

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA - CEFET/RJ

DETERMINAÇÃO TEÓRICA E EXPERIMENTAL DAS
PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DO AR.

Lucas Santos Evangelista

Victor Tristão Biot

Projeto de graduação apresentado ao curso
de engenharia mecânica do CEFET/RJ como
parte dos requisitos necessários para obtenção do
título de bacharel em Engenharia Mecânica

Prof. Orientador: Carlos Eduardo Guedes Catunda

Rio de Janeiro

Dezembro de 2017

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaríamos de agradecer aos nossos familiares, que nos deram força e apoio incondicional durante essa trajetória. Pais, mães, irmãos, todos que puderam contribuir para que este sonho se tornasse realidade.

Aos amigos, que sempre estiveram por perto, seja nos momentos bons ou ruins, agradecemos eternamente pelo companheirismo e pela verdadeira amizade construída.

Aos docentes, que nos acompanharam desde o início da faculdade, com suas experiências, que certamente proporcionaram o melhor ensino possível. Somos orgulhosos de afirmar que estudamos e nos formamos no CEFET-RJ.

Agradecemos ao nosso orientador Carlos Eduardo Guedes Catunda, que desde o início nos incentivou e sempre nos ajudou quando solicitado. Somos gratos pela sua atenção durante esse ano e principalmente pelas palavras duras nos momentos necessários, que com certeza foram decisivas para que pudéssemos realizar o melhor trabalho possível.

Ao professor Almir Venâncio, que com toda sua compreensão não hesitou em momento algum em nos ajudar, nos disponibilizando sempre que possível o laboratório de meteorologia e a utilização dos instrumentos necessários.

Resumo

Neste trabalho construiu-se um protótipo que simulasse um saturador adiabático para se determinar as propriedades termodinâmicas do ar atmosférico. Foram realizados experimentos em bancada e os dados do ar atmosférico (umidade relativa, temperatura de bulbo úmido e temperatura de bulbo seco) foram coletados com o auxílio de termômetros e um higrômetro. Foi desenvolvido uma rotina em MATLAB, com objetivo de calcular as propriedades termodinâmicas e psicométricas do ar de entrada e saída do protótipo experimental. Em seguida, calculou-se os valores das temperaturas de bulbo úmido termodinâmico em função apenas da entalpia do ar de entrada e umidade específica de entrada. Por fim foi feita uma comparação entre os dados teóricos e os dados obtidos experimentalmente.

Abstract

The aim of this project is to determine psychrometric properties of the atmospheric air by means of an adiabatic saturator. Experiments were carried at CEFET-RJ to collect atmospheric air data (relative humidity, wet and dry bulb temperatures). A MATLAB routine to calculate the thermodynamic properties of the incoming and outgoing air was developed. Wet bulb temperatures were calculated as a function of the incoming air enthalpy and specific humidity and the results were compared to the experimental data.

Sumário

1. Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Justificativa	1
1.3 Objetivo	1
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1 O ar atmosférico	3
2.2 Psicrometria	4
2.2.1 Temperatura de bulbo seco (TBS).....	4
2.2.2 Temperatura de bulbo úmido (TBU).....	4
2.2.3 Umidade Específica (ω).....	5
2.2.3 Umidade Relativa (ϕ)	5
2.2.4 Ponto de Orvalho (t_o).....	6
2.2.5 Entalpia (h)	6
2.2.6 Volume específico (v)	6
2.3 Diagrama psicrométrico	6
2.4 Processos Psicrométricos.....	7
2.4.1 Resfriamento Simples.....	7
2.4.2 Resfriamento Adiabático	8
2.4.3 Resfriamento com Desumidificação.....	9
2.4.4 Aquecimento Simples.....	10
2.4.5 Umidificação Simples.....	10
2.4.6 Desumidificação com Aquecimento.....	11
2.4.7 Umidificação e Resfriamento não Adiabático.....	12
.....	12
2.5 Convecção com Troca Mássica	13
2.5.1 O número de Reynolds	13
2.5.2 O Número de Prandtl.....	14
2.5.3 O Número de Nusselt	14
2.5.4 O Número de Schmidt	15
2.5.5 O Número de Sherwood	15
2.5.6 O Número de Lewis.....	16
2.6 Saturador Adiabático	17
3. Materiais e Métodos	19

3.1 Método Numérico.....	19
3.1.1 Dados de Entrada.....	19
3.1.2 O Modelo de Dalton	20
3.1.3 Pressão do ar seco e do vapor	21
3.1.4 Umidade específica.....	23
3.1.5 Entalpia.....	24
3.1.6 Volume específico	26
3.1.7 Temperatura de bulbo úmido termodinâmica.....	27
3.1.8 Plotagem de Gráficos	28
3.2 Método Experimental	29
4. Resultados e Discussão.....	32
4.1 Aquisição de dados	32
4.2 Variações nos Estados Termodinâmicos do ar	32
4.3 Temperatura de bulbo úmido Termodinâmica	37
6. Conclusões.....	40
6.1 Propostas para Futuros Projetos	40
7. Bibliografia.....	42
APÊNDICE A	43

Lista de figuras

<i>Figura 1: Psicrômetro simples.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2: Higrômetro que utiliza cabelo humano como elemento sensível.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 3: Carta psicrométrica atual da ASHRAE.....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 4: Resfriamento simples.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 5: Resfriamento adiabático.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 6: Resfriamento com desumidificação.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 7: Aquecimento simples.....</i>	<i>10</i>
<i>Figura 8: Umidificação simples.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 9: Desumidificação com aquecimento.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 10: Umidificação e resfriamento não adiabático.....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 11: Desenho esquemático de um saturador adiabático ideal.....</i>	<i>17</i>
<i>Figura 12: Dados de entrada em programação MATLAB.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 13: Matriz de propriedades termodinâmicas da água.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 14: Programação MATLAB para cálculo das pressões de ar seco e vapor.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 15: Rotina MATLAB de interpolação para valores da pressão de saturação do vapor..</i>	<i>23</i>
<i>Figura 16: Programação MATLAB para cálculo da umidade específica.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 17: Programação MATLAB para cálculo da entalpia.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 18: Script de interpolação utilizado para cálculo da entalpia do vapor.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 19: Cálculo do volume específico em MATLAB.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 20: Programação MATLAB para cálculo da entalpia da temperatura de bulbo úmido termodinâmica.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 21: Rotina MATLAB utilizada para exportar os resultados calculados para o Microsoft EXCEL.....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 22: Foto do protótipo experimental a esquerda e desenho esquemático do funcionamento a direita.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 23: Imagem do protótipo durante os experimentos.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 24: Instrumentos de medição utilizados.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 25: Variação das temperaturas e umidade relativa nos experimentos realizados com água.....</i>	<i>33</i>

<i>Figura 26: Mudança do estado termodinâmico do ar representado na carta psicrométrica - Experimentos com água.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 27: Variação das temperaturas e umidade relativa nos experimentos realizados com gelo.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 28: Mudança do estado termodinâmico do ar representado na carta psicrométrica - Experimentos com água.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 29: Temperaturas do ar de saída e temperaturas de orvalho durante os experimentos com gelo.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 30: Comparação entre as temperaturas de bulbo úmido nos experimentos com água....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 31: Comparação entre as temperaturas de bulbo úmido nos experimentos com gelo....</i>	<i>39</i>

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1: Composição para o ar seco em percentual da ASHRAE.....</i>	<i>3</i>
<i>Tabela 2: Valores medidos nos experimentos.....</i>	<i>32</i>

1. Introdução

O estudo detalhado da psicometria é de grande importância para a humanidade. Através do conhecimento das condições de umidade e temperatura do ar é possível projetar sistemas de condicionamento de ar, que além de oferecerem maior conforto térmico, conservam alimentos e são muito utilizados em processos industriais como nas torres de resfriamento muito utilizadas em termelétricas. Porém para desenvolver tais projetos que envolvam psicrometria é necessário em primeiro momento determinar as propriedades psicrométricas do ar atmosférico onde estes sistemas irão operar. Existem diversos modelos para se determinar estas propriedades e neste trabalho será estudado alguns deles.

1.1 Motivação

A ciência por natureza busca entender o mundo, e através do estudo da termodinâmica, podemos prever diversos processos que estão acontecendo ao nosso redor. Com isso, buscamos estudar e comparar as diferentes formas de calcular as propriedades termodinâmicas do ar úmido e assim entender melhor a aplicabilidade de cada uma destas teorias.

1.2 Justificativa

A engenharia busca continuamente a melhoria nos processos e um dos grandes desafios para tal fato, é a maior aproximação da teoria com a realidade. Através de cálculos mais precisos, é possível realizar projetos cada vez mais elaborados e eficientes. O diagrama psicométrico, desde sua invenção (que data por volta do século XX), tornou possível analisar as propriedades do ar e assim projetar sistemas de condicionamento. Como cada abordagem empírica possui maior ou menor aplicabilidade para cada caso, desenvolveu-se modelos para calcular as propriedades termodinâmicas do ar. Com isso, deve-se analisar continuamente todas as possibilidades de cálculo, a fim de se obter um resultado cada vez mais coerente com a realidade.

1.3 Objetivo

Este trabalho busca apresentar e analisar um protótipo de um saturador adiabático. Para isto, será utilizado um reservatório hermético, com orifício de entrada e saída, que será conectado à uma bomba. Serão realizados dois experimentos, um com água no reservatório e outro com gelo. Serão realizadas medições em função do tempo e simultaneamente serão

calculados os resultados teóricos. Ao final será realizada uma comparação entre os valores e uma análise da temperatura de bulbo úmido termodinâmico comparativamente com a temperatura de bulbo úmido psicrométrica.

2. Revisão Bibliográfica

Para o estudo de saturadores adiabáticos, assim como outros equipamentos que trabalham com o ar atmosférico, é de grande importância o conhecimento na área da psicrometria que é o campo da termodinâmica que estuda as propriedades da mistura de gases com vapor d'água. Um saturador adiabático altera as propriedades termodinâmicas do ar atmosférico ao transferir calor e massa para o mesmo durante o processo de saturação. Neste capítulo serão apresentados as principais propriedades psicrométricas assim como as transformações que podem ocorrer com o ar atmosféricos em diferentes processos.

2.1 O ar atmosférico

O ar atmosférico é composto por vários gases, vapor de água e poluentes. O ar seco é o ar atmosférico sem o vapor de água e é composto principalmente pelos componentes indicados na Tabela 1, que mostra valores adotados para cálculos psicrométricos. O ar seco segue a abordagem dos gases ideais. Sua composição pode variar em função da altitude e posição geográfica. O ar úmido é a mistura de ar seco com vapor de água [1].

Tabela 1: Composição para o ar seco em percentual da ASHRAE 1997 [2].

Substância	%
Nitrogênio	78,084000
Oxigênio	20,947600
Argônio	0,934000
Dióxido de Carbono	0,031400
Neônio	0,001818
Hélio	0,000524
Metano	0,000150
Dióxido de Enxofre	0 a 0,000100
Hidrogênio	0,000050
Criptônio, Xenônio e Ozônio	0,000200

2.2 Psicrometria

A psicrometria é o campo da termodinâmica que estuda as propriedades das misturas de ar e vapor d'água assim como os processos que alteram estas propriedades, o conhecimento da psicrometria tem grande importância em áreas de condicionamento de ar, secagem de alimentos, conforto térmico, condensação em superfícies frias etc.

Na elaboração de projetos, principalmente de condicionamento de ar necessita-se determinar certas propriedades da mistura ar/vapor. Estas propriedades são denominadas propriedades psicrométricas do ar [3] tais propriedades podem ser calculadas ou medidas utilizando equipamentos e medição especiais, tais propriedades serão melhor explicadas a seguir. O conjunto de duas ou mais propriedades termodinâmicas conhecidas caracterizam o chamado estado termodinâmico do ar.

2.2.1 Temperatura de bulbo seco (TBS)

É a temperatura medida por um termômetro de bulbo comum.

2.2.2 Temperatura de bulbo úmido (TBU)

No ar saturado, o vapor de água está em equilíbrio com a água líquida. A temperatura na qual esse equilíbrio se estabelece é conhecida como temperatura de bulbo úmido. Para determinar essa temperatura, um termômetro de bulbo é envolvido com um chumaço de algodão úmido e a evaporação da água desse chumaço ocorre com a retirada de calor do bulbo do termômetro, esse esfria e registra uma temperatura menor que a do bulbo seco. O ar ao redor do termômetro satura-se de vapor de água [4].

Um instrumento capaz de medir as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido simultaneamente é chamado de psicrômetro e pode ser visto na Figura 1.

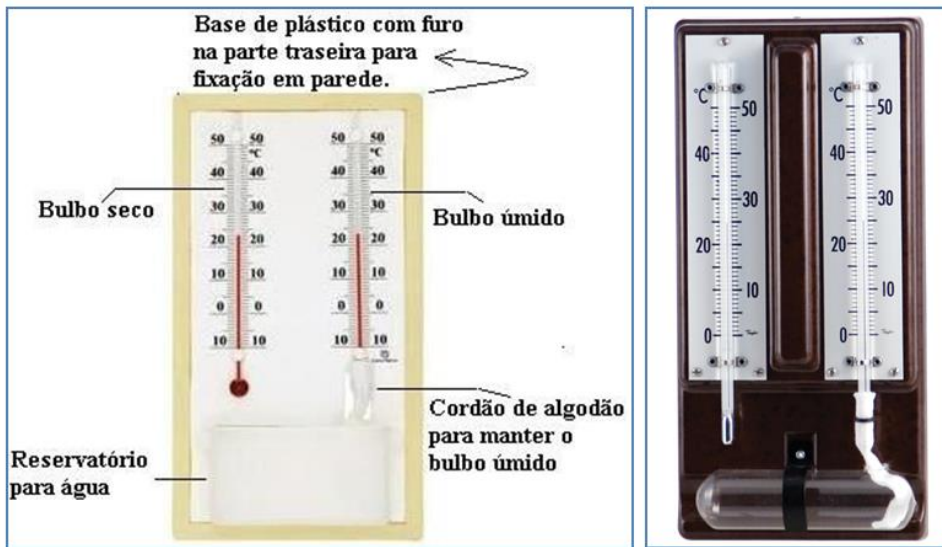


Figura 1: Psicrômetro simples [5].

2.2.3 Umidade Específica (ω)

A umidade específica representa a massa de vapor de água presente em 1 quilograma de ar seco [4].

2.2.4 Umidade Relativa (ϕ)

A umidade relativa do ar é a quantidade de água contida no ar em relação à que ele poderia conter se estivesse saturado. A relação entre a pressão parcial de vapor e a pressão de vapor saturado define a umidade relativa do ambiente (%) [4]. O aparelho que fornece o valor da umidade relativa do ar diretamente é chamado higrômetro e pode ser visto na Figura 2.



Figura 2: Higrômetro que utiliza cabelo humano como elemento sensível [5].

2.2.5 Ponto de Orvalho (t_o)

Expressa a condição mínima de temperatura de bulbo seco em que uma mistura ar-vapor consegue manter água no estado gasoso (vapor), abaixo da qual ocorre a condensação da umidade (ou a formação de névoa). Expresso no SI em °C [6].

2.2.6 Entalpia (h)

Expressa o conteúdo energético do ar (calor total) por unidade de massa de ar úmido de um estado psicrométrico em relação a um estado de referência e incorpora os conteúdos de calor sensível e latente. Expresso no SI em kJ/kg [6].

2.2.7 Volume específico (v)

Expressa a relação entre o volume e a massa do conteúdo de ar da mistura. Expresso no SI em m³/kg [6].

2.3 Diagrama psicrométrico

As propriedades psicrométricas, na maioria dos casos, são obtidas através de cartas. Estas cartas, denominadas diagramas ou cartas psicrométricas, correspondem, em princípio, ao chamado diagrama de Mollier para o ar úmido. A carta psicrométrica é elaborada referida à pressão do nível do mar padrão, de 760 mmHg, e pode ser usada com suficiente exatidão para pressões compreendidas entre 736 e 787 mmHg. Qualquer ponto na carta é denominado de ponto de estado, cuja localização, para uma dada pressão atmosférica, é fixada por duas propriedades psicrométricas. Existem diversas cartas psicrométricas, publicadas pela Carrier corporation, pela Trane company e por outras empresas fabricantes de equipamentos de ar condicionado. São representadas em unidades inglesas e no sistema internacional. O uso das cartas psicrométricas requer habilidade por parte do usuário, o que restringe a alguns sua utilização. Assim, a aplicação da modelagem matemática das equações e conseqüente simulação computacional das cartas psicrométricas simplificam significativamente seu uso, extinguindo os erros de leitura. A simulação computacional das cartas psicrométricas, além das vantagens supracitadas, possibilita ao usuário executar várias leituras consecutivas, somente com a entrada de duas propriedades psicrométricas disponíveis. Isto, é praticamente inviável com a leitura manual das cartas, já que é um trabalho muito minucioso e portanto, lento, além

de propiciar uma maior chance de erros [3]. Na Figura 3 podemos ver um exemplo de diagrama psicrométrico.

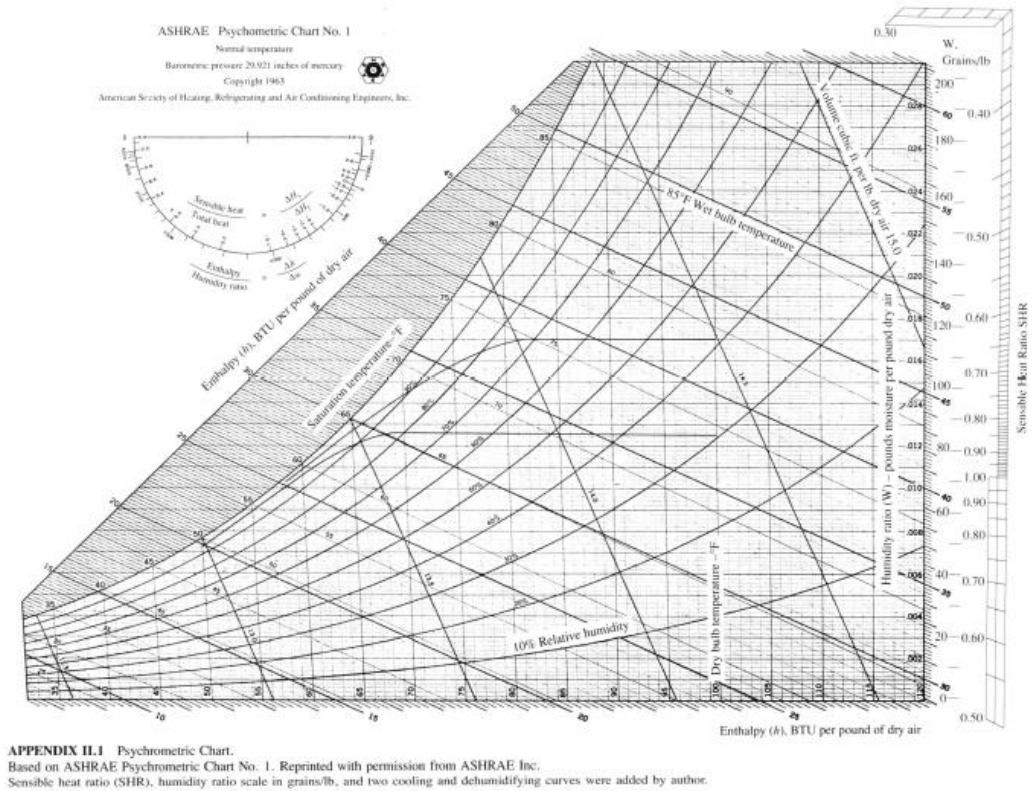


Figura 3: Carta psicrométrica atual da ASHRAE [7].

2.4 Processos Psicrométricos de Condicionamento de Ar

A manutenção de um espaço residencial ou de uma instalação industrial a uma dada temperatura e umidade desejadas exige uma ou mais variações no estado termodinâmico do ar, esta variação é chamada de processo psicrométrico. A maioria dos processos de condicionamento de ar pode ser modelada em regime permanente, os principais processos psicrométricos utilizados, representados no diagrama psicrométrico, acham-se evidenciados a seguir:

2.4.1 Resfriamento simples

Este processo se caracteriza pela redução da temperatura de bulbo seco do ar do ponto A para o ponto B (retirada exclusivamente de calor sensível), mantendo-se a umidade específica

do ar constante, conforme se verifica na Figura 4. Conseqüentemente a umidade relativa da mistura ar-vapor irá aumentar, uma vez que a condição desta irá se aproximar da curva de saturação.

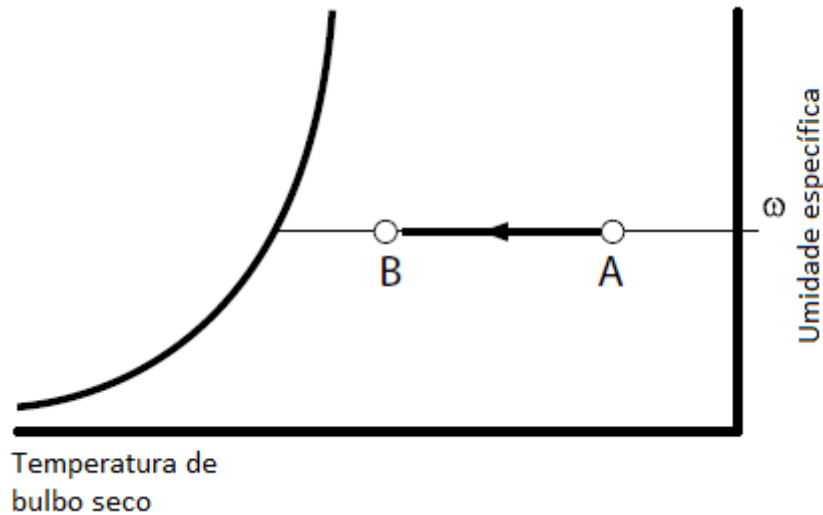


Figura 4: Resfriamento simples [6].

Este processo é realizado principalmente por serpentinas de resfriamento (alimentadas por água gelada ou pela expansão direta de gás refrigerante) [6].

2.4.2 Resfriamento Adiabático

Este processo, mostrado na Figura 5, se caracteriza pela redução da temperatura de bulbo seco (ponto A) do ar através da evaporação de água (geralmente atomizada no fluxo de ar), elevando o conteúdo de umidade do ar (ponto B). Quando a água se evapora ela “rouba” calor do ar, reduzindo sua temperatura. Ocorre uma troca do calor latente oriundo da evaporação da água pelo calor sensível (associada à temperatura da mistura) do ar. O resultado do somatório do acréscimo da carga latente com a redução da carga sensível tem resultado nulo, evidenciando um processo sem variação do conteúdo enérgico (adiabático).

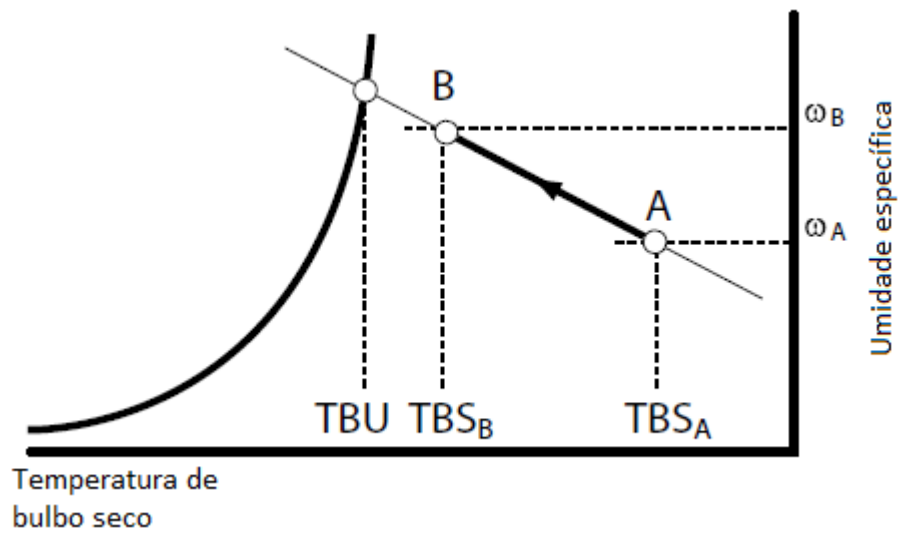


Figura 5: Resfriamento adiabático [6].

O processo pode ser realizado por lavador de água recirculada ou pela aspersão direta da água no ambiente [6].

2.4.3 Resfriamento com desumidificação

Como evidenciado na Figura 6, este processo se caracteriza pela redução simultânea da temperatura de bulbo seco (carga sensível) e da umidade específica (carga latente) do ar.

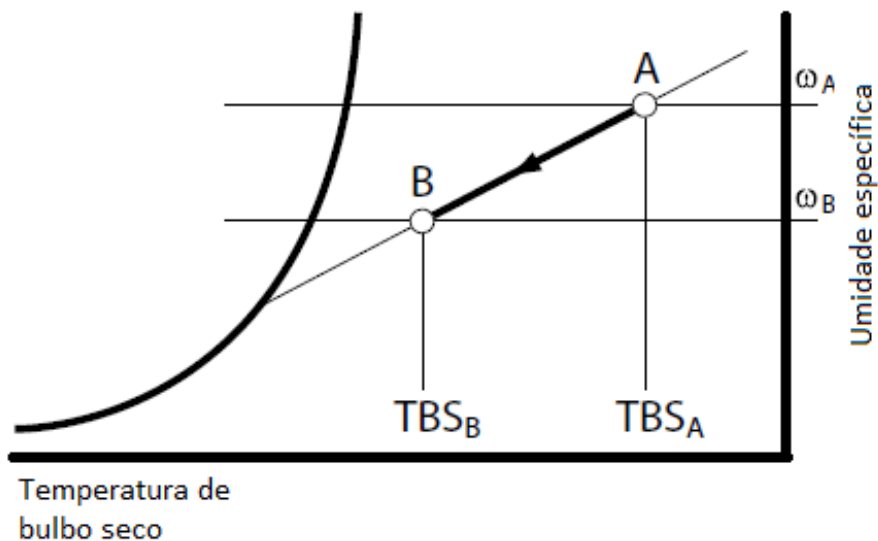


Figura 6: Resfriamento com desumidificação [6].

Este processo pode ser efetivado por serpentina de água gelada ou de expansão direta ou ainda por lavador de água gelada [6].

2.4.4 Aquecimento simples

Este processo se caracteriza pela elevação da temperatura de bulbo seco, com acréscimo exclusivamente de calor sensível ao ar, sem alteração da umidade específica do ar, conforme evidenciado na Figura 7, onde o ar passa do ponto A para o ponto B. Como a umidade específica permanece constante, a umidade relativa da mistura irá se reduzir, uma vez que a nova condição irá se afastar da curva de saturação.

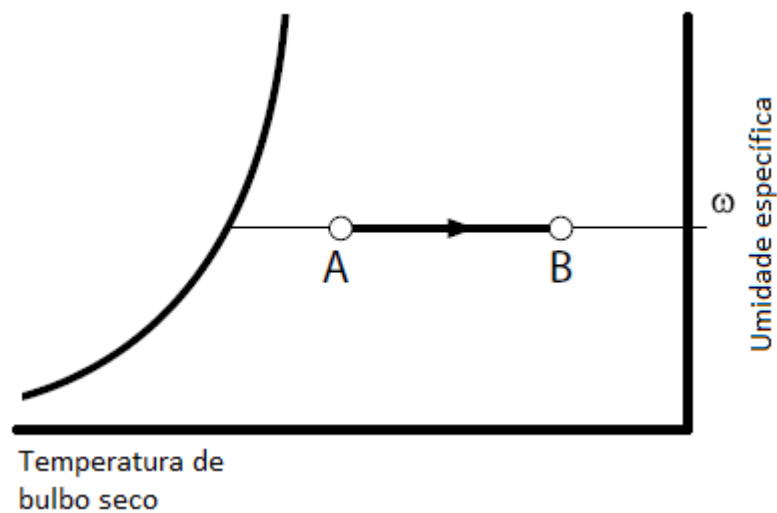


Figura 7: Aquecimento simples [6].

Este processo pode ser promovido por serpentinas de aquecimento (alimentadas por água quente, vapor ou pela condensação de gases refrigerantes) ou resistências elétricas [6].

2.4.5 Umidificação simples

De acordo com a Figura 8, este processo se caracteriza pela elevação da umidade específica do ar, com a manutenção da temperatura de bulbo seco constante.

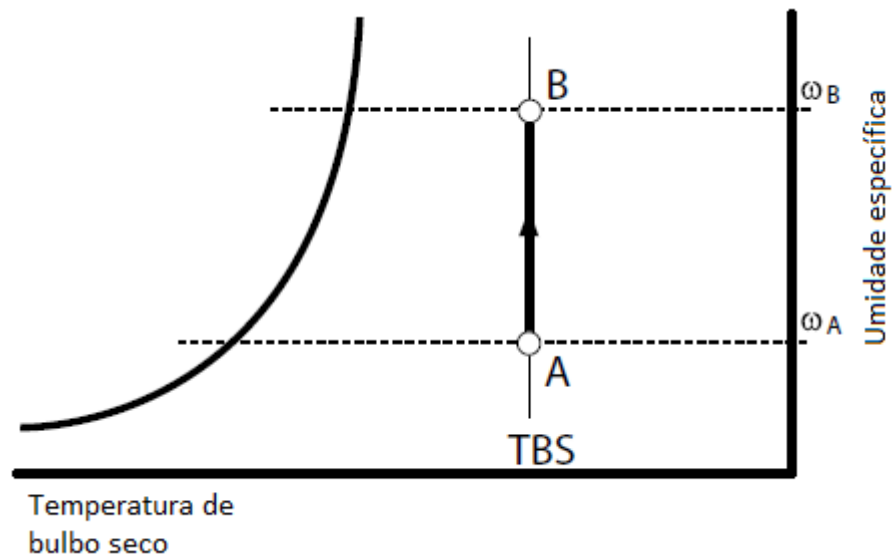


Figura 8: Umidificação simples [6].

Isto é feito mediante o acréscimo exclusivamente de calor latente ao ar (evaporação de água), o qual é promovido por injeção de vapor (alimentado por linhas de vapor saturado ou pela evaporação de água aquecida por resistências elétricas de imersão). Consequentemente a umidade relativa do ar irá se elevar-se, uma vez que a condição desta irá se aproximar da curva de saturação [6].

2.4.6 Desumidificação com Aquecimento

Este processo se caracteriza pela redução da umidade específica do ar (conteúdo de calor latente), acompanhado pela elevação da temperatura de bulbo seco do ar (conteúdo de calor sensível), conforme se verifica na Figura 9.

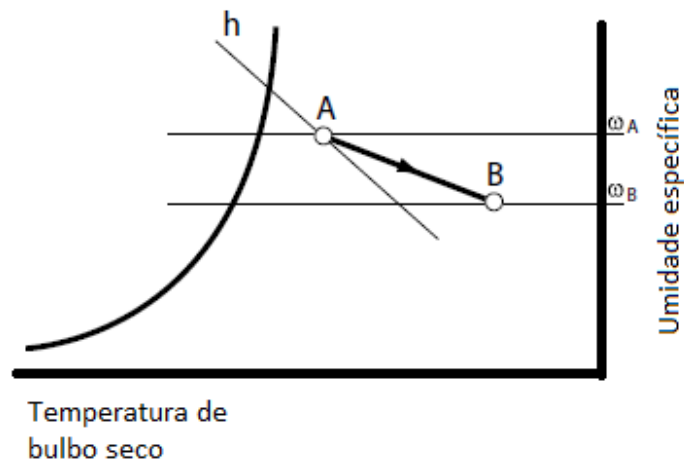


Figura 9: Desumidificação com aquecimento [6].

Este processo geralmente é promovido por desumidificador químico [6].

2.4.7 Umidificação e Resfriamento não Adiabático

Este processo se caracteriza pela redução do conteúdo de calor sensível (TBS), acompanhada pela elevação do conteúdo de calor latente do ar, sendo o resultado da somatória do fluxo energético (entrada + saída de energia) maior que zero. Como evidenciado na Figura 10, a mistura passa da condição A para a condição B, reduzindo a TBS e elevando simultaneamente o calor latente e a entalpia.

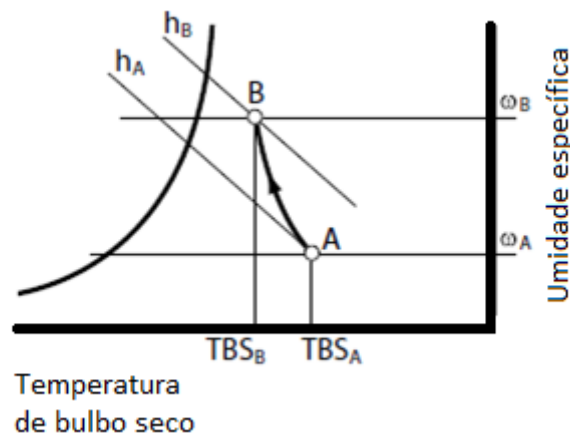


Figura 10: Umidificação e resfriamento não adiabático [6].

Este processo pode ser promovido por lavador de água quente. No caso, a temperatura da água utilizada estaria acima da temperatura de bulbo úmido do ar no ambiente, produzindo, além da troca de calor sensível do ar ambiente pelo calor latente da água, um acréscimo na energia total do sistema (entalpia). Se utilizássemos água resfriada ao invés de quente, com uma temperatura inferior à do ponto de orvalho do ambiente, ocorreria a remoção de umidade do ar, tornando o processo semelhante ao de resfriamento com desumidificação (Figura 6). Por outro lado, do ponto de vista teórico, se a água não estivesse suficientemente fria (acima do ponto de orvalho do ambiente), ocorreria um processo de umidificação e resfriamento não adiabático, porém em ponto com entalpia menor que a do ambiente. Porém, do ponto de vista prático nota-se pouca viabilidade econômica neste processo [6].

2.5 Convecção com Troca Mássica

Além da transferência de calor, outro fenômeno recorrente nos processos micrométricos é a convecção de massa, esta se define como a transferência de massa entre uma superfície e um fluido em movimento, o movimento do fluido afeta consideravelmente a transferência de massa ao remover o fluido com alta concentração de perto da superfície e substituindo-o por um fluido mais afastado e de menor concentração [8].

Para entendermos melhor o fenômeno de convecção de massa encontrados em alguns processos de condicionamento de ar é necessário o conhecimento de alguns parâmetros adimensionais que serão apresentados a seguir.

2.5.1 O número de Reynolds

A transição de um escoamento laminar para turbulento sobre uma superfície depende de vários fatores como a rugosidade superficial, geometria, velocidade do escoamento, temperatura da superfície etc. Após exaustivas experiências feitas na década de 1880 Osborn Reynolds descobriu que o regime de escoamento depende principalmente da razão entre as forças de inércia e as forças viscosas do fluido [8]. Esta razão é chamada de número de Reynolds que é a quantidade adimensional expressa pela Equação 2.1.

$$\text{Re} = \frac{\rho V L}{\mu} \quad (2.1)$$

onde:

ρ = massa específica

V = Velocidade do fluido

L = Comprimento característico

μ = Viscosidade do fluido

Grandes valores do número de Reynolds implicam que as forças de inércia são preponderantes sobre as forças viscosas e assim as forças viscosas não podem impedir flutuações aleatórias e rápidas do fluido. Para pequenos e moderados números de Reynolds as forças viscosas são grandes o suficiente para suprimir estas forças e manter o fluido escoando através de linhas de corrente, assim o escoamento é turbulento no primeiro caso e laminar no segundo [8].

2.5.2 O Número de Prandtl

Quando um fluido escoar por uma superfície sólida a camada de fluido adjacente a ela possui velocidade zero em relação a mesma, forma-se uma camada adjacente a ela denominada camada limite hidrodinâmica, é a região na qual a velocidade do fluido varia de 0 a 99% [8] da velocidade de escoamento das camadas de fluido mais distantes da superfície. Analogamente a camada limite térmica se desenvolve quando um fluido escoar por uma superfície com uma temperatura diferente da sua, as camadas mais próximas da superfície possuem temperaturas mais próximas a temperatura da superfície, e a medida em que nos afastamos da superfície a temperatura tende a do fluido. A espessura relativa da camada limite hidrodinâmica e térmica é descrita pelo parâmetro adimensional do número de Prandtl [8] definido pela Equação 2.2.

$$\text{Pr} = \frac{\mu C_p}{k} \quad (2.2)$$

onde:

μ = Viscosidade cinemática do fluido

C_p = Calor específico do fluido

k = Coeficiente de condutividade térmica

O número de Prandtl varia entre 0,01 para os metais líquidos e 100.000 para óleos pesados. Para a água o número de Prandtl é na ordem de 10 e para gases é cerca de 1, o que indica que tanto a quantidade de movimento quanto o calor dissipam-se através do fluido aproximadamente na mesma taxa [8].

2.5.3 O Número de Nusselt

Como podemos ver, em estudos de convecção é prática comum adimensionalizar as equações e combinar variáveis que se agrupam em números adimensionais para se reduzir o número total de variáveis. Também é comum adimensionalizar o coeficiente de transferência de calor h usando o número de Nusselt [8] definido pela Equação 2.3.

$$\text{Nu} = \frac{h_c L}{k} \quad (2.3)$$

onde:

h_c = Coeficiente de transferência de calor

L = Comprimento equivalente

k = Coeficiente de condutividade térmica

A transferência de calor através do fluido ocorre por condução quando o fluido está imóvel e por convecção quando o fluido envolve algum movimento, o número de Nusselt representa então o aumento da transferência de calor ao fluido como resultado da convecção em relação a condução do mesmo fluido em toda a camada. Quanto maior o número de Nusselt maior será o calor transferido por convecção [8].

2.5.4 O Número de Schmidt

Como explicado previamente na convecção de calor as magnitudes relativas à difusão da quantidade de movimento e de calor nas camadas limite hidrodinâmica e térmica são expressas pelo número de Prandtl. A quantidade correspondente à convecção de massa entre as mesmas camadas é o número de Schmidt expressa pela Equação 2.4 que representa as magnitudes relativas a difusão molecular da quantidade de movimento e de massa nas camadas limite hidrodinâmica e de concentração respectivamente [8].

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (2.4)$$

onde:

ν = Viscosidade cinemática do fluido

D = Coeficiente de difusão de massa

Um número de Schmidt próximo da unidade ($Sc = 1$) indica que a transferência da quantidade de movimento e de massa por difusão são comparáveis e que as camadas limite hidrodinâmica e de concentração quase coincidem uma com a outra [8].

2.5.5 O Número de Sherwood

Frequentemente na análise de convecção de calor, é conveniente expressar o coeficiente de transferência de calor na forma adimensionalizada do número de Nusselt. A

quantidade correspondente na convecção de massa é o número de Sherwood expresso pela Equação 2.5.

$$Sh = \frac{h_m L}{D} \quad (2.5)$$

onde:

h_m = Coeficiente de transferência de massa

L = Comprimento equivalente

D = Coeficiente de difusão de massa

2.5.6 O Número de Lewis

Finalmente para representar as magnitudes relativas da difusão de calor nas camadas limite térmica e de concentração é necessário mais um número adimensional, este é chamado número de Lewis expresso pela Equação 2.6 e representa a razão entre a difusividades térmica e de massa [8].

$$Le = \frac{Sc}{Pr} \quad (2.6)$$

onde:

Sc = Número de Schmidt

Pr = Número de Prandtl

O valor do número de Lewis para o ar úmido é igual 0,865, e aumenta ligeiramente com a temperatura, portanto a para uma mistura de água e vapor d'água, a relação entre os coeficientes de transferência de calor e massa pode ser expressa com boa precisão pela Equação 2.7 conhecida como Relação de Lewis e é comumente utilizadas em aplicações de ar condicionado [8].

$$h_c = \rho C_p h_m \quad (2.7)$$

onde:

h_c = Coeficiente de transferência de calor

ρ = Massa específica do fluido

C_p = Calor específico do fluido

h_m = Coeficiente de transferência de massa

2.6 Saturador Adiabático

A saturação adiabática consiste em um processo onde a mistura ar-vapor entra em contato com água em um ambiente isolado, se caso o ar não estiver saturado, uma parte da água se evaporará e a temperatura da mistura gasosa irá diminuir [9].

O dispositivo onde ocorre a saturação adiabática é chamado de saturador adiabático que nada mais é que um dispositivo ideal perfeitamente isolado termicamente do ambiente e de comprimento infinito, ou seja, a área de troca térmica entre o ar e a água é infinitamente grande, a Figura 11 apresenta um desenho esquemático de um saturador adiabático [1].

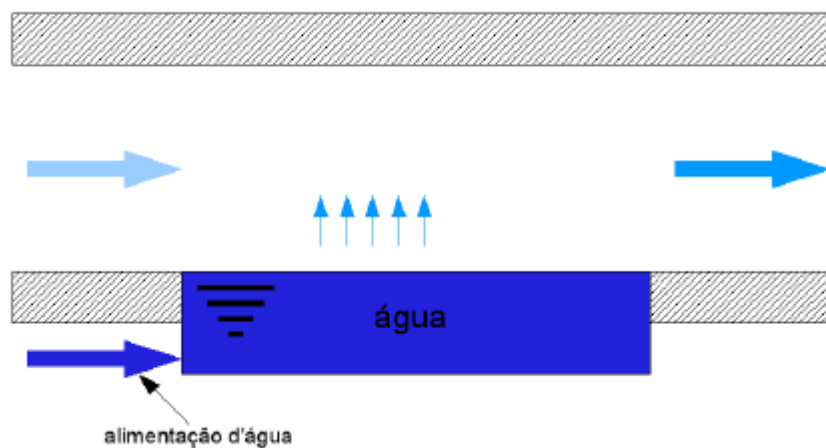


Figura 11: Desenho esquemático de um saturador adiabático ideal [1].

O aparato é alimentado com um fluxo de ar contínuo cujas temperatura e umidade na entrada são mantidas constantes. Uma câmara de água, que está em contato com a corrente de ar é constantemente alimentada. A diferença de pressão parcial entre o vapor no ar e na água provoca a evaporação da água na câmara, aumentando a umidade do ar. Como a área de contato entre a água e o ar é infinita, na saída, o ar se encontra saturado e em equilíbrio termodinâmico com a água, já que a pressão parcial do vapor no ar será igual à pressão parcial da água [1]. Em um saturador adiabático, o líquido troca calor sempre com ar não saturado e sua temperatura de

equilíbrio termodinâmico com o ar define a temperatura de bulbo úmido termodinâmica [10]. Esta temperatura entretanto não deve ser confundida com a TBU lida com um termômetro cujo o bulbo está envolto em uma gaze embebida em água.

A TBU resulta de um processo de equilíbrio dinâmico de na transferência simultânea de calor e massa dependente de vários fatores, como a velocidade do ar, a geometria do bulbo, etc. A área da mecha é finita e as condições de transferência de calor e massa não são ideais (como no saturador adiabático).

Já a temperatura de bulbo úmido termodinâmica decorre de uma condição de equilíbrio termodinâmico num processo ideal de saturação adiabática e trata-se de uma propriedade termodinâmica do ar.

Em 1911 Carrier admitiu não haver diferença entre estes dois valores, posteriormente em 1922 Lewis concluiu que se o adimensional número de Lewis fosse unitário a hipótese de Carrier estaria correta.

3. Materiais e Métodos

3.1 Método Numérico

Para estabelecer o estado termodinâmico da mistura ar-vapor foi utilizado o modelo de Dalton. Com a implementação deste modelo e a utilização de alguns dados de entrada é possível estimar o estado termodinâmico após os processos psicrométricos e com a utilização de protótipo experimental, buscou-se validar tais previsões. Para tal foi utilizada uma programação em MATLAB para se construir uma calculadora psicrométrica que calcula, com base em alguns dados de entrada, o estado termodinâmico do ar atmosférico assim como o valor de saída após alguns processos psicrométricos. A programação MATLAB completa pode ser vista no APÊNDICE A.

Todos as fórmulas foram retiradas do “Fundamentals Handbook” da ASHRAE.

3.1.1 Dados de Entrada

Para determinar o estado termodinâmico do ar antes e depois dos processos psicrométricos foi desenvolvido um programa em MATLAB cujos valores de entrada são:

c_p = Calor específico a pressão constante (kJ/kg*K)

V_1 = Vazão volumétrica total do sistema (m³/min)

P = Pressão atmosférica (kPa)

R_{ar} = Constante universal dos gases perfeitos (kJ/kg*K)

ϕ_1 = Umidade relativa de entrada (%)

ϕ_2 = Umidade relativa de saída (%)

T_1 = Temperatura de entrada (°C)

T_2 = Temperatura de saída (°C)

$T_{\text{água}}$ = Temperatura da água no borbulhador (°C)

Em programação MATLAB os dados de entrada são inseridos como mostra a Figura 12.

```

32 %CONSTANTES
33 cp=1.005; %calor específico a pressão constante (KJ/Kg*K)
34 V1=0.004; %vazão volumétrica total do sistema (m^3/min)
35 P=input (' DIGITE A PRESSÃO ATMOSFÉRICA:'); %pressão atmosférica (Pa)
36 Rar=0.287; %constante universal dos gases perfeitos (KJ/Kg*K)
37 fil=input (' DIGITE A UMIDADE RELATIVA DE ENTRADA:'); %umidade relativa 1
38 fi2=input (' DIGITE A UMIDADE RELATIVA DE SAIDA:'); %umidade relativa 2
39
40 %Temperaturas
41 T1= input (' DIGITE A TEMPERATURA DO AR DE ENTRADA EM GRAUS CELSIUS:'); %ar ambiente (°Celsius)
42 T2=input (' DIGITE A TEMPERATURA DO AR DE SAIDA EM GRAUS CELSIUS:'); %ar saída (°Celsius)
43 Tagua= input (' DIGITE A TEMPERATURA DA ÁGUA EM GRAUS CELSIUS:'); %água do borbulhador (°Celsius)

```

Figura 12: Dados de entrada do programa MATLAB.

Em alguns cálculos é necessária a utilização de propriedades tabeladas, a matriz contendo as propriedades termodinâmicas tabeladas pode ser encontrada na Figura 13.

```

11 %Propriedades termodinâmicas tabeladas, T, Psat, hf, hg
12 %Tabela A-4: Água saturada - Tabela de temperatura
13 %M(linha, coluna)
14 - M=[0.01 0.6117 0.001 2500.9;
15 5 0.8725 21.020 2510.1;
16 10 1.2281 42.022 2519.2;
17 15 1.7057 62.982 2528.3;
18 20 2.3392 83.915 2537.4;
19 25 3.1698 104.83 2546.5;
20 30 4.2469 125.74 2555.6;
21 35 5.6291 146.64 2564.6;
22 40 7.3851 167.53 2573.5;
23 45 9.5953 188.44 2582.4;
24 50 12.352 209.34 2591.3;
25 55 15.763 230.26 2600.1;
26 60 19.947 251.18 2608.8;
27 65 25.043 272.12 2617.5;
28 70 31.202 293.07 2626.1];

```

Figura 13: Matriz de propriedades termodinâmicas da água.

A matriz M contém as propriedades termodinâmicas (temperatura, pressão de saturação, entalpia do líquido, entalpia do vapor) da água.

3.1.2 O Modelo de Dalton das Pressões Parciais

O modelo da mistura de gases perfeitos observada por John Dalton estabelece que a pressão total da mistura, é igual a soma das pressões que cada gás exerceria se ocupasse isoladamente o volume do reservatório, que contém a mistura e estivesse a temperatura da mistura. O modelo de Dalton para mistura de gases ideais propõe que as propriedades de cada

um dos componentes da mistura gasosa podem ser determinadas através da hipótese de que este componente ocupa o volume total do recipiente na mesma temperatura da mistura. É necessário salientar que esse modelo prevê que a presença de um gás na mistura não influencia nas propriedades de outro [11]. A partir dessas premissas, foi possível chegar nas seguintes equações:

3.1.3 Pressão do ar seco e do vapor

O cálculo das pressões do ar seco e do vapor na mistura é dado pela Equação 3.1.

$$P_a = P - P_v \quad (3.1)$$

onde:

P_a = Pressão do ar seco (kPa)

P = Pressão atmosférica (kPa)

P_v = Pressão do vapor (kPa)

A pressão do vapor na mistura é dada pela Equação 3.2.

$$P_v = P_g * \emptyset \quad (3.2)$$

onde:

P_v = Pressão do vapor (kPa)

P_g = Pressão de saturação do ar (kPa)

\emptyset = Umidade relativa (%)

A programação MATLAB utilizada para o cálculo das pressões do ar seco e do vapor se encontra na Figura 14.

```

49 %Pressão ar (KPa)
50
51 - PsatT1 = Psat_alternativo(M,T1);
52 - PsatT2 = Psat_alternativo(M,T2);
53
54 - formatSpec = 'O valor da pressão de %d é %f';
55 - str = sprintf(formatSpec,T1,PsatT1)
56
57 - formatSpec = 'O valor da pressão de %d é %f';
58 - str = sprintf(formatSpec,T2,PsatT2)
59
60 - Pg1=PsatT1;
61 - Pg2=PsatT2;
62
63 - Pv1=Pg1*fi1;|
64 - Pv2=Pg2*fi2;
65
66 - Pa1=P-Pv1;
67 - Pa2=P-Pv2;

```

Figura 14: Programação MATLAB para cálculo das pressões de ar seco e vapor.

Para o cálculo da pressão de saturação, utilizamos uma rotina para realizar interpolações necessárias, de acordo com as temperaturas de entrada, a rotina utilizada é mostrada na Figura 15.

```

1      %CALCULA Psat
2      function y = Psat_alternativo(M,Tl)
3
4      for i =1:15
5          a=M(i,1);
6          c=M(i,2);
7          if i > 1
8              b = M(i-1,1);
9              d = M(i-1,2);
10         end
11
12         if M(i,1) == Tl
13             %formatSpec = 'A entalpia de %d = %f';
14             %str = sprintf(formatSpec,M(i,1),M(i,2))
15             y = M(i,2);
16             break;
17         end
18
19         if M(i,1) > Tl
20             %formatSpec = 'O valor da entalpia de %d é %f';
21             if (b-a) ~= 0
22                 y = ((Tl-a)*(d-c)/(b-a)) + c;
23                 %str = sprintf(formatSpec,Tl,hgl)
24                 %str = sprintf(x,'%0.5f')
25             end
26             break;
27         end
28     end
29
30 end

```

Figura 15: Rotina MATLAB de interpolação para valores da pressão de saturação do vapor.

3.1.4 Umidade específica

A umidade específica da mistura ar-vapor é calculada segundo a Equação 3.3.

$$\omega = 0,622 * \left(\frac{P_v}{P - P_v} \right) \quad (3.3)$$

onde:

ω = Umidade específica (kg H₂O / kg ar seco)

P_v = Pressão do vapor (kPa)

P = Pressão atmosférica (kPa)

Na Figura 16 podemos observar as linhas de código na programação MATLAB para cálculo da umidade específica.

```
75 %Umidade específica (kg h2o/ kg ar seco)
76 - w1=0.622*(Pv1/(P-Pg1));
77 - w2=0.622*(Pv2/(P-Pg2));
```

Figura 16: Programação MATLAB para cálculo da umidade específica.

3.1.5 Entalpia

O cálculo da entalpia da mistura pode ser realizado utilizando a Equação 3.4.

$$h = cp * T + \omega * h_g \quad (3.4)$$

onde:

h = Entalpia da mistura (kJ / kg)

cp = Calor específico à pressão constante (kJ /kg °C)

T = Temperatura (°C)

ω = Umidade específica (kg água / kg ar seco)

h_g = Entalpia do vapor (kJ/kg)

O cálculo da entalpia da mistura em programação MATLAB se encontra na Figura 17.

```
80      %CÁLCULO DAS ENTALPIAS
81 -    hg1 = hg_alternativo(M,T1);
82 -    hg2 = hg_alternativo(M,T2);
83
84 -    formatSpec = 'O valor da entalpia de %d é %f';
85 -    str = sprintf(formatSpec,T1,hg1)
86
87 -    formatSpec = 'O valor da hg2 de %d é %f';
88 -    str = sprintf(formatSpec,T2,hg2)
89
90 -    h1=(cp*T1)+(w1*hg1);
91 -    formatSpec = 'O valor da entalpia de %d é %f';
92 -    str = sprintf(formatSpec,hg1,h1)
93
94 -    h2=(cp*T2)+(w2*hg2);
95 -    formatSpec = 'O valor da entalpia de %d é %f';
96 -    str = sprintf(formatSpec,hg2,h2)
```

Figura 17: Programação MATLAB para cálculo da entalpia.

Nesta etapa novamente é necessário uma rotina para realizar as interpolações necessárias de acordo com as temperaturas de entrada para se obter a entalpia do vapor a temperatura de entrada T , a rotina utilizada se encontra na Figura 18.

```

1      %CALCULA hg
2      function y = hg_alternativo(M,Tl)
3
4      for i =1:15
5          a=M(i,1);
6          c=M(i,4);
7          if i > 1
8              b = M(i-1,1);
9              d = M(i-1,4);
10         end
11
12         if M(i,1) == Tl
13             %formatSpec = 'A entalpia de %d = %f';
14             %str = sprintf(formatSpec,M(i,1),M(i,4))
15             y = M(i,4);
16             break;
17         end
18
19         if M(i,1) > Tl
20             %formatSpec = 'O valor da entalpia de %d é %f';
21             if (b-a) ~= 0
22                 y = ((Tl-a)*(d-c)/(b-a)) + c;
23                 %str = sprintf(formatSpec,Tl,hg1)
24                 %str = sprintf(x,'%0.5f')
25             end
26             break;
27         end
28     end
29
30 end

```

Figura 18: Rotina de interpolação utilizada para o cálculo da entalpia do vapor.

3.1.6 Volume específico

O cálculo do volume específico de um mistura ar-vapor se dá pela Equação 3.5.

$$v = R_{ar} * \left(\frac{T}{P_a}\right) \quad (3.5)$$

onde,

R_{ar} = Constante universal dos gases perfeitos (kJ/kg K)

T = Temperatura do ar (Kelvin)

P_a = Pressão do ar seco (kPa)

Na Figura 19 está explicitada as linhas de código em MATLAB utilizados para o cálculo do volume específico.

```
70 %Volume especifico (m^3/kg ar seco)
71 - v1=(Rar*T11)/Pa1;
72 - v2=(Rar*T22)/Pa2;
```

Figura 19: Cálculo do volume específico em MATLAB.

3.1.7 Temperatura de bulbo úmido termodinâmica

Como explicada anteriormente a temperatura da água em um saturador adiabático é chamada de temperatura de bulbo úmido termodinâmica e sua entalpia por ser calculada pela Equação 3.6.

$$h_2^* = h_1 + (\omega_2^* - \omega_1) * h_{\acute{a}gua} \quad (3.6)$$

onde,

h_2^* = Entalpia do ar de saída (kJ/kg)

h_1 = Entalpia do ar de entrada (kJ/kg)

ω_2^* = Umidade específica do ar de saída (kg H₂O / kg ar seco)

ω_1 = Umidade específica do ar de saída (kg H₂O / kg ar seco)

$h_{\acute{a}gua}$ = Entalpia da água (kJ/kg)

Podemos ver a linha de comando utilizada no MATLAB na Figura 20.

```

106 %ENTALPIA DE BULBO UMIDO TERMODINÂMICO
107 %h1+(w2t-w1)*hagua=h2t
108 - h2t=h1+(w2-w1)*hagua;
109 %h2t=h2;
110 %hagua=(h2t-h1)/(w2-w1);

```

Figura 20: Rotina em MATLAB para cálculo da entalpia da temperatura de bulbo úmido termodinâmica.

3.1.8 Construção de Gráficos

Para a melhor compreensão dos resultados experimentais a utilização de gráficos é de fundamental importância. Para gerar gráficos com os valores calculados e compará-los com os dados experimentais foi desenvolvida uma rotina no MATLAB que exporta os resultados calculados para o Microsoft EXCEL onde as informações foram representadas em gráficos que serão mostradas futuramente neste trabalho. A rotina MATLAB utilizada para exportação dos resultados para uma planilha em EXCEL está mostrada na Figura 21.

```

190 - N=[cp;
191     fil;
192     fi2;
193     h1;
194     h2;
195     h2t;
196     hagua;
197     hgl;
198     hg2;
199     magua;
200     mar;|
201     P;
202     T1;
203     T2;
204     Tagua;
205     Tagua_tbu;
206     v1;
207     v2;
208     w1;
209     w2;
210     Rar];
211
212
213 - xlswrite('resultados.xls',N,'resultados2','B28');

```

Figura 21: Rotina MATLAB utilizada para exportar os resultados calculados para o Microsoft EXCEL.

3.2 Método Experimental

Para a coleta de dados experimentais, foi desenvolvido um protótipo experimental de forma a simular um saturador adiabático, o protótipo foi construindo utilizando materiais de baixo custo e de fácil obtenção. Os materiais utilizados se encontram listados a seguir:

- Recipiente de isopor
- Mangueiras de silicone
- Bomba de aquário
- Resina epóxi

Um recipiente de isopor foi utilizado para simular um ambiente adiabático, neste foram feitos dois furos, um na lateral inferior e um no topo por onde foram fixadas duas mangueiras de silicone com a resina epóxi de forma a vedar por completo o orifício. A mangueira lateral inferior foi conectada à bomba de aquário. Uma foto do protótipo experimental e uma desenho esquemático de seu funcionamento são mostradas na Figura 22.

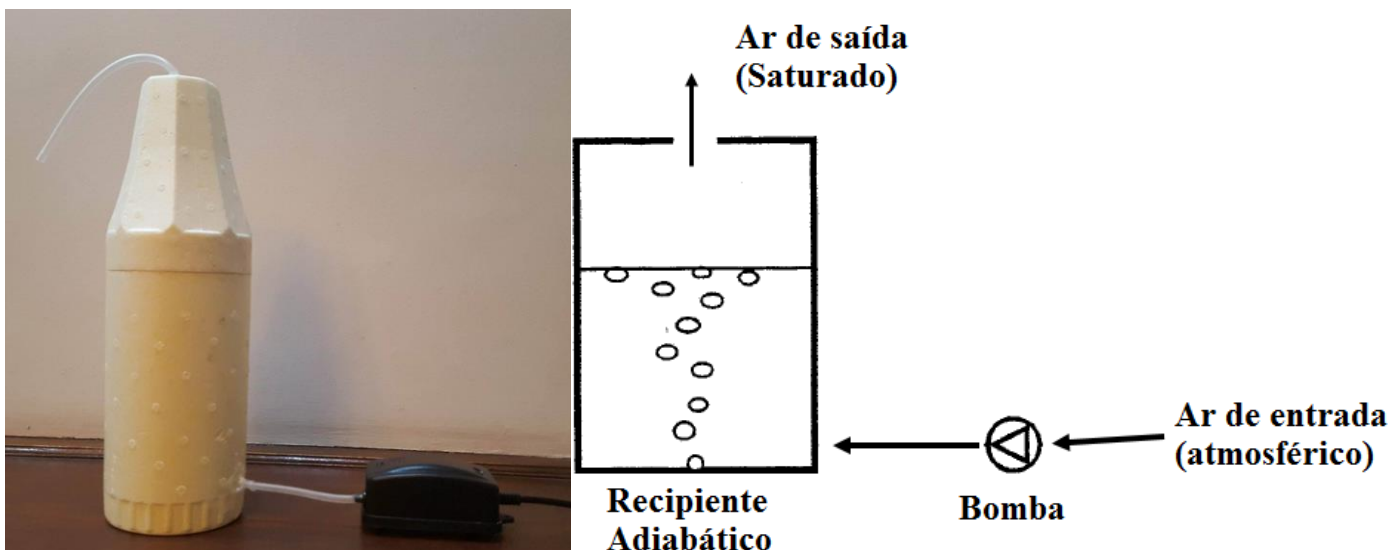


Figura 22: Foto do protótipo experimental a esquerda e desenho esquemático do funcionamento a direita.

Durante os experimentos o recipiente é preenchido com água e a bomba é ligada, o ar ambiente é bombeado para dentro do recipiente, onde borbulha e finalmente sai pela mangueira na parte superior do protótipo. Após este experimento, a água no recipiente foi substituída por

gelo e o mesmo procedimento foi realizado. Em ambos os experimentos foram realizadas as seguintes medições:

- Temperatura de bulbo seco do ar ambiente
- Temperatura da água/gelo no recipiente
- Temperatura de bulbo seco do ar de saída
- Temperatura de bulbo úmido do ar ambiente
- Umidade relativa ambiente
- Umidade relativa do ar de saída

Foram realizadas 6 medições em cada experimento e uma média aritmética dos resultados foi feita. Uma imagem do protótipo durante os experimentos pode ser vista na Figura 23.



Figura 23: Imagem do protótipo durante os experimentos.

Os experimentos foram realizados em 3 dias distintos, com condições diferentes de temperatura e umidade relativa do ar ambiente.

Os instrumentos de medição utilizados foram os seguintes:

- Termômetro digital com sensor externo
- Termômetro digital Bodum, modelo KT300
- Higrômetro analógico de cabelo humano Fischer
- Psicrômetro analógico

Na Figura 24, fotos dos instrumentos utilizados são apresentados.



Figura 24: Instrumentos de medição utilizados.

4. Resultados e Discussão

4.1 Aquisição de dados

A temperatura de bulbo úmido termodinâmica é função apenas da temperatura e umidade relativa do ar que entra no saturador ($T1$, $\varnothing1$), no caso do nosso experimento o ar atmosférico que é bombeado para dentro do borbulhador.

Para avaliarmos o protótipo em diferentes condições foram realizados 3 experimentos em dias distintos, com valores de umidade e temperatura diferentes. Em cada dia foram realizados dois experimentos, um com o protótipo contendo água e em seguida outro experimento com gelo.

Também foram realizadas medições de temperatura e humidade do ar de saída do borbulhador ($T2$, $\varnothing2$) nos experimentos assim como as temperaturas de bulbo úmido (TBU), lida em um psicrômetro analógico e a temperatura de bulbo úmido termodinâmica que neste caso é a temperatura da água/gelo no borbulhador ($T_{\text{água}}$, T_{gelo}). A média dos valores medidos em cada experimento é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2: Valores medidos nos experimentos.

DADOS OBTIDOS - EXPERIMENTO COM ÁGUA						
DIA	T1 (°C)	$\varnothing1$	T2 (°C)	$\varnothing2$	Tbu (°C)	Tágua (°C)
1	27,6	0,41	26,0	0,78	18,2	25,9
2	26,1	0,52	26,3	0,84	19,8	26,7
3	27,6	0,80	27,5	0,94	24,8	27,5

DADOS OBTIDOS - EXPERIMENTO COM GELO						
DIA	T1 (°C)	$\varnothing1$	T2 (°C)	$\varnothing2$	Tbu (°C)	Tgelo (°C)
1	27,2	0,44	14,2	0,34	18,5	1,7
2	26,1	0,50	16,9	0,49	19,8	2,7
3	27,6	0,77	18,4	0,53	24,3	1,9

4.2 Variações nos Estados Termodinâmicos do ar

Com base nas medições feitas, e como já era esperado, houve variação no estado termodinâmico do ar após este passar pelo protótipo experimental. Os gráficos mostrando a variação na temperatura e umidade medidas nos experimentos com água podem ser encontrados na Figura 25.

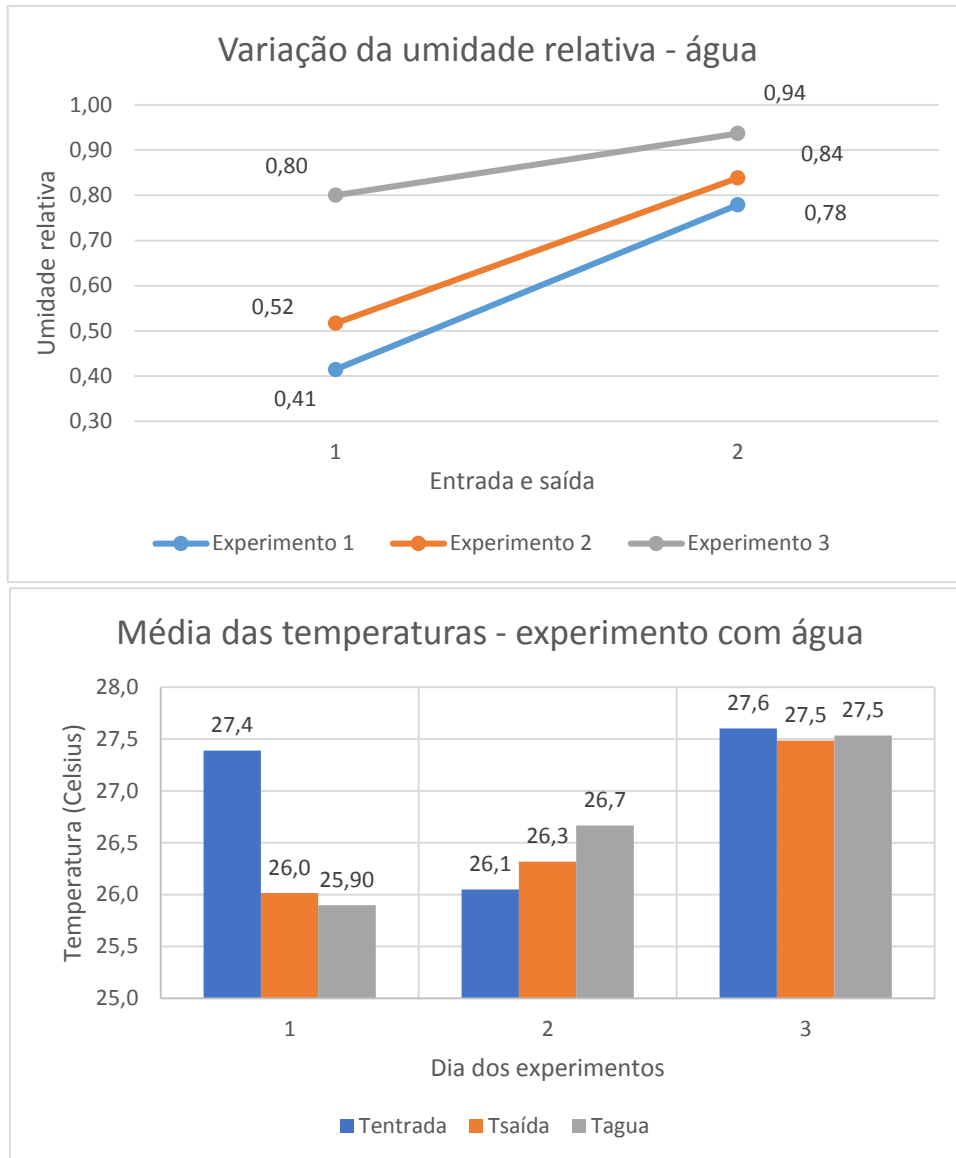


Figura 25: Variação das temperaturas e umidade relativa nos experimentos realizados com água.

Como podemos observar, ao passar pelo borbulhador, o ar atmosférico aumenta significativamente sua umidade relativa ao mesmo tempo que sua temperatura também foi alterada, porém esta tendeu a se igualar à temperatura da água contida no saturador, seja aumentando ou diminuindo sua temperatura. A mudança nos estados termodinâmicos do ar durante os experimentos com água podem ser representados na carta psicrométrica segundo a Figura 26.

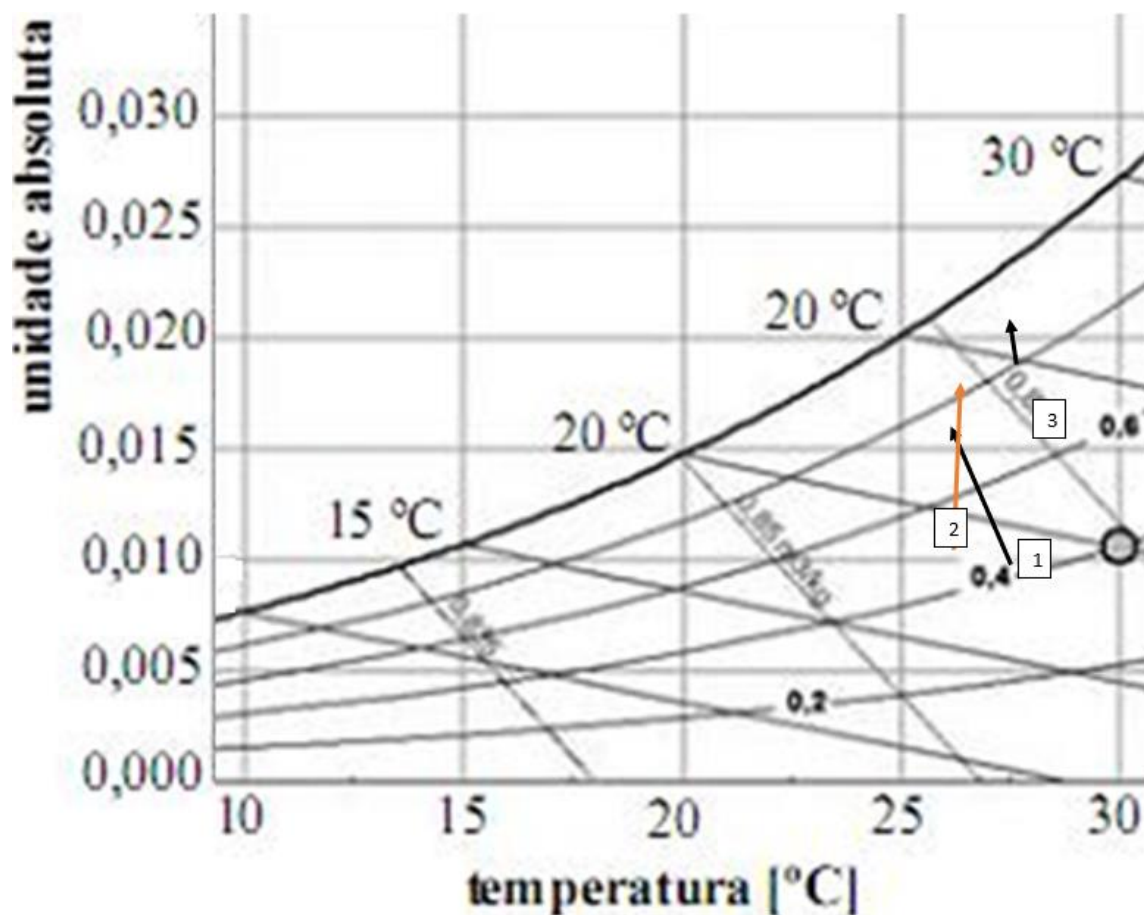


Figura 26: Mudança do estado termodinâmico do ar representado na carta psicrométrica - Experimentos com água

Podemos ver que todos os experimentos utilizando água no borbuhador aumentaram sua umidade relativa e absoluta, por outro lado a variação de temperatura foi menos significativa e sempre tendendo a se igualar a temperatura da água do borbuhador. Com isto podemos considerar que o processo que ocorreu no protótipo experimental foi o de umidificação simples, explicado na sessão 2.4.5 deste projeto. Neste experimento, enquanto o ar era borbuhado na água, parte desta evaporava o que aumenta a massa de vapor no ar e por definição sua umidade específica e relativa. Durante o borbuhamento o ar também troca calor com a água tendendo a

aumentar ou diminuir sua temperatura de forma a se igualar a temperatura da água (temperatura de bulbo úmido termodinâmica). Podemos observar também que o experimento 3 foi o que sofreu menor aumento em sua umidade relativa, isto pode ser explicado pelo fato do ar atmosférico de entrada já possui umidade relativa bem elevada (80%).

No caso dos experimentos contendo gelo no protótipo experimental houve queda tanto na temperatura, que mais uma vez tende a temperatura do gelo, como também ocorre a diminuição nos valores de umidade relativa, como podemos ver nos gráficos da Figura 27.

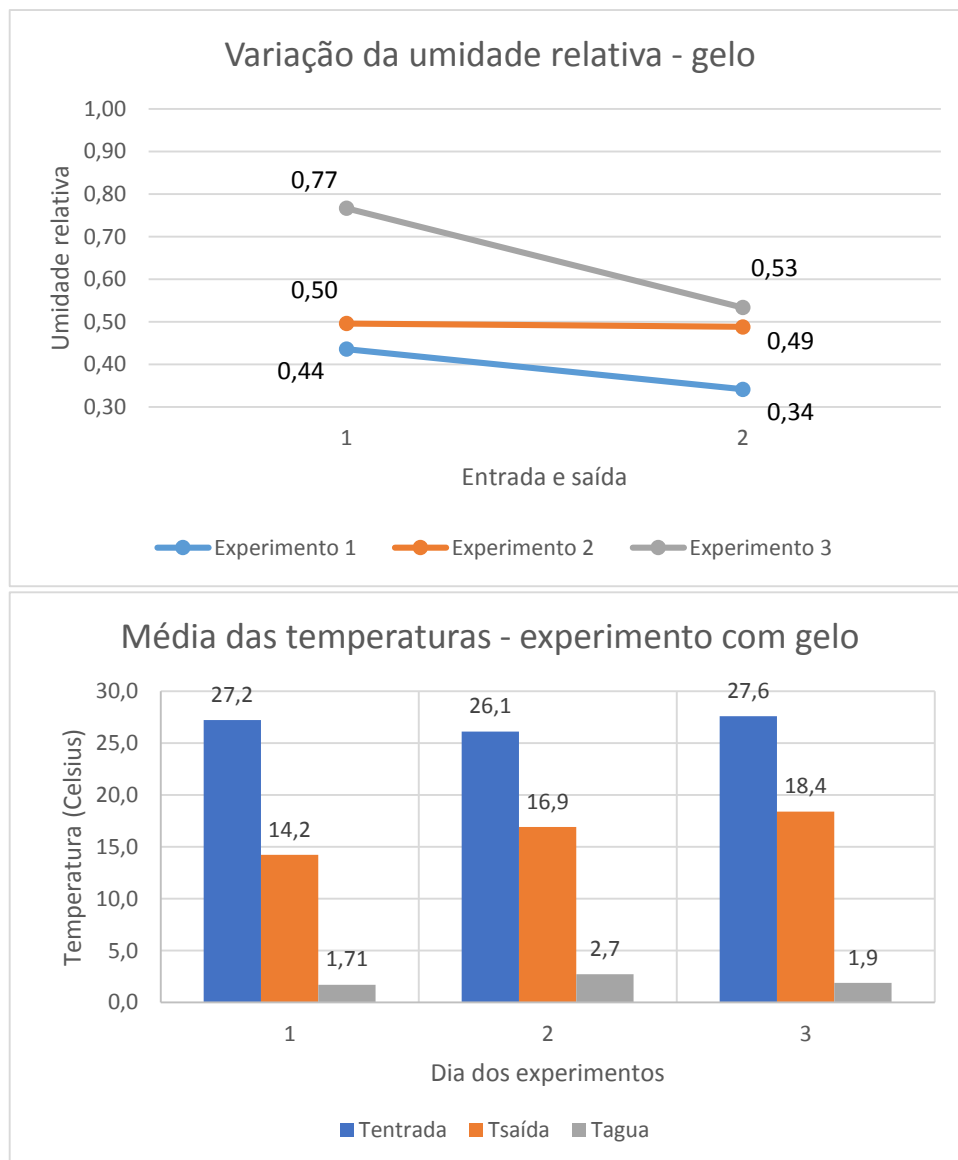


Figura 27: Variação das temperaturas e umidade relativa nos experimentos realizados com gelo.

A mudança nos estados termodinâmicos do ar durante os experimentos com gelo podem ser representados na carta psicrométrica segundo a Figura 28.

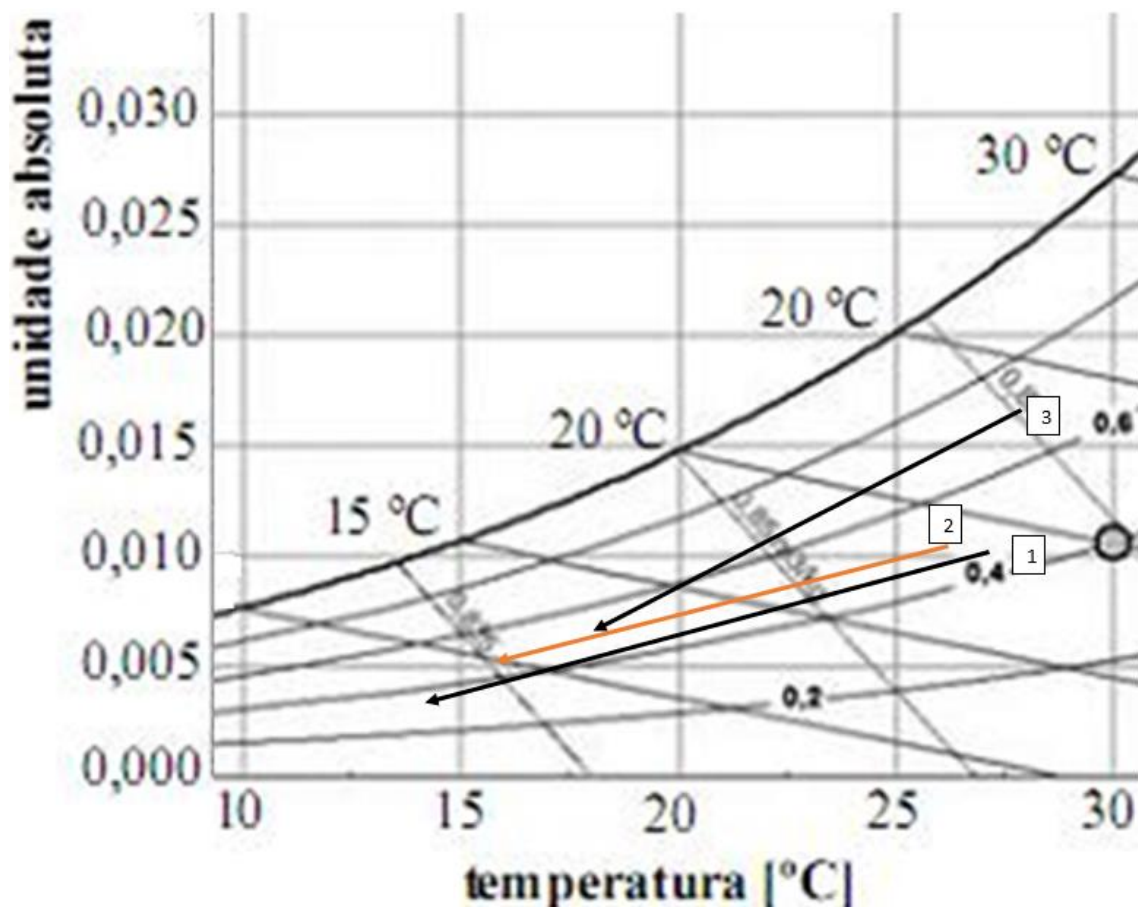


Figura 28: Mudança do estado termodinâmico do ar representado na carta psicrométrica - Experimentos com água.

Neste experimento, podemos ver que a variação de temperatura e umidade relativa se assemelha aos ocorridos nos processos de desumidificação com resfriamento, visto na sessão 2.4.3 deste trabalho. Durante este experimento o ar ao ser bombeado e entrar em contato com o gelo, se resfriava até valores abaixo do ponto de orvalho, quando isto ocorre o vapor de água presente no ar se condensa o que faz com que a umidade específica e relativa diminua.

Um detalhe interessante neste experimento é que no segundo dia de medições, embora a temperatura do ar tenha diminuído significativamente, a umidade relativa pouco se alterou, isso pode ser explicado pelo fato de que este dia foi o único em que o ar não se resfriou a uma temperatura abaixo do ponto de orvalho, como podemos ver pelo gráfico da Figura 29, o que indica que não houve condensação dentro do recipiente e por sua vez diminuição significativa na umidade relativa.

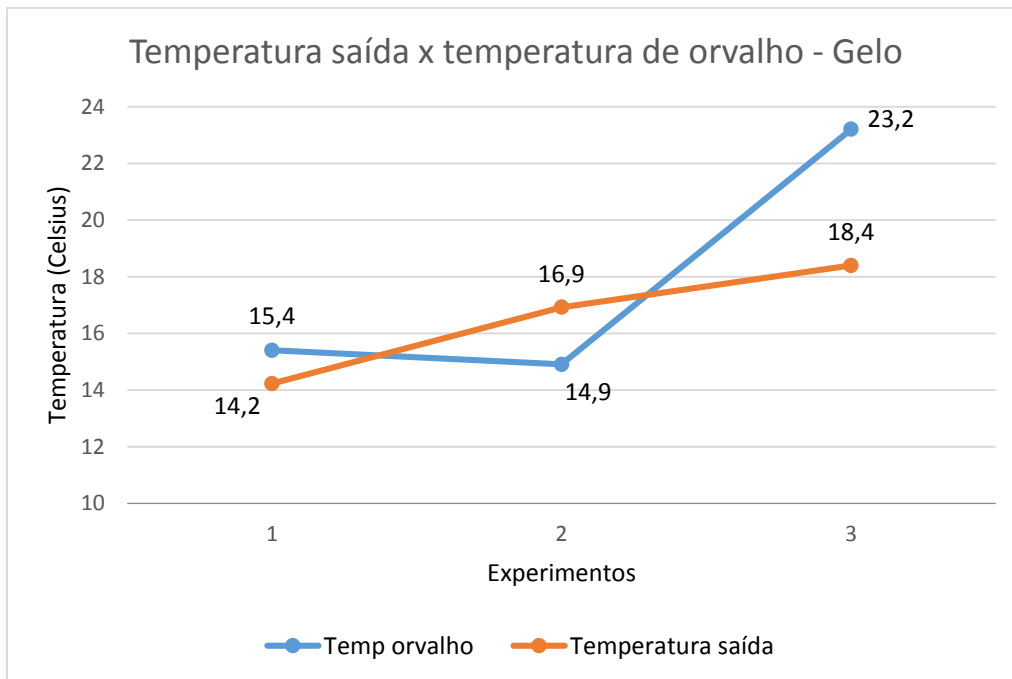


Figura 29: Temperaturas do ar de saída e temperaturas de orvalho durante os experimentos com gelo.

4.3 Temperatura de bulbo úmido Termodinâmica

Como visto anteriormente, a temperatura de bulbo úmido termodinâmica é função exclusivamente das propriedades do ar de entrada. Um saturador adiabático pode ser utilizado para determinar estas propriedades do ar, porém como este se trata de um processo ideal, na prática é mais comum a utilização de termômetros de bulbo úmido e psicrômetros para determinar o estado termodinâmico do ar ambiente. Como pudemos observar durante os experimentos, o protótipo experimental, se mostrou capaz de realizar um processo próximo ao de um saturador adiabático o que nos permite comparar as temperaturas de bulbo úmido termodinâmica, a temperatura da água contida no saturador e a TBU medida em um psicrômetro, e descobrir o quanto estes dados são precisos.

Para os cálculos da temperatura de bulbo úmido termodinâmica foram feitas as seguintes suposições:

- Processo adiabático, sem trocas de calor com o ambiente
- Umidade relativa de saída de 100%
- Temperatura do ar de saída e da água são iguais

Com os dados coletados do ar de entrada em cada experimento (temperatura e umidade relativa) e utilizando os modelos matemáticos e a calculadora psicrométrica desenvolvida em MATLAB apresentados neste trabalho, foi possível calcular a temperatura de bulbo úmido termodinâmica.

Uma comparação entre a temperatura de bulbo úmido termodinâmica, calculada para os valores do ar de entrada, com a TBU medida por um psicrômetro analógico e temperatura da água pode ser vista na Figura 30.

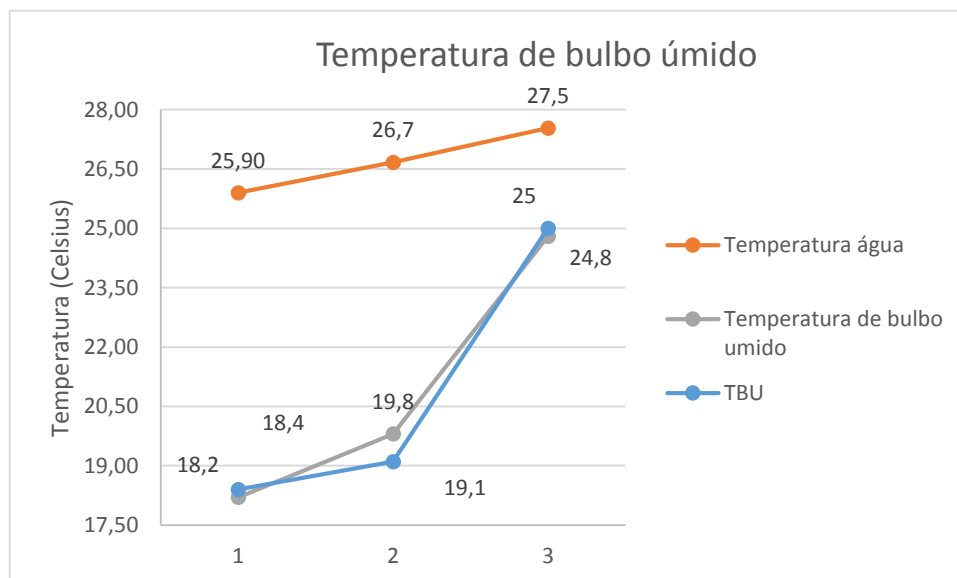


Figura 30: Comparação entre as temperaturas de bulbo úmido nos experimentos com água.

Podemos observar que a temperatura de bulbo úmido termodinâmica e a TBU são bastante similares, o que indica que ambos os métodos são eficazes para determinar as propriedades do ar atmosférico. Porém a teoria nos diz que em um saturador adiabático, a temperatura da água no saturador é a temperatura de bulbo úmido, e como podemos observar no gráfico, todas as temperaturas medidas da água ficaram significativamente acima das temperaturas esperadas. Alguns fatores podem ter influenciado para tais erros, como o fato de nosso protótipo experimental não funcionar exatamente da mesma forma de um saturador adiabático, nosso experimento utiliza um borbulhador para saturar o ar enquanto em um saturador o ar é soprado por cima de uma camada infinitamente longa de água. Além disso também utilizamos a premissa de que o ar sairia do borbulhador com umidade relativa de 100%, o que não ocorreu em nenhum dos nossos experimentos, o maior valor de umidade medido na saída do borbulhador foi de 94% no terceiro experimento, é interessante notar que

este foi o dia em que a temperatura da água mais se aproximou da temperatura de bulbo úmido termodinâmica assim como o dia em que obtivemos o menor valor de saturação, foi o dia em que a diferença entre as temperaturas de bulbo úmido termodinâmica e da água foram maiores. Isto nos indica que a capacidade de saturação do protótipo influencia diretamente na precisão da medida da temperatura de bulbo úmido termodinâmica e com isso a definição das propriedades de entrada.

Também realizamos o mesmo procedimento com os dados obtidos nos experimentos com gelo dentro do recipiente do protótipo experimental e o resultado em forma de gráfico pode ser visto na Figura 31:

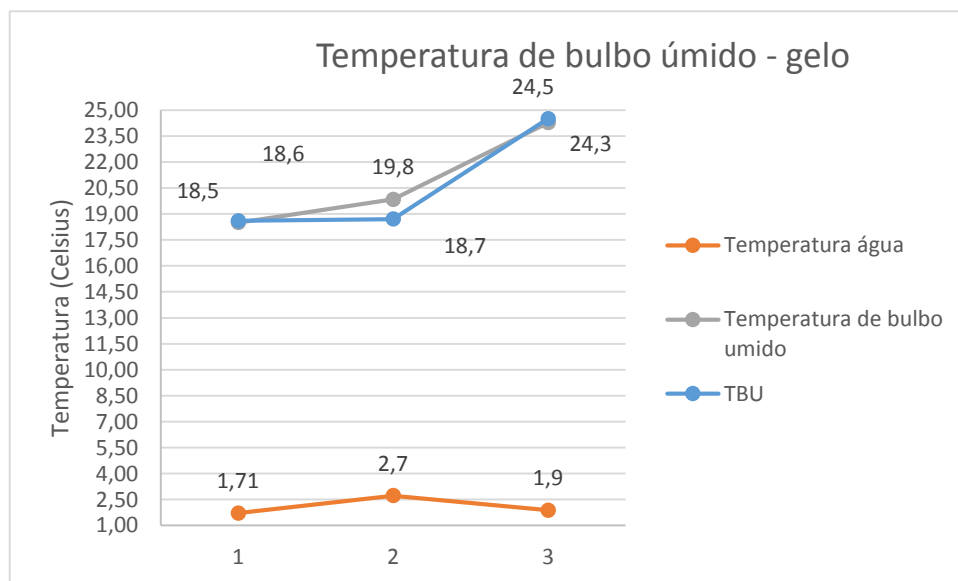


Figura 31: Comparação entre as temperaturas de bulbo úmido nos experimentos com gelo.

No experimento contendo gelo dentro do recipiente podemos notar que a temperatura de bulbo úmido termodinâmica também se aproxima da TBU medida com o psicrômetro, o que prova que também é possível determinar o estado psicrométrico do ar atmosférico utilizando água em estado sólido no saturador. Porém para realizar os cálculos da temperatura de bulbo úmido termodinâmica neste experimento, não foi possível considerar o ar de saída como possuindo a mesma temperatura do gelo, já que os experimentos mostraram que a diferença de temperatura entre o ar de saída e o gelo eram significativamente grandes. Neste caso utilizamos os valores da temperatura do gelo que foi medida durante os experimentos, para calcular sua entalpia e assim utilizando a Equação 3.6 calcular a temperatura de bulbo úmido termodinâmica. A introdução deste valor medido experimentalmente na equação fez com que os resultados fossem mais precisos do que nos experimentos com água.

6. Conclusões

Após os cálculos utilizando os modelos matemáticos adotados e a comparação com os dados experimentais podemos concluir primeiramente que nos experimentos com água o protótipo experimental funcionou como um saturador adiabático, aumentando a umidade relativa do ar sem grandes alterações na temperatura do mesmo. Podemos verificar também que a temperatura de bulbo úmido termodinâmica é função apenas da entalpia e umidade específica do ar que entra no saturador, e com isso determinar o estado psicrométrico do ar ambiente. Os experimentos utilizando gelo também provam que podemos determinar o estado psicrométrico do ar utilizando água em estado sólido dentro do saturador. Ambos os experimentos mostraram valores de temperatura de bulbo úmido termodinâmica muito semelhante aos lidos com o psicrômetro analógico, o que nos mostra que um borbulhador simples como o utilizado nos experimentos é capaz de medir com precisão a TBU e determinar o estado psicrométrico do ar.

Devido a pequena diferença entre os valores de TBU podemos concluir que a hipótese de Carrier foi satisfeita, e que no caso dos experimentos o valor do número de Lewis pode ser considerado como unitário, isto é, o coeficiente de transferência de massa pode ser diretamente determinado a partir do coeficiente de transferência de calor.

6.1 Propostas para Futuros Projetos

Visando a busca continua de conhecimento e a melhoria do trabalho realizado, obtendo novas conclusões propõe-se aqui as seguintes melhorias:

- Realizar um número maior de experimentos.

Ao realizar mais experimentos com diferentes condições do ar atmosférico é possível se obter relações diretas entre as propriedades do ar de entrada e o de saída do borbulhador podendo se utilizar estas informações para prever o estado do ar de saída apenas se conhecendo o estado do ar de entrada.

- Realizar os experimentos com água por um tempo maior.

Como vimos em nossos experimentos a temperatura do ar de saída tendia a temperatura da água no borbulhador. Realizando o experimento por um tempo maior é possível que estas temperaturas se igualem de fato e assim satisfaça a premissa de que as temperaturas são com os mesmo valor, o que tornaria os valores da temperatura de bulbo úmido termodinâmica mais precisos.

- Realizar melhorias no protótipo experimental

Apesar de ter funcionado de maneira satisfatória o protótipo experimental não conseguiu aumentar a umidade relativa do ar para 100%, pode-se melhorar o protótipo de forma que este alcance este nível de saturação o que tornaria os cálculos de temperatura de bulbo úmido termodinâmica ainda mais precisos.

7. Bibliografia

- [1] VIANA, S. T.; “*Análise de Viabilidade Técnica para a Recuperação de Água em Torres de Resfriamento*”, Universidade Federal de Santa Catarina, Dez. 2010.
- [2] DIAS, J. B.; “*Construção e Validação para uma Bancada de Calibração de Sensores para Determinação da Umidade Relativa do ar,*” Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Nov. 2001.
- [3] JESUS, F. M.; SILVA, G. F.; “*Programa para Estimativa das Propriedades Psicrométricas*”, Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, 2002.
- [4] CELESTINO, S. M. C.; “*Princípios de Secagem de Alimentos*”, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária , Embrapa, 2010.
- [5] LOUREDO, P.; “Pa-rumao,” agosto 2014. [Online]. Available: <http://pa-rumao.blogspot.com.br/2014/08/higrometro-e-psirometro.html>.
- [6] BRITTO, J. F. B.; “*Considerações sobre psicrometria*” SBCC.
- [7] “ASHRAE,” [Online]. Available: <https://www.ashrae.org/resources-publications/bookstore/psychrometrics>. [Acesso em 19 06 2017].
- [8] ÇENGEL; Y. A.; GHAJAR, A.J.; “*Transferencia de Calor e Massa, Uma Abordagem Prática*”, AMGH Editora, 2012.
- [9] RORIZ, V. F.; “*Refrigeração Evaporativa por Aspersão em Telhas de Fibrocimento: Estudo teórico e experimental,*” Universidade Federal de São Carlos, 2007.
- [10] SILVA, A. C. S. B. D.; “*Simulação de Resfriamento Evaporativo Por Microaspersão D’água*”, Universidade Federa de Santa Catarina - UFSC, Fev. 2004.
- [11] KRETSCHMER, A.; GEREMIA; G.; RANZI; M. F.; “*Projeto Experimental de Resfriador Evaporativo*”, Univeridade Federal do Rio Grande do Sul, Jul. 2013.

APÊNDICE A

Código completo em MATLAB para cálculo das propriedades psicrométricas do ar.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%%
%%          CALCULA AS PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS E
%%
%%          PSICOMÉTRICAS
%%
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear
close all

%Propriedades termodinâmicas tabeladas, T, Psat, hf, hg
%Tabela A-4: Água saturada - Tabela de temperatura
%M(linha, coluna)
M=[0.01 0.6117 0.001 2500.9;
5 0.8725 21.020 2510.1;
10 1.2281 42.022 2519.2;
15 1.7057 62.982 2528.3;
20 2.3392 83.915 2537.4;
25 3.1698 104.83 2546.5;
30 4.2469 125.74 2555.6;
35 5.6291 146.64 2564.6;
40 7.3851 167.53 2573.5;
45 9.5953 188.44 2582.4;
50 12.352 209.34 2591.3;
55 15.763 230.26 2600.1;
60 19.947 251.18 2608.8;
65 25.043 272.12 2617.5;
70 31.202 293.07 2626.1];

%Definição de variáveis

cp=1.005; %calor especifico a pressão constante (KJ/Kg*K)
V1=0.004; %vazão volumétrica total do sistema (m^3/min)
P=input (' DIGITE A PRESSÃO ATMOSFÉRICA:'); %pressão atmosférica
(Pa)
Rar=0.287; %constante universal dos gases perfeitos (KJ/Kg*K)
fi1=input (' DIGITE A UMIDADE RELATIVA DE ENTRADA:'); %umidade relativa
1
fi2=input (' DIGITE A UMIDADE RELATIVA DE SAIDA:'); %umidade relativa 2

%Temperaturas
T1= input (' DIGITE A TEMPERATURA DO AR DE ENTRADA EM GRAUS CELSIUS:'); %ar
ambiente (°Celsius)
T2=input (' DIGITE A TEMPERATURA DO AR DE SAIDA EM GRAUS CELSIUS:'); %ar
saida (°Celsius)

```

```

Tagua= input (' DIGITE A TEMPERATURA DA ÁGUA EM GRAUS CELSIUS:');      %agua
do borbulhador (°Celsius)

T11=T1+273.15;      %(Kelvin)
T22=T2+273.15;      %(Kelvin)

%Pressão ar (kPa)

PsatT1 = Psat_alternativo(M,T1);
PsatT2 = Psat_alternativo(M,T2);

formatSpec = 'O valor da pressão de %d é %f';
str = sprintf(formatSpec,T1,PsatT1)

formatSpec = 'O valor da pressão de %d é %f';
str = sprintf(formatSpec,T2,PsatT2)

Pg1=PsatT1;
Pg2=PsatT2;

Pv1=Pg1*fi1;
Pv2=Pg2*fi2;

Pa1=P-Pv1;
Pa2=P-Pv2;

%Volume especifico (m^3/kg ar seco)
v1=(Rar*T11)/Pa1;
v2=(Rar*T22)/Pa2;

%Umidade específica (kg h2o/ kg ar seco)
w1=0.622*(Pv1/(P-Pg1));
w2=0.622*(Pv2/(P-Pg2));

%CÁLCULO DAS ENTALPIAS
hg1 = hg_alternativo(M,T1);
hg2 = hg_alternativo(M,T2);

formatSpec = 'O valor da entalpia de %d é %f';
str = sprintf(formatSpec,T1,hg1)

formatSpec = 'O valor da hg2 de %d é %f';
str = sprintf(formatSpec,T2,hg2)

h1=(cp*T1)+(w1*hg1);
formatSpec = 'O valor da entalpia de %d é %f';
str = sprintf(formatSpec,hg1,h1)

h2=(cp*T2)+(w2*hg2);
formatSpec = 'O valor da entalpia de %d é %f';
str = sprintf(formatSpec,hg2,h2)

```

```

%ENTALPIA DA ÁGUA NO BORBULHADOR

hagua = hg_alternativo_agua(M,Tagua);
formatSpec = 'O valor da entalpia de %d é %f';
str = sprintf(formatSpec,Tagua,hagua);

%ENTALPIA DE BULBO UMIDO TERMODINÂMICO
%h1+(w2t-w1)*hagua=h2t
h2t=h1+(w2-w1)*hagua;
%h2t=h2;
%hagua=(h2t-h1)/(w2-w1);

%CALCULO TEMPERATURA DE BULBO UMIDO DA ÁGUA

Tagua_tbu = Tagua_alternativo(M,hagua);
formatSpec = 'O valor da temperatura de %d é %f';
str = sprintf(formatSpec,hagua,Tagua_tbu)

%Vazão mássica (kg/min)

%V1=mar*v1;
%V=mar/((1/v2)+(1/v3));
mar=(1/v1)*V1;

%QUANTIDADE DE ÁGUA NO AR APÓS BORBULHADOR (kg/min)
magua=mar*(w2);

%h=(1.006*T2)+(w2*(2501.3+1.805*T2));
%hagua=(h2t-h1)/(w2-w1);

%Comandos para plotagem dos dados:

figure(1)
px1=1
py1=T1;
ponto_h=plot(px1,py1,'-bx','LineWidth',1);
axis([0 3,25 28])
xlabel('Numero de avaliações')
ylabel('Temperatura (Celsius)')
title('Grafico 1')
grid minor
grid on
hold on

px2=2
py2=T2;
plot(px2,py2,'-bx','LineWidth',1);
title('Gráfico 1')
hold on;

figure(2)
y= input('COLOCAR MATRIZ DAS TEMPERATURAS EM CELSIUS E ENTRE []:');

```

```

plot(y, '-bx', 'LineWidth',1);
xlabel('medições')
ylabel('temperaturas')
axis([])
title('Gráfico 2')
grid minor
grid on
hold on

```

```

figure(3)
y= [T1 T2];
x= [h1 h2];
plot(x,y, '-bx', 'LineWidth',1)
axis([48 70 25.8 27.8])
xlabel('entalpia');
ylabel('temperatura')
title('Gráfico 3')
grid minor
grid on
hold on

```

```

figure (4)
y= [h2t h2];
x= [1 2];
plot(x,y)
axis([1 2 48 70])
xlabel('numero da medida')
ylabel('Entalpia')
title('Gráfico 4')
grid minor
grid on
hold on

```

```

%Definição da matriz com variáveis desejadas para exportação para o excel

```

```

N=[cp;
    fi1;
    fi2;
    h1;
    h2;
    h2t;
    hagua;
    hg1;
    hg2;
    magua;
    mar;
    P;
    T1;
    T2;
    Tagua;
    Tagua_tbu;
    v1;
    v2;
    w1;
    w2;
    Rar];

```

```

xlswrite('resultados.xls',N,'resultados2','AB28');

```

```

%CALCULA hg
function y = hg_alternativo(M,T1)

for i =1:15
    a=M(i,1);
    c=M(i,4);
    if i > 1
        b = M(i-1,1);
        d = M(i-1,4);
    end

    if M(i,1) == T1
        %formatSpec = 'A entalpia de %d = %f';
        %str = sprintf(formatSpec,M(i,1),M(i,4))
        y = M(i,4);
        break;
    end

    if M(i,1) > T1
        %formatSpec = 'O valor da entalpia de %d é %f';
        if (b-a) ~= 0
            y = ((T1-a)*(d-c)/(b-a)) + c;
            %str = sprintf(formatSpec,T1,hg1)
            %str = sprintf(x,'%0.5f')
        end
        break;
    end
end

end
end

```

```

%CALCULA hagua
function y = hg_alternativo_agua(M,T2)

for i =1:15
    a=M(i,1);
    c=M(i,3);
    if i > 1
        b = M(i-1,1);
        d = M(i-1,3);
    end

    if M(i,1) == T2
        %formatSpec = 'A entalpia de %d = %f';
        %str = sprintf(formatSpec,M(i,1),M(i,3))
        y = M(i,4);
        break;
    end

    if M(i,1) > T2
        %formatSpec = 'O valor da entalpia de %d é %f';
        if (b-a) ~= 0
            y = ((T2-a)*(d-c)/(b-a)) + c;
            %str = sprintf(formatSpec,T2,hagua)
            %str = sprintf(x,'%0.5f')
        end
    end
end

```



```

        break;
    end
end
end

```

```

%CALCULA Psat

```

```

function y = Psat_alternativo(M,T1)

```

```

for i =1:15

```

```

    a=M(i,1);

```

```

    c=M(i,2);

```

```

    if i > 1

```

```

        b = M(i-1,1);

```

```

        d = M(i-1,2);

```

```

    end

```

```

    if M(i,1) == T1

```

```

        %formatSpec = 'A entalpia de %d = %f';

```

```

        %str = sprintf(formatSpec,M(i,1),M(i,2))

```

```

        y = M(i,2);

```

```

        break;

```

```

    end

```

```

    if M(i,1) > T1

```

```

        %formatSpec = 'O valor da entalpia de %d é %f';

```

```

        if (b-a) ~= 0

```

```

            y = ((T1-a)*(d-c)/(b-a)) + c;

```

```

            %str = sprintf(formatSpec,T1,hgl)

```

```

            %str = sprintf(x,'%0.5f')

```

```

        end

```

```

        break;

```

```

    end

```

```

end

```

```

end

```

```

%CALCULA Tagua

```

```

function y = Tagua_alternativo(M,hagua)

```

```

for i =1:15

```

```

    a=M(i,1);

```

```

    c=M(i,3);

```

```

    if i > 1

```

```

        b = M(i-1,1);

```

```

        d = M(i-1,3);

```

```

    end

```

```

    if M(i,4) == hagua

```

```

        %formatSpec = 'A entalpia de %d = %f';

```

```

        %str = sprintf(formatSpec,M(i,1),M(i,3))

```

```

        y = M(i,1);

```

```

        break;

```

```

    end

```

```
if M(i,3) > hagua
    %formatSpec = 'O valor da temperatura de %d é %f';
    if (d-c) ~= 0
        y = ((hagua-c)*(b-a)/(d-c)) + a;
        %str = sprintf(formatSpec,Tagua,hagua)
        %str = sprintf(x,'%0.5f')
    end
    break;
end
end
end
```