

## Temperatura de Bulbo Úmido de Gases

Paulo Sérgio Germano Carvalho

psgc@uol.com.br

José R. Simões-Moreira

jrsimoes@usp.br

SISEA – Laboratório de Sistemas Energéticos Alternativos  
Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da USP  
Av. Prof. Mello Moraes, 2231 – CEP 05508 – 900 – São Paulo, SP, Brasil

**Resumo.** Em processos industriais é de suma importância o conhecimento do teor de vapor de água presente em produtos de combustão, gases de processo e, em especial, no ar atmosférico. Esta necessidade é encontrada principalmente nas indústrias dos segmentos de papel, têxtil, alimentícia, refrigeração, ventilação, ar condicionado, controle ambiental, estocagem de produtos agrícolas, dentre outras. Várias são as técnicas disponíveis para a medição do teor de umidade, sendo o psicrômetro uma das mais difundidas por sua facilidade operacional, baixo custo e porque também apresenta uma precisão compatível com a maioria das aplicações práticas. O princípio de funcionamento do instrumento está baseado no processo de equilíbrio decorrente da transferência simultânea de calor e massa entre uma corrente de gás de umidade indeterminada e o bulbo de um termômetro, o qual está envolto por uma mecha de material higroscópico umedecido. A temperatura de equilíbrio indicada pelo termômetro chama-se Temperatura de Bulbo Úmido (TBU). Dentro de determinadas hipóteses, a TBU indicada pelo instrumento é muito próxima da Temperatura de Bulbo Úmido Termodinâmica (TBUT), a qual é uma propriedade termodinâmica definida pelo estado do gás e que permite calcular precisamente o seu teor de umidade. Já a TBU é uma grandeza dependente de diversos fatores, incluindo a geometria do bulbo, a velocidade relativa entre a corrente de gás e o bulbo do termômetro, efeitos de radiação, para citar apenas algumas variáveis. Nesse artigo são investigadas as condições operacionais e construtivas do psicrômetro para as quais o instrumento vai indicar a propriedade Temperatura de Bulbo Úmido Termodinâmica e estabelecer um procedimento de seleção da geometria do instrumento e da faixa de número de Reynolds da corrente de gás.

**Palavras chave:** Temperatura de Bulbo Úmido, Gás Úmido; Temperatura de Saturação Adiabática.

### 1. Introdução

Em processos industriais é de suma importância o conhecimento do teor de vapor de água presente em gases e, em particular, o do ar atmosférico. Esta necessidade é encontrada principalmente nas indústrias dos segmentos de papel, têxtil, alimentícia, refrigeração, ventilação, ar condicionado, controle ambiental, estocagem de produtos agrícolas, e para tanto várias técnicas de medição são utilizadas. Dentre as diversas técnicas utilizadas, destaca-se o psicrômetro que é um instrumento constituído por dois termômetros tendo um deles o bulbo revestido por uma substância higroscópica geralmente feita de algodão que é mantida umedecida com água destilada conforme ilustrado na Fig. (1). O segundo termômetro, não indicado na figura, é um instrumento comum sem nenhum preparo adicional. O psicrômetro é simples, barato, fácil de operar e com alguns cuidados tem a precisão suficiente para a maioria das aplicações. Verifica-se que quando uma corrente de gás úmido se movimenta relativamente ao bulbo úmido do termômetro durante um certo tempo, uma temperatura de equilíbrio vai ser alcançada devido aos processo simultâneo de transferência de calor e massa. Essa temperatura, conhecida como a *Temperatura de Bulbo Úmido* (TBU), decorre, portanto, do processo convectivo de evaporação da água contida na mecha para a corrente de gás úmido. A outra temperatura indicada pelo segundo termômetro é a temperatura ordinária do gás que, por contraste, recebe o nome de *Temperatura de Bulbo Seco* (TBS). Como será visto na próxima seção deste trabalho, a TBU do gás é muito próxima de uma propriedade termodinâmica chamada de *Temperatura de Bulbo Úmido Termodinâmica* (TBUT), o que permite que sejam igualados os dois valores. Considerando válida essa simplificação, conhecendo-se o valor da *Temperatura de Bulbo Seco* (TBS), da *Temperatura de Bulbo Úmido* (TBU) provenientes da leitura do psicrômetro e da pressão da corrente de gás, pode-se facilmente se determinar todos os parâmetros de caracterização do estado termodinâmico do gás. O exemplo mais comum é medir os valores de TBU e TBS de um ar úmido submetido a uma pressão barométrica conhecida, e usando o diagrama psicrométrico, determinar todas as propriedades termodinâmicas tais como umidade absoluta, umidade relativa, temperatura de orvalho, entalpia específica e volume específico.

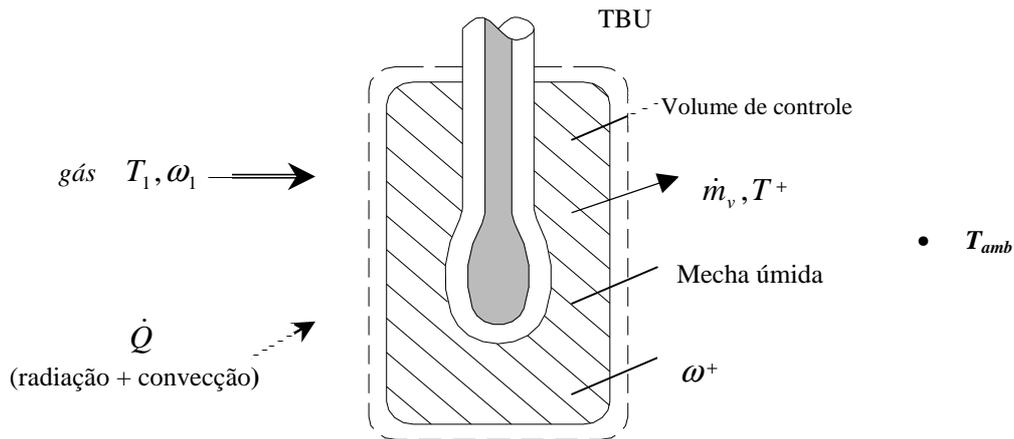


Figura 1. Esquema do bulbo úmido do psicrômetro

## 2. Teoria da Medição da Umidade Usando o Psicrômetro

### 2.1 Psicrômetro Adiabático.

A Fig.(2) ilustra o dispositivo chamado de *saturador ou psicrômetro adiabático* utilizado para a obtenção experimental da *Temperatura Termodinâmica de Bulbo Úmido (TBUT ou  $T^*$ )* ou também chamada *Temperatura de Saturação Adiabática*. Neste dispositivo uma corrente de gás úmido é forçada a entrar em contato com um borrifo de água numa câmara termicamente isolada (adiabática). Na saída do equipamento o gás está saturado e em equilíbrio termodinâmico com a água da câmara a temperatura  $T^*$ . Água que foi evaporada e saiu junto com o fluxo de gás é repostada no reservatório à mesma  $T^*$ . A taxa de evaporação/reposição da água é  $\dot{m}_L$ . O processo é isobárico e em regime permanente.

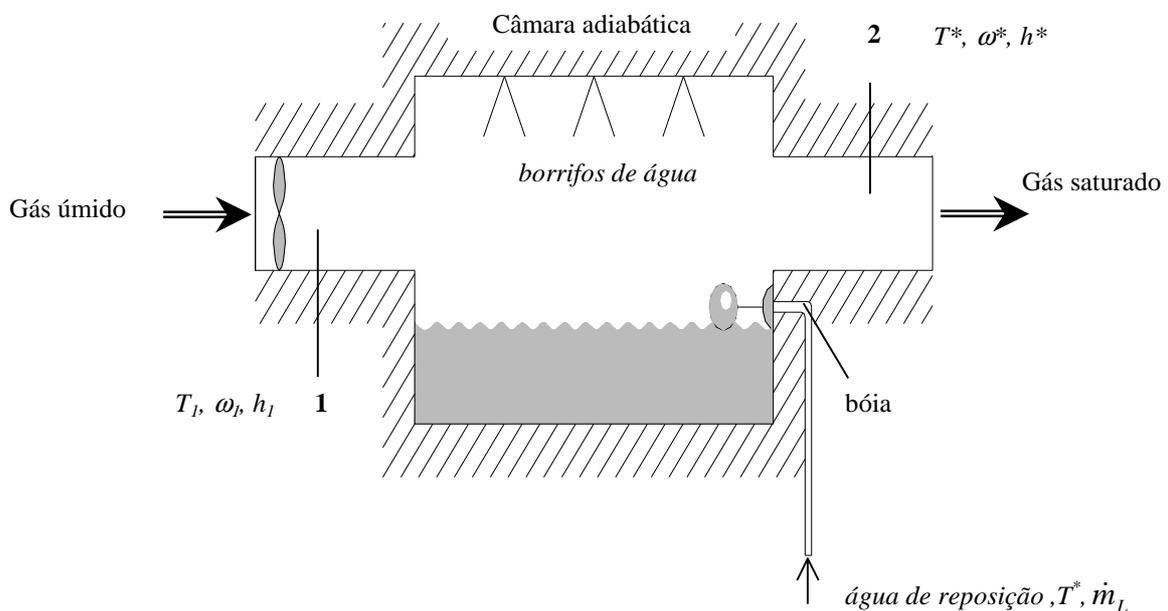


Figura 2. Esquema de um saturador ou psicrômetro adiabático

Os fluxos mássicos podem ser assim definidos na seção de entrada (seção 1) do dispositivo como sendo:

$$\dot{m}_{g1} = \dot{m}_{gs} + \dot{m}_{v1} \quad , \quad (1)$$

e na seção de saída ( seção 2) do dispositivo:

$$\dot{m}_{g2} = \dot{m}_{gs} + \dot{m}_{v2} \quad . \quad (2)$$

O Fluxo em massa de água de reposição é

$$\dot{m}_L = \dot{m}_{v2} - \dot{m}_{v1} \quad , \quad (3)$$

onde,  $\dot{m}_g$  é o fluxo de gás úmido,  $\dot{m}_{gs}$  é o fluxo de gás seco,  $\dot{m}_v$  é o fluxo de vapor de água contido no gás úmido,  $\dot{m}_L$  é o fluxo de água de reposição e, os índices “1” e “2” indicam as seções de entrada e saída do saturador adiabático, respectivamente. O asterísco (\*) indica que as propriedades são avaliadas na Temperatura de Bulbo Úmido Termodinâmica,  $T^*$ . Considerando o saturador como um volume de controle adiabático e isobárico, um balanço de energia em regime permanente resulta na seguinte expressão

$$\dot{m}_{gs} h_{gs1} + \dot{m}_{v1} h_{v1} + (\dot{m}_{v2} - \dot{m}_{v1}) h_L^* = \dot{m}_{gs} h_{gs2} + \dot{m}_{v2} h_{v2}^* \quad , \quad (4)$$

onde,  $h_{gs}$  é a entalpia específica do gás seco,  $h_v$  é a entalpia específica do vapor e  $h_L^*$  é a entalpia específica da água de reposição. O fluxo mássico do gás sêco não é alterado pela passagem através do saturador, porém o fluxo total de massa do gás úmido na saída é acrescido de massa de água que foi repostada. A Eq. (4) ainda pode ser reescrita tendo em consideração a definição da umidade absoluta  $\omega$  dada por  $\omega = \dot{m}_v / \dot{m}_{gs}$ . Substituindo essa definição naquela equação, obtém-se

$$h_{gs1} + \omega_1 h_{v1} + (\omega^* - \omega_1) h_L^* = h_{gs2} + \omega_2^* h_{v2}^* \quad (5)$$

Válida a hipótese de mistura de gases perfeitos, define-se a entalpia do gás úmido ( $h_g$ ) como sendo a soma da entalpia do gás sêco com a entalpia da parcela do vapor. Assim, as entalpias específicas do gás úmido na entrada e saída são, na ordem

$$h_{g1} = h_{gs1} + \omega_1 h_{v1} \quad , \quad \text{e} \quad h_{g2} = h_{gs2} + \omega_2 h_{v2} \quad . \quad (6)$$

Introduzindo as Eqs. (6) na Eq. (5) tem-se a forma compacta da equação da energia

$$h_{g1} + (\omega_2^* - \omega_1) h_L^* = h_{g2}^* \quad . \quad (7)$$

Uma análise da Eq. (7) permite concluir que mantida a pressão constante,  $\omega_2^*, h_L^*, h_{g2}^*$ , dependem somente de  $T^*$  e do estado termodinâmico do gás na entrada do saturador representado pelas propriedades  $h_{g1}, \omega_1$  e  $T_1$ . Logo existe uma relação única entre o estado termodinâmico do gás úmido na entrada do dispositivo e a  $T^*$  para aquela pressão. De forma que  $T^*$  é, portanto, necessariamente uma propriedade termodinâmica do gás úmido na condição de entrada.

## 2.2-TEORIA DO PSICRÔMETRO

Na seção anterior mostrou-se que existe uma propriedade termodinâmica do ar úmido chamada de temperatura de bulbo úmida termodinâmica. Nessa seção será vista como se pode obter uma grandeza semelhante àquela através do uso de um psicrômetro. O psicrômetro é instrumento constituído por dois termômetros tendo um deles o bulbo revestido por uma substância higroscópica geralmente feita de algodão e umedecida com água destilada. A Fig. (1) ilustra um termômetro de bulbo úmido envolvido com material higroscópico umedecido. Mostra também o volume de controle que

será usado no equacionamento a ser feito. O gás úmido ao circular pelo bulbo do termômetro sofre a troca simultânea de calor e massa. A água da mecha ao se vaporizar retira calor do bulbo o que reduz a sua temperatura. A mecha por estar a menor temperatura que o gás recebe calor deste de forma que se estabelece um equilíbrio dinâmico no qual a mecha cede calor para evaporar a água e recebe igual quantidade de energia do gás. A temperatura de equilíbrio é a temperatura de bulbo úmido. Fazendo o equacionamento destas trocas de calor e massa considerando o volume de controle esquematizado na Fig. (1) tem-se :

$$\dot{Q} = \dot{m}_v h_{lv}^+ , \quad (8)$$

onde  $\dot{m}_v$  é a taxa temporal de massa que é evaporada na mecha ao receber o fluxo  $\dot{Q}$  e  $h_{lv}^+$  é a entalpia específica de vaporização avaliada à temperatura da mecha, que é a Temperatura de Bulbo Úmido  $T^+$ . Para fazer uma distinção entre a propriedade temperatura de bulbo úmida termodinâmica e temperatura de bulbo úmida, a primeira recebe o símbolo  $T^*$  e a segunda,  $T^+$ .

Pela lei de convecção de massa tem-se:

$$\dot{m}_v = \rho_{gs} h_m A(\omega^+ - \omega) , \quad (10)$$

onde  $\rho_{gs}$  é a densidade do gás seco,  $h_m$  é o coeficiente de transferência de massa,  $A$  é a área de troca de calor da mecha,  $\omega^+$  é a umidade absoluta avaliada a temperatura de bulbo úmido, e  $\omega$  é a umidade absoluta avaliada a temperatura do gás úmido

Substituindo a Eq. (10) na Eq. (9) tem-se :

$$\dot{Q} = \rho_{gs} h_m A(\omega^+ - \omega) h_{lv}^+ . \quad (11)$$

Por outro lado, o fluxo de calor total  $\dot{Q}$  recebido pela mecha do bulbo é composto de 2 parcelas sendo uma de convecção  $\dot{Q}_c$  e outra de radiação  $\dot{Q}_r$ , isto é

$$\dot{Q} = \dot{Q}_c + \dot{Q}_r . \quad (12)$$

Pela lei de convecção de calor, o fluxo de calor por convecção  $\dot{Q}_c$  é dado por

$$\dot{Q}_c = h_c A(T - T^+) , \quad (13)$$

onde,  $h_c$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção e  $T$  é a temperatura do gás úmido ao longe. O valor do coeficiente de transferência de calor por convecção  $h_c$  depende de vários fatores e geralmente é obtido por meio de correlações experimentais. O fluxo de calor por radiação  $\dot{Q}_r$  obedece a Lei de Stefan-Boltzman e é dado por :

$$\dot{Q}_r = \sigma \varepsilon A(T_{amb}^4 - T^+{}^4) , \quad (14)$$

onde  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzmann ( $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ),  $\varepsilon$  é a emissividade média da mecha umedecida e  $T_{amb}$  é a temperatura do meio ambiente que circunda a mecha. Ainda pode se definir um coeficiente de radiação térmica  $h_r$  de acordo com:

$$\dot{Q}_r = h_r A(T_{amb} - T^+) , \quad (15)$$

onde, consistentemente,  $h_r$  é dado por :

$$h_r = \frac{\sigma \varepsilon (T_{amb}^4 - T^{+4})}{(T - T^+)}, \quad (16)$$

Logo, o fluxo de calor total  $\dot{Q}$  pode ser expresso usando as Eqs. (13) e (16) como sendo :

$$\dot{Q} = h_c A (T - T^+) + h_r A (T_{amb} - T^+). \quad (17)$$

Pode-se igualar a Eq. (11) com (17) resultando :

$$\rho_{gs} h_m A (\omega^+ - \omega) h_{lv}^+ = h_c A (T - T^+) + h_r A (T_{amb} - T^+). \quad (18)$$

Define-se o adimensional relação Lewis ( $R_{Le}$ ) como sendo:

$$R_{Le} = \frac{h_c}{h_m \rho_g C_{pg}}, \quad (19)$$

onde  $C_{pg}$  é o calor específico do gás úmido a pressão constante. A Eq. (18) pode ainda ser rearranjada para obter-se a seguinte expressão simplificada:

$$\omega = \omega^+ - K^+ (T - T^+), \quad (20)$$

onde  $K^+$  é dado por:

$$K^+ = \frac{C_{pg} R_{Le}}{h_{lv}^+} \left[ 1 + \frac{h_r (T_{amb} - T^+)}{h_c (T - T^+)} \right]. \quad (21)$$

A variável  $K^+$  dada pela Eq. (21) é um grandeza associada ao psicrômetro que em conjunto com a temperatura de bulbo úmido formam os parâmetros-chaves para a obtenção das propriedades termodinâmicas do gás úmido. A Eq. (20) é uma forma variante da chamada de *Equação do Psicrômetro* (Threlkeld, 1970 e Simões-Moreira, 1999a e 1999b).

Retornando à Eq. (7) que define a temperatura de bulbo úmido termodinâmica e considerando a hipótese de comportamento de gás ideal para mistura de gás com vapor de água, têm-se a seguinte nova forma daquela equação

$$C_{pg} (T - T^*) + \omega C_{pv} (T - T^*) - (\omega - \omega^*) h_{Lv}^* = 0, \quad (22)$$

sendo:  $C_{pg} = C_{pgs} + \omega C_{pv}$  o calor específico a pressão constante do gás úmido,  $C_{pgs}$  é o calor específico a pressão constante do gás seco e  $C_{pv}$  é o calor específico a pressão constante do vapor de água. Note que o índice 1 foi eliminado. Já as propriedades do gás úmido na saída do dispositivo (índice 2) foram assinaladas simplesmente por um asterisco. Após alguma manipulação, a Eq. (22) pode ainda ser reescrita na forma compacta como

$$(\omega^* - \omega) h_L^* = C_{pg} (T - T^*). \quad (23)$$

Alternativamente, a Eq. (23) ainda pode ser escrita como

$$(\omega^* - \omega) = K^* (T - T^*), \quad (24)$$

onde

$$K^* = \frac{C_{pg}}{h_{Lv}^*}. \quad (25)$$

Nota-se uma semelhança entre a Eq. (24) escrita para o saturador adiabático e a Eq. (20) escrita para o psicrômetro. De forma que pode se agora determinar sob que condições operacionais o psicrômetro vai indicar a temperatura de bulbo úmido termodinâmica, para isso deve se igualar a Eq. (21) com a Eq. (25), o que resulta em:

$$R_{le} \left\{ 1 + \frac{h_r (T_{amb} - T^+)}{h_c (T - T^+)} \right\} = 1 . \quad (26)$$

Note que nessa operação, já se igualou  $T^+$  com  $T^*$  e, portanto, a razão entre o calor específico e entalpia de vaporização (Eq. 25) foi simplificada. A temperatura de bulbo úmido é medida com o auxílio de um termômetro de bulbo úmido de uma forma fácil e rápida. Se a combinação de grandezas dadas pela Eq. (26) for satisfeita, isso significará que a temperatura de bulbo úmido indicada pelo psicrômetro vai corresponder à propriedade termodinâmica temperatura de bulbo úmido termodinâmica. Na próxima seção são analisados dois casos envolvendo o ar atmosférico e um produto de combustão e determinam-se as condições operacionais e construtivas de um psicrômetro que indica a propriedade desejada.

### 3. Condição na qual o Psicrômetro Indica a Temperatura de Bulbo Úmido Termodinâmica.

Nesta seção obtém-se uma expressão adimensional baseada nos princípios de transferência de calor e massa que satisfaça a igualdade da Eq. (26). Para efeitos de ilustração, consideram-se dois casos de psicrômetros de geometrias de bulbos simples sobre os quais há um fluxo mássico cruzado, são eles o bulbo cilíndrico e o bulbo esférico. Isto é feito por dois motivos: primeiramente por existirem correlações empíricas bastante conhecidas e consagradas para essas geometrias. E em segundo lugar, por ser bastante comum se modelar o bulbo de psicrômetro como tendo o formato esférico ou cilíndrico, principalmente o cilíndrico (Threlkeld, 1970). Depois analisam-se as expressões resultantes de cada caso com exemplos numéricos. Com isso, pode-se delimitar as condições operacionais e dimensões geométricas dos bulbos que satisfaçam a condição da Eq. (26).

#### 3.1-Análise das Geometrias dos Bulbos dos Termômetros

Nessa seção, é realizado um estudo enfocando a analogia entre a troca de calor e a troca de massa em um bulbo de um termômetro.

Em primeiro lugar, é conveniente definir a seguinte grandeza,  $\theta$ , como sendo :

$$\theta = \frac{T_{amb} - T^+}{T_a - T^+} . \quad (27)$$

Inserindo a definição acima na Eq. 26) tem-se:

$$1 + \frac{h_r}{h_c} \theta = \frac{1}{R_{le}} . \quad (28)$$

Devido a analogia entre o fenômeno de transferência de calor e massa, é possível estabelecer-se uma relação entre o coeficiente de convecção ( $h_c$ ), o coeficiente de transferência de massa ( $h_m$ ), com as propriedades difusividade térmica ( $\alpha$ ) e difusividade mássica ( $D_m$ ) segundo a seguinte expressão (Holman, 1983):

$$\frac{h_c}{h_m} = \rho_g C_{pg} \left( \frac{\alpha}{D_m} \right)^{2/3} . \quad (29)$$

Assim, substituindo a Eq.(29) na Eq.(28), obtém-se a seguinte expressão após algumas manipulações:

$$\frac{h_r}{h_c} = \left\{ \left( \frac{\alpha}{D_m} \right)^{2/3} - 1 \right\} \frac{1}{\theta} . \quad (30)$$

Por outro lado, define-se o adimensional número de Stanton ( $St$ ) como sendo:

$$St = \frac{Nu}{Re \cdot Pr}, \quad (31)$$

onde, na definição do número de Stanton aparecem os adimensionais da transferência de calor convectiva forçada, quais sejam o número de Prandtl ( $Pr$ ), número de Reynolds ( $Re$ ) e número de Nusselt ( $Nu$ ). Substituindo esses grupos adimensionais na Eq. (30), a mesma adquire a seguinte forma adimensionalizada :

$$St^{-1} = \frac{Re \cdot Pr}{Nu} = \frac{\mu_g C_{pg} Re}{\sigma \epsilon L (T_{amb} + T^+)^2 (T_{amb}^2 + T^{+2}) \left( \frac{1}{Le^{2/3}} - 1 \right)}, \quad (32)$$

onde,  $L$  é a dimensão característica em que os adimensionais se baseiam,  $\mu$  é a viscosidade, e  $Le$  é o número de Lewis dado pela razão  $\alpha/D$ .

A Eq.(32), resulta da combinação de propriedades que permitem determinar a temperatura de bulbo úmido termodinâmica a partir do conhecimento da temperatura de bulbo úmido. Agora pode-se comparar equações empíricas para diversas geometrias com essa equação. Nesse trabalho comparam-se os casos de um psicrômetro de bulbo esférico e outro cilíndrico. Para o caso de bulbo cilíndrico é válida a correlação clássica obtida de um livro-texto de transferência de calor (Holman, 1983, por exemplo):

$$St_{cilindros} = 0,683 Re^{-0,534} Pr^{-2/3}, \quad (33)$$

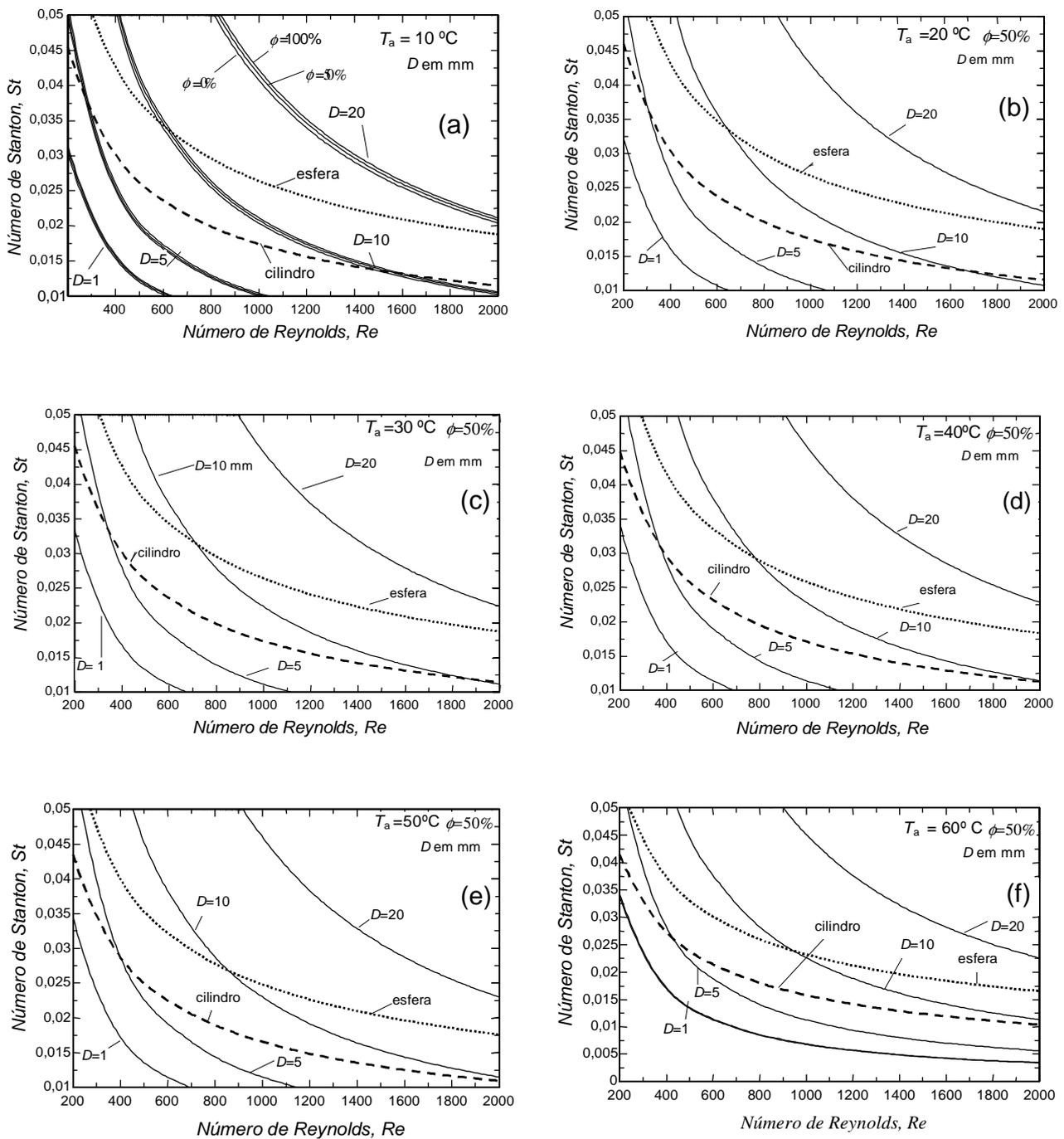
e, para o caso de esferas, é válida a correlação :

$$St_{esferas} = \frac{(2 + (0,4 Re^{0,5} + 0,06 Re^{2/3} Pr^{0,4}))}{Re \cdot Pr}. \quad (34)$$

As propriedades de transporte e termodinâmicas devem ser avaliadas tanto na temperatura média como na umidade média.

Para a análise com ar atmosférico, considerou-se as propriedades termodinâmicas à pressão atmosférica de 100 kPa e seis diferentes temperaturas (10 °C a 60 °C). A propriedade difusividade mássica ( $D_m$ ) foi obtida dos dados disponibilizados em Ashrae (1997). Os gráficos da Fig. 3 indicam a expressão da relação geral dos adimensionais do psicrômetro (Eq. 32) para diversas dimensões características (neste caso o diâmetro  $D$ ), as curvas correspondentes ao escoamento sobre um cilindro (Eq. 33) e, por último, a expressão do escoamento sobre uma esfera (Eq. 34). Nestes gráficos, o número de Stanton é mostrado como função do número de Reynolds. No gráfico da Fig. 3a, válido para uma temperatura do ar de 10 °C, três diferentes valores de umidade relativa (0 %, 50% e 100%) foram analisados. Verificou-se, no entanto, que havia uma dependência bastante fraca dessa grandeza, como bem ilustrado pela proximidade das curvas naquela figura. De forma que, para os gráficos subseqüentes (Figs. 3b a 3f), somente o caso de  $\phi = 50\%$  foi considerado.

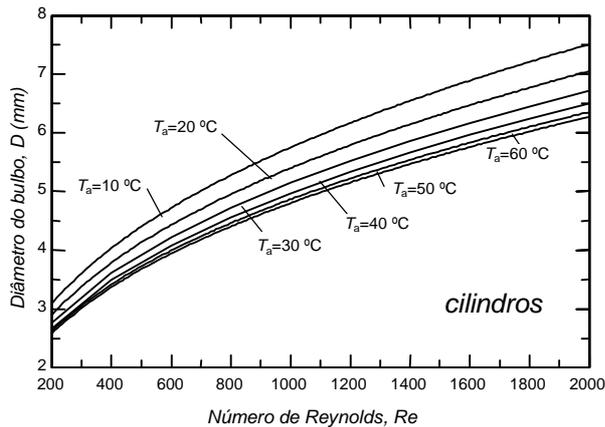
Estes gráficos devem ser interpretados da seguinte maneira: Dada uma temperatura do ar  $T_a$ , que é igual a do ambiente nesse caso, e para um dado comprimento característico, o gráfico vai indicar a dependência do número de Stanton como função do número de Reynolds para a qual a aproximação da leitura da temperatura de bulbo úmido do psicrômetro se iguala à temperatura de bulbo úmido termodinâmica. Naturalmente, os pontos de intersecção entre as curvas do escoamento sobre um cilindro e sobre uma esfera indicam as condições para as quais um sensor de bulbo cilíndrico ou esférico vai indicar a temperatura de bulbo úmido termodinâmica. Isto é deixado para ser analisado na próxima seção.



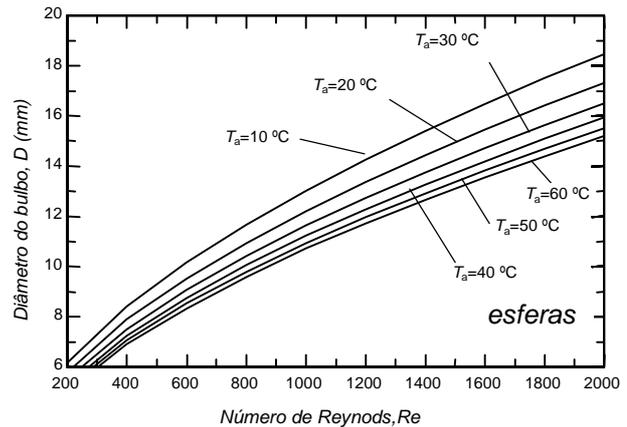
**Figura 3.** Número de Stanton ( $St$ ) como função do número de Reynolds ( $Re$ ), considerando a pressão atmosférica de 100 kPa, e umidade relativa de 50% com exceção de (a) em que se mostram também as umidades relativas de 0% e 100%. (a) até (f) é válido para temperaturas do ar atmosférico variando entre  $10^\circ\text{C}$  e  $60^\circ\text{C}$ . As curvas representam a expressão da relação geral dos adimensionais do psicrômetro (Eq. 32) para diversas dimensões características (neste caso o diâmetro  $D$ ), as curvas correspondentes ao escoamento sobre um cilindro (Eq. 33) e, por último, a expressão do escoamento sobre uma esfera (Eq. 34).

### 3.2-Dados para o Ar Atmosférico

De volta às curvas da Fig. 3, pode-se agora verificar as condições para as quais um sensor de bulbo cilíndrico e outro esférico vão indicar a temperatura de bulbo úmido termodinâmica. Para isso, deve-se perceber que essas condições são aquelas que satisfazem simultaneamente a expressão geral dos adimensionais do psicrômetro (Eq. 32) e a do cilindro (Eq. 33), ou a da esfera (Eq. 34), conforme o caso. Isto, visto nos gráficos da Fig. 3, representa a intersecção das curvas do cilindro ou da esfera com a curva da Eq. (32). Esses pontos de intersecção deram origem a dois novos gráficos que estão indicados nas Figs. 4 e 5, válidos para o ar atmosférico úmido na pressão barométrica de 100 kPa. O gráfico da Fig. 4 mostra o diâmetro de um bulbo cilíndrico como função do número de Reynolds para diversas temperaturas de bulbo seco do ar. De forma semelhante, o gráfico da Fig. 5 mostra as mesmas grandezas para um bulbo esférico.



**Figura. 4** - Diâmetro de bulbo de um termômetro de bulbo úmido cilíndrico como função do número de Reynolds e temperatura do ar para que o sensor indique a temperatura de bulbo úmido termodinâmica.



**Figura. 5** - Diâmetro de bulbo de um termômetro de bulbo úmido esférico como função do número de Reynolds e temperatura do ar para que o sensor indique a temperatura de bulbo úmido termodinâmica.

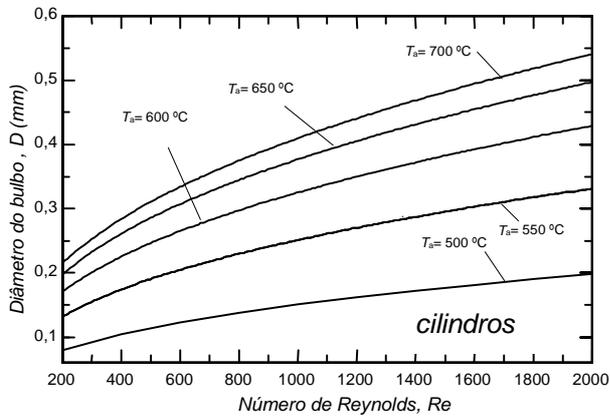
As Figs. 4 e 5 mostram que existe um compromisso entre o tamanho do bulbo de termômetro, a temperatura do ar e o número de Reynolds. Pode-se dizer que o diâmetro “ótimo” do bulbo varia de forma aproximadamente linear com o número de Reynolds. Na prática, no entanto, os psicrômetros têm uma velocidade de movimentação do ar mais ou menos fixa, dada pelo ventilador integrado ao instrumento, ou pelo movimento do gás na tubulação em que o psicrômetro está inserido, de forma que o número de Reynolds também deve ser mais ou menos fixo. Assim, da presente análise, pode-se selecionar o diâmetro mais adequado do sensor para esse dado número de Reynolds. Como exemplo, suponha o escoamento de ar atmosférico úmido com temperatura de bulbo seco de 20 °C, velocidade de 3 m/s, pergunta-se: qual deve ser o diâmetro mais adequado para o bulbo do termômetro? Para responder a essa questão, primeiramente adota-se que, por exemplo, o bulbo do termômetro possa ser aproximado por um cilindro e as expressões apresentadas neste trabalho podem ser usadas diretamente, inclusive o gráfico da Fig. 4. Como o número de Reynolds depende do diâmetro, um processo iterativo deve ser empregado até a convergência final. Por exemplo, para as condições propostas, tem-se que a viscosidade cinemática vale  $1,824 \cdot 10^{-5} \text{ kg/ms}$  e o volume específico é de  $0,8403 \text{ m}^3/\text{kg}$ . Numa primeira iteração, considere o diâmetro de bulbo de 7 mm que vai resultar em um número de Reynolds de 1370. Agora, com o auxílio da Fig. 4, entra-se com esse valor de Reynolds para determinar o diâmetro do bulbo de 5,5 mm. Portanto, uma nova iteração é necessária, o que vai resultar num valor final de diâmetro de bulbo de 5,5 mm correspondente a um número de Reynolds de 1077. Assim, um termômetro de bulbo úmido de 5,5 mm de diâmetro inserido em um fluxo de ar atmosférico a 20 °C a uma velocidade de 3 m/s vai indicar a propriedade termodinâmica temperatura de bulbo úmido termodinâmica, como desejado.

### 3.3 Dados para os Produtos de Combustão de Propano

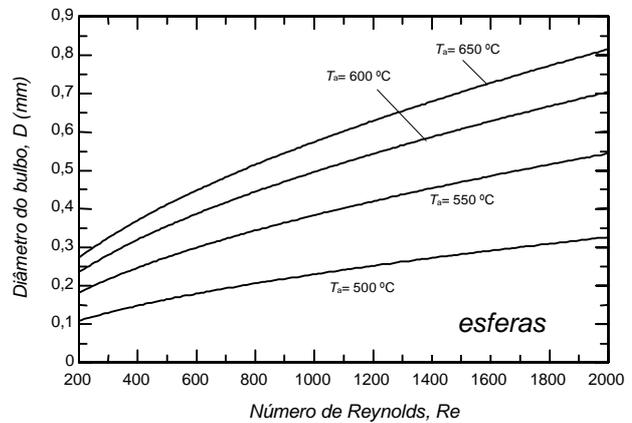
Agora, a análise recai sobre uma outra mistura de gases diferentes do ar atmosférico. Como exemplo foi considerado o caso dos produtos de combustão do propano ( $\text{C}_3\text{H}_8$ ) com 20 % de excesso de ar. Neste caso, um balanço estequiométrico indica que essa mistura, na base úmida, deve ser formada por dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), com uma fração molar de 9,8%, nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) com fração molar de 73,82% e oxigênio com uma fração molar de 3,27%. As

propriedades termodinâmicas foram avaliadas usando-se as leis de mistura considerando-se de gases perfeitos. As Eqs. (32), (33) e (34) foram utilizadas novamente agora utilizando as propriedades termodinâmicas e de transporte para esse produto de combustão. As propriedades foram obtidas na temperatura e umidade média. A difusividade mássica da mistura foi avaliada pela correlação de Fuller (citado em Welty, 2001), viscosidade e outras propriedades de mistura foram avaliadas pela regra simples de mistura com ponderação molar.

Os resultados da análise para um sensor de bulbo cilíndrico e outro esférico estão mostrados nos gráficos das Figs. 6 e 7. Igualmente como no caso do ar atmosférico discutido na sub-Seção 3.2, obteve-se o diâmetro do sensor como função do número de Reynolds para diversas temperaturas dos produtos de combustão.



**Figura. 6** - Diâmetro de bulbo de um termômetro de bulbo úmido cilíndrico como função do número de Reynolds e temperatura dos produtos de combustão do propano com 20% de excesso de ar para que o sensor indique a temperatura de bulbo úmido termodinâmica.



**Figura. 7** - Diâmetro de bulbo de um termômetro de bulbo úmido esférico como função do número de Reynolds e temperatura dos produtos de combustão do propano com 20% de excesso de ar para que o sensor indique a temperatura de bulbo úmido termodinâmica.

Como exemplo, supõem-se gases oriundos da combustão de propano com 20% de excesso de ar, a 600 °C e número de Reynolds igual a 800. Na fig. 6, determina-se que um termômetro de bulbo úmido com formato cilíndrico com diâmetro de 0,3 mm, nas condições propostas, indicará com precisão a temperatura de bulbo úmido termodinâmica.

#### 4. Conclusão e Recomendação

Neste artigo foram revisadas a teoria do psicrômetro. Neste processo de revisão teórica, as equações e correlações envolvidas foram generalizadas, o que resultou na determinação de uma expressão geral adimensional do psicrômetro. De posse dessa equação, foram analisadas duas geometrias usuais de bulbos de sensores, quais sejam, a geometria cilíndrica e a esférica, e determinadas a dimensão construtiva e as características operacionais do sensor para que o mesmo indique a propriedade temperatura de bulbo úmido termodinâmica. Na análise com o ar atmosférico, verificou-se que o efeito da umidade relativa era bastante pequeno em relação às demais grandezas envolvidas. Como resultado final do trabalho, indicou-se, através de exemplos, um procedimento para determinação do diâmetro ideal do bulbo de um sensor como função do número de Reynolds e, portanto, da velocidade do gás, e das temperaturas envolvidas. Nesta condição de operação, o termômetro indica a propriedade termodinâmica desejada.

#### 5. Referências

- Ashrae, 1997, *Fundamentals Handbook*, Ashrae, pp 6.20.  
 Simões-Moreira, J. R., 1999a, *Fundamentos e Aplicações da Psicrometria*, RPA Editorial, São Paulo Brasil, pag 105-112.  
 Simões-Moreira, J. R., 1999b, A Thermodynamic Formulation of the Psychrometer Constant, *Measurement Science and Technology*, V.10, pp. 301-311.  
 Holman, J. P., 1983, *Transferência de Calor*, McGraw-Hill do Brasil.  
 Welty, James R., 2001, *Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer*, 4<sup>th</sup> Edition, John Wiley, USA, pp. 430-435.  
 Threlkeld, J.L. 1970, *Thermal Environmental Engineering*, Englewood Cliffs, N.J.; Prentice Hall