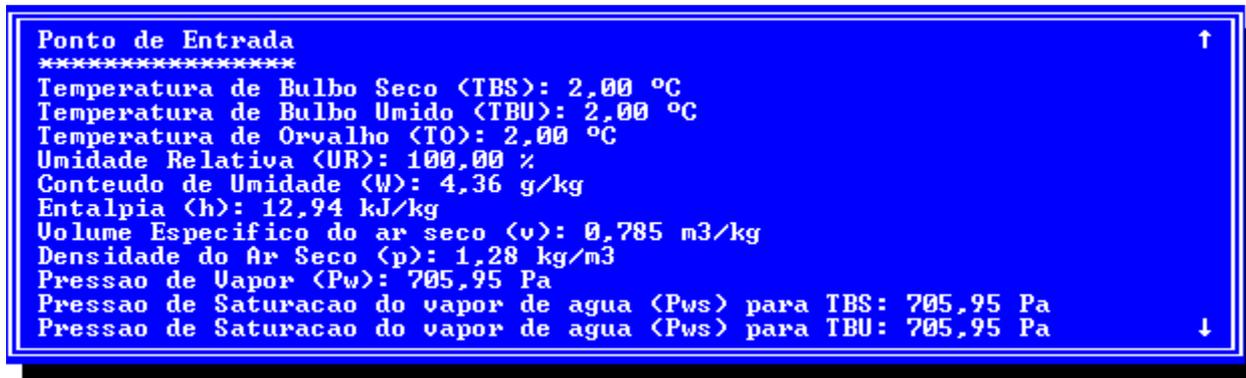
Figura 6.25 – Exemplo 2: menu para escolha das características do fluxo de ar no ponto de saída



Fonte: elaborado pelo autor

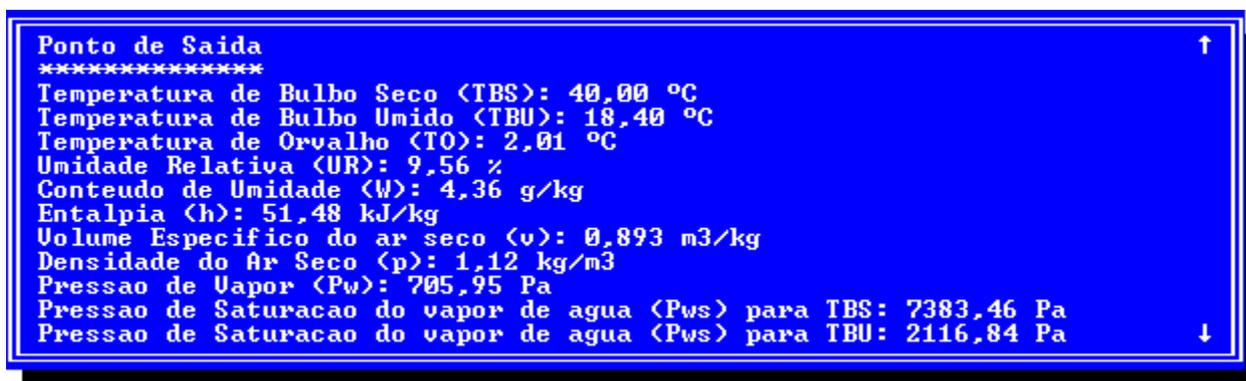
Após a entrada dos dados, o programa calcula as propriedades psicrométricas do ponto de entrada e de saída e também a potência e vazão mássica de ar seco do processo de aquecimento, como mostram as Figuras 6.26, 6.27 e 6.28.

Figura 6.26 – Exemplo 2: resultados – tela 1



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 6.27 – Exemplo 2: resultados – tela 2



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 6.28 – Exemplo 2: resultados – tela 3

```

Pressao de Saturacao do vapor de agua <Pws> para TBU: 2116,84 Pa      ↑
Conteudo de Umidade na saturacao <Ws> para TBS: 48,88 g/kg
Conteudo de Umidade na saturacao <Ws> para TBU: 13,27 g/kg
Grau de Saturacao <GS>: 0,09

Vazao Volumetrica de ar seco <U>: 11,38 m3/s
Area do duto <A>: -
Velocidade do fluxo de ar <u>: -

Processo Psicrometrico
*****
Potencia <Q>: 490,95 kW
Vazao Massica de ar seco <ma>: 12739,88 g/s

```

Fonte: elaborado pelo autor

6.3.3 Exemplo 3 – Resfriamento do Ar Úmido

O seguinte exemplo foi adaptado de Beyer [2010]. O ar com temperatura de bulbo seco igual à 28 °C e umidade relativa igual à 32% é resfriado até ficar com temperatura de bulbo seco igual à 22 °C. O calor sensível retirado do processo requer uma potência térmica de 4,5 kW e a velocidade do fluxo do ar na saída é de 2 m/s. Determinar a vazão volumétrica, a umidade relativa e a área transversal do duto na saída.

No Menu Principal, selecionar a opção **Processos Psicrométricos** e, em seguida, **Resfriamento do Ar Úmido**. Na tela seguinte é feita a escolha das propriedades psicrométricas conhecidas do ponto de entrada, sendo que neste exemplo foram selecionados **Temperatura de Bulbo Seco (TBS)** e **Umidade Relativa (UR)**, e na sequência são digitados os valores referentes a essas propriedades (TBS = 28 e UR = 32). Na próxima tela são feitas as escolhas referentes às características do fluxo de ar, sendo que neste caso é selecionada a opção **Nenhuma das alternativas acima**, no menu da esquerda.

Na próxima tela são apresentadas as propriedades psicrométricas do ponto de saída. Neste caso, assim como no exemplo anterior, o conteúdo de umidade é constante, então basta selecionar apenas uma propriedade, que no exemplo é a **Temperatura de Bulbo Seco**. Na caixa de diálogo que aparece em seguida, é digitado o valor da temperatura de bulbo seco do ponto de saída (TBS = 22). Como no ponto de entrada não foram informadas as características do fluxo de ar, então o programa volta a perguntar se é conhecida alguma dessas características, mas para o ponto de saída (Figura 6.29). Neste caso é selecionada a opção **Somente a Velocidade (u)**, no menu da esquerda.

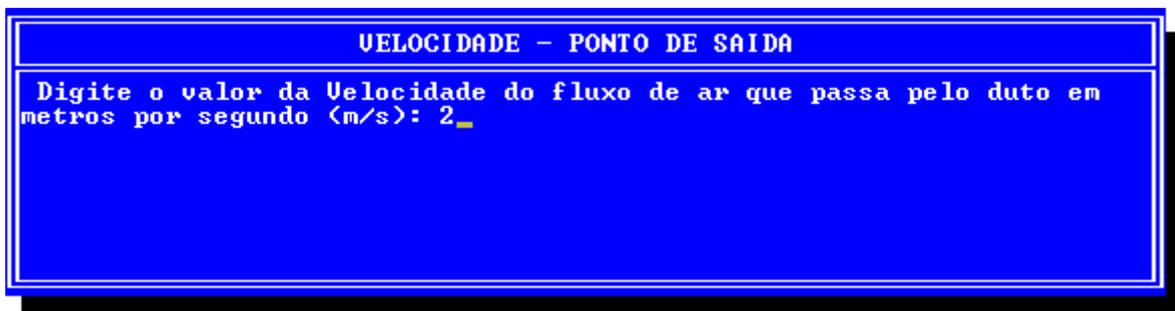
Figura 6.29 – Exemplo 3: menu para escolha das características do fluxo de ar no ponto de saída



Fonte: elaborado pelo autor

Então é apresentada a caixa de diálogo para que seja digitada a Velocidade do fluxo de ar, que no caso é 2 (Figura 6.30).

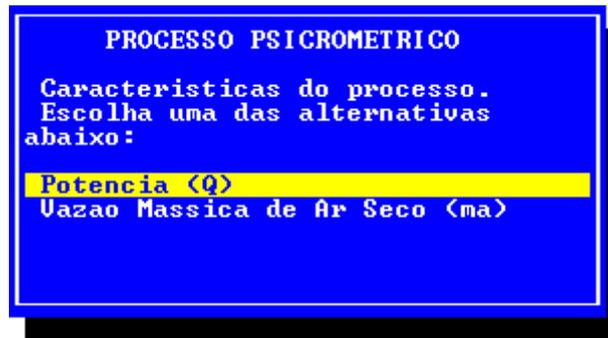
Figura 6.30 – Exemplo 3: velocidade do fluxo de ar sendo digitada



Fonte: elaborado pelo autor

Como não foi informada, nem para o ponto de entrada nem para o ponto de saída, uma vazão volumétrica, ou área e velocidade para se poder calcular uma vazão, o programa então, apresenta um menu para escolha de uma característica conhecida do processo psicrométrico (Figura 6.31). Sendo que nesse exemplo é conhecida a **Potência (Q)**.

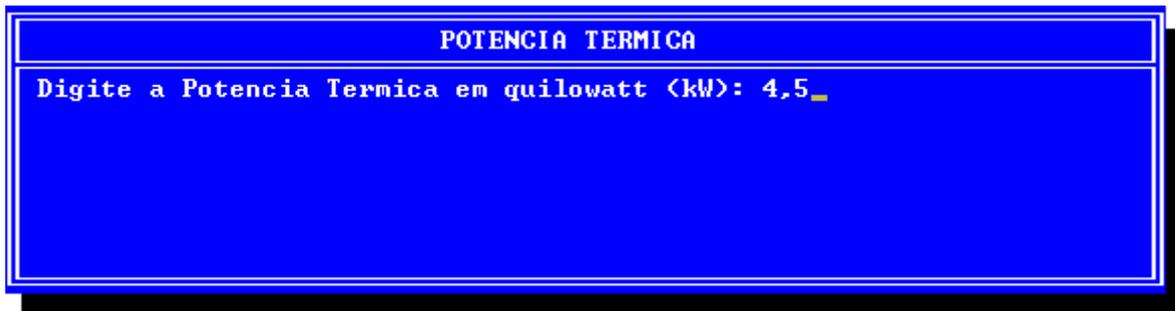
Figura 6.31 – Exemplo 3: menu para escolha da característica do processo psicrométrico



Fonte: elaborado pelo autor

Então é apresentada a caixa de diálogo para que seja digitada a Potência Térmica do processo psicrométrico, que no caso é 4,5 (Figura 6.32).

Figura 6.32 – Exemplo 3: potência térmica sendo digitada



Fonte: elaborado pelo autor

Com isso o programa calcula as propriedades do ponto de entrada, de saída e também a potência e vazão mássica do processo de resfriamento, como mostram as Figuras 6.33 e 6.34.

Figura 6.33 – Exemplo 3: resultados – tela 1



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 6.34 – Exemplo 3: resultados – tela 2

```

Pressao de Saturacao do vapor de agua <Pws> para TBU: 1681,65 Pa      ↑
Conteudo de Umidade na saturacao <Ws> para TBS: 16,67 g/kg
Conteudo de Umidade na saturacao <Ws> para TBU: 10,50 g/kg
Grau de Saturacao <GS>: 0,45

Vazao Volumetrica de ar seco <U>: 0,62 m3/s
Area do duto <A>: 0,31 m2
Velocidade do fluxo de ar <u>: 2,00 m/s

Processo Psicrometrico
*****
Potencia <Q>: 4,50 kW
Vazao Massica de ar seco <ma>: 735,30 g/s

```

Fonte: elaborado pelo autor

6.3.4 Exemplo 4 – Umidificação do Ar Úmido

Uma vazão de $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ entra em um umidificador a vapor com temperatura de bulbo seco igual à $21 \text{ }^\circ\text{C}$ e umidade relativa igual à 35% e sai deste com umidade relativa de 65%. Determinar o consumo de água e a potência de vaporização [Beyer, 2010].

No Menu Principal, selecionar a opção **Processos Psicrométricos** e, em seguida, **Umidificação do Ar Úmido**. Na tela seguinte são feitas as escolhas referentes às propriedades psicrométricas conhecidas do ponto de entrada, sendo que neste exemplo foram selecionados **Temperatura de Bulbo Seco (TBS)** e **Umidade Relativa (UR)**, e na sequência são digitados os valores referentes a essas propriedades (TBS = 21 e UR = 35). Na próxima tela são feitas as escolhas referentes às características do fluxo de ar, sendo que neste caso são selecionadas **Vazão Volumétrica do Ar Seco (V)**, no menu da esquerda e **Nenhuma das alternativas acima**, no menu da direita e então é digitada a vazão volumétrica ($V = 0,2$) na caixa de diálogo que aparece em seguida.

Na próxima tela são apresentadas as propriedades psicrométricas do ponto de saída. Neste caso, a temperatura de bulbo seco é constante, então basta selecionar apenas uma propriedade, que no exemplo é a **Umidade Relativa (UR)**. Na caixa de diálogo que aparece em seguida é digitado o valor da umidade relativa do ponto de saída (UR = 65). Neste exemplo não são conhecidas as características do fluxo de ar no ponto de saída então é selecionada a opção **Nenhuma das alternativas acima**, no menu que aparece após ter sido digitada a umidade relativa.

Após a entrada dos dados, o programa calcula as propriedades psicrométricas do ponto de entrada e de saída, a potência, a vazão mássica de ar seco e a vazão mássica de água do processo de umidificação, como mostra a Figura 6.35.

Figura 6.35 – Exemplo 4: resultados

```

Conteudo de Umidade na saturacao <Ws> para TBS: 15,65 g/kg
Conteudo de Umidade na saturacao <Ws> para TBU: 11,88 g/kg
Grau de Saturacao <GS>: 0,64

Vazao Volumetrica de ar seco <U>: 0,20 m3/s
Area do duto <A>: -
Velocidade do fluxo de ar <u>: -

Processo Psicrometrico
*****
Potencia <Q>: 2,84 kW
Vazao Massica de agua <mw>: 1,12 g/s
Vazao Massica de ar seco <ma>: 237,95 g/s

```

Fonte: elaborado pelo autor

6.3.5 Exemplo 5 – Desumidificação do Ar Úmido

O seguinte exemplo foi adaptado de Beyer [2010]. Um fluxo de ar com vazão igual à $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$ entra por um duto com dimensão de $0,45 \times 0,4 \text{ m}$. O ar entra com temperatura de bulbo seco igual à $24,5 \text{ }^\circ\text{C}$ e umidade relativa igual à 90% e sofre desumidificação, saindo com umidade relativa de 50%. Determinar a potência necessária para retirar o calor latente e a quantidade de água condensada no processo.

No Menu Principal, selecionar a opção **Processos Psicrométricos** e, em seguida, **Desumidificação do Ar Úmido**. Na tela seguinte são feitas as escolhas referentes às propriedades psicrométricas conhecidas do ponto de entrada, sendo que neste exemplo foram selecionados **Temperatura de Bulbo Seco (TBS)** e **Umidade Relativa (UR)**, e na sequência são digitados os valores referentes a essas propriedades ($TBS = 24,5$ e $UR = 90$). Na próxima tela são feitas as escolhas referentes às características do fluxo de ar, sendo que neste caso são selecionadas **Vazão Volumétrica do Ar Seco (V)**, no menu da esquerda e **Área Retangular (base x altura)**, no menu da direita. Então são digitadas a vazão volumétrica ($V = 0,2$), a base e altura da seção transversal do duto por onde passa o fluxo de ar, nas caixas de diálogos que aparecem em seguida (Figuras 6.36 e 6.67).

Figura 6.36 – Exemplo 5: base da seção transversal do duto sendo digitada

The image shows a blue dialog box with a white border. At the top, it reads "AREA DO DUTO <RETANGULAR> – PONTO DE ENTRADA". Below this, the prompt text says "Digite a Base do duto com area retangular em metros <m>: 0,45_". The cursor is positioned at the end of the input field.

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 6.37 – Exemplo 5: altura da seção transversal do duto sendo digitada

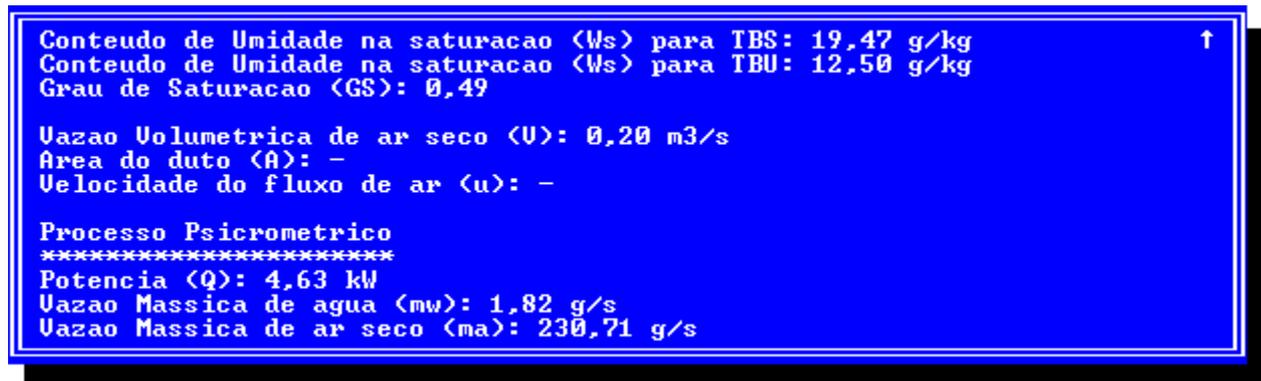
The image shows a blue dialog box with a white border. At the top, it reads "AREA DO DUTO <RETANGULAR> – PONTO DE ENTRADA". Below this, the prompt text says "Digite a Altura do duto com area retangular em metros <m>: 0,4_". The cursor is positioned at the end of the input field.

Fonte: elaborado pelo autor

A seguir são apresentadas as propriedades psicrométricas do ponto de saída, sendo que neste caso, assim como no exemplo anterior, a temperatura de bulbo seco é constante, então basta selecionar apenas uma propriedade, que no exemplo é a **Umidade Relativa (UR)**. Na caixa de diálogo que aparece em seguida é digitado o valor da umidade relativa do ponto de saída (UR=50). Também não são conhecidas as características do fluxo de ar no ponto de saída então é selecionado **Nenhuma das alternativas acima**, no menu seguinte.

Após a entrada dos dados, o programa calcula as propriedades psicrométricas do ponto de entrada e de saída, a potência, a vazão mássica de ar seco e a vazão mássica de água do processo de desumidificação, como mostra a Figura 6.38.

Figura 6.38 – Exemplo 5: resultados



Fonte: elaborado pelo autor

6.3.6 Exemplo 6 – Resfriamento Evaporativo

Uma vazão de ar entra com temperatura de bulbo seco igual à 34 °C e de bulbo úmido igual à 26 °C em um lavador, onde é umidificado com água esguichada até sair com UR = 90%. Encontre a temperatura de saída, o consumo de água e a eficiência de saturação, se a vazão de saída for de 2,7 m³/s [Beyer, 2010].

No Menu Principal, selecionar a opção **Processos Psicrométricos** e, em seguida, **Resfriamento Evaporativo**. Na tela seguinte são feitas as escolhas referentes às propriedades psicrométricas conhecidas do ponto de entrada, sendo que neste exemplo foram selecionados **Temperatura de Bulbo Seco (TBS)** e **Temperatura de Bulbo Úmido (TBU)**, e na sequência são digitados os valores referentes a essas propriedades (TBS = 34 e TBU = 26). Na próxima tela são feitas as escolhas referentes às características do fluxo de ar, sendo que neste caso são selecionadas **Vazão Volumétrica do Ar Seco (V)**, no menu da esquerda e **Nenhuma das alternativas acima**, no menu da direita e então é digitada a vazão volumétrica (V = 2,7) na caixa de diálogo que aparece em seguida.

Na próxima tela são apresentadas as propriedades psicrométricas do ponto de saída. Neste caso, a entalpia é constante, então basta selecionar apenas uma propriedade, que no exemplo é a **Umidade Relativa (UR)**. Na caixa de diálogo que aparece em seguida é digitado o valor da umidade relativa do ponto de saída (UR = 90). Neste exemplo não são conhecidas as características do fluxo de ar no ponto de saída então é selecionada a opção **Nenhuma das alternativas acima**, no menu que aparece após ter sido digitada a umidade relativa.

Após a entrada dos dados, o programa calcula as propriedades psicrométricas do ponto de entrada e de saída, a vazão mássica de ar seco e a vazão mássica de água do processo de resfriamento evaporativo, como mostram as Figuras 6.38 e 6.39.

Figura 6.39 – Exemplo 6: resultados – tela 1

```

Ponto de Saida                                     ↑
*****
Temperatura de Bulbo Seco (TBS): 27,33 °C
Temperatura de Bulbo Umido (TBU): 26,00 °C
Temperatura de Orvalho (TO): 25,58 °C
Umidade Relativa (UR): 90,00 %
Conteudo de Umidade (W): 20,78 g/kg
Entalpia (h): 80,22 kJ/kg
Volume Especifico do ar seco (v): 0,880 m3/kg
Densidade do Ar Seco (p): 1,16 kg/m3
Pressao de Uapor (Pw): 3276,44 Pa
Pressao de Saturacao do vapor de agua (Pws) para TBS: 3636,86 Pa
Pressao de Saturacao do vapor de agua (Pws) para TBU: 3363,13 Pa   ↓

```

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 6.40 – Exemplo 6: resultados – tela 2

```

Conteudo de Umidade na saturacao (Ws) para TBS: 23,15 g/kg
Conteudo de Umidade na saturacao (Ws) para TBU: 21,35 g/kg
Grau de Saturacao (GS): 0,90                                     ↑

Vazao Volumetrica de ar seco (U): 2,65 m3/s
Area do duto (A): -
Velocidade do fluxo de ar (u): -

Processo Psicrometrico
*****
Vazao Massica de agua (mw): 8,56 g/s
Vazao Massica de ar seco (ma): 3016,00 g/s
Eficiencia de Saturacao (ns): 83,38 %

```

Fonte: elaborado pelo autor

6.3.7 Exemplo 7 – Desumidificação do Ar Úmido por Adsorção

Uma vazão de ar entra com temperatura de bulbo seco igual à 19 °C e umidade relativa igual à 90% passando por um sal higroscópico onde é desumidificado até sair com umidade relativa igual à 30%. Encontre a temperatura de saída e a quantidade de água adsorvida, se a vazão de saída for 1 m³/s.

No Menu Principal, selecionar a opção **Processos Psicrométricos** e, em seguida, **Desumidificação do Ar Úmido por Adsorção**. Na tela seguinte é feita a escolha das propriedades psicrométricas conhecidas do ponto de entrada, sendo que no caso do exemplo foram selecionados **Temperatura de Bulbo Seco (TBS)** e **Umidade Relativa (UR)**, e na sequência são digitados os valores referentes a essas propriedades (TBS = 19 e UR = 90). Na próxima tela são feitas as escolhas referentes às características do fluxo de ar, sendo que neste caso é selecionado **Nenhuma das alternativas acima**, no menu da esquerda.

Na próxima tela são apresentadas as propriedades psicrométricas do ponto de saída. Assim como no caso anterior, a entalpia é constante, então basta selecionar apenas uma propriedade, que no exemplo é a **Umidade Relativa (UR)**. Na caixa de diálogo que aparece em seguida é digitado o valor da umidade relativa do ponto de saída ($UR = 30$). Na tela seguinte são feitas as escolhas referentes às características do fluxo de ar, sendo que neste caso são selecionadas **Vazão Volumétrica do Ar Seco (V)**, no menu da esquerda e **Nenhuma das alternativas acima**, no menu da direita e então é digitada a vazão volumétrica ($V = 1$) na caixa de diálogo que aparece em seguida. Então, o programa calcula as propriedades psicrométricas do ponto de entrada e de saída, a vazão mássica de ar seco e a vazão mássica de água do processo de desumidificação do ar úmido por adsorção, como mostram as Figuras 6.40 e 6.41.

Figura 6.41 – Exemplo 6: resultados – tela 1

```

Ponto de Saida
*****
Temperatura de Bulbo Seco <TBS>: 29,87 °C
Temperatura de Bulbo Umido <TBU>: 17,88 °C
Temperatura de Orvalho <TO>: 10,46 °C
Umidade Relativa <UR>: 30,00 %
Conteudo de Umidade <W>: 7,86 g/kg
Entalpia <h>: 50,52 kJ/kg
Volume Especifico do ar seco <v>: 0,869 m3/kg
Densidade do Ar Seco <p>: 1,16 kg/m3
Pressao de Vapor <Pw>: 1265,33 Pa
Pressao de Saturacao do vapor de agua <Pws> para TBS: 4213,69 Pa
Pressao de Saturacao do vapor de agua <Pws> para TBU: 2049,21 Pa

```

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 6.42 – Exemplo 6: resultados – tela 2

```

Pressao de Saturacao do vapor de agua <Pws> para TBU: 2049,21 Pa
Conteudo de Umidade na saturacao <Ws> para TBS: 26,99 g/kg
Conteudo de Umidade na saturacao <Ws> para TBU: 12,84 g/kg
Grau de Saturacao <GS>: 0,29

Vazao Volumetrica de ar seco <U>: 1,00 m3/s
Area do duto <A>: -
Velocidade do fluxo de ar <u>: -

Processo Psicrometrico
*****
Vazao Massica de agua <mw>: 5,20 g/s
Vazao Massica de ar seco <ma>: 1150,39 g/s

```

Fonte: elaborado pelo autor

6.3.8 Exemplo 8 – Resfriamento e Desumidificação do Ar Úmido

Encontrar a potência de refrigeração necessária para processar um fluxo de ar com temperatura de bulbo seco $TBS_E = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ e $UR_E = 50 \%$. O ar passa por uma serpentina de refrigeração com vazão volumétrica $V_E = 5 \text{ m}^3/\text{s}$ e é processado até uma condição final de saturação com temperatura de bulbo $TBS_S = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009]. Determinar também a vazão de água retirada.

No Menu Principal, selecionar a opção **Processos Psicrométricos** e, em seguida, **Resfriamento e Desumidificação do Ar Úmido**. Na tela seguinte são feitas as escolhas referentes às propriedades psicrométricas conhecidas do ponto de entrada, sendo que neste exemplo foram selecionados **Temperatura de Bulbo Seco (TBS)** e **Umidade Relativa (UR)**, e na sequência são digitados os valores referentes a essas propriedades ($TBS = 30$ e $UR = 50$). Na próxima tela são feitas as escolhas referentes às características do fluxo de ar, sendo que neste caso são selecionadas **Vazão Volumétrica do Ar Seco (V)**, no menu da esquerda e **Nenhuma das alternativas acima**, no menu da direita e então é digitada a vazão volumétrica ($V = 5$) na caixa de diálogo que aparece em seguida.

Na próxima tela são apresentadas as propriedades psicrométricas do ponto de saída, sendo que neste exemplo são selecionadas a **Temperatura de Bulbo Seco (TBS)** e a **Umidade Relativa (UR)**. Nas caixas de diálogos que aparecem em seguida são digitados os valores das propriedades selecionadas ($TBS = 10$ e $UR = 100$). Como não são conhecidas as características do fluxo de ar no ponto de saída então é selecionada opção **Nenhuma das alternativas acima**, no menu que aparece após a entrada de dados do ponto de saída.

Após a entrada dos dados, o programa calcula as propriedades psicrométricas do ponto de entrada e de saída, o calor total, sensível e latente, a vazão mássica de ar seco e de água, a temperatura de orvalho da serpentina e o fator de calor sensível, de contato e de passagem da serpentina, como mostra a Figura 6.43.

Figura 6.43 – Exemplo 8: resultados

```

Velocidade do fluxo de ar (u): -
Processo Psicrometrico
*****
Calor Total (Q): 199,09 kW
Calor Sensivel (Qs): 116,31 kW
Calor Latente (Ql): 82,78 kW
Uazao Massica de agua (mw): 32,38 g/s
Uazao Massica de ar seco (ma): 5700,16 g/s
Temperatura de Orvalho da serpentina (Tos): 10,00 °C
Fator de Calor Sensivel (FCS): 0,58
Fator de Contato da serpentina (efetividade da serpentina) (Fc): 1,00
Fator de Passagem da serpentina (Fp): 0,00

```

Fonte: elaborado pelo autor

6.3.9 Exemplo 9 – Mistura Adiabática de Dois Fluxos de Ar Úmido

Uma corrente de ar exterior com vazão volumétrica igual à $2 \text{ m}^3/\text{s}$, temperatura de bulbo seco igual à 4 °C e temperatura de bulbo úmido igual à 2 °C é misturada adiabaticamente com ar recirculado com vazão volumétrica igual à $6,25 \text{ m}^3/\text{s}$, temperatura de bulbo seco igual à 25 °C e umidade relativa igual à 50% . Determinar as temperaturas de bulbo seco e úmido da mistura resultante [American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009].

No Menu Principal, selecionar a opção **Processos Psicrométricos** e, em seguida, **Mistura Adiabática de Dois Fluxos de Ar Úmido**. Na tela seguinte são feitas as escolhas referentes às propriedades psicrométricas conhecidas do ponto 1, sendo que neste exemplo foram selecionados **Temperatura de Bulbo Seco (TBS)** e **Temperatura de Bulbo Úmido (TBU)**, e na sequência são digitados os valores dessas propriedades ($TBS = 4$ e $TBU = 2$). Na próxima tela são feitas as escolhas referentes às características do fluxo de ar, sendo que neste caso são selecionadas **Vazão Volumétrica do Ar Seco (V)**, no menu da esquerda e **Nenhuma das alternativas acima**, no menu da direita (Figura 6.43) e então é digitada a vazão volumétrica ($V=2$) na caixa de diálogo que aparece em seguida.

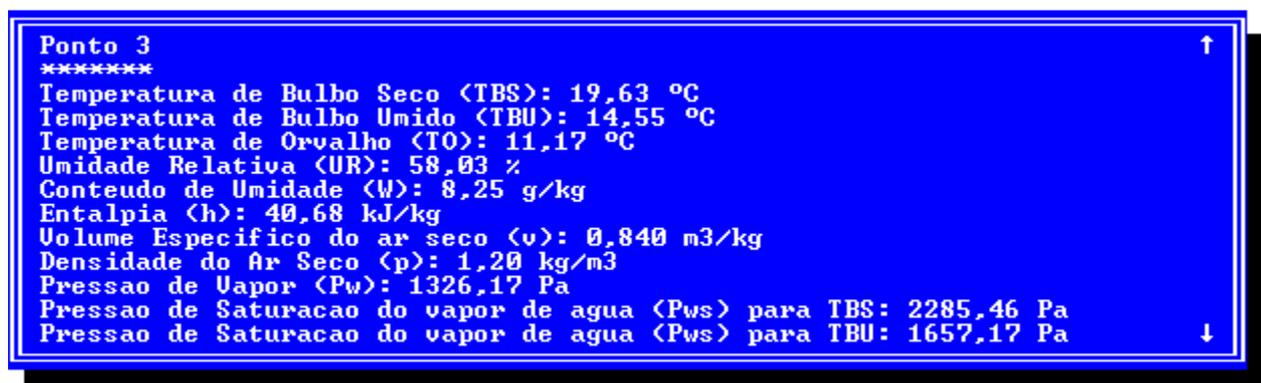
Figura 6.44 – Exemplo 9: menu para escolha das características do fluxo de ar no ponto 1



Fonte: elaborado pelo autor

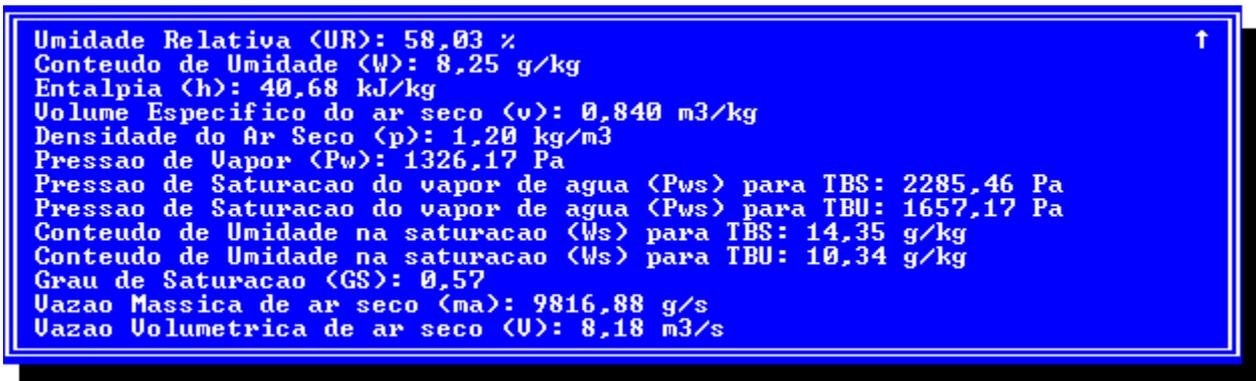
Na próxima tela são apresentadas as propriedades psicrométricas do ponto 2, sendo que neste exemplo são selecionadas a **Temperatura de Bulbo Seco (TBS)** e a **Umidade Relativa (UR)**. Nas caixas de diálogos que aparecem em seguida são digitados os valores das propriedades selecionadas (TBS = 25 e UR = 50). Na próxima tela são feitas as escolhas referentes às características do fluxo de ar, sendo que neste caso são selecionadas **Vazão Volumétrica do Ar Seco (V)**, no menu da esquerda e **Nenhuma das alternativas acima**, no menu da direita e então é digitada a vazão volumétrica ($V = 6,25$) na caixa de diálogo que aparece em seguida. Após a entrada dos dados, o programa calcula as propriedades psicrométricas do ponto 1, ponto 2 e da mistura (ponto 3), como mostram as Figuras 6.45 e 6.46.

Figura 6.45 – Exemplo 9: resultados – tela 1



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 6.46 – Exemplo 9: resultados – tela 2



Fonte: elaborado pelo autor

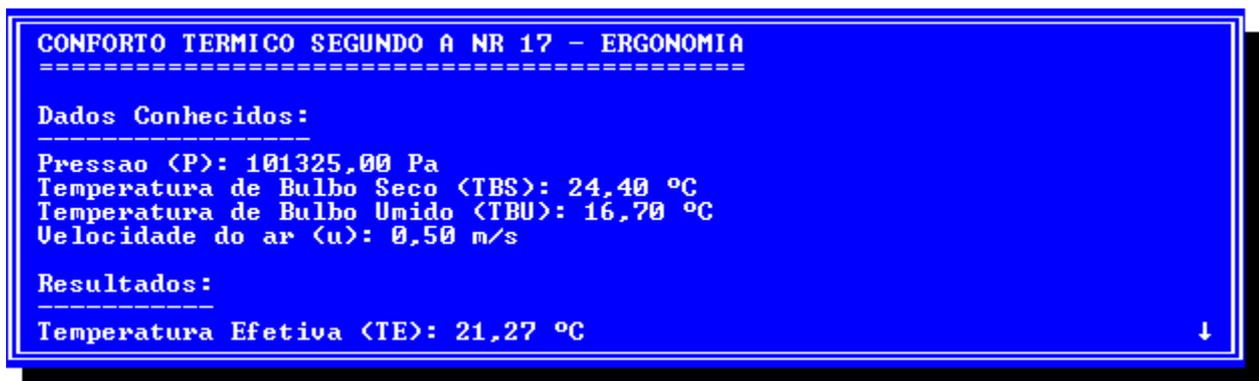
6.3.10 Exemplo 10 – Verificação de Conforto Térmico Segundo a NR-17

Determinar “[...] a temperatura efetiva, sabendo-se que a temperatura de bulbo seco é 24,4 °C [...] e a do termômetro de bulbo úmido é 16,7 °C [...], admitindo uma velocidade do ar de 0,5 m/s [...]” [Macintyre, 1990]. Verificar se essa situação atende a NR-17.

No Menu Principal, selecionar a opção **Conforto Térmico segundo a NR17 - Ergonomia**. Na tela seguinte são feitas as escolhas referentes às propriedades psicrométricas conhecidas, sendo que neste exemplo foram selecionados **Temperatura de Bulbo Seco (TBS)** e **Temperatura de Bulbo Úmido (TBU)**, e na sequência são digitados os valores dessas propriedades (TBS = 24,4 e TBU = 16,7) e da **Velocidade do Ar**, que no caso é 0,5.

Após a entrada dos dados, o programa calcula a temperatura efetiva, a umidade relativa e faz a verificação se essa situação atende ou não a NR-17, como mostram as Figuras 6.47, 6.48 e 6.49.

Figura 6.47 – Exemplo 10: resultados – tela 1



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 6.48 – Exemplo 10: resultados – tela 2

```

Resultados:
Temperatura Efetiva (TE): 21,27 °C
Umidade Relativa (UR): 45,70 %
Velocidade do ar (u): 0,50 m/s

AMBIENTE DE TRABALHO ATENDE A NR-17

*****
*          NORMA REGULAMENTADORA 17 - ERGONOMIA          *
* <Redacao dada pela Portaria MTPS nº 3.751, de 23/11/1990> *
*                                                                 *

```

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 6.49 – Exemplo 10: resultados – tela 3

```

* <Redacao dada pela Portaria MTPS nº 3.751, de 23/11/1990> *
*                                                                 *
* Item 17.5.2.: Nos locais de trabalho onde sao executadas atividades *
* que exijam solicitacao intelectual e atencao constantes, tais como: *
* salas de controle, salas de desenvolvimento ou analise de projetos, *
* laboratorios, escritorios, dentre outros, sao recomendadas as *
* seguintes condicoes de conforto: *
* a) indice de temperatura efetiva entre 20 °C e 23 °C; *
* b) velocidade do ar nao superior a 0,75 m/s; *
* c) umidade relativa do ar nao inferior a 40 %. *
*                                                                 *
*****

```

Fonte: elaborado pelo autor

7 RESULTADOS E COMENTÁRIOS

Neste capítulo são comparados e comentados os resultados obtidos no programa desenvolvido com os lidos na carta psicrométrica. Os resultados do programa também foram comparados com um outro *software* chamado **GRAPSI**³ (Gráfico Psicrométrico Digital).

O programa computacional GRAPSI foi desenvolvido pelo professor e pesquisador Evandro de Castro Melo do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade de Viçosa. É também autora deste programa a Dra. Daniela de Carvalho Lopes. Com este programa é possível “[...] calcular as propriedades psicrométricas do ar úmido e visualizá-las no próprio gráfico que é desenhado na tela do computador. [...] Ele pode ser usado para temperaturas entre -100 a 372 °C e altitudes até 4.000 m.” [Melo, 2012]. Devido a essas características e ao fato do *software* ser gratuito é que este foi adotado como parâmetro para a comparação com os valores gerados pelo psicronATOR. Neste trabalho foi utilizado o GRAPSI 7.0.

Nos próximos itens foram apresentados as comparações dos valores calculados pelos diferentes métodos e também os respectivos erros relativos percentuais para cada variável em cada caso. Ao final do capítulo é apresentado os comentários referentes aos resultados, erros relativos e absolutos obtidos com os cálculos realizados pelo programa desenvolvido.

7.1 Exemplo 1 – Determinação das Propriedades Psicrométricas de um Único Ponto

Dados conhecidos:

- a) temperatura de bulbo seco: TBS = 40 °C;
- b) temperatura de bulbo úmido: TBU = 20 °C;
- c) pressão: P = 101325 Pa.

Nas Figuras 7.1 e 7.2 são apresentados os resultados calculados com o programa desenvolvido e os erros deste em relação aos valores de referência obtidos na carta psicrométrica (Figura 7.1) e com o *software* GRAPSI (Figura 7.2).

³ <http://www.evandro.eng.br/grapsi.html>

Figura 7.1 – Exemplo 1: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os lidos na carta psicrométrica

	Valores de Referência (carta psicrométrica)	Resultados Obtidos no Programa Desenvolvido	Erro
Temperatura de Orvalho (TO)	7,5 °C	7,45 °C	0,67%
Umidade Relativa (UR)	14 %	13,98 %	0,14%
Conteúdo de Umidade (W)	6,5 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	6,40 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	1,54%
Entalpia (h)	56,7 kJ / kg _{ar seco}	56,72 kJ / kg _{ar seco}	0,04%
Volume Específico (v)	0,896 m ³ / kg _{ar seco}	0,896 m ³ / kg _{ar seco}	0,00%

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 7.2 – Exemplo 1: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os obtidos no GRAPSI

	Valores de Referência (GRAPSI)	Resultados Obtidos Programa Desenvolvido	Erro
Temperatura de Orvalho (TO)	7,5 °C	7,45 °C	0,67%
Umidade Relativa (UR)	14 %	13,98 %	0,14%
Conteúdo de Umidade (W)	6,4 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	6,40 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	0,00%
Entalpia (h)	56,8 kJ / kg _{ar seco}	56,72 kJ / kg _{ar seco}	0,14%
Volume Específico do ar seco (v)	0,896 m ³ / kg _{ar seco}	0,896 m ³ / kg _{ar seco}	0,00%
Pressão de Vapor (Pw)	1 kPa	1,032 kPa	3,22%
Pressão de Saturação (Pws)	7,4 kPa	7,383 kPa	0,22%

Fonte: elaborado pelo autor

7.2 Exemplo 2 – Aquecimento do Ar Úmido

Dados conhecidos:

- ponto de entrada: TBS = 2 °C, UR = 100%, V = 10 m³/s;
- ponto de saída: TBS = 40 °C;
- pressão: P = 101325 Pa.

Nas Figuras 7.3 e 7.4 são apresentados os resultados calculados com o programa desenvolvido e os erros deste em relação aos valores de referência obtidos na carta psicrométrica (Figura 7.3) e com o *software* GRAPSI (Figura 7.4).

Figura 7.3 – Exemplo 2: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os lidos na carta psicrométrica

	Valores de Referência (carta psicrométrica)	Resultados Obtidos no Programa Desenvolvido	Erro
Ponto de Entrada			
Entalpia (h)	13 kJ / kg _{ar seco}	12,94 kJ / kg _{ar seco}	0,46%
Volume Específico (v)	0,785 m ³ / kg _{ar seco}	0,785 m ³ / kg _{ar seco}	0,00%
Ponto de Saída			
Entalpia (h)	51,5 kJ / kg _{ar seco}	51,48 kJ / kg _{ar seco}	0,04%
Processo Psicrométrico			
Potência Térmica (Q)	490 kW	490,95 kW	0,19%
Vazão Mássica de Ar Seco (m _a)	12,74 kg _{ar seco} /s	12,74 kg _{ar seco} /s	0,00%

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 7.4 – Exemplo 2: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os obtidos no GRAPSI

	Valores de Referência (GRAPSI)	Resultados Obtidos Programa Desenvolvido	Erro
Ponto de Entrada			
Temperatura de Orvalho (TO)	2 °C	2,00 °C	0,00%
Umidade Relativa (UR)	100 %	100 %	0,00%
Conteúdo de Umidade (W)	4,4 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	4,36 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	0,91%
Entalpia (h)	13 kJ / kg _{ar seco}	12,94 kJ / kg _{ar seco}	0,46%
Volume Específico (v)	0,785 m ³ / kg _{ar seco}	0,785 m ³ / kg _{ar seco}	0,00%
Pressão de Vapor (Pw)	0,7 kPa	0,706 kPa	0,85%
Pressão de Saturação (Pws)	0,7 kPa	0,706 kPa	0,85%
Ponto de Saída			
Temp. de Bulbo Úmido (TBU)	18,2 °C	18,40 °C	1,10%
Temperatura de Orvalho (TO)	2 °C	2,01 °C	0,50%
Umidade Relativa (UR)	9,6 %	9,56 %	0,42%
Conteúdo de Umidade (W)	4,4 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	4,36 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	0,91%
Entalpia (h)	51,5 kJ / kg _{ar seco}	51,48 kJ / kg _{ar seco}	0,04%
Volume Específico (v)	0,893 m ³ / kg _{ar seco}	0,893 m ³ / kg _{ar seco}	0,00%
Pressão de Vapor (Pw)	0,7 kPa	0,706 kPa	0,85%
Pressão de Saturação (Pws)	7,4 kPa	7,383 kPa	0,22%

Fonte: elaborado pelo autor

7.3 Exemplo 3 – Resfriamento do Ar Úmido

Dados conhecidos:

- a) ponto de entrada: TBS = 28 °C, UR = 32%;

- b) ponto de saída: TBS = 22 °C, u = 2 m/s;
- c) processo psicrométrico: Q = 4,5 kW;
- d) pressão: P = 101325 Pa.

Nas Figuras 7.5 e 7.6 são apresentados os resultados calculados com o programa desenvolvido e os erros deste em relação aos valores de referência obtidos na carta psicrométrica (Figura 7.5) e com o *software* GRAPSI (Figura 7.6).

Figura 7.5 – Exemplo 3: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os lidos na carta psicrométrica

	Valores de Referência (carta psicrométrica)	Resultados Obtidos no Programa Desenvolvido	Erro
Ponto de Entrada			
Entalpia (h)	47 kJ / kg _{ar seco}	47,36 kJ / kg _{ar seco}	0,77%
Ponto de Saída			
Umidade Relativa (UR)	45,83 %	45,76 %	0,15%
Entalpia (h)	41 kJ / kg _{ar seco}	41,24 kJ / kg _{ar seco}	0,59%
Volume Específico (v)	0,846 m ³ / kg _{ar seco}	0,846 m ³ / kg _{ar seco}	0,00%
Vazão Volumétrica (V)	0,63 m ³ /s	0,620 m ³ /s	1,59%
Área da Seção Transversal (A)	0,32 m ²	0,310 m ²	3,13%
Processo Psicrométrico			
Vazão Mássica de Ar Seco (m _a)	0,75 kg _{ar seco} /s	0,74 kg _{ar seco} /s	1,96%

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 7.6 – Exemplo 3: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os obtidos no GRAPSI

	Valores de Referência (GRAPSI)	Resultados Obtidos Programa Desenvolvido	Erro
Ponto de Entrada			
Temp. de Bulbo Úmido (TBU)	16,9 °C	16,95 °C	0,30%
Temperatura de Orvalho (TO)	9,8 °C	9,80 °C	0,00%
Conteúdo de Umidade (W)	7,5 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	7,52 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	0,27%
Entalpia (h)	47,4 kJ / kg _{ar seco}	47,36 kJ / kg _{ar seco}	0,08%
Volume Específico (v)	0,864 m ³ / kg _{ar seco}	0,863 m ³ / kg _{ar seco}	0,12%
Pressão de Vapor (Pw)	1,2 kPa	1,210 kPa	0,86%
Pressão de Saturação (Pws)	3,8 kPa	3,782 kPa	0,47%
Ponto de Saída			
Temp. de Bulbo Úmido (TBU)	14,8 °C	14,78 °C	0,14%
Temperatura de Orvalho (TO)	9,8 °C	9,80 °C	0,00%
Umidade Relativa (UR)	45,8 %	45,76 %	0,09%
Conteúdo de Umidade (W)	7,5 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	7,52 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	0,27%
Entalpia (h)	41,3 kJ / kg _{ar seco}	41,24 kJ / kg _{ar seco}	0,15%
Volume Específico (v)	0,846 m ³ / kg _{ar seco}	0,846 m ³ / kg _{ar seco}	0,00%
Pressão de Vapor (Pw)	1,2 kPa	1,210 kPa	0,86%
Pressão de Saturação (Pws)	2,6 kPa	2,645 kPa	1,72%

Fonte: elaborado pelo autor

7.4 Exemplo 4 – Umidificação do Ar Úmido

Dados conhecidos:

- ponto de entrada: TBS = 21 °C, UR = 35%, V = 0,2 m³/s;
- ponto de saída: UR = 65%;
- pressão: P = 101325 Pa.

Nas Figuras 7.7 e 7.8 são apresentados os resultados calculados com o programa desenvolvido e os erros deste em relação aos valores de referência obtidos na carta psicrométrica (Figura 7.7) e com o *software* GRAPSI (Figura 7.8).

Figura 7.7 – Exemplo 4: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os lidos na carta psicrométrica

	Valores de Referência (carta psicrométrica)	Resultados Obtidos no Programa Desenvolvido	Erro
Ponto de Entrada			
Conteúdo de Umidade (W)	5,5 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	5,39 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	2,00%
Entalpia (h)	34,67 kJ / kg _{ar seco}	34,82 kJ / kg _{ar seco}	0,43%
Volume Específico (v)	0,84 m ³ / kg _{ar seco}	0,841 m ³ / kg _{ar seco}	0,12%
Ponto de Saída			
Conteúdo de Umidade (W)	10,13 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	10,09 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	0,39%
Entalpia (h)	46,50 kJ / kg _{ar seco}	46,75 kJ / kg _{ar seco}	0,54%
Processo Psicrométrico			
Potência Térmica (Q)	2,82 kW	2,84 kW	0,71%
Vazão Mássica de Água (m _w)	1,10 g _{água} / s	1,12 g _{água} / s	1,82%
Vazão Mássica de Ar Seco (m _a)	0,24 kg _{ar seco} / s	0,24 kg _{ar seco} / s	0,00%

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 7.8 – Exemplo 4: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os obtidos no GRAPSI

	Valores de Referência (GRAPSI)	Resultados Obtidos Programa Desenvolvido	Erro
Ponto de Entrada			
Temp. de Bulbo Úmido (TBU)	12,3 °C	12,35 °C	0,41%
Temperatura de Orvalho (TO)	5 °C	4,98 °C	0,40%
Conteúdo de Umidade (W)	5,4 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	5,39 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	0,19%
Entalpia (h)	34,8 kJ / kg _{ar seco}	34,82 kJ / kg _{ar seco}	0,06%
Volume Específico (v)	0,841 m ³ / kg _{ar seco}	0,841 m ³ / kg _{ar seco}	0,00%
Pressão de Vapor (Pw)	0,9 kPa	0,871 kPa	3,26%
Pressão de Saturação (Pws)	2,5 kPa	2,488 kPa	0,49%
Ponto de Saída			
Temp. de Bulbo Úmido (TBU)	16,7 °C	16,68 °C	0,12%
Temperatura de Orvalho (TO)	14,2 °C	14,19 °C	0,07%
Conteúdo de Umidade (W)	10,1 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	10,09 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	0,10%
Entalpia (h)	46,8 kJ / kg _{ar seco}	46,75 kJ / kg _{ar seco}	0,11%
Volume Específico (v)	0,847 m ³ / kg _{ar seco}	0,847 m ³ / kg _{ar seco}	0,00%
Pressão de Vapor (Pw)	1,6 kPa	1,617 kPa	1,06%
Pressão de Saturação (Pws)	2,5 kPa	2,488 kPa	0,49%

Fonte: elaborado pelo autor

7.5 Exemplo 5 – Desumidificação do Ar Úmido

Dados conhecidos:

- a) ponto de entrada: $T_{BS} = 24,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $UR = 90\%$, $V = 0,2 \text{ m}^3/\text{s}$, $B=0,45 \text{ m}$, $H=0,4 \text{ m}$;
- b) ponto de saída: $UR = 50\%$;
- c) pressão: $P = 101325 \text{ Pa}$.

Nas Figuras 7.9 e 7.10 são apresentados os resultados calculados com o programa desenvolvido e os erros deste em relação aos valores de referência obtidos na carta psicrométrica (Figura 7.9) e com o *software* GRAPSI (Figura 7.10).

Figura 7.9 – Exemplo 5: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os lidos na carta psicrométrica

	Valores de Referência (carta psicrométrica)	Resultados Obtidos no Programa Desenvolvido	Erro
Ponto de Entrada			
Conteúdo de Umidade (W)	17,5 $\text{g}_{\text{vapor d'água}} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$	17,47 $\text{g}_{\text{vapor d'água}} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$	0,17%
Entalpia (h)	69 $\text{kJ} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$	69,14 $\text{kJ} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$	0,20%
Volume Específico (v)	0,867 $\text{m}^3 / \text{kg}_{\text{ar seco}}$	0,867 $\text{m}^3 / \text{kg}_{\text{ar seco}}$	0,00%
Ponto de Saída			
Conteúdo de Umidade (W)	9,7 $\text{g}_{\text{vapor d'água}} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$	9,59 $\text{g}_{\text{vapor d'água}} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$	1,13%
Entalpia (h)	49,00 $\text{kJ} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$	49,06 $\text{kJ} / \text{kg}_{\text{ar seco}}$	0,12%
Processo Psicrométrico			
Potência Térmica (Q)	4,62 kW	4,63 kW	0,22%
Vazão Mássica de Água (m_w)	1,80 $\text{g}_{\text{água}} / \text{s}$	1,82 $\text{g}_{\text{água}} / \text{s}$	1,11%
Vazão Mássica de Ar Seco (m_a)	0,23 $\text{kg}_{\text{ar seco}} / \text{s}$	0,23 $\text{kg}_{\text{ar seco}} / \text{s}$	0,00%

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 7.10 – Exemplo 5: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os obtidos no GRAPSI

	Valores de Referência (GRAPSI)	Resultados Obtidos Programa Desenvolvido	Erro
Ponto de Entrada			
Temp. de Bulbo Úmido (TBU)	23,3 °C	23,23 °C	0,30%
Temperatura de Orvalho (TO)	22,8 °C	22,77 °C	0,13%
Conteúdo de Umidade (W)	17,5 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	17,47 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	0,17%
Entalpia (h)	69,2 kJ / kg _{ar seco}	69,14 kJ / kg _{ar seco}	0,09%
Volume Específico (v)	0,867 m ³ / kg _{ar seco}	0,867 m ³ / kg _{ar seco}	0,00%
Pressão de Vapor (Pw)	2,8 kPa	2,768 kPa	1,13%
Pressão de Saturação (Pws)	3,1 kPa	3,076 kPa	0,78%
Ponto de Saída			
Temp. de Bulbo Úmido (TBU)	17,5 °C	17,47 °C	0,17%
Temperatura de Orvalho (TO)	13,4 °C	13,42 °C	0,15%
Conteúdo de Umidade (W)	9,6 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	9,59 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	0,10%
Entalpia (h)	49,1 kJ / kg _{ar seco}	49,06 kJ / kg _{ar seco}	0,08%
Volume Específico (v)	0,856 m ³ / kg _{ar seco}	0,856 m ³ / kg _{ar seco}	0,00%
Pressão de Vapor (Pw)	1,5 kPa	1,538 kPa	2,53%
Pressão de Saturação (Pws)	3,1 kPa	3,076 kPa	0,78%

Fonte: elaborado pelo autor

7.6 Exemplo 6 – Resfriamento Evaporativo

Dados conhecidos:

- ponto de entrada: TBS = 34 °C, TBU = 26 °C;
- ponto de saída: UR = 90%, V = 2,7 m³/s;
- pressão: P = 101325 Pa.

Nas Figuras 7.11 e 7.12 são apresentados os resultados calculados com o programa desenvolvido e os erros deste em relação aos valores de referência obtidos na carta psicrométrica (Figura 7.11) e com o *software* GRAPSI (Figura 7.12).

Figura 7.11 – Exemplo 6: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os lidos na carta psicrométrica

	Valores de Referência (carta psicrométrica)	Resultados Obtidos no Programa Desenvolvido	Erro
Ponto de Entrada			
Conteúdo de Umidade (W)	18 $g_{\text{vapor d'água}} / kg_{\text{ar seco}}$	17,95 $g_{\text{vapor d'água}} / kg_{\text{ar seco}}$	0,28%
Ponto de Saída			
Temp. de Bulbo Seco (TBS)	27,3 °C	27,33 °C	0,11%
Conteúdo de Umidade (W)	20,88 $g_{\text{vapor d'água}} / kg_{\text{ar seco}}$	20,78 $g_{\text{vapor d'água}} / kg_{\text{ar seco}}$	0,49%
Volume Específico (v)	0,88 $m^3 / kg_{\text{ar seco}}$	0,88 $m^3 / kg_{\text{ar seco}}$	0,00%
Processo Psicrométrico			
Eficiência de Saturação (η_s)	83,38 %	83,38 %	0,00%
Vazão Mássica de Água (m_w)	8,68 $g_{\text{água}} / s$	8,71 $g_{\text{água}} / s$	0,35%
Vazão Mássica de Ar Seco (m_a)	3,07 $kg_{\text{ar seco}} / s$	3,07 $kg_{\text{ar seco}} / s$	0,00%

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 7.12 – Exemplo 6: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os obtidos no GRAPSI

	Valores de Referência (GRAPSI)	Resultados Obtidos Programa Desenvolvido	Erro
Ponto de Entrada			
Temperatura de Orvalho (TO)	23,2 °C	23,20 °C	0,00%
Umidade Relativa (UR)	53,4 %	53,37 %	0,06%
Conteúdo de Umidade (W)	18 $g_{\text{vapor d'água}} / kg_{\text{ar seco}}$	17,95 $g_{\text{vapor d'água}} / kg_{\text{ar seco}}$	0,28%
Entalpia (h)	80,3 $kJ / kg_{\text{ar seco}}$	80,22 $kJ / kg_{\text{ar seco}}$	0,10%
Volume Específico (v)	0,895 $m^3 / kg_{\text{ar seco}}$	0,895 $m^3 / kg_{\text{ar seco}}$	0,00%
Pressão de Vapor (Pw)	2,8 kPa	2,842 kPa	1,48%
Pressão de Saturação (Pws)	5,3 kPa	5,324 kPa	0,45%
Ponto de Saída			
Temp. de Bulbo Seco (TBS)	27,1 °C	27,33 °C	0,85%
Temperatura de Orvalho (TO)	25,6 °C	25,58 °C	0,08%
Conteúdo de Umidade (W)	20,8 $g_{\text{vapor d'água}} / kg_{\text{ar seco}}$	20,78 $g_{\text{vapor d'água}} / kg_{\text{ar seco}}$	0,10%
Entalpia (h)	80,3 $kJ / kg_{\text{ar seco}}$	80,22 $kJ / kg_{\text{ar seco}}$	0,10%
Volume Específico (v)	0,879 $m^3 / kg_{\text{ar seco}}$	0,880 $m^3 / kg_{\text{ar seco}}$	0,11%
Pressão de Vapor (Pw)	3,3 kPa	3,276 kPa	0,71%
Pressão de Saturação (Pws)	3,6 kPa	3,637 kPa	1,02%

Fonte: elaborado pelo autor

7.7 Exemplo 7 – Desumidificação do Ar Úmido por Adsorção

Dados conhecidos:

- a) ponto de entrada: TBS = 19 °C, UR = 90%;
- b) ponto de saída: UR = 30%, V = 1 m³/s;
- c) pressão: P = 101325 Pa.

Nas Figuras 7.13 e 7.14 são apresentados os resultados calculados com o programa desenvolvido e os erros deste em relação aos valores de referência obtidos na carta psicrométrica (Figura 7.13) e com o *software* GRAPSI (Figura 7.14).

Figura 7.13 – Exemplo 7: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os lidos na carta psicrométrica

	Valores de Referência (carta psicrométrica)	Resultados Obtidos no Programa Desenvolvido	Erro
Ponto de Entrada			
Conteúdo de Umidade (W)	12,5 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	12,38 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	0,96%
Ponto de Saída			
Temp. de Bulbo Seco (TBS)	30 °C	29,87 °C	0,43%
Conteúdo de Umidade (W)	8 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	7,86 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	1,75%
Volume Específico (v)	0,87 m ³ / kg _{ar seco}	0,869 m ³ / kg _{ar seco}	0,11%
Processo Psicrométrico			
Vazão Mássica de Água (m _w)	5,17 g _{água} / s	5,20 g _{água} / s	0,58%
Vazão Mássica de Ar Seco (m _a)	1,15 kg _{ar seco} / s	1,15 kg _{ar seco} / s	0,00%

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 7.14 – Exemplo 7: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os obtidos no GRAPSI

	Valores de Referência (GRAPSI)	Resultados Obtidos Programa Desenvolvido	Erro
Ponto de Entrada			
Temperatura de Orvalho (TO)	17,3 °C	17,34 °C	0,23%
Conteúdo de Umidade (W)	12,4 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	12,38 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	0,16%
Entalpia (h)	50,5 kJ / kg _{ar seco}	50,52 kJ / kg _{ar seco}	0,04%
Volume Específico (v)	0,844 m ³ / kg _{ar seco}	0,844 m ³ / kg _{ar seco}	0,00%
Pressão de Vapor (Pw)	2 kPa	1,978 kPa	1,10%
Pressão de Saturação (Pws)	2,2 kPa	2,198 kPa	0,10%
Ponto de Saída			
Temp. de Bulbo Seco (TBS)	30,2 °C	29,87 °C	1,09%
Temperatura de Orvalho (TO)	10,5 °C	10,46 °C	0,38%
Conteúdo de Umidade (W)	7,9 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	7,86 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	0,51%
Entalpia (h)	50,5 kJ / kg _{ar seco}	50,52 kJ / kg _{ar seco}	0,04%
Volume Específico (v)	0,87 m ³ / kg _{ar seco}	0,869 m ³ / kg _{ar seco}	0,11%
Pressão de Vapor (Pw)	1,3 kPa	1,265 kPa	2,67%
Pressão de Saturação (Pws)	4,3 kPa	4,214 kPa	2,01%

Fonte: elaborado pelo autor

7.8 Exemplo 8 – Resfriamento e Desumidificação do Ar Úmido

Dados conhecidos:

- ponto de entrada: TBS = 30 °C, UR = 50%, V = 10 m³/s;
- ponto de saída: TBS = 10 °C, UR = 100%;
- pressão: P = 101325 Pa.

Nas Figuras 7.15 e 7.16 são apresentados os resultados calculados com o programa desenvolvido e os erros deste em relação aos valores de referência obtidos na carta psicrométrica (Figura 7.15) e com o *software* GRAPSI (Figura 7.16).

Figura 7.15 – Exemplo 8: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os lidos na carta psicrométrica

	Valores de Referência (carta psicrométrica)	Resultados Obtidos no Programa Desenvolvido	Erro
Ponto de Entrada			
Conteúdo de Umidade (W)	13,3 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	13,31 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	0,08%
Entalpia (h)	64,3 kJ / kg _{ar seco}	64,21 kJ / kg _{ar seco}	0,14%
Volume Específico (v)	0,877 m ³ / kg _{ar seco}	0,877 m ³ / kg _{ar seco}	0,00%
Ponto de Saída			
Conteúdo de Umidade (W)	7,66 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	7,63 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	0,39%
Entalpia (h)	29,50 kJ / kg _{ar seco}	29,28 kJ / kg _{ar seco}	0,75%
Processo Psicrométrico			
Potência Térmica (Q)	198,4 kW	199,1 kW	0,37%
Vazão Mássica de Água (m _w)	32,15 g _{água} / s	32,38 g _{água} / s	0,72%
Vazão Mássica de Ar Seco (m _a)	5,70 kg _{ar seco} / s	5,70 kg _{ar seco} / s	0,00%

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 7.16 – Exemplo 8: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os obtidos no GRAPSI

	Valores de Referência (GRAPSI)	Resultados Obtidos Programa Desenvolvido	Erro
Ponto de Entrada			
Temp. de Bulbo Úmido (TBU)	22 °C	22,00 °C	0,00%
Temperatura de Orvalho (TO)	18,5 °C	18,46 °C	0,22%
Conteúdo de Umidade (W)	13,3 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	13,31 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	0,08%
Entalpia (h)	64,2 kJ / kg _{ar seco}	64,21 kJ / kg _{ar seco}	0,02%
Volume Específico (v)	0,877 m ³ / kg _{ar seco}	0,877 m ³ / kg _{ar seco}	0,00%
Pressão de Vapor (Pw)	2,1 kPa	2,123 kPa	1,10%
Pressão de Saturação (Pws)	4,3 kPa	4,246 kPa	1,26%
Ponto de Saída			
Temp. de Bulbo Úmido (TBU)	10 °C	10,00 °C	0,00%
Temperatura de Orvalho (TO)	10 °C	10,00 °C	0,00%
Conteúdo de Umidade (W)	7,6 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	7,63 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	0,39%
Entalpia (h)	29,3 kJ / kg _{ar seco}	29,28 kJ / kg _{ar seco}	0,07%
Volume Específico (v)	0,812 m ³ / kg _{ar seco}	0,812 m ³ / kg _{ar seco}	0,00%
Pressão de Vapor (Pw)	1,2 kPa	1,228 kPa	2,33%
Pressão de Saturação (Pws)	1,2 kPa	1,228 kPa	2,33%

Fonte: elaborado pelo autor

7.9 Exemplo 9 – Mistura Adiabática de Dois Fluxos de Ar Úmido

Dados conhecidos:

- a) ponto 1: TBS = 4 °C, TBU = 2 °C, V = 2 m³/s;
- b) ponto 2: TBS = 25 °C, UR = 50%, V = 6,25 m³/s;
- c) pressão: P = 101325 Pa.

Nas Figuras 7.17 e 7.18 são apresentados os resultados calculados com o programa desenvolvido e os erros deste em relação aos valores de referência obtidos na carta psicrométrica (Figura 7.17) e com o *software* GRAPSI (Figura 7.18).

Figura 7.17 – Exemplo 9: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os lidos na carta psicrométrica

	Valores de Referência (carta psicrométrica)	Resultados Obtidos no Programa Desenvolvido	Erro
Ponto 1			
Volume Específico (v)	0,789 m ³ / kg _{ar seco}	0,79 m ³ / kg _{ar seco}	0,13%
Vazão Mássica de Ar Seco (m _a)	2,54 kg _{ar seco} /s	2,54 kg _{ar seco} /s	0,00%
Ponto 2			
Volume Específico (v)	0,858 m ³ / kg _{ar seco}	0,858 m ³ / kg _{ar seco}	0,00%
Vazão Mássica de Ar Seco (m _a)	7,28 kg _{ar seco} /s	7,28 kg _{ar seco} /s	0,00%
Ponto 3			
Temp. de Bulbo Seco (TBS)	19,6 °C	19,63 °C	0,15%
Temp. de Bulbo Úmido (TBU)	14,6 °C	14,55 °C	0,34%
Vazão Mássica de Ar Seco (m _a)	9,82 kg _{ar seco} /s	9,82 kg _{ar seco} /s	0,00%

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 7.18 – Exemplo 9: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os obtidos no GRAPSI

	Valores de Referência (GRAPSI)	Resultados Obtidos Programa Desenvolvido	Erro
Ponto 1			
Temperatura de Orvalho (TO)	-0,8 °C	-0,72 °C	10,00%
Umidade Relativa (UR)	70,8 %	70,74 %	0,08%
Conteúdo de Umidade (W)	3,6 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	3,55 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	1,39%
Entalpia (h)	13 kJ / kg _{ar seco}	12,93 kJ / kg _{ar seco}	0,54%
Volume Específico (v)	0,790 m ³ / kg _{ar seco}	0,790 m ³ / kg _{ar seco}	0,00%
Pressão de Vapor (Pw)	0,6 kPa	0,575 kPa	4,09%
Pressão de Saturação (Pws)	0,8 kPa	0,813 kPa	1,68%
Ponto 2			
Temp. de Bulbo Úmido (TBU)	17,9 °C	17,88 °C	0,11%
Temperatura de Orvalho (TO)	13,9 °C	13,88 °C	0,14%
Conteúdo de Umidade (W)	9,9 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	9,88 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	0,20%
Entalpia (h)	50,3 kJ / kg _{ar seco}	50,32 kJ / kg _{ar seco}	0,04%
Volume Específico (v)	0,858 m ³ / kg _{ar seco}	0,858 m ³ / kg _{ar seco}	0,00%
Pressão de Vapor (Pw)	1,6 kPa	1,585 kPa	0,96%
Pressão de Saturação (Pws)	3,2 kPa	3,169 kPa	0,96%
Ponto 3			
Temp. de Bulbo Seco (TBS)	19,6 °C	19,63 °C	0,15%
Temp. de Bulbo Úmido (TBU)	14,6 °C	14,55 °C	0,34%
Temperatura de Orvalho (TO)	11,2 °C	11,17 °C	0,27%
Umidade Relativa (UR)	58,2 %	58,03 %	0,29%
Conteúdo de Umidade (W)	8,3 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	8,25 g _{vapor d'água} / kg _{ar seco}	0,60%
Entalpia (h)	40,7 kJ / kg _{ar seco}	40,68 kJ / kg _{ar seco}	0,05%
Volume Específico (v)	0,84 m ³ / kg _{ar seco}	0,840 m ³ / kg _{ar seco}	0,00%
Pressão de Vapor (Pw)	1,3 kPa	1,326 kPa	2,01%
Pressão de Saturação (Pws)	2,3 kPa	2,285 kPa	0,63%

Fonte: elaborado pelo autor

7.10 Exemplo 10 – Verificação de Conforto Térmico Segundo a NR-17

Dados conhecidos:

- temperatura de bulbo seco: TBS = 24,4 °C;
- temperatura de bulbo úmido: TBU = 16,7 °C;
- velocidade do ar: u = 0,5 m/s;
- pressão: P = 101325 Pa.

Nas Figuras 7.19 e 7.20 são apresentados os resultados calculados com o programa desenvolvido e os erros deste em relação aos valores de referência obtidos nos gráficos (Figura 7.19) e com o *software* GRAPSI (Figura 7.20).

Figura 7.19 – Exemplo 10: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os lidos nos gráficos

	Valores de Referência (gráficos)	Resultados Obtidos no Programa Desenvolvido	Erro
Temperatura Efetiva (TE)	20 °C	21,27 °C	6,35%
Umidade Relativa (UR)	46 %	45,70 %	0,65%

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 7.20 – Exemplo 10: comparação dos resultados obtidos no programa desenvolvido com os obtidos no GRAPSI

	Valores de Referência (GRAPSI)	Resultados Obtidos Programa Desenvolvido	Erro
Umidade Relativa (UR)	45,7 %	45,70 %	0,00%

Fonte: elaborado pelo autor

7.11 Comentários dos Resultados Obtidos

Analisando os resultados obtidos pode-se perceber que os valores calculados pelo programa desenvolvido são muito próximos daqueles lidos diretamente da carta psicrométrica. A maioria dos resultados comparados geraram erros inferiores à 0,5%, sendo que o volume específico foi o que apresentou as diferenças mais baixas entre os valores de referência e os calculados pelo programa. Dentre as variáveis que apresentaram a maior diferença pode-se citar o conteúdo de umidade, que apresentou 2,00% no exemplo 4 e 1,75% no exemplo 7, entretanto nos outros exemplos, em que essa variável foi comparada, o erro foi inferior à 0,5%. Vale ressaltar que mesmo nos casos dos erros de 2,00% e 1,75% a diferença absoluta entre o valor referência e o valor calculado foi de 0,11 g_{água}/kg_{ar seco} e 0,14 g_{água}/kg_{ar seco}, respectivamente, o que indica uma boa proximidade entre os valores. Outra variável que apresentou um erro maior foi a temperatura efetiva, com erro de 6,35% e diferença absoluta entre o valor de referência e o calculado pelo programa de 1,27 °C, sendo que esta foi a variável que mais se afastou do valor de referência. O motivo para isso é que “As discrepâncias dos valores achados em relação ao cálculo analítico devem-se à inexatidão das fórmulas algébricas e à imprecisão de leitura da carta psicrométrica.” [Costa, 1974].

Os erros obtidos comparando os valores calculados via GRAPSI com os do programa desenvolvido também, em sua maioria, foram inferiores à 0,5% e, assim como na comparação com a carta psicrométrica, o volume específico também continuou apresentando as menores diferenças entre os valores de referência e os calculados. Já a variável que apresentou as maiores diferenças, em todos os exemplos, foi a pressão de vapor, com erros variando de 0,71% até 4,09%. Entretanto a diferença absoluta entre os valores comparados para a pressão de vapor do exemplo 9, que gerou o erro de 4,09%, foi de 0,025 kPa, ou seja, também é um valor muito próximo da referência. Outra variável que merece um comentário adicional é a temperatura de orvalho, que em oito dos nove exemplos, apresentou erros muito baixos, todos inferiores à 0,70%, mas no exemplo 9 foi obtido um erro de 10,00%. Apesar deste erro ter sido o maior encontrado, a diferença absoluta entre os valores comparados é de apenas 0,08 °C, já que o valor calculado pelo GRAPSI foi de -0,8 °C e o calculado pelo programa desenvolvido foi de -0,72 °C. Neste caso também, apesar do erro relativo percentual ter sido grande a diferença absoluta foi praticamente ínfima.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos do conforto térmico humano vêm sendo realizados desde os anos de 1800 e é indiscutível sua importância para a eficiência e o bom trabalho desenvolvido pelos trabalhadores em seu dia-a-dia. Fato que fica evidenciado pela existência de uma Norma Regulamentadora, editada pelo Ministério do Trabalho, que estabelece limites a serem obedecidos para manter um ambiente termicamente agradável às pessoas. Sendo assim, passou-se a desenvolver sistemas de condicionamento do ambiente para promover esse bem estar térmico. Entretanto, em instalações de conforto térmico ambiental, se faz necessária a determinação de propriedades psicrométricas. Para isso existem as cartas psicrométricas que permitem a determinação gráfica dessas propriedades. Em alguns casos, como da temperatura efetiva (utilizada pela NR-17) que não pode ser determinada diretamente com o uso de instrumentos, também é necessária a utilização de gráficos. A obtenção de resultados, via leitura em gráficos, pode gerar resultados imprecisos, caso não seja feita uma leitura cuidadosa destes, além de também ser necessário fazer interpolação dos pontos marcados, dependendo do caso.

Com isso, se torna interessante a utilização de um programa computacional que auxilie a determinação desses dados de forma rápida e prática, evitando com isso trabalhar com gráficos e cartas psicrométricas. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um *software* que determinasse essas propriedades com um bom grau de precisão e confiabilidade. O *software* desenvolvido é capaz de determinar as propriedades psicrométricas de um ponto, fazer cálculos envolvendo processos psicrométricos e também verificar se uma determinada situação atende os requisitos de conforto térmico estabelecidos pela NR-17. Apesar do programa computacional desenvolvido apresentar algumas limitações de intervalos válidos de temperaturas e a não geração do gráfico, alguns pontos fortes podem ser destacados como a possibilidade de se utilizar quaisquer duas propriedades para determinação das outras propriedades psicrométricas, não ficando limitado apenas à temperatura de bulbo seco e mais duas ou três propriedades. Outro ponto forte é o fato do programa possibilitar a resolução de alguns processos psicrométricos diretamente pelo programa, visto que este também calcula a vazão mássica de ar e da água, dependendo do caso, bem como a potência térmica dos processos psicrométricos. Além disso o programa também gera dois arquivos de relatórios com os resultados, sendo um deles compatível com editores de planilhas eletrônicas, suprimindo com isso algumas limitações do programa, permitindo ao usuário continuar a fazer seus cálculos com os resultados gerados.

Com a análise dos resultados se verificou a validade do uso do programa para determinação das propriedades psicométricas. Os erros percentuais obtidos foram, em sua maioria, baixos e mesmo aqueles com erros percentuais altos apresentaram pouca diferença absoluta entre os valores de referência e os calculados pelo programa. Sendo assim o objetivo proposto para este trabalho de desenvolver um programa computacional capaz de auxiliar a resolução de problemas psicométricos, substituindo a carta psicométrica, foi alcançado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. **ASHRAE Handbook – Fundamentals**: chapter 1, psychrometrics, Atlanta, 2009.

Armstrong. **The Armstrong Humidification Handbook**. Michigan, USA, 1995. Disponível em: <www.armstronginternational.com/files/products/humidifiers/pdf/HB501.pdf>. Acesso em: 19 out. 2012.

Auliciems, A.; Szokolay, S. **PLEA Note 3: Thermal comfort**. London, UK: Passive and Low Energy Architecture, 2007. Disponível em: <<http://www.plea-arch.net/PLEA/Note.aspx?p=9&ix=4&pid=1&prcid=17&ppid=603>>. Acesso em: 06 out. 2012.

Beyer, P. O. **Conforto Térmico**, Apostila da disciplina SEG 003 – Higiene do Trabalho – Conforto Térmico, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

Brasil, Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-17 – Ergonomia**, Brasília, 1990. Disponível em: <http://portal.mte.gov.br/data/files/FF8080812BE914E6012BEFBAD7064803/nr_17.pdf>. Acesso em: 08 jul. 2012.

Costa, E. C. **Física Aplicada à Construção**: conforto térmico, Edgard Blücher, São Paulo, 1974.

Gatley, D. P. Psychrometric Chart Celebrates 100th Anniversary, **ASHRAE Journal**, v. 46. n. 11. p. 16-20, 2004. Disponível em: <<http://www.ashrae.org/File%20Library/docLib/Public/ASHRAE-D-22915-20041029.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2012.

Glicksman, L. R. **Air Water Vapor Mixtures**: psychrometrics, Apostila da disciplina 4.42J / 1.044J / 2.45J Fundamentals of Energy in Buildings, Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare, 2010. Disponível em: <http://ocw.mit.edu/courses/architecture/4-42j-fundamentals-of-energy-in-buildings-fall-2010/readings/MIT4_42JF10_water_vapor.pdf>. Acesso em: 24 mar. 2012.

Halliday, D.; Resnick, R.; Walker, J. **Fundamentos de Física**: Gravitação, Ondas e Termodinâmica, v. 2, 6 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2002.

Honeywell. **Engineering Manual of Automatic Control for Commercial Building**, Minneapolis, 1997. Disponível em: <<https://customer.honeywell.com/resources/techlit/TechLitDocuments/77-0000s/77-E1100.pdf>>. Acesso em: 24 mar. 2012.

Macintyre, A. J. **Ventilação Industrial e Controle da Poluição**, LTC Editora, Rio de Janeiro, 1990.

Melo, E. C. **GRAPSI**: gráfico psicrométrico digital, 2012. Disponível em: <<http://www.evandro.eng.br/grapsi.html>>. Acesso em: 26 set. 2012.

Rossi, S. J. **Psicrometria**, FUNAPE – Fundação de Apoio à Pesquisa e à Extensão, João Pessoa, 1987.

Ruas, A. C. **Conforto Térmico nos Ambientes de Trabalho**, Ministério do Trabalho e Emprego, Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho – FUNDACENTRO, São Paulo, 1999. Disponível em: <<http://www.fundacentro.gov.br/dominios/CTN/anexos/Publicacao/Conforto%20T%c3%a9rmico%20nos%20Ambientes%20de%20Trabalho.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2012.

Teodoreanu, E.; Bunescu, I. Thermal Comfort. In: **Present Environment and Sustainable Development**. n. 1. 2007. p. 134-142. Disponível em <<http://pesd.ro/articole/nr.1/Teodoreanu.pdf>>. Acesso em: 06 out. 2012.

APÊNDICE A – Relatórios completos gerados pelo programa

Relatório gerado pelo programa para o Exemplo 1 – Determinação das Propriedades Psicrométricas de um Único Ponto (item 6.3.1).

PROPRIEDADES PSICROMETRICAS DE UM PONTO		
Dados Conhecidos:		
Pressao (P)	101325	Pa
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	40	°C
Temperatura de Bulbo Umido (TBU)	20	°C
Resultados:		
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	40	°C
Temperatura de Bulbo Umido (TBU)	20	°C
Temperatura de Orvalho (TO)	7,447478	°C
Umidade Relativa (UR)	13,979578	%
Conteudo de Umidade (W)	6,400827	g/kg
Entalpia (h)	56,72469	kJ/kg
Volume Especifico do ar seco (v)	0,896247552	m ³ /kg
Densidade do ar seco (p)	1,122905	kg/m ³
Pressao de Vapor (Pw)	1032,176514	Pa
Pressao de Saturacao do vapor de agua (Pws) para TBS	7383,459961	Pa
Pressao de Saturacao do vapor de agua (Pws) para TBU	2338,803711	Pa
Conteudo de Umidade na saturacao (Ws) para TBS	48,882591	g/kg
Conteudo de Umidade na saturacao (Ws) para TBU	14,695052	g/kg
Grau de Saturacao (GS)	0,130943	

Relatório gerado pelo programa para o Exemplo 2 – Aquecimento do Ar Úmido (item 6.3.2).

AQUECIMENTO DO AR UMIDO			
Dados Conhecidos:			
Pressao (P)	101325 Pa		
Ponto de Entrada			
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	2 °C		
Umidade Relativa (UR)	100 %		
Vazao Volumetrica do ar seco (V)	10 m3/s		
Ponto de Saida			
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	40 °C		
Resultados:			
	Unidades	Entrada	Saida
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	°C	2	40
Temperatura de Bulbo Umido (TBU)	°C	2	18,400185
Temperatura de Orvalho (TO)	°C	2	2,013872
Umidade Relativa (UR)	%	100	9,561296
Conteudo de Umidade (W)	g/kg	4,363636	4,363636
Entalpia (h)	kJ/kg	12,941686	51,478107
Volume Especifico do ar seco (v)	m3/kg	0,78493696	0,893341824
Densidade do ar seco (p)	kg/m3	1,279547	1,124277
Pressao de Vapor (Pw)	Pa	705,954468	705,954468
Pressao de Saturacao do vapor de agua (Pws) para TBS	Pa	705,954468	7383,459961
Pressao de Saturacao do vapor de agua (Pws) para TBU	Pa	705,954468	2116,839844
Conteudo de Umidade na saturacao (Ws) para TBS	g/kg	4,363636	48,882591
Conteudo de Umidade na saturacao (Ws) para TBU	g/kg	4,363636	13,270662
Grau de Saturacao (GS)		1	0,089268
Vazao Volumetrica de ar seco (V)	m3/s	10	11,381065
Area do duto (A)	m2	-	-
Velocidade do fluxo de ar (u)	m/s	-	-
Processo:			
Potencia (Q)	490,949249 kW		
Vazao Massica de ar seco (ma)	12739,87695 g/s		

Relatório gerado pelo programa para o Exemplo 3 – Resfriamento do Ar Úmido (item 6.3.3).

RESFRIAMENTO DO AR UMIDO			
Dados Conhecidos:			
Pressao (P)	101325 Pa		
Ponto de Entrada			
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	28 °C		
Umidade Relativa (UR)	32 %		
Ponto de Saida			
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	22 °C		
Velocidade do fluxo de ar (u)	2 m/s		
Processo Psicrometrico			
Potencia (Q)	4,5 kW		
Resultados:			
	Unidades	Entrada	Saida
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	°C	28	22
Temperatura de Bulbo Umido (TBU)	°C	16,951981	14,782012
Temperatura de Orvalho (TO)	°C	9,798164	9,798164
Umidade Relativa (UR)	%	32	45,762543
Conteudo de Umidade (W)	g/kg	7,518816	7,518816
Entalpia (h)	kJ/kg	47,36414	41,244228
Volume Especifico do ar seco (v)	m3/kg	0,863436608	0,84623392
Densidade do ar seco (p)	kg/m3	1,166871	1,190591
Pressao de Vapor (Pw)	Pa	1210,306274	1210,306274
Pressao de Saturacao do vapor de agua (Pws) para TBS	Pa	3782,207031	2644,753174
Pressao de Saturacao do vapor de agua (Pws) para TBU	Pa	1932,056396	1681,6521
Conteudo de Umidade na saturacao (Ws) para TBS	g/kg	24,115824	16,6689
Conteudo de Umidade na saturacao (Ws) para TBU	g/kg	12,08972	10,496387
Grau de Saturacao (GS)		0,311779	0,451069
Vazao Volumetrica de ar seco (V)	m3/s	0,634889	0,62224
Area do duto (A)	m2	-	0,31112
Velocidade do fluxo de ar (u)	m/s	-	2
Processo:			
Potencia (Q)	4,5 kW		
Vazao Massica de ar seco (ma)	735,304749 g/s		

Relatório gerado pelo programa para o Exemplo 4 – Umidificação do Ar Úmido (item 6.3.4).

UMIDIFICACAO DO AR UMIDO			
Dados Conhecidos:			
Pressao (P)	101325 Pa		
Ponto de Entrada			
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	21 °C		
Umidade Relativa (UR)	35 %		
Vazao Volumetrica do ar seco (V)	0,2 m3/s		
Ponto de Saida			
Umidade Relativa (UR)	65 %		
Resultados:			
	Unidades	Entrada	Saida
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	°C	21	21
Temperatura de Bulbo Umido (TBU)	°C	12,354031	16,676132
Temperatura de Orvalho (TO)	°C	4,984656	14,19094
Umidade Relativa (UR)	%	35	65
Conteudo de Umidade (W)	g/kg	5,390681	10,086199
Entalpia (h)	kJ/kg	34,818653	46,745548
Volume Especifico do ar seco (v)	m3/kg	0,840515456	0,846806592
Densidade do ar seco (p)	kg/m3	1,19616	1,192818
Pressao de Vapor (Pw)	Pa	870,683411	1616,983521
Pressao de Saturacao do vapor de agua (Pws) para TBS	Pa	2487,666992	2487,666992
Pressao de Saturacao do vapor de agua (Pws) para TBU	Pa	1435,674316	1898,510864
Conteudo de Umidade na saturacao (Ws) para TBS	g/kg	15,653923	15,653923
Conteudo de Umidade na saturacao (Ws) para TBU	g/kg	8,938998	11,875803
Grau de Saturacao (GS)		0,344366	0,644324
Vazao Volumetrica de ar seco (V)	m3/s	0,2	0,201497
Area do duto (A)	m2	-	-
Velocidade do fluxo de ar (u)	m/s	-	-
Processo:			
Potencia (Q)	2,837996 kW		
Vazao Massica de agua (mw)	1,117295 g/s		
Vazao Massica de ar seco (ma)	237,949234 g/s		

Relatório gerado pelo programa para o Exemplo 5 – Desumidificação do Ar Úmido (item 6.3.5).

DESUMIDIFICACAO DO AR UMIDO			
Dados Conhecidos:			
Pressao (P)	101325 Pa		
Ponto de Entrada			
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	24,5 °C		
Umidade Relativa (UR)	90 %		
Vazao Volumetrica do ar seco (V)	0,2 m3/s		
Base do duto com area retangular (B)	0,45 m		
Altura do duto com area retangular (H)	0,4 m		
Ponto de Saida			
Umidade Relativa (UR)	50 %		
Resultados:			
	Unidades	Entrada	Saida
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	°C	24,5	24,5
Temperatura de Bulbo Umido (TBU)	°C	23,225533	17,470696
Temperatura de Orvalho (TO)	°C	22,766953	13,419628
Umidade Relativa (UR)	%	90	50
Conteudo de Umidade (W)	g/kg	17,469915	9,585837
Entalpia (h)	kJ/kg	69,135361	49,058006
Volume Especifico do ar seco (v)	m3/kg	0,866892992	0,856204096
Densidade do ar seco (p)	kg/m3	1,173697	1,179142
Pressao de Vapor (Pw)	Pa	2768,373047	1537,985107
Pressao de Saturacao do vapor de agua (Pws) para TBS	Pa	3075,970215	3075,970215
Pressao de Saturacao do vapor de agua (Pws) para TBU	Pa	2849,039063	1996,546753
Conteudo de Umidade na saturacao (Ws) para TBS	g/kg	19,471788	19,471788
Conteudo de Umidade na saturacao (Ws) para TBU	g/kg	17,993687	12,501375
Grau de Saturacao (GS)		0,897191	0,492294
Vazao Volumetrica de ar seco (V)	m3/s	0,2	0,197534
Area do duto (A)	m2	0,18	-
Velocidade do fluxo de ar (u)	m/s	1,111111	-
Processo:			
Potencia (Q)	4,632026 kW		
Vazao Massica de agua (mw)	1,818927 g/s		
Vazao Massica de ar seco (ma)	230,708984 g/s		

Relatório gerado pelo programa para o Exemplo 6 – Resfriamento Evaporativo (item 6.3.6).

RESFRIAMENTO EVAPORATIVO			
Dados Conhecidos:			
Pressao (P)	101325 Pa		
Ponto de Entrada			
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	34 °C		
Temperatura de Bulbo Umido (TBU)	26 °C		
Vazao Volumetrica do ar seco (V)	2,7 m3/s		
Ponto de Saida			
Umidade Relativa (UR)	90 %		
Resultados:			
	Unidades	Entrada	Saida
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	°C	34	27,329269
Temperatura de Bulbo Umido (TBU)	°C	26	26
Temperatura de Orvalho (TO)	°C	23,197716	25,575409
Umidade Relativa (UR)	%	53,37355	90
Conteudo de Umidade (W)	g/kg	17,945103	20,783205
Entalpia (h)	kJ/kg	80,219551	80,219551
Volume Especifico do ar seco (v)	m3/kg	0,895226112	0,87966784
Densidade do ar seco (p)	kg/m3	1,137082	1,160419
Pressao de Vapor (Pw)	Pa	2841,562256	3276,436523
Pressao de Saturacao do vapor de agua (Pws) para TBS	Pa	5323,914551	3636,864502
Pressao de Saturacao do vapor de agua (Pws) para TBU	Pa	3363,132324	3363,132324
Conteudo de Umidade na saturacao (Ws) para TBS	g/kg	34,491089	23,1546
Conteudo de Umidade na saturacao (Ws) para TBU	g/kg	21,352015	21,352015
Grau de Saturacao (GS)		0,520282	0,897584
Vazao Volumetrica de ar seco (V)	m3/s	2,7	2,653076
Area do duto (A)	m2	-	-
Velocidade do fluxo de ar (u)	m/s	-	-
Processo:			
Vazao Massica de agua (mw)	8,559708 g/s		
Vazao Massica de ar seco (ma)	3015,997803 g/s		
Eficiencia de Saturacao (ns)	83,384132 %		

Relatório gerado pelo programa para o Exemplo 7 – Desumidificação do Ar Úmido por Adsorção (item 6.3.7).

DESUMIDIFICACAO DE AR UMIDO POR ADSORCAO			
Dados Conhecidos:			
Pressao (P)	101325 Pa		
Ponto de Entrada			
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	19 °C		
Umidade Relativa (UR)	90 %		
Ponto de Saida			
Umidade Relativa (UR)	30 %		
Vazao Volumetrica do ar seco (V)	1 m3/s		
Resultados:			
	Unidades	Entrada	Saida
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	°C	19	29,866882
Temperatura de Bulbo Umido (TBU)	°C	17,883469	17,883469
Temperatura de Orvalho (TO)	°C	17,338936	10,462433
Umidade Relativa (UR)	%	90	30
Conteudo de Umidade (W)	g/kg	12,383039	7,864954
Entalpia (h)	kJ/kg	50,521599	50,521599
Volume Especifico do ar seco (v)	m3/kg	0,844105344	0,869267008
Densidade do ar seco (p)	kg/m3	1,199356	1,159442
Pressao de Vapor (Pw)	Pa	1978,016724	1265,328491
Pressao de Saturacao do vapor de agua (Pws) para TBS	Pa	2197,796387	4213,691406
Pressao de Saturacao do vapor de agua (Pws) para TBU	Pa	2049,206543	2049,206543
Conteudo de Umidade na saturacao (Ws) para TBS	g/kg	13,789438	26,986397
Conteudo de Umidade na saturacao (Ws) para TBU	g/kg	12,837911	12,837911
Grau de Saturacao (GS)		0,898009	0,291441
Vazao Volumetrica de ar seco (V)	m3/s	0,971054	1
Area do duto (A)	m2	-	-
Velocidade do fluxo de ar (u)	m/s	-	-
Processo:			
Vazao Massica de agua (mw)	5,19758 g/s		
Vazao Massica de ar seco (ma)	1150,394531 g/s		

Relatório gerado pelo programa para o Exemplo 8 – Resfriamento e Desumidificação do Ar Úmido (item 6.3.8).

RESFRIAMENTO E DESUMIDIFICACAO DO AR UMIDO			
Dados Conhecidos:			
Pressao (P)	101325 Pa		
Ponto de Entrada			
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	30 °C		
Umidade Relativa (UR)	50 %		
Vazao Volumetrica do ar seco (V)	5 m3/s		
Ponto de Saida			
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	10 °C		
Umidade Relativa (UR)	100 %		
Resultados:			
	Unidades	Entrada	Saida
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	°C	30	10
Temperatura de Bulbo Umido (TBU)	°C	21,99654	10
Temperatura de Orvalho (TO)	°C	18,462318	10
Umidade Relativa (UR)	%	50	100
Conteudo de Umidade (W)	g/kg	13,310205	7,630054
Entalpia (h)	kJ/kg	64,211533	29,284683
Volume Especifico do ar seco (v)	m3/kg	0,877167744	0,811971776
Densidade do ar seco (p)	kg/m3	1,155207	1,240967
Pressao de Vapor (Pw)	Pa	2123,015137	1227,995239
Pressao de Saturacao do vapor de agua (Pws) para TBS	Pa	4246,030273	1227,995239
Pressao de Saturacao do vapor de agua (Pws) para TBU	Pa	2644,195068	1227,995239
Conteudo de Umidade na saturacao (Ws) para TBS	g/kg	27,202568	7,630054
Conteudo de Umidade na saturacao (Ws) para TBU	g/kg	16,665287	7,630054
Grau de Saturacao (GS)		0,4893	1
Vazao Volumetrica de ar seco (V)	m3/s	5	4,628372
Area do duto (A)	m2	-	-
Velocidade do fluxo de ar (u)	m/s	-	-
Processo:			
Calor Total (Q)	199,08876 kW		
Calor Sensivel (Qs)	116,305214 kW		
Calor Latente (Ql)	82,783546 kW		
Vazao Massica de agua (mw)	32,377792 g/s		
Vazao Massica de ar seco (ma)	5700,164063 g/s		
Temperatura de Orvalho da serpentina (TOs)	10 °C		
Fator de Calor Sensivel (FCS)	0,584188		
Fator de Contato da serpentina (efetividade da serpentina) (Fc)	1		
Fator de Passagem da serpentina (Fp)	0		

Relatório gerado pelo programa para o Exemplo 9 – Mistura Adiabática de Dois Fluxos de Ar Úmido (item 6.3.9).

MISTURA ADIABATICA DE DOIS FLUXOS DE AR UMIDO				
Dados Conhecidos:				
Pressao (P)	101325 Pa			
Ponto 1				
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	4 °C			
Temperatura de Bulbo Umido (TBU)	2 °C			
Vazao Volumetrica do ar seco (V)	2 m3/s			
Ponto 2				
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	25 °C			
Umidade Relativa (UR)	50 %			
Vazao Volumetrica do ar seco (V)	6,25 m3/s			
Resultados:				
	Unidades	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	°C	4	25	19,628094
Temperatura de Bulbo Umido (TBU)	°C	2	17,88147	14,55492
Temperatura de Orvalho (TO)	°C	0,717159	13,878814	11,167718
Umidade Relativa (UR)	%	70,739517	50	58,026482
Conteudo de Umidade (W)	g/kg	3,552367	9,881043	8,48172
Entalpia (h)	kJ/kg	12,934898	50,32196	40,675667
Volume Especifico do ar seco (v)	m3/kg	0,789618304	0,858043264	0,840405952
Densidade do ar seco (p)	kg/m3	1,270934	1,176958	1,199716
Pressao de Vapor (Pw)	Pa	575,451782	1584,608276	1326,174316
Pressao de Saturacao do vapor de agua (Pws) para TBS	Pa	813,479919	3169,216553	2285,463867
Pressao de Saturacao do vapor de agua (Pws) para TBU	Pa	705,954468	2048,948486	1657,173218
Conteudo de Umidade na saturacao (Ws) para TBS	g/kg	5,033649	20,081123	14,352176
Conteudo de Umidade na saturacao (Ws) para TBU	g/kg	4,363636	12,836261	10,341057
Grau de Saturacao (GS)		0,705724	0,492056	0,574698
Vazao Massica de ar seco (ma)	g/s	2532,869385	7284,015137	9816,884766
Vazao Volumetrica de ar seco (V)	m3/s	2	6,25	8,182676
Area do duto (A)	m2	-	-	-
Velocidade do fluxo de ar (u)	m/s	-	-	-

Relatório gerado pelo programa para o Exemplo 10 – Verificação de Conforto Térmico Segundo a NR-17 (item 6.3.10).

CONFORTO TERMICO SEGUNDO A NR 17 - ERGONOMIA		
Dados Conhecidos:		
Pressao (P)	101325 Pa	
Temperatura de Bulbo Seco (TBS)	24,4 °C	
Temperatura de Bulbo Umido (TBU)	16,700001 °C	
Velocidade do ar (u)	0,5 m/s	
Resultados:		
Temperatura Efetiva (TE)	21,272507 °C	
Umidade Relativa (UR)	45,703239 %	
Velocidade do ar (u)	0,5 m/s	
AMBIENTE DE TRABALHO ATENDE A NR-17		
NORMA REGULAMENTADORA 17 - ERGONOMIA (Redacao dada pela Portaria MTPS nº 3.751, de 23/11/1990)		
Item 17.5.2.: Nos locais de trabalho onde sao executadas atividades que exijam solicitacao intelectual e atencao constantes, tais como: salas de controle, salas de desenvolvimento ou analise de projetos, laboratorios, escritorios, dentre outros, sao recomendadas as seguintes condicoes de conforto:		
a) indice de temperatura efetiva entre 20 °C e 23 °C		
b) velocidade do ar nao superior a 0,75 m/s		
c) umidade relativa do ar nao inferior a 40 %		

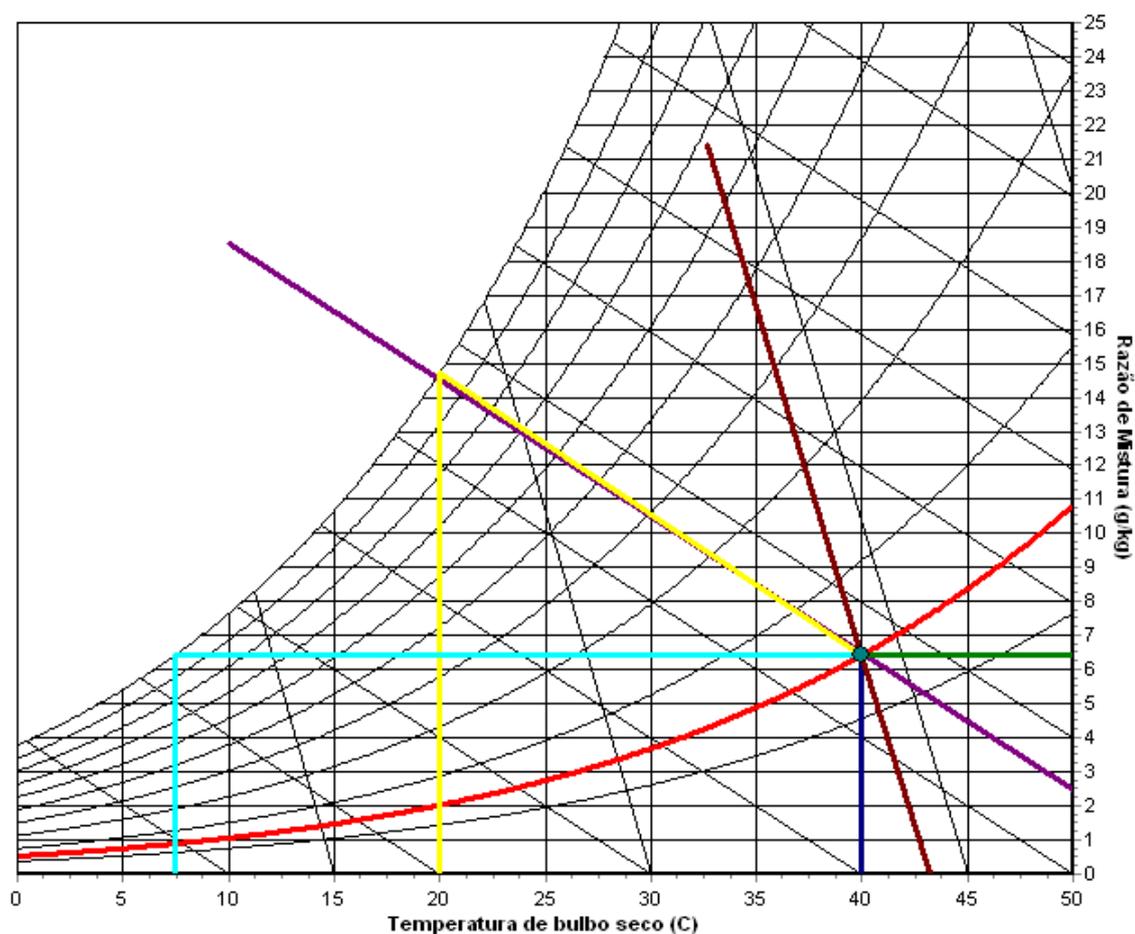
APÊNDICE B – Resultados e gráficos gerados pelo GRAPSI

Resultados gerados pelo GRAPSI para o Exemplo 1 – Determinação das Propriedades Psicrométricas de um Único Ponto (item 6.3.1):

Tbs(°C)	Tbm(°C)	Tpo(°C)	UR(%)	RM(g/kg)	Patm(kPa)	Pvsat(kPa)	Pv(kPa)	Ent(kJ/kg)	VE(m ³ /kg)
40,0	20,0	7,5	14,0	6,4	101.325	7,4	1,0	56,8	0,896

Na figura B.1 é apresentado o gráfico gerado pelo GRAPSI.

Figura B.1 – Gráfico gerado pelo GRAPSI para o exemplo 1

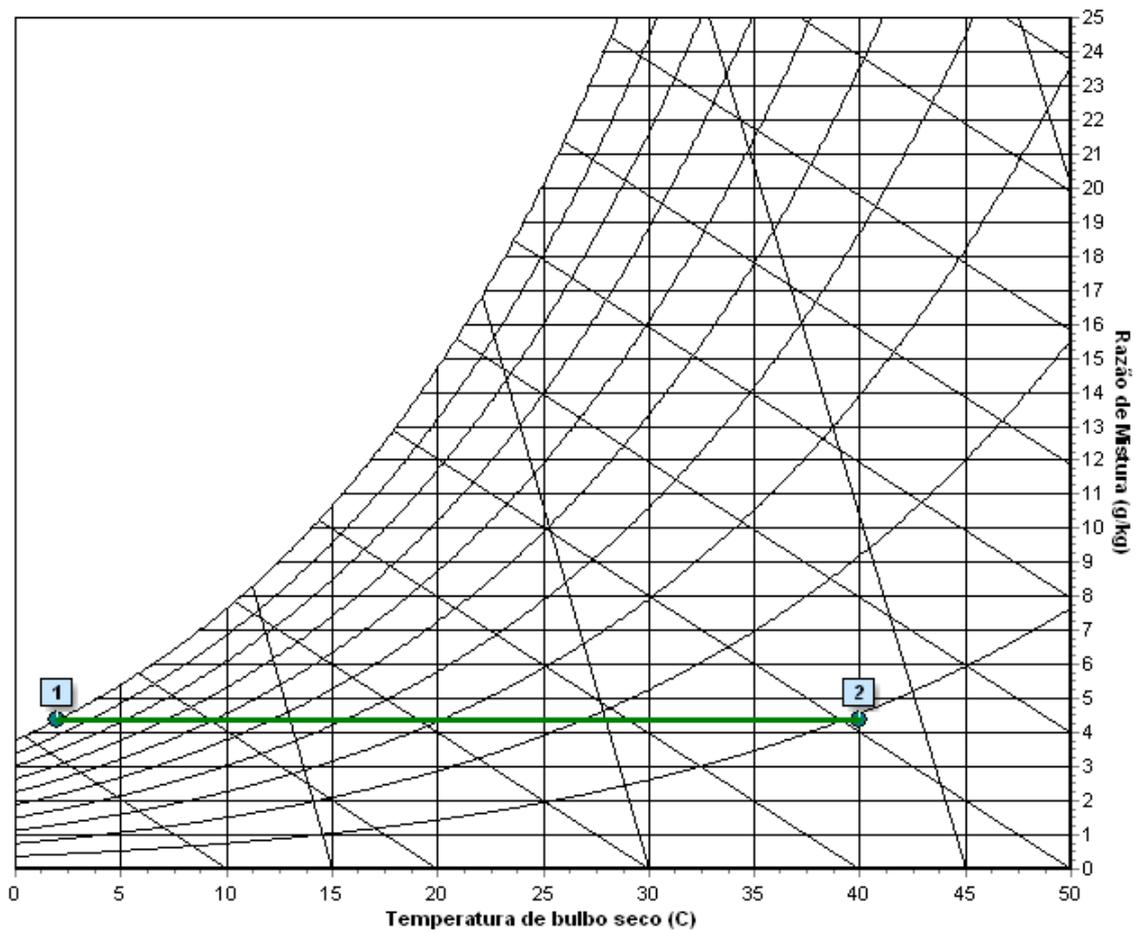


Resultados gerados pelo GRAPSI para o Exemplo 2 – Aquecimento do Ar Úmido (item 6.3.2):

	Tbs(°C)	Tbm(°C)	Tpo(°C)	UR(%)	RM(g/kg)	Patm(kPa)	Pvsat(kPa)	Pv(kPa)	Ent(kJ/kg)	VE(m ³ /kg)
PONTO 01	2,0	2,0	2,0	100,0	4,4	101.325	0,7	0,7	13,0	0,785
PONTO 02	40,0	18,2	2,0	9,6	4,4	101.325	7,4	0,7	51,5	0,893

Na figura B.2 é apresentado o gráfico gerado pelo GRAPSI.

Figura B.2 – Gráfico gerado pelo GRAPSI para o exemplo 2

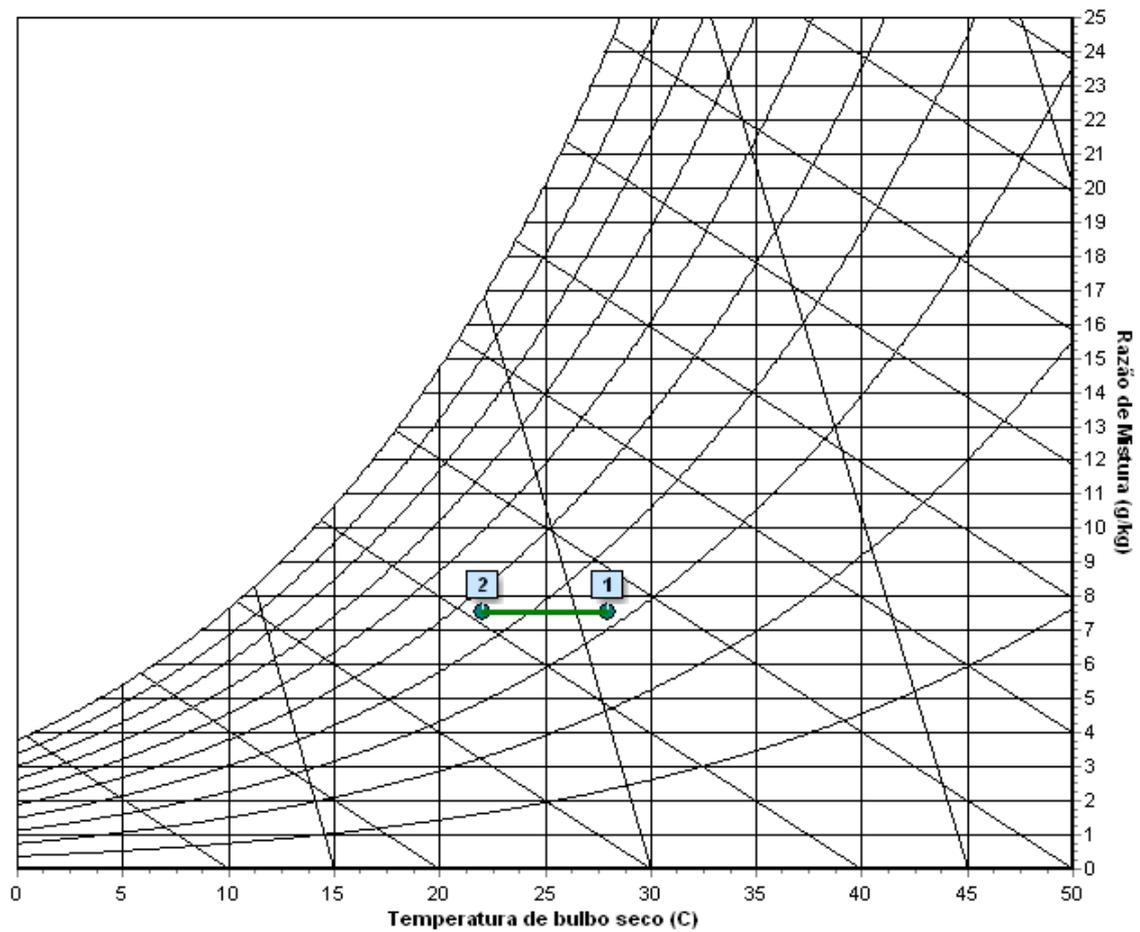


Resultados gerados pelo GRAPSI para o Exemplo 3 – Resfriamento do Ar Úmido (item 6.3.3).

	Tbs(°C)	Tbm(°C)	Tpo(°C)	UR(%)	RM(g/kg)	Patm(kPa)	Pvsat(kPa)	Pv(kPa)	Ent(kJ/kg)	VE(m ³ /kg)
PONTO 01	28,0	16,9	9,8	32,0	7,5	101.325	3,8	1,2	47,4	0,864
PONTO 02	22,0	14,8	9,8	45,8	7,5	101.325	2,6	1,2	41,3	0,846

Na figura B.3 é apresentado o gráfico gerado pelo GRAPSI.

Figura B.3 – Gráfico gerado pelo GRAPSI para o exemplo 3



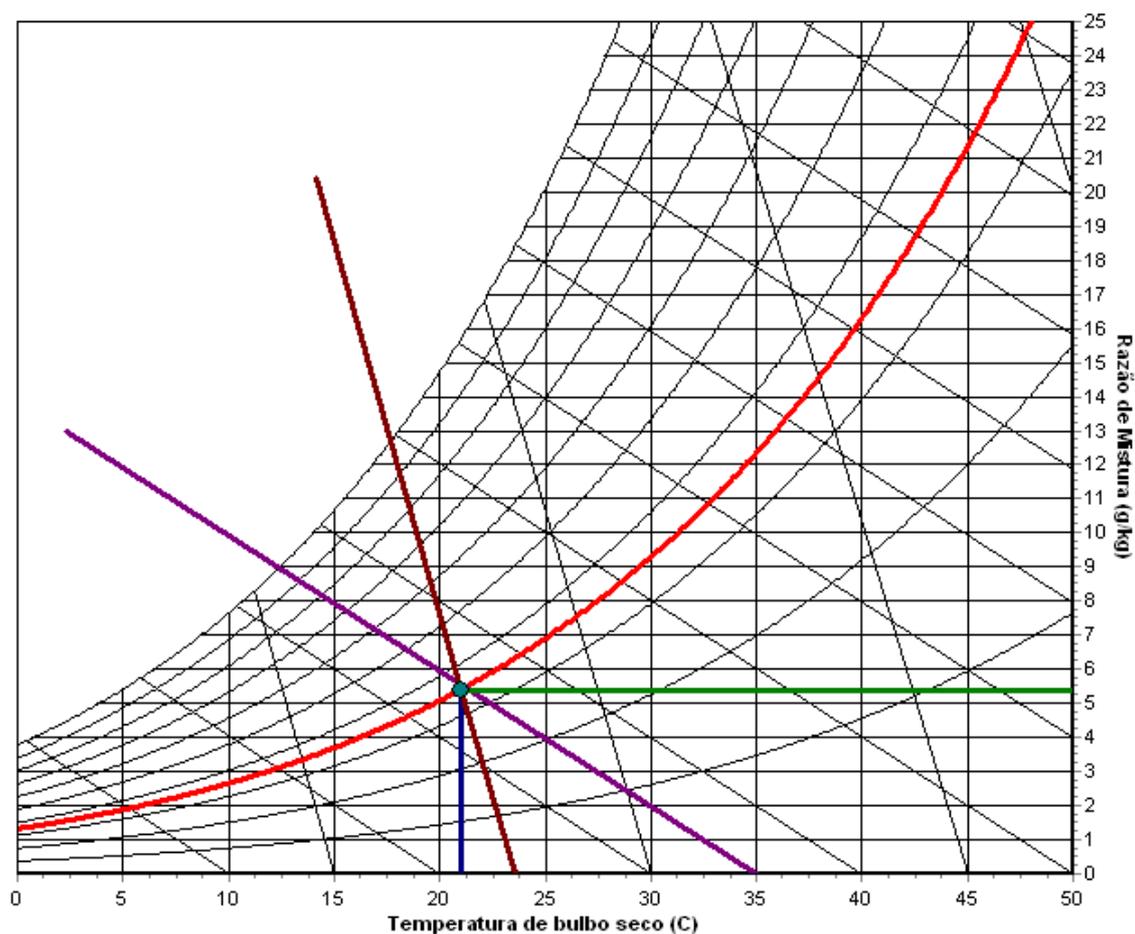
Resultados gerados pelo GRAPSI para o Exemplo 4 – Umidificação do Ar Úmido (item 6.3.4).

Resultados para o ponto de entrada:

Tbs(°C)	Tbm(°C)	Tpo(°C)	UR(%)	RM(g/kg)	Patm(kPa)	Pvsat(kPa)	Pv(kPa)	Ent(kJ/kg)	VE(m ³ /kg)
21,0	12,3	5,0	35,0	5,4	101.325	2,5	0,9	34,8	0,841

Na figura B.4 é apresentado o gráfico gerado pelo GRAPSI para o ponto de entrada.

Figura B.4 – Gráfico gerado pelo GRAPSI para o exemplo 4 – ponto de entrada

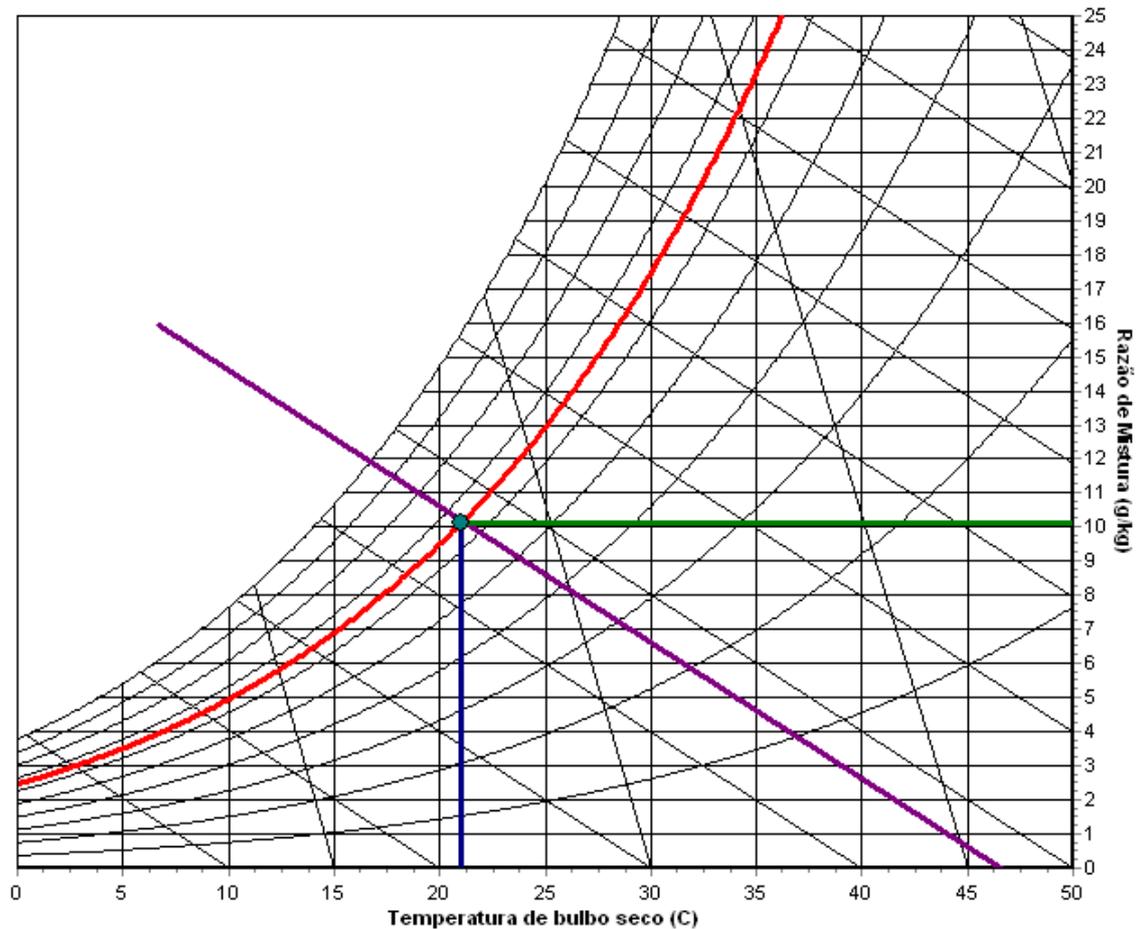


Resultados para o ponto de saída:

Tbs(°C)	Tbm(°C)	Tpo(°C)	UR(%)	RM(g/kg)	Patm(kPa)	Pvsat(kPa)	Pv(kPa)	Ent(kJ/kg)	VE(m ³ /kg)
21,0	16,7	14,2	65,0	10,1	101.325	2,5	1,6	46,8	0,847

Na figura B.5 é apresentado o gráfico gerado pelo GRAPSI para o ponto de saída.

Figura B.5 – Gráfico gerado pelo GRAPSI para o exemplo 4 – ponto de saída



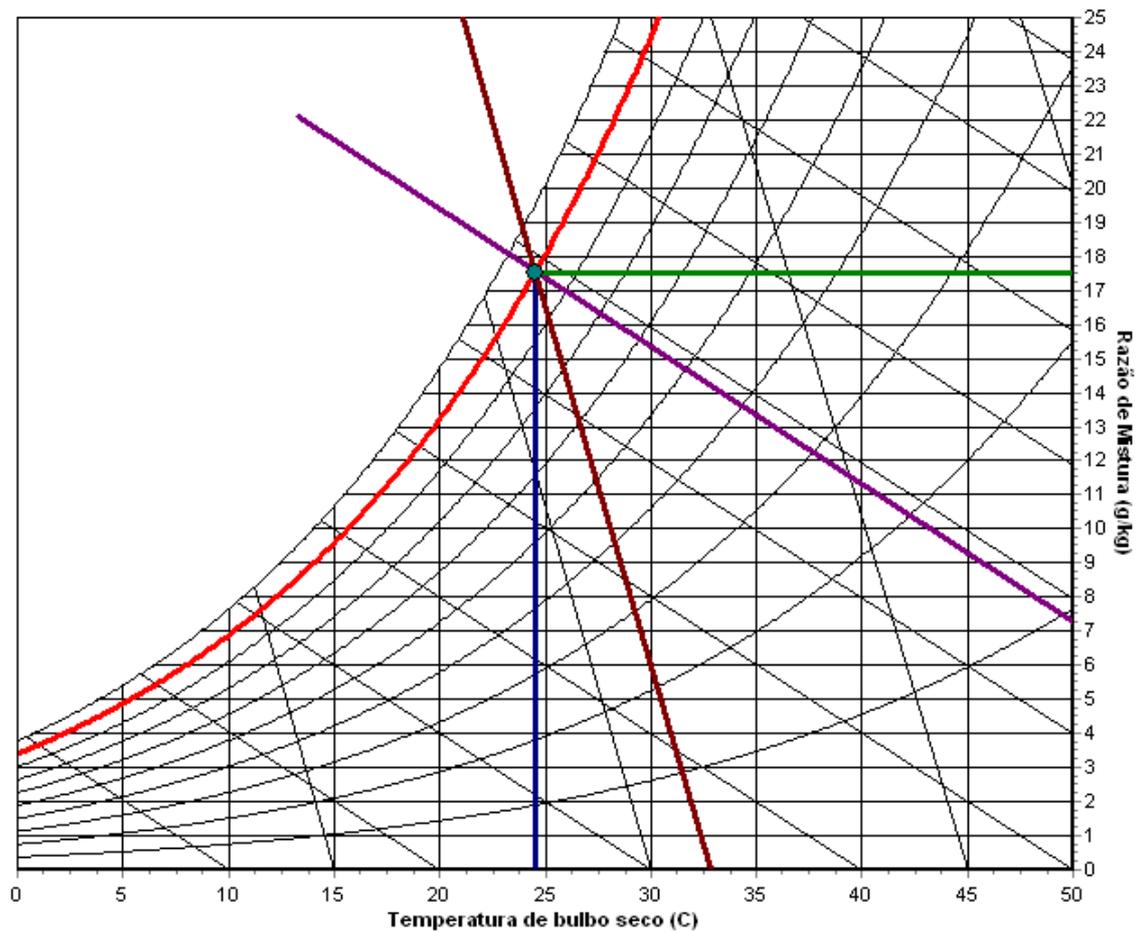
Resultados gerados pelo GRAPSI para o Exemplo 5 – Desumidificação do Ar Úmido (item 6.3.5).

Resultados para o ponto de entrada:

Tbs(°C)	Tbm(°C)	Tpo(°C)	UR(%)	RM(g/kg)	Patm(kPa)	Pvsat(kPa)	Pv(kPa)	Ent(kJ/kg)	VE(m ³ /kg)
24,5	23,3	22,8	90,0	17,5	101.325	3,1	2,8	69,2	0,867

Na figura B.6 é apresentado o gráfico gerado pelo GRAPSI para o ponto de entrada.

Figura B.6 – Gráfico gerado pelo GRAPSI para o exemplo 5 – ponto de entrada

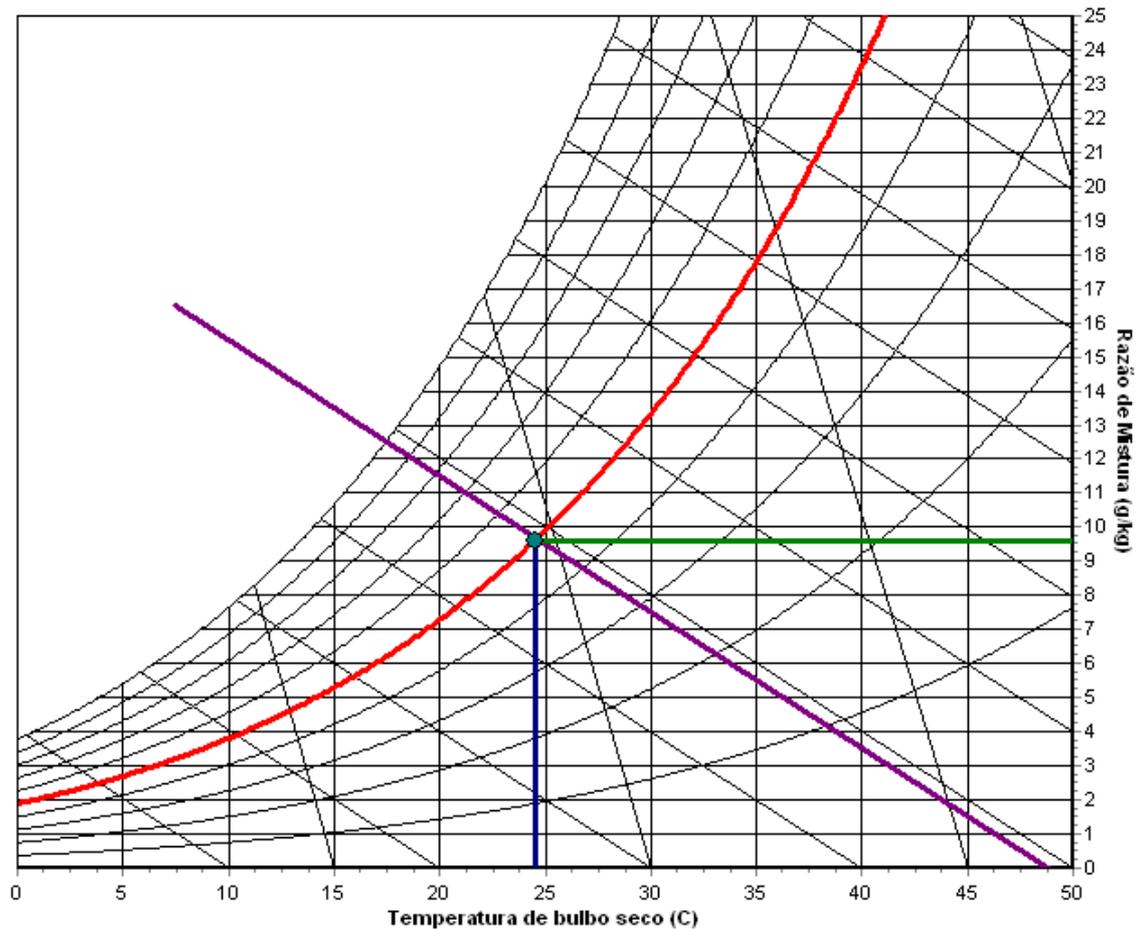


Resultados para o ponto de saída:

Tbs(°C)	Tbm(°C)	Tpo(°C)	UR(%)	RM(g/kg)	Patm(kPa)	Pvsat(kPa)	Pv(kPa)	Ent(kJ/kg)	VE(m ³ /kg)
24,5	17,5	13,4	50,0	9,6	101.325	3,1	1,5	49,1	0,856

Na figura B.7 é apresentado o gráfico gerado pelo GRAPSI para o ponto de saída.

Figura B.7 – Gráfico gerado pelo GRAPSI para o exemplo 5 – ponto de saída

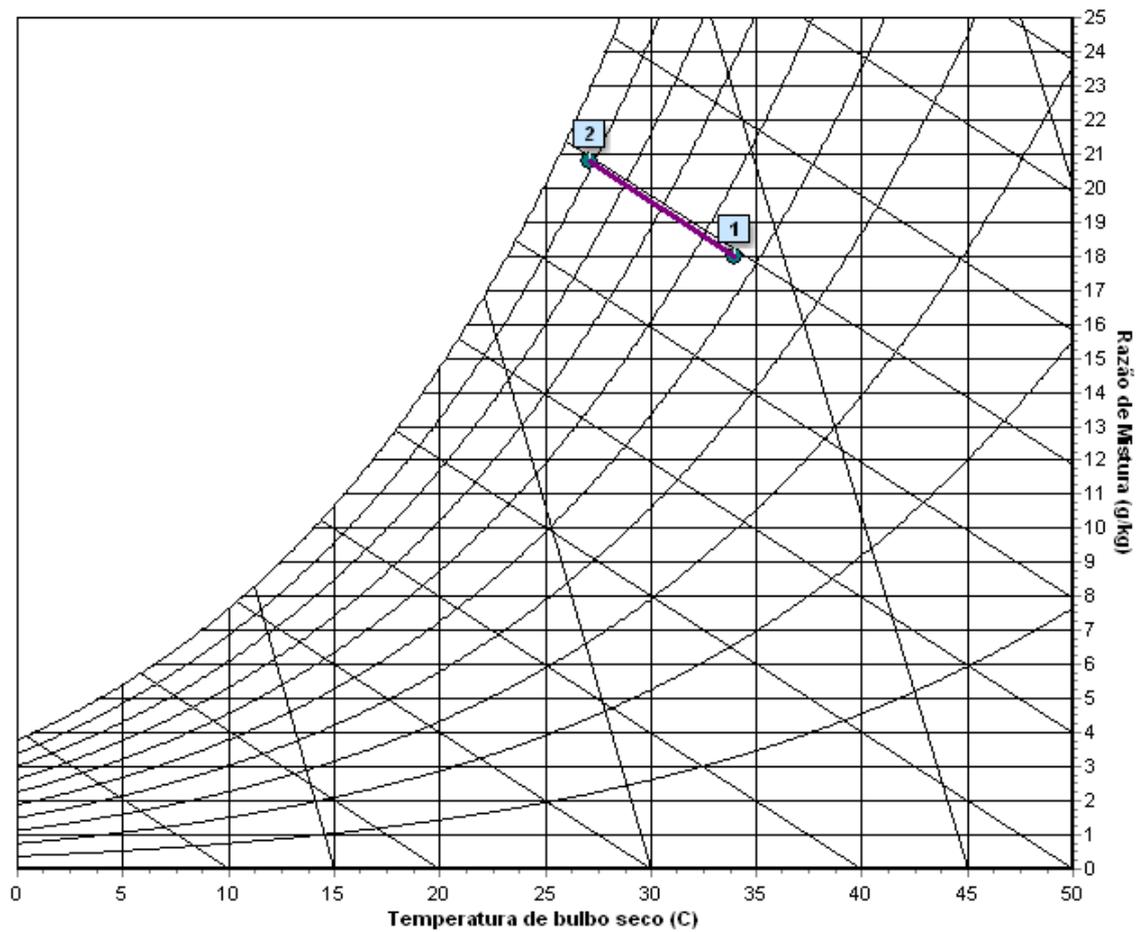


Resultados gerados pelo GRAPSI para o Exemplo 6 – Resfriamento Evaporativo (item 6.3.6).

	Tbs(°C)	Tbm(°C)	Tpo(°C)	UR(%)	RM(g/kg)	Patm(kPa)	Pvsat(kPa)	Pv(kPa)	Ent(kJ/kg)	VE(m ³ /kg)
PONTO 01	34,0	26,0	23,2	53,4	18,0	101.325	5,3	2,8	80,3	0,895
PONTO 02	27,1	26,0	25,6	90,0	20,8	101.325	3,6	3,3	80,3	0,879

Na figura B.8 é apresentado o gráfico gerado pelo GRAPSI.

Figura B.8 – Gráfico gerado pelo GRAPSI para o exemplo 6

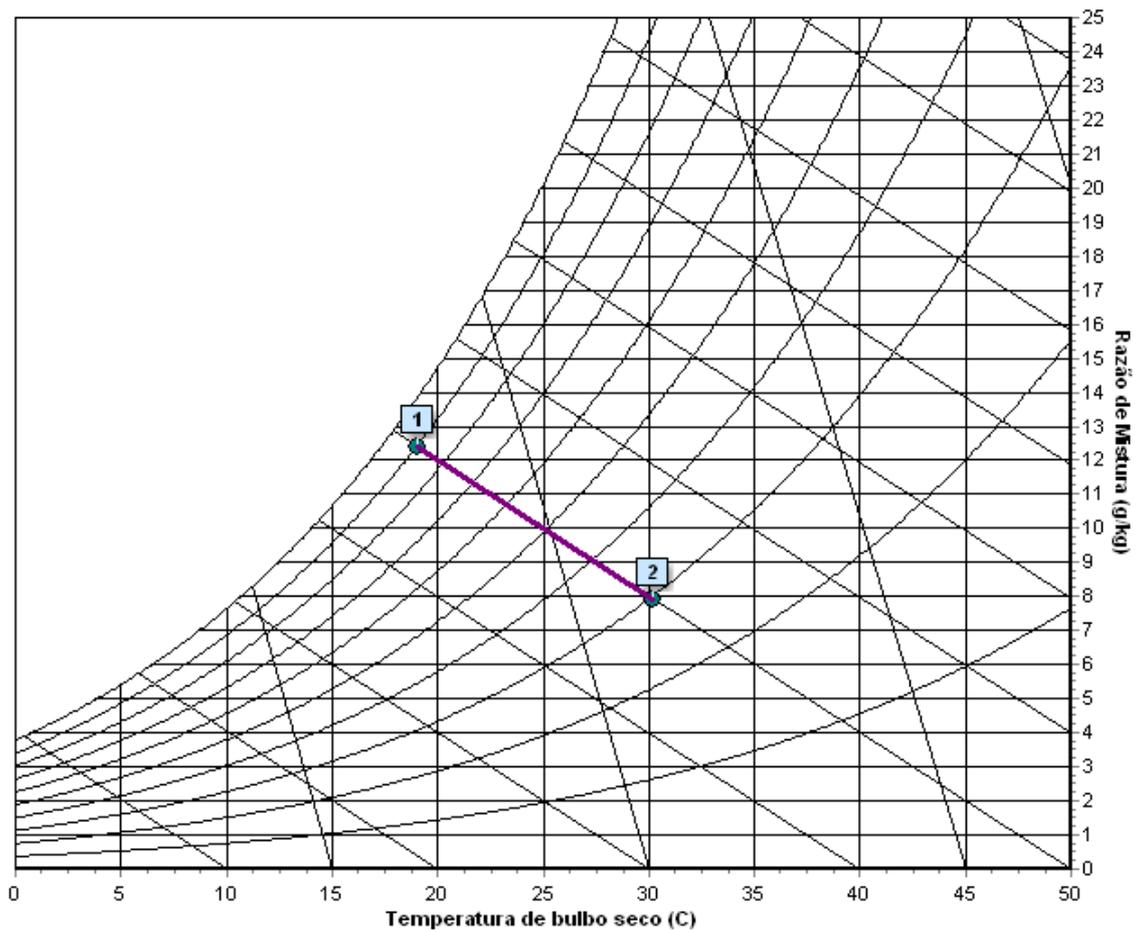


Resultados gerados pelo GRAPSI para o Exemplo 7 – Desumidificação do Ar Úmido por Adsorção (item 6.3.7).

	Tbs(°C)	Tbm(°C)	Tpo(°C)	UR(%)	RM(g/kg)	Patm(kPa)	Pvsat(kPa)	Pv(kPa)	Ent(kJ/kg)	VE(m ³ /kg)
PONTO 01	19,0	17,9	17,3	90,0	12,4	101.325	2,2	2,0	50,5	0,844
PONTO 02	30,2	17,9	10,5	30,0	7,9	101.325	4,3	1,3	50,5	0,870

Na figura B.9 é apresentado o gráfico gerado pelo GRAPSI.

Figura B.9 – Gráfico gerado pelo GRAPSI para o exemplo 7



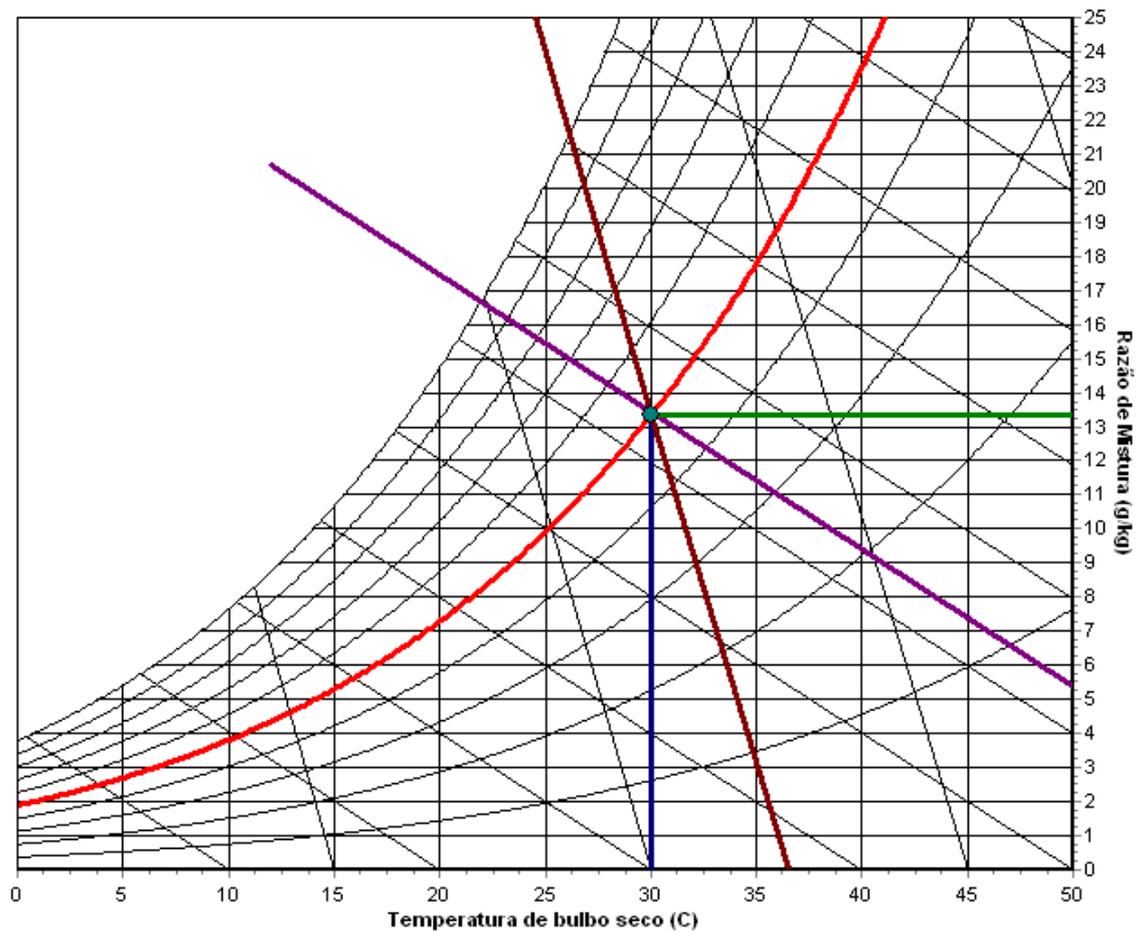
Resultados gerados pelo GRAPSI para o Exemplo 8 – Resfriamento e Desumidificação do Ar Úmido (item 6.3.8).

Resultados para o ponto de entrada:

Tbs(°C)	Tbm(°C)	Tpo(°C)	UR(%)	RM(g/kg)	Patm(kPa)	Pvsat(kPa)	Pv(kPa)	Ent(kJ/kg)	VE(m ³ /kg)
30,0	22,0	18,5	50,0	13,3	101.325	4,3	2,1	64,2	0,877

Na figura B.10 é apresentado o gráfico gerado pelo GRAPSI para o ponto de entrada.

Figura B.10 – Gráfico gerado pelo GRAPSI para o exemplo 8 – ponto de entrada

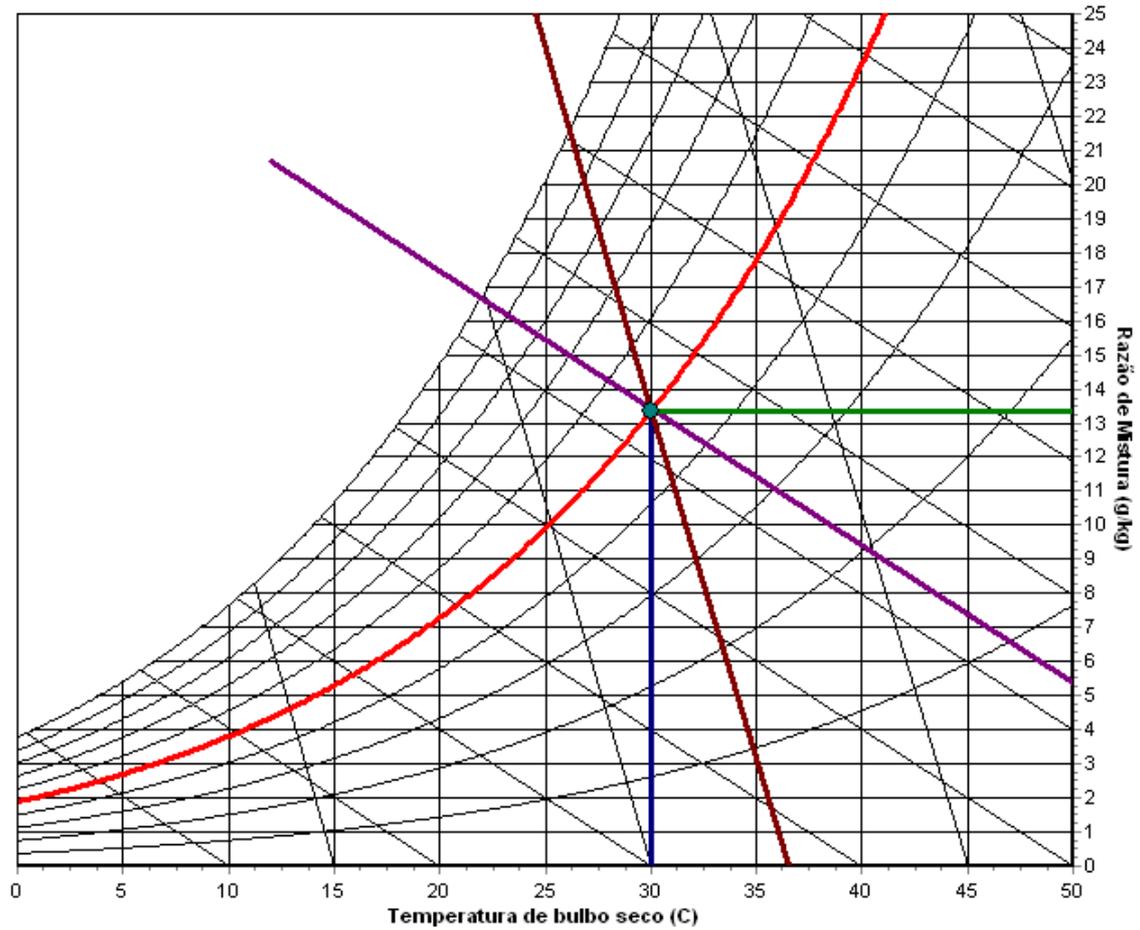


Resultados para o ponto de saída:

Tbs(°C)	Tbm(°C)	Tpo(°C)	UR(%)	RM(g/kg)	Patm(kPa)	Pvsat(kPa)	Pv(kPa)	Ent(kJ/kg)	VE(m ³ /kg)
10,0	10,0	10,0	100,0	7,6	101,325	1,2	1,2	29,3	0,812

Na figura B.11 é apresentado o gráfico gerado pelo GRAPSI para o ponto de saída.

Figura B.11 – Gráfico gerado pelo GRAPSI para o exemplo 8 – ponto de saída

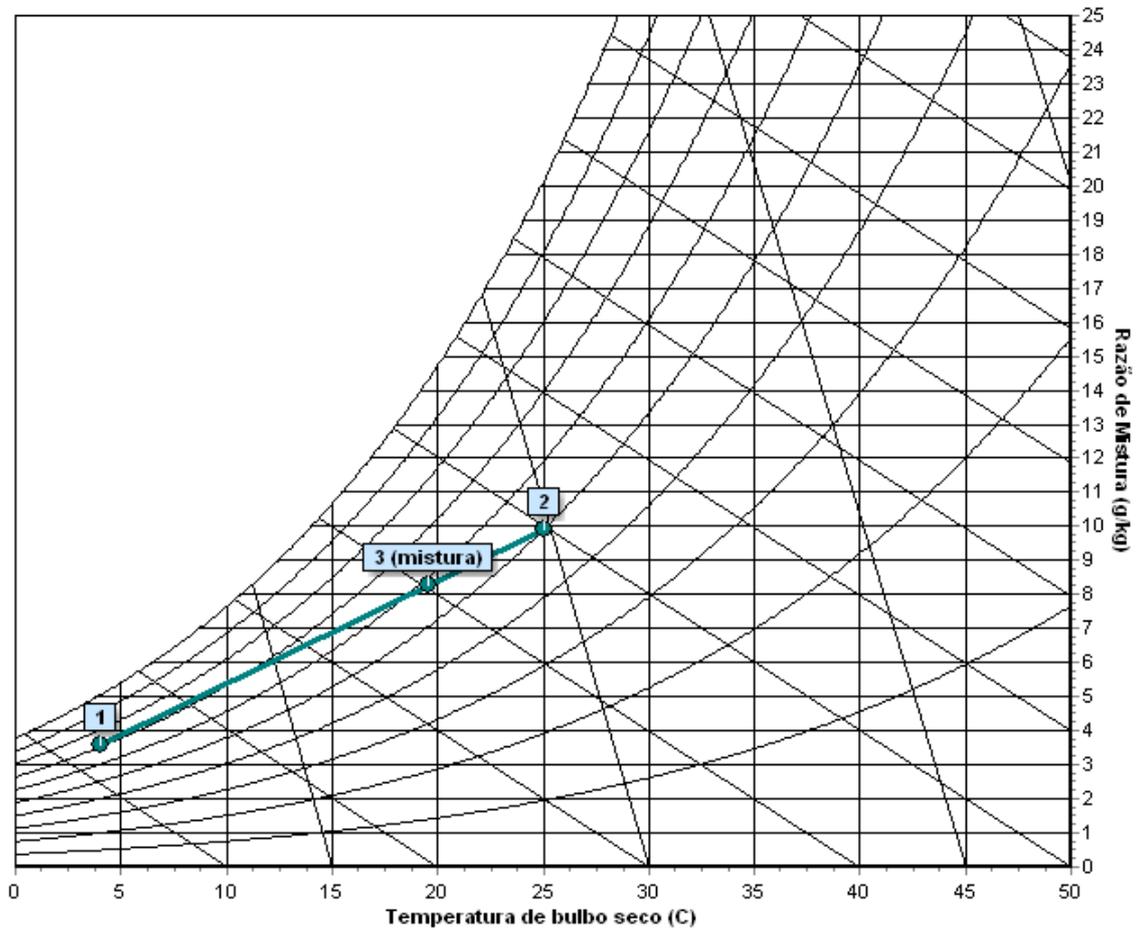


Resultados gerados pelo GRAPSI para o Exemplo 9 – Mistura Adiabática de Dois Fluxos de Ar Úmido (item 6.3.9).

	Tbs(°C)	Tbm(°C)	Tpo(°C)	UR(%)	RM(g/kg)	Patm(kPa)	Pvsat(kPa)	Pv(kPa)	Ent(kJ/kg)	VE(m ³ /kg)	Fluxo total(m ³ /h)
PONTO 01	4,0	2,0	-0,8	70,8	3,6	101.325	0,8	0,6	13,0	0,790	9.117.600
PONTO 02	25,0	17,9	13,9	50,0	9,9	101.325	3,2	1,6	50,3	0,858	26.220.000
PONTO 03	19,6	14,6	11,2	58,2	8,3	101.325	2,3	1,3	40,7	0,840	29.696.000

Na figura B.12 é apresentado o gráfico gerado pelo GRAPSI.

Figura B.12 – Gráfico gerado pelo GRAPSI para o exemplo 9



Resultados gerados pelo GRAPSI para o Exemplo 10 – Verificação de Conforto Térmico Segundo a NR-17 (item 6.3.10).

Tbs(°C)	Tbm(°C)	Tpo(°C)	UR(%)	RM(g/kg)	Patm(kPa)	Pvsat(kPa)	Pv(kPa)	Ent(kJ/kg)	VE(m ³ /kg)
24,4	16,7	12,0	45,7	8,7	101.325	3,1	1,4	46,7	0,855

Na figura B.13 é apresentado o gráfico gerado pelo GRAPSI.

Figura B.13 – Gráfico gerado pelo GRAPSI para o exemplo 10

