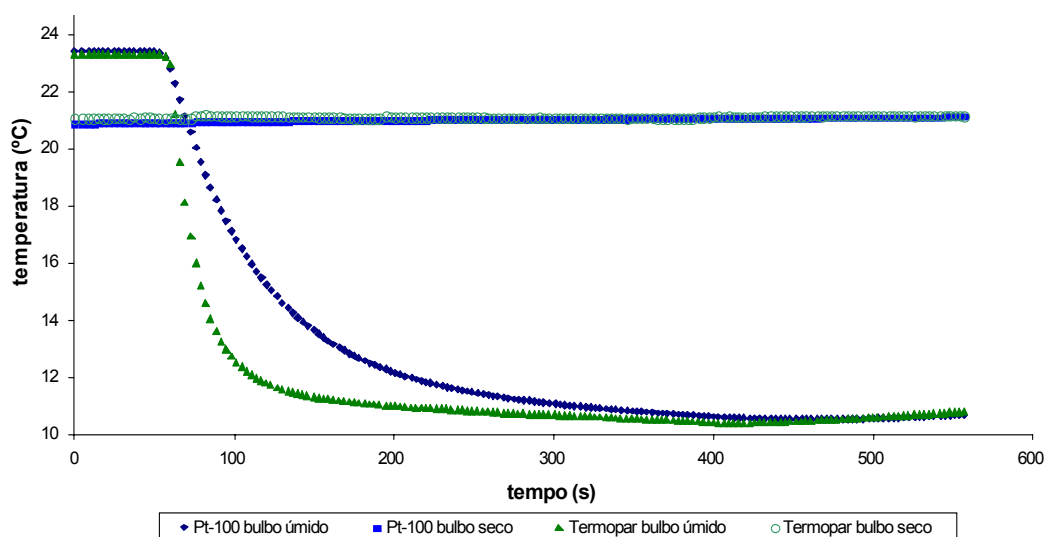


## 4 RESULTADOS E ANALISE

### 4.1. Avaliação preliminar

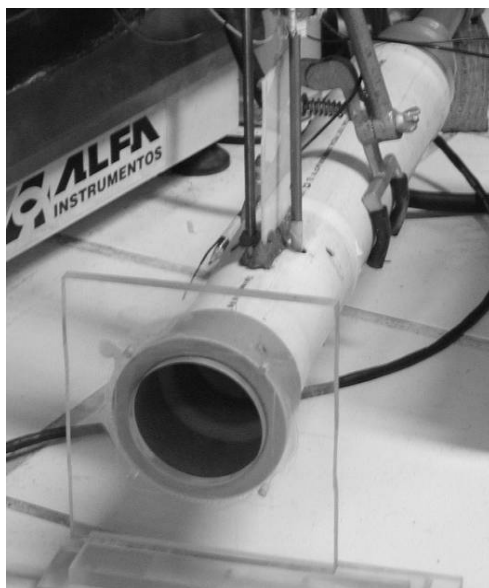
Foram coletados, com auxílio do Lab VIEW, os valores da resistência dos termômetros PT-100 e Termopares tanto de bulbo seco quanto de bulbo úmido em intervalos de 3s para uma velocidade do ar de 1,44m/s (Fig. 8), observando um bom comportamento do sistema de aquisição de dados.



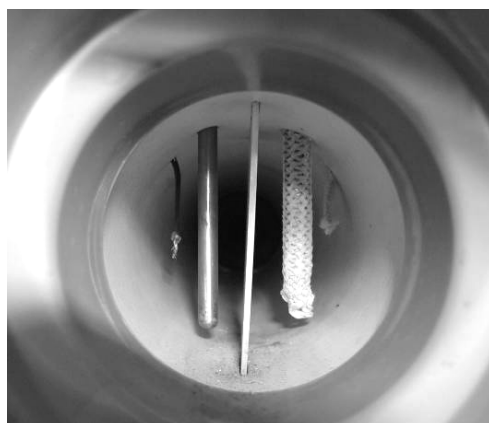
**Figura 8.** Curva de temperatura versus tempo para uma velocidade do ar de 1,44m/s.

Pode-se observar que a variação da curva do termopar tipo bulbo úmido é muito mais acentuada que para o termômetro PT-100 bulbo úmido. Na análise da constante de tempo para os dois tipos de termômetros se observará, que este fenômeno é refletido através da constante de tempo para cada um dos termômetros tipo bulbo úmido.

Na Fig. 9, apresenta-se o psicrômetro tipo bulbo úmido e bulbo seco construído para desenvolver o presente trabalho e na Fig. 10 a posição dos termômetros. Na Fig. 11, se apresenta o arranjo experimental empregado no presente trabalho.



**Figura 9.** Psicrômetro tipo bulbo úmido e bulbo seco construído para o presente trabalho.



**Figura 10.** Posição dos termômetros tipo bulbo úmido e bulbo seco PT-100 e termopar.



**Figura 11.** Arranjo experimental utilizado no presente trabalho.

## 4.2.

### Determinação da umidade relativa utilizando os termômetros PT-100

Utilizando a Eq.(42) para o cálculo da pressão real de vapor e a Eq.(22) para o cálculo da pressão de saturação, foi utilizada a Eq.(30) para o cálculo da umidade relativa detectada pelo psicrômetro baseado em termômetros PT-100.

As incertezas foram avaliadas segundo o procedimento apresentado nas Eq.(79) até (89) do capítulo de materiais e métodos.

Na Tabela 10 é apresentada uma parte da planilha construída em Excel® para realizar os cálculos.

Na Tabela 11 é apresentado um resumo dos cálculos dos diferentes graus de umidade em função da velocidade do ar utilizados no presente trabalho.

**Tabela 10.** Planilha padrão construída no Excel® para o cálculo da umidade relativa baseada nas medições realizadas com os termômetros PT-100

|                |                |           |         |             |       |             |
|----------------|----------------|-----------|---------|-------------|-------|-------------|
| $e_{db}$ (kPa) | $e_{sw}$ (kPa) | A         | P (kPa) | $e_d$ (kPa) | UR(%) | $\pm U(ur)$ |
| 2,49586        | 1,26969        | 0,0006660 | 100,1   | 0,5648      | 22,63 | 4,24        |

|            |            |             |         |           |          |          |
|------------|------------|-------------|---------|-----------|----------|----------|
| $de/dt_w$  | $de/dt_d$  | $de/dP$     | $de/dA$ | $de_d/dt$ | $u(e)$   | $u(e_d)$ |
| 0,00215487 | 0,00216879 | 1,22036E-07 | 0,05292 | 0,004564  | 0,053008 | 0,004564 |

|          |        |       |      |
|----------|--------|-------|------|
| $T_{db}$ | 21,098 | $\pm$ | 0,04 |
| $T_{wb}$ | 10,524 | $\pm$ | 0,04 |

**Tabela 11.** Valores para diferentes graus de umidade relativa e velocidade do ar utilizando termômetros PT-100.

| Grandezas medidas |           |                         |           |                        |           | Grandeza calculada |           |
|-------------------|-----------|-------------------------|-----------|------------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Velocidade do ar  |           | Temperatura bulbo úmido |           | Temperatura bulbo seco |           | Umidade relativa   |           |
| (m/s)             | U (k = 2) | °C                      | U (k = 2) | °C                     | U (k = 2) | (%)                | U (k = 2) |
| 1.44              | 0.042     | 10.52                   | 0.04      | 21.03                  | 0.04      | 22.29              | 4.33      |
| 1.43              | 0.002     | 11.02                   | 0.04      | 21.62                  | 0.04      | 22.91              | 4.21      |
| 1.43              | 0.002     | 13.68                   | 0.04      | 14.28                  | 0.04      | 93.70              | 0.49      |
| 1.41              | 0.011     | 14.49                   | 0.04      | 14.85                  | 0.04      | 96.24              | 0.38      |
| 2.12              | 0.002     | 10.07                   | 0.04      | 22.66                  | 0.04      | 13.66              | 4.69      |
| 2.13              | 0.001     | 12.21                   | 0.04      | 13.23                  | 0.04      | 88.96              | 0.75      |
| 2.11              | 0.003     | 12.50                   | 0.04      | 13.18                  | 0.04      | 92.66              | 0.55      |
| 2.11              | 0.005     | 13.09                   | 0.04      | 13.58                  | 0.04      | 94.75              | 0.45      |
| 2.14              | 0.004     | 13.85                   | 0.04      | 14.29                  | 0.04      | 95.35              | 0.42      |
| 2.15              | 0.010     | 15.15                   | 0.04      | 15.21                  | 0.04      | 99.37              | 0.32      |
| 2.90              | 0.012     | 10.90                   | 0.04      | 18.16                  | 0.04      | 38.82              | 3.57      |
| 2.87              | 0.001     | 12.26                   | 0.04      | 23.28                  | 0.04      | 23.62              | 3.96      |
| 2.84              | 0.001     | 13.18                   | 0.04      | 14.04                  | 0.04      | 90.93              | 0.63      |
| 2.83              | 0.001     | 12.85                   | 0.04      | 13.61                  | 0.04      | 91.83              | 0.59      |
| 2.82              | 0.003     | 13.60                   | 0.04      | 13.78                  | 0.04      | 98.08              | 0.34      |
| 2.78              | 0.014     | 15.60                   | 0.04      | 15.27                  | 0.04      | 100.00             | 0.38      |

Observam-se nos dados da Tabela 11 que a incerteza da umidade relativa tem um comportamento inversamente proporcional ao grau de umidade; no intervalo de umidade que vai de 13% até 40% a incerteza é em torno de 4%, e no intervalo de umidade que vai de 80% até 100% a incerteza é em torno de 0,50%. As incertezas estão apresentadas com uma confiabilidade de 95,45% ( $k = 2$ ). Segundo o NPL (Scott, 1996), as incertezas da umidade devem estar em torno de 2% até 5,0% ( $k = 2$ ).

A temperatura do bulbo úmido para uma velocidade do ar de 1,4m/s está em torno de 12,4°C, para uma velocidade do ar de 2,1m/s está em torno de 12,8°C e para uma velocidade do ar de 2,8m/s está em torno de 13,1°C. Em média a temperatura do bulbo úmido está em torno de 12,8°C.

#### 4.3.

#### Determinação da umidade relativa utilizando termopares

Utilizando a Eq.(42) foi calculada a umidade relativa detectada pelo psicrômetro baseado em nos termômetros tipo termopar. As incertezas foram avaliadas segundo o procedimento apresentado nas Eq.(88) e (89) do capítulo de materiais e métodos.

Na Tabela 12, é apresentado um resumo dos cálculos dos diferentes graus de umidade em função da velocidade do ar utilizados no presente trabalho.

**Tabela 12.** Valores para diferentes graus de umidade relativa e velocidade do ar utilizando o psicrômetro com termômetros tipo Termopar.

| Grandezas medidas |           |                         |           |                        |           | Grandeza calculada |           |
|-------------------|-----------|-------------------------|-----------|------------------------|-----------|--------------------|-----------|
| Velocidade do ar  |           | Temperatura bulbo úmido |           | Temperatura bulbo seco |           | Umidade relativa   |           |
| (m/s)             | U (k = 2) | °C                      | U (k = 2) | °C                     | U (k = 2) | (%)                | U (k = 2) |
| 1.44              | 0.003     | 10.38                   | 0.21      | 20.49                  | 0.21      | 23.67              | 4.36      |
| 1.43              | 0.002     | 10.66                   | 0.21      | 20.96                  | 0.21      | 23.45              | 4.32      |
| 1.43              | 0.002     | 13.39                   | 0.21      | 14.62                  | 0.20      | 87.32              | 1.67      |
| 1.41              | 0.011     | 14.36                   | 0.21      | 13.21                  | 0.21      | 100.00             | 1.95      |
| 2.12              | 0.002     | 9.98                    | 0.21      | 20.64                  | 0.20      | 20.51              | 4.55      |
| 2.13              | 0.001     | 11.89                   | 0.21      | 13.83                  | 0.21      | 79.71              | 1.90      |
| 2.11              | 0.003     | 12.43                   | 0.21      | 12.50                  | 0.21      | 99.27              | 1.69      |
| 2.11              | 0.005     | 13.04                   | 0.21      | 12.36                  | 0.21      | 100.00             | 1.86      |
| 2.14              | 0.004     | 14.11                   | 0.21      | 13.16                  | 0.21      | 100.00             | 1.90      |
| 2.15              | 0.010     | 14.98                   | 0.21      | 14.10                  | 0.21      | 100.00             | 1.82      |
| 2.90              | 0.012     | 10.84                   | 0.21      | 16.27                  | 0.21      | 50.22              | 3.19      |
| 2.87              | 0.001     | 12.14                   | 0.21      | 22.24                  | 0.20      | 27.08              | 3.93      |
| 2.84              | 0.001     | 12.78                   | 0.21      | 14.21                  | 0.20      | 85.07              | 1.72      |
| 2.83              | 0.001     | 12.77                   | 0.21      | 12.99                  | 0.20      | 97.53              | 1.65      |
| 2.82              | 0.003     | 13.49                   | 0.21      | 12.57                  | 0.21      | 100.00             | 1.93      |
| 2.78              | 0.014     | 15.61                   | 0.21      | 14.03                  | 0.21      | 100.00             | 2.07      |

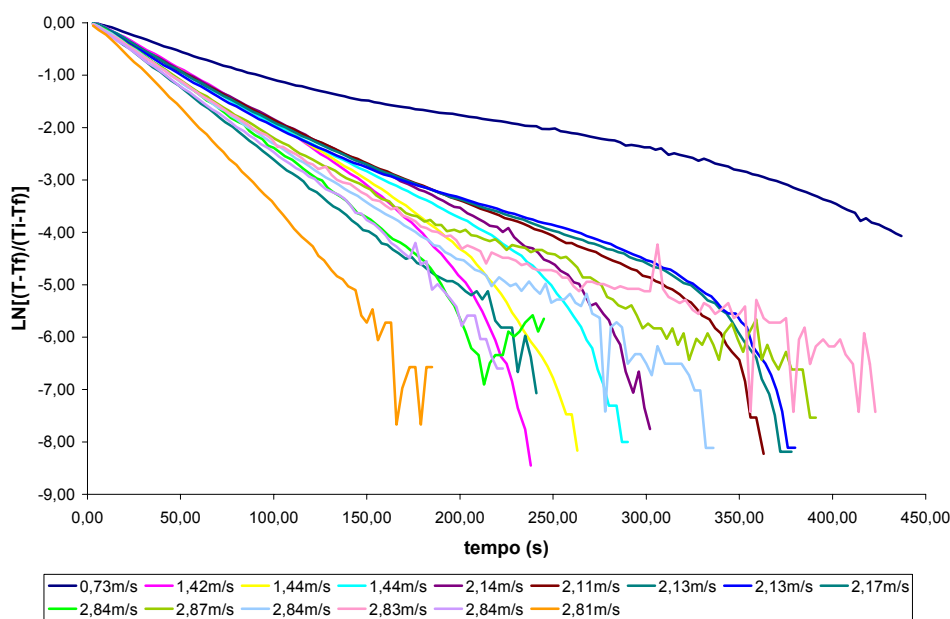
Observam-se nos dados da Tabela 12, que a incerteza da umidade relativa é dependente do conteúdo de umidade do ar; no intervalo de umidade que vai de 20% até 50% a incerteza é em torno de 4,1%, e no intervalo de umidade que vai de 74% até 100% a incerteza é em torno de 1,80%. As incertezas estão apresentadas com uma confiabilidade de 95,45% ( $k = 2$ ). Segundo o NPL (Scott, 1996), as incertezas da umidade devem estar em torno de 2,0% até 5,0% ( $k = 2$ ).

A temperatura do bulbo úmido para uma velocidade do ar de 1,4m/s está em torno de 12,2°C, para uma velocidade do ar de 2,1m/s está em torno de 12,7°C e para uma velocidade do ar de 2,8m/s está em torno de 12,9°C. Em média a temperatura do bulbo úmido esta em torno de 12,6°C.

#### 4.4.

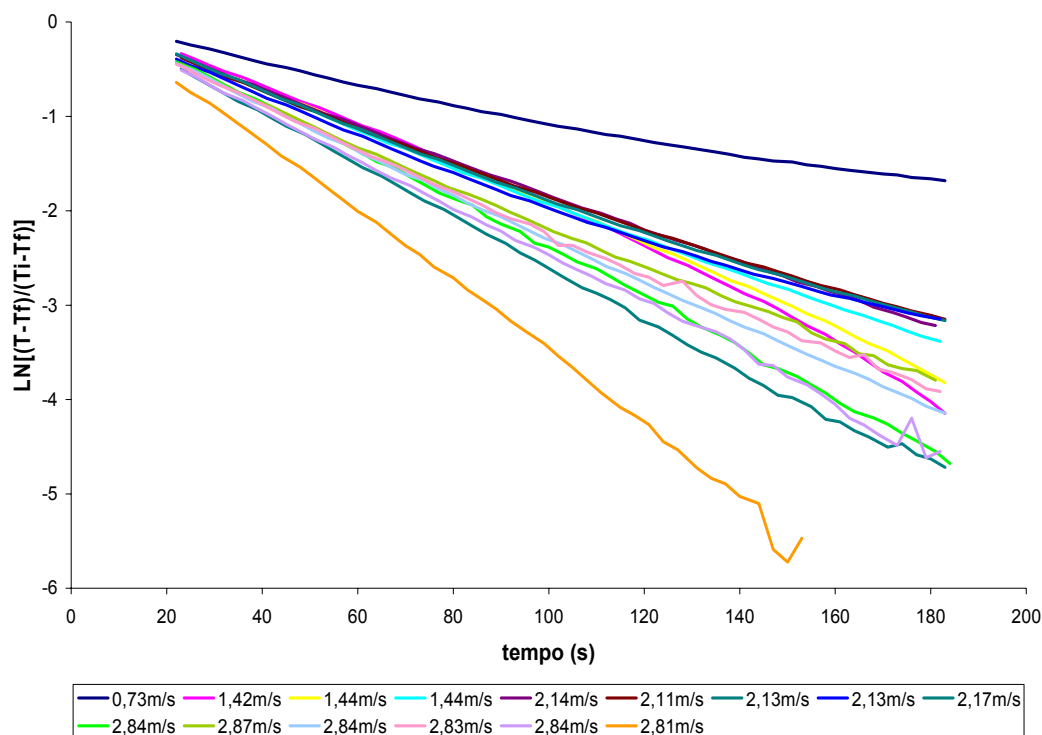
#### Determinação da constante de tempo através de $\ln[(T-T_f)/(T_i-T_f)]$ para o psicrômetro utilizando termômetros PT-100.

A partir da Eq.(55) do capítulo de materiais e métodos, é considerado um modelo com ajuste de primeiro grau, plotamos  $y = \ln[(T - T_f)/(T_i - T_f)]$  contra valores de tempo, conforme se observa na Fig. 12 para o psicrômetro com termômetros PT-100. São mostradas as curvas determinadas experimentalmente variando a velocidade do ar e o conteúdo de umidade.



**Figura 12.** Gráfico  $y = \ln[(T - T_f)/(T_i - T_f)]$  contra o tempo, com o PT-100

A constante de tempo  $\tau$  é determinada pelo método dos mínimos quadrados; para seu cálculo foram eliminadas as partes inicial e final das curvas devido ao atraso da resposta pela turbulência inicial no psicrômetro e à descontinuidade que se apresenta no valor da temperatura de equilíbrio no termômetro bulbo úmido respectivamente (Fig. 13).



**Figura 13.** Curvas de  $y = \ln\left[\frac{(T - T_f)}{(T_i - T_f)}\right]$  contra o tempo, com cortes inicial e final para o PT-100.

#### 4.4.1. Determinação das constantes de tempo segundo o modelo logarítmico

Baseados nos dados da Fig. 13, determinou-se constante de tempo para cada uma das retas, calculada com o inverso da inclinação de cada uma das retas. Foi aplicado o método dos mínimos quadrados e as incertezas das constantes foram achadas por diferenças finitas.

Na Tabela 13, são apresentados os valores da constante de tempo como função da umidade e a velocidade do ar para o psicrômetro com termômetros tipo PT-100.

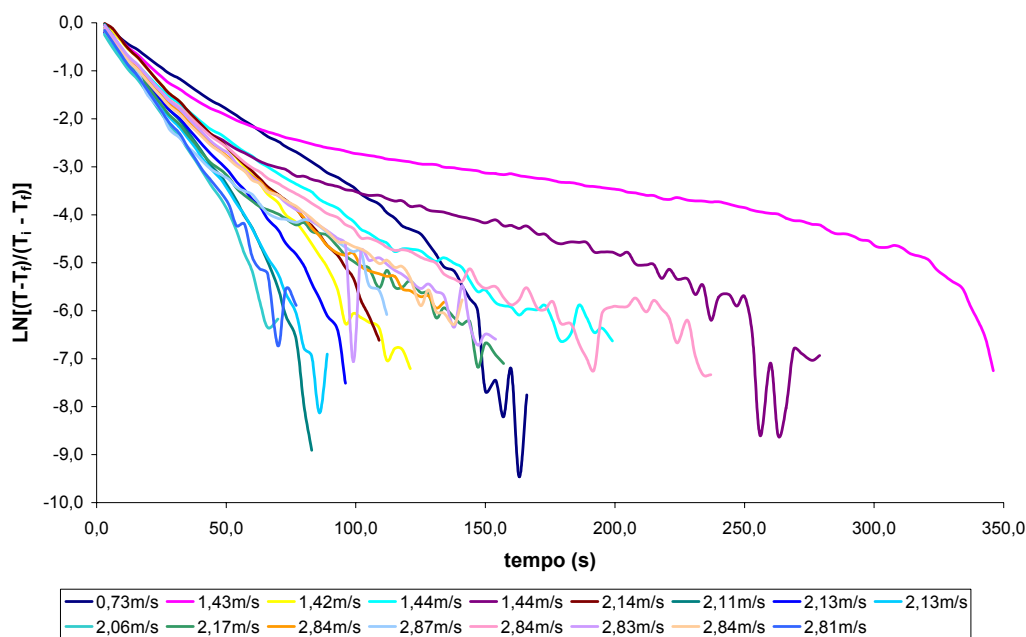
**Tabela 13.** Constante de tempo do psicrômetro utilizando PT-100 em função velocidade e umidade do ar segundo o modelo logarítmico, as incertezas estão calculadas para  $k = 2$ .

| Constante de tempo<br>$\tau$ (s) | Incerteza<br>$\pm u(\tau)$<br>( $k = 2$ ) | velocidade do ar (m/s) | Incerteza<br>$\pm u(v)$ m/s<br>( $k = 2$ ) | umidade relativa (%) | Incerteza<br>$\pm u(u.r.)$<br>( $k = 2$ ) |
|----------------------------------|-------------------------------------------|------------------------|--------------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------|
| 71,68                            | 1,02                                      | 1,44                   | 0,042                                      | 22,29                | 4,33                                      |
| 42,17                            | 1,01                                      | 1,43                   | 0,002                                      | 22,91                | 4,21                                      |
| 46,59                            | 0,38                                      | 1,43                   | 0,002                                      | 93,70                | 0,49                                      |
| 50,21                            | 0,76                                      | 1,41                   | 0,011                                      | 96,24                | 0,38                                      |
| 54,54                            | 0,30                                      | 2,13                   | 0,001                                      | 13,66                | 4,69                                      |
| 63,35                            | 0,72                                      | 2,11                   | 0,003                                      | 88,96                | 0,75                                      |
| 66,09                            | 1,14                                      | 2,11                   | 0,005                                      | 92,66                | 0,55                                      |
| 68,64                            | 1,14                                      | 2,14                   | 0,004                                      | 94,75                | 0,45                                      |
| 65,52                            | 1,12                                      | 2,15                   | 0,010                                      | 95,35                | 0,42                                      |
| 38,38                            | 0,36                                      | 2,90                   | 0,012                                      | 99,37                | 0,32                                      |
| 55,76                            | 1,47                                      | 2,87                   | 0,001                                      | 38,82                | 3,57                                      |
| 43,63                            | 0,21                                      | 2,84                   | 0,001                                      | 23,62                | 3,96                                      |
| 50,86                            | 0,81                                      | 2,84                   | 0,001                                      | 90,93                | 0,63                                      |
| 37,21                            | 0,76                                      | 2,83                   | 0,001                                      | 91,83                | 0,59                                      |
| 26,72                            | 0,25                                      | 2,82                   | 0,003                                      | 98,08                | 0,34                                      |

#### 4.5.

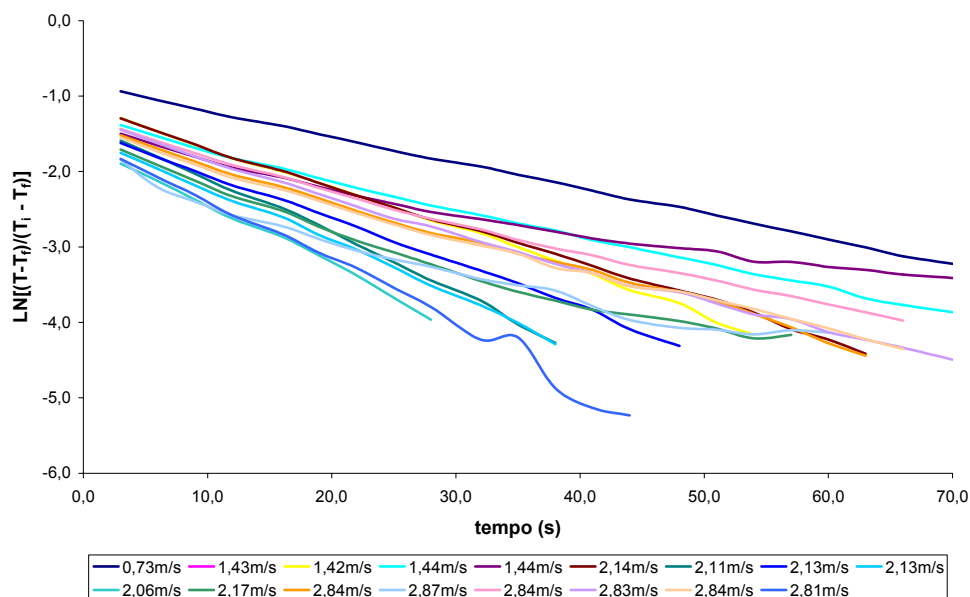
#### Determinação da constante de tempo através de $\ln[(T-T_f)/(T_i-T_f)]$ para o psicrômetro utilizando termopares

Na Fig. 14 são mostradas as curvas determinadas experimentalmente mudando a velocidade do ar e o conteúdo de umidade para o psicrômetro utilizando termopares.



**Figura 14.** Gráfico  $y = \ln[(T - T_f)/(T_i - T_f)]$  contra o tempo, com os termopares.

A constante de tempo  $\tau$  é determinada pelo método dos mínimos quadrados; para seu cálculo foram eliminadas as partes inicial e final das curvas devido ao atraso da resposta pela turbulência inicial no psicrômetro e à descontinuidade que se apresenta no valor da temperatura de equilíbrio no termômetro bulbo úmido, respectivamente (Fig. 15).



**Figura 15.** Curvas de  $y = \ln\left[\frac{(T - T_f)}{(T_i - T_f)}\right]$  contra o tempo, com cortes inicial e final para o Termopar.

#### 4.5.1.

##### Determinação das constantes de tempo segundo o modelo logarítmico

Baseados nos dados da Fig. 15 determinou-se a constante de tempo para cada uma das retas, calculado-o com o inverso da inclinação de cada uma das retas. Foi aplicado o método dos mínimos quadrados e as incertezas das constantes foram achadas por diferenças finitas.

Na Tabela 14, são apresentados os valores da constante de tempo como função da umidade e a velocidade do ar para o psicrômetro com termômetros tipo termopar.

**Tabela 14.** Constante de tempo do psicrômetro utilizando Termopar em função velocidade e umidade do ar segundo o modelo logarítmico, as incertezas estão calculadas para  $k = 2$ .

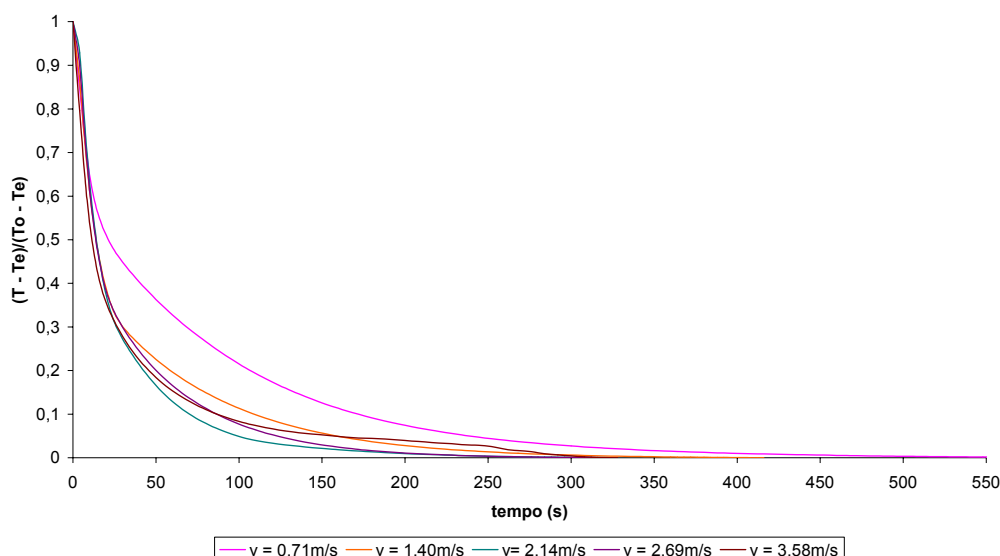
| Constante de tempo<br>$\tau$ (s) | Incerteza<br>$\pm u(\tau)$<br>$K = 2$ | velocidade do ar (m/s) | Incerteza<br>$\pm u(v)$ m/s<br>$K = 2$ | umidade relativa (%) | Incerteza<br>$\pm u(u.r.)$<br>$K = 2$ |
|----------------------------------|---------------------------------------|------------------------|----------------------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| 87,34                            | 4,84                                  | 1,43                   | 0,002                                  | 23,67                | 4,36                                  |
| 17,25                            | 0,22                                  | 1,42                   | 0,003                                  | 23,45                | 4,32                                  |
| 28,77                            | 0,91                                  | 1,44                   | 0,003                                  | 87,32                | 1,67                                  |
| 52,32                            | 3,67                                  | 1,44                   | 0,005                                  | 100,00               | 1,95                                  |
| 18,59                            | 0,39                                  | 2,14                   | 0,002                                  | 20,51                | 4,55                                  |
| 13,49                            | 0,35                                  | 2,11                   | 0,001                                  | 79,71                | 1,90                                  |
| 16,58                            | 0,12                                  | 2,13                   | 0,004                                  | 99,27                | 1,69                                  |
| 13,78                            | 0,43                                  | 2,13                   | 0,010                                  | 100,00               | 1,86                                  |
| 12,67                            | 0,45                                  | 2,06                   | 0,014                                  | 100,00               | 1,90                                  |
| 20,57                            | 0,53                                  | 2,84                   | 0,001                                  | 50,22                | 3,19                                  |
| 23,40                            | 1,56                                  | 2,87                   | 0,001                                  | 27,08                | 3,93                                  |
| 28,71                            | 1,38                                  | 2,84                   | 0,001                                  | 85,07                | 1,72                                  |
| 20,41                            | 0,65                                  | 2,83                   | 0,012                                  | 97,53                | 1,65                                  |
| 22,08                            | 0,85                                  | 2,84                   | 0,026                                  | 100,00               | 1,93                                  |
| 12,62                            | 0,33                                  | 2,81                   | 0,012                                  | 100,00               | 2,07                                  |

#### 4.6.

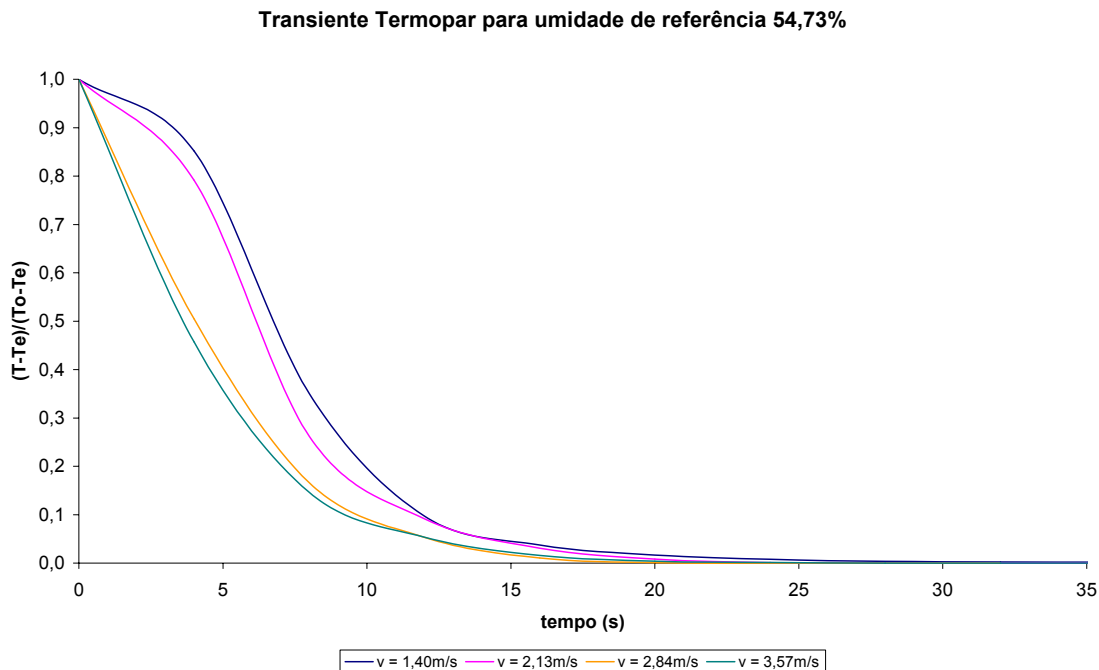
#### Comportamento transiente do psicrômetro tipo bulbo úmido e bulbo seco baseado em termômetros tipo PT-100 e Termopar

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos nas leituras dos termômetros do psicrômetros ao variar a velocidade do ar para uma umidade em particular, observando a tendência das curvas a um valor limite da temperatura de equilíbrio. A Fig. 16 corresponde ao psicrômetro com PT-100 e a Fig. 17 ao psicrômetro com Termopar.

Transiente PT-100 com umidade 54,73%



**Figura 16.** Comportamento transiente do psicrômetro utilizando termômetros PT-100.



**Figura 17.** Comportamento transiente do psicrômetro utilizando termômetros Termopar.

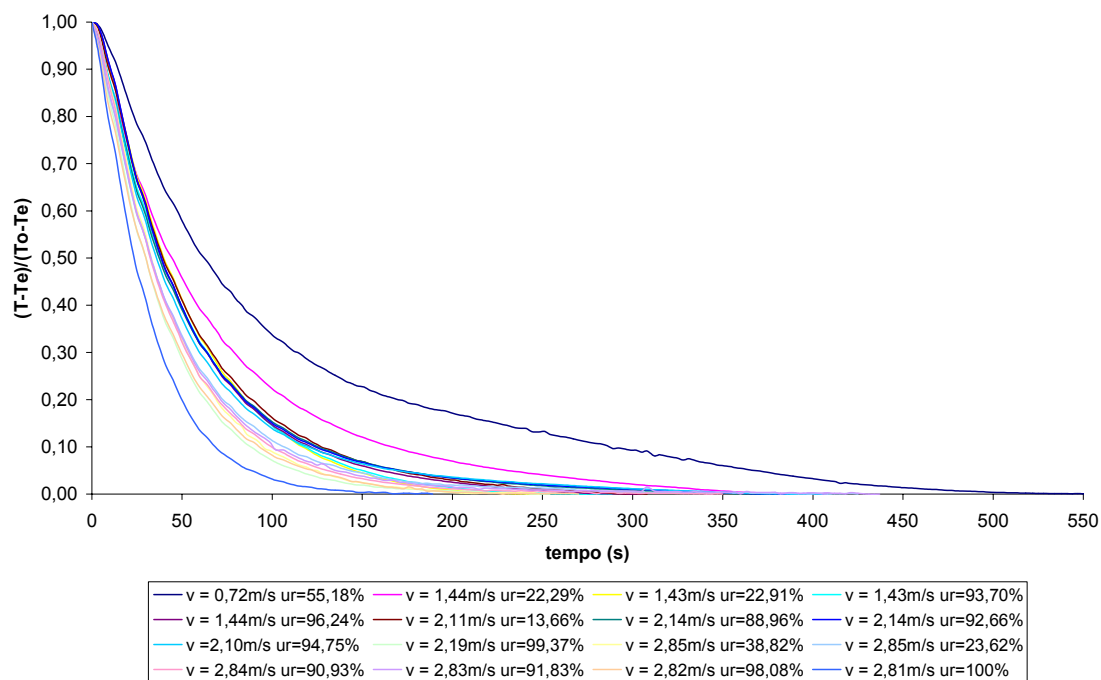
Observa-se, do comportamento de ambos gráficos, que a temperatura de bulbo úmido do psicrômetro tende a um valor limite, esse valor limite corresponde em primeira aproximação à temperatura de saturação adiabática proposto teoricamente por Threlkeld (Threlkeld, 1970). Além disso, observa-se que as curvas tendem a se agrupar a medida que a velocidade ultrapassa os 2,5m/s.

#### 4.7.

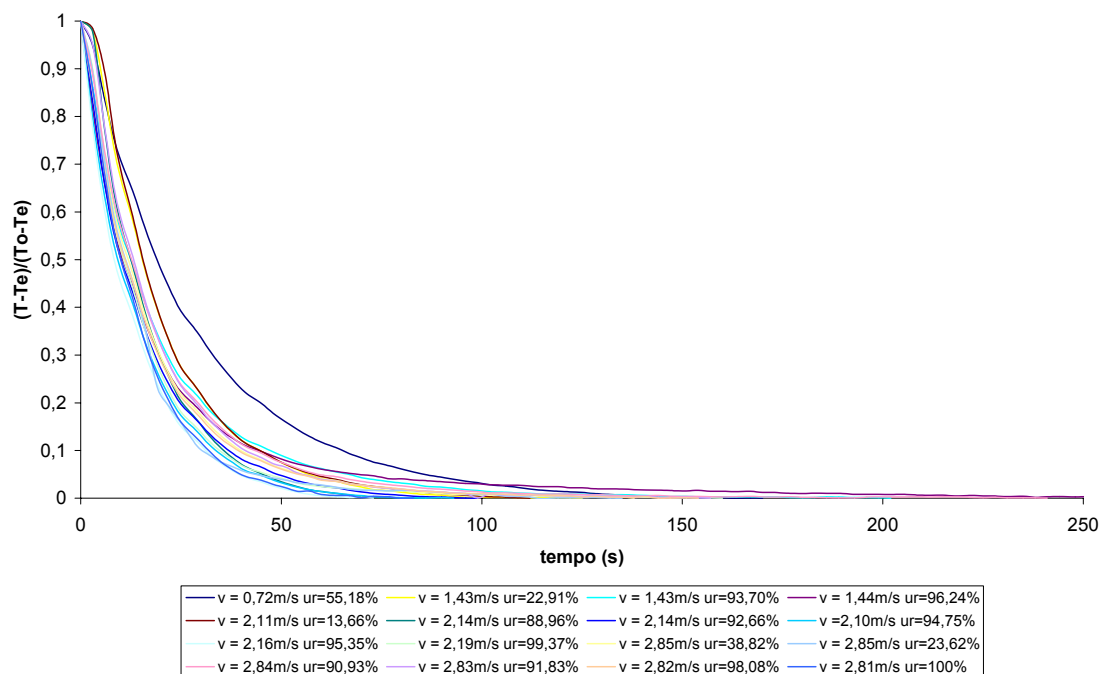
#### **Resultados do comportamento transiente do psicrômetro utilizando termômetros PT-100 e termômetros Termopar.**

Na Fig. 18 se apresentam as curvas experimentais do bulbo úmido para diferentes velocidades do ar e diferentes graus de umidade utilizando PT-100, na Tabela 15 se apresenta o resumo dos valores obtidos na aplicação do critério de Akaike para medições feitas com PT-100 na escolha do melhor modelo de ajuste e na Tabela 16, apresentam-se as probabilidades de fazer a escolha certa do modelo de ajuste.

Na Fig. 19 se apresentam as curvas experimentais do bulbo úmido para diferentes velocidades do ar e diferentes graus de umidade utilizando Termopar, na Tabela 17 se apresenta o resumo dos valores obtidos na aplicação do critério de Akaike para medições feitas com Termopar na escolha do melhor modelo de ajuste e na Tabela 18, apresentam-se as probabilidades de fazer a escolha certa do modelo de ajuste.



**Figura 18.** Curvas experimentais do comportamento transiente do bulbo úmido para diferentes velocidades do ar e diferentes graus de umidade com PT-100.



**Figura 19.** Curvas experimentais do comportamento transiente do bulbo úmido para diferentes velocidades do ar e diferentes graus de umidade com Termopar.

**Tabela 15.** Resumo dos valores obtidos na aplicação do critério de AKAIKE para medições feitas com PT-100 na escolha do melhor modelo de ajuste.

| vel. (m/s)          | 0,72    | 1,44     | 1,43    | 1,43    | 1,44    | 2,11    | 2,14    | 2,14    | 2,10    | 2,16    | 2,19    | 2,85    | 2,85    | 2,84    | 2,83    | 2,82    | 2,81    |
|---------------------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| u.r.(%)             | 55,18   | 22,29    | 22,91   | 93,70   | 96,24   | 13,66   | 88,96   | 92,66   | 94,75   | 95,35   | 99,37   | 38,82   | 23,62   | 90,93   | 91,83   | 98,08   | 100,00  |
| <b>Lin AIC</b>      | -108,33 | -462,95  | -79,67  | -251,35 | -252,94 | -144,78 | -60,25  | -46,53  | -35,66  | 14,64   | -165,33 | -157,33 | -65,67  | -305,02 | -74,45  | -104,67 | -80,62  |
| <b>Exp AIC</b>      | -144,26 | -327,36  | -158,94 | -340,93 | -519,13 | -226,99 | -189,64 | -176,41 | -171,08 | -151,07 | -296,42 | -258,40 | -253,58 | -412,49 | -363,29 | -330,09 | -232,71 |
| <b>som exp AIC</b>  | -371,15 | -546,68  | -154,06 | -349,02 | -514,95 | -224,33 | -185,95 | -169,77 | -133,09 | -183,91 | -291,70 | -253,78 | -253,89 | -408,02 | -363,48 | -325,39 | -227,80 |
| <b>racional AIC</b> | -545,87 | -485,91  | -59,38  | -168,71 | -293,36 | -87,22  | -294,59 | -315,33 | -308,66 | -273,76 | -454,08 | -459,72 | -370,79 | -614,05 | -462,40 | -466,95 | -383,16 |
| <b>polinom AIC</b>  | -777,45 | -321,14  | -166,97 | -322,76 | -481,20 | -446,42 | -311,21 | -346,39 | -333,67 | -274,23 | -530,21 | -523,48 | -311,05 | -688,85 | -320,28 | -492,53 | -501,51 |
| <b>exp+lin AIC</b>  | -749,15 | -1301,72 | -470,65 | -766,31 | -517,17 | -555,82 | -189,33 | -174,03 | -447,27 | -385,47 | -302,53 | -274,97 | -581,67 | -908,84 | -770,79 | -680,64 | -528,01 |

**Tabela 16.** Probabilidade de fazer a escolha do modelo certo utilizando termômetro PT-100, tomando como referência o modelo  $\ln[(T-T_e)/(T_o - T_e)]$ 

| vel. (m/s)         | 0,72     | 1,44     | 1,43  | 1,43     | 1,44     | 2,11     | 2,14 | 2,14 | 2,10  | 2,16 | 2,19    | 2,85     | 2,85 | 2,84     | 2,83 | 2,82 | 2,81  |
|--------------------|----------|----------|-------|----------|----------|----------|------|------|-------|------|---------|----------|------|----------|------|------|-------|
| u.r.(%)            | 55,2     | 22,3     | 22,9  | 93,7     | 96,2     | 13,7     | 89,0 | 92,7 | 94,7  | 95,3 | 99,4    | 38,8     | 23,6 | 90,9     | 91,8 | 98,1 | 100,0 |
| <b>linear</b>      | 0,50     | 0,50     | 0,50  | 0,50     | 0,50     | 0,50     | 0,50 | 0,50 | 0,500 | 0,50 | 0,50    | 0,500    | 0,50 | 0,50     | 0,50 | 0,50 | 0,50  |
| <b>exponencial</b> | 1,50E-15 | 1,42E-37 | 0,186 | 5,25E-06 | 1        | 5,11E-16 | 1    | 1    | 1     | 1    | 1,2E-4  | 7,22E-31 | 1    | 3,75E-30 | 1    | 1    | 0,96  |
| <b>soma exp.</b>   | 1        | 8,38E-14 | 0,030 | 4,04E-04 | 1        | 2,52E-16 | 1    | 1    | 1     | 1    | 2,0E-05 | 9,78E-32 | 1    | 5,07E-31 | 1    | 1    | 0,76  |
| <b>racional</b>    | 1        | 4,20E-20 | 0,000 | 2,10E-43 | 1,19E-19 | 1,52E-53 | 1    | 1    | 1     | 1    | 1       | 1        | 1    | 1        | 1    | 1    | 1     |
| <b>polinomial</b>  | 1        | 4,88E-39 | 0,999 | 1,25E-09 | 1        | 1        | 1    | 1    | 1     | 1    | 1       | 1        | 1    | 1        | 1    | 1    | 1     |
| <b>exp+lin</b>     | 1        | 1        | 1     | 1        | 1        | 1        | 1    | 1    | 1     | 1    | 6,63E-3 | 4,36E-27 | 1    | 1        | 1    | 1    | 1     |

Ao comparar os diferentes modelos de ajuste utilizando o critério de Akaike, nota-se que o modelo exponencial linear é melhor. Esta escolha é reforçada ao observar que a máxima probabilidade se apresenta nos modelos polinomial e exponencial linear, embora o modelo polinomial seja matematicamente bom, não é adequado para a interpretação física do fenômeno. Com tudo, Doebelin (Doebelin, 1985) chama resposta degrau ao modelo exponencial linear determinado experimentalmente neste trabalho.

**Tabela 17.** Resumo dos valores obtidos na aplicação do critério de AKAIKE para medições feitas com Termopar na escolha do melhor modelo de ajuste.

|              |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |        |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| vel. m/s     | 0,7    | 1,4    | 1,4    | 1,4    | 1,4    | 2,1    | 2,1    | 2,1    | 2,1    | 2,1    | 2,2    | 2,8    | 2,9    | 2,8    | 2,8    | 2,8    | 2,8    |
| u.r. (%)     | 55,2   | 22,3   | 22,9   | 93,7   | 96,2   | 13,7   | 89,0   | 92,7   | 94,7   | 95,3   | 99,4   | 38,8   | 23,6   | 90,9   | 91,8   | 98,1   | 100,0  |
| Lin AIC      | -56,0  | 232,1  | -26,4  | 31,6   | 148,9  | -33,9  | -32,8  | -59,6  | -19,0  | -23,5  | 33,6   | -26,0  | 29,5   | 63,6   | -20,3  | -2,8   | -28,3  |
| Exp AIC      | -82,3  | 295,1  | 64,0   | -39,7  | -28,3  | 73,3   | 53,5   | -55,3  | -95,1  | -82,7  | -72,9  | 14,8   | -42,3  | -77,6  | 87,7   | -119,6 | -111,0 |
| som exp AIC  | -85,2  | 101,8  | 68,0   | -133,6 | -330,9 | 77,3   | 105,1  | -53,5  | -108,0 | -95,8  | -69,4  | 17,7   | -41,6  | -139,4 | 91,7   | -119,6 | -162,3 |
| racional AIC | -259,3 | -406,8 | -125,7 | -288,1 | -477,1 | -130,3 | -126,2 | -183,4 | -190,5 | -183,3 | -253,4 | -189,4 | -196,8 | -308,5 | -204,5 | -259,8 | -229,5 |
| polinom AIC  | -492,4 | -390,8 | -159,2 | -446,8 | -369,7 | -243,2 | -159,1 | -325,2 | -333,3 | -286,5 | -389,6 | -358,4 | -341,9 | -387,2 | -291,1 | -381,6 | -394,7 |
| exp+lin AIC  | -456,9 | -609,2 | -222,0 | -442,5 | -754,1 | -249,6 | -205,5 | -314,4 | -339,5 | -291,1 | -404,1 | -358,2 | -352,7 | -581,3 | -282,5 | -482,2 | -398,8 |

**Tabela 18.** Probabilidade de fazer a escolha do modelo certo utilizando termômetro Termopar, tomando como referência o modelo  $\ln[(T-T_e)/(T_o - T_e)]$ 

|             |       |      |         |      |      |         |         |         |      |      |      |         |      |      |         |      |       |
|-------------|-------|------|---------|------|------|---------|---------|---------|------|------|------|---------|------|------|---------|------|-------|
| vel. (m/s)  | 0,72  | 1,44 | 1,43    | 1,43 | 1,44 | 2,11    | 2,14    | 2,14    | 2,10 | 2,16 | 2,19 | 2,85    | 2,85 | 2,84 | 2,83    | 2,82 | 2,81  |
| u.r.(%)     | 55,2  | 22,3 | 22,9    | 93,7 | 96,2 | 13,7    | 89,0    | 92,7    | 94,7 | 95,3 | 99,4 | 38,8    | 23,6 | 90,9 | 91,8    | 98,1 | 100,0 |
| linear      | 0,50  | 0,50 | 0,50    | 0,50 | 0,50 | 0,50    | 0,50    | 0,50    | 0,50 | 0,50 | 0,50 | 0,50    | 0,50 | 0,50 | 0,50    | 0,50 | 0,50  |
| exponencial | 0,002 | 0,97 | 4,6E-35 | 1    | 1    | 3,6E-37 | 2,6E-44 | 2,1E-21 | 1    | 1    | 1    | 5,8E-18 | 1    | 1    | 3,5E-31 | 1    | 1     |
| soma exp.   | 1     | 1    | 1       | 1    | 1    | 1       | 1       | 1       | 1    | 1    | 1    | 1       | 1    | 1    | 1       | 1    | 1     |
| racional    | 1     | 1    | 1       | 1    | 1    | 1       | 1       | 1       | 1    | 1    | 1    | 1       | 1    | 1    | 1       | 1    | 1     |
| polinomial  | 1     | 1    | 1       | 1    | 1    | 1       | 1       | 1       | 1    | 1    | 1    | 1       | 1    | 1    | 1       | 1    | 1     |
| exp+lin     | 1     | 1    | 1       | 1    | 1    | 1       | 1       | 1       | 1    | 1    | 1    | 1       | 1    | 1    | 1       | 1    | 1     |

Ao comparar os diferentes modelos de ajuste utilizando o critério de Akaike, nota-se que o modelo exponencial linear é melhor. Esta escolha é reforçada ao observar que esse modelo apresenta uma probabilidade um; embora outros modelos também apresentem uma probabilidade semelhante, o modelo selecionado representa o comportamento de um sistema de primeira ordem. Com tudo, Doebelin (Doebelin, 1985) chama resposta degrau ao modelo exponencial linear determinado experimentalmente neste trabalho.

## 4.8.

**Constantes do modelo exponencial + linear que melhor ajusta os dados experimentais através do tempo do psicrômetro tipo bulbo úmido e bulbo seco baseado na utilização de termômetros tipo PT-100.**

Baseado no critério de Aikake, escolheu-se o modelo  $T(t) = A \cdot \exp(-t/B) + C + D \cdot t$  e os valores das constantes são apresentadas na Tabela 19, onde as incertezas estão calculadas para um grau de confiança de 95,45% ( $k = 2$ ).

**Tabela 19.** Valores das constantes do modelo de ajuste para a temperatura do termômetro bulbo úmido PT-100 e valores das condições do ar.

| Condições do ar |        |          |           | Constantes para o modelo $Y(T) = A \cdot \exp(-T/B) + C + D \cdot T$ utilizando PT-100 |          |       |        |       |        |        |          |
|-----------------|--------|----------|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------|--------|-------|--------|--------|----------|
| v (m/s)         | ± U(v) | u.r. (%) | ± U(u.r.) | A                                                                                      | ± U(A)   | B     | ± U(B) | C     | ± U(C) | D      | ± U(D)   |
| 0,71            | 1,511  | 55,51    | 0,26      | 7,410                                                                                  | 7,29E-03 | 69,56 | 0,07   | 13,30 | 0,007  | -0,003 | 1,45E-05 |
| 1,44            | 0,042  | 22,88    | 0,18      | 30,255                                                                                 | 3,04E-02 | 61,98 | 0,07   | 11,16 | 0,006  | -0,001 | 1,46E-05 |
| 1,43            | 0,002  | 23,48    | 0,18      | 14,034                                                                                 | 1,15E-09 | 58,85 | 0,08   | 9,87  | 0,004  | 0,004  | 4,75E-05 |
| 1,41            | 0,011  | 96,26    | 0,33      | 8,166                                                                                  | 1,41E-08 | 50,28 | 1,79   | 14,52 | 0,082  | 0,000  | 5,95E-04 |
| 2,12            | 0,002  | 14,33    | 0,16      | 12,355                                                                                 | 8,10E-10 | 50,42 | 0,07   | 10,40 | 0,005  | -0,001 | 3,47E-05 |
| 2,13            | 0,001  | 89,04    | 0,33      | 9,817                                                                                  | 1,18E-08 | 50,17 | 1,26   | 12,44 | 0,071  | -0,001 | 5,01E-04 |
| 2,11            | 0,003  | 92,71    | 0,34      | 9,747                                                                                  | 1,67E-08 | 49,84 | 1,78   | 12,63 | 0,099  | 0,000  | 7,01E-04 |
| 2,11            | 0,005  | 94,78    | 0,34      | 8,738                                                                                  | 3,66E-10 | 45,13 | 0,04   | 13,43 | 0,003  | -0,001 | 9,43E-06 |
| 2,14            | 0,004  | 95,38    | 0,33      | 7,232                                                                                  | 1,84E-10 | 42,87 | 0,02   | 14,37 | 0,002  | -0,001 | 1,17E-06 |
| 2,15            | 0,010  | 99,37    | 0,33      | 6,505                                                                                  | 6,80E-09 | 40,59 | 0,96   | 15,01 | 0,055  | 0,001  | 2,57E-04 |
| 2,90            | 0,012  | 39,29    | 0,22      | 11,513                                                                                 | 2,32E-08 | 46,95 | 1,83   | 10,21 | 0,115  | 0,003  | 1,07E-03 |
| 2,87            | 0,001  | 24,13    | 0,17      | 10,011                                                                                 | 2,29E-10 | 43,07 | 0,02   | 12,37 | 0,002  | 0,000  | 4,37E-06 |
| 2,84            | 0,001  | 90,99    | 0,33      | 9,154                                                                                  | 2,62E-10 | 42,59 | 0,03   | 13,16 | 0,002  | 0,000  | 7,56E-06 |
| 2,83            | 0,001  | 91,89    | 0,33      | 8,981                                                                                  | 2,31E-10 | 42,67 | 0,02   | 12,92 | 0,002  | 0,000  | 3,42E-06 |
| 2,82            | 0,003  | 98,09    | 0,34      | 7,948                                                                                  | 2,26E-10 | 40,89 | 0,03   | 13,52 | 0,002  | 0,000  | 1,05E-05 |
| 2,78            | 0,014  | 100,00   | 0,34      | 6,034                                                                                  | 2,47E-10 | 33,49 | 0,03   | 15,30 | 0,002  | 0,002  | 1,33E-05 |

B é a constante de tempo  $\tau$  de para cada curva experimental avaliada em cada uma das condições de medição (velocidade e umidade do ar).

## 4.9.

**Constantes do modelo exponencial + linear que melhor ajusta os dados experimentais através do tempo do psicrômetro tipo bulbo úmido e bulbo seco baseado na utilização de termômetros tipo Termopar.**

Baseados no critério de Aikaike, escolheu-se o modelo  $T(t) = A \cdot \exp(-t/B) + C + D \cdot t$  e os valores das constantes são apresentados na Tabela 20, as incertezas estão calculadas para um grau de confiança de 95,45% ( $k = 2$ ).

**Tabela 20.** Valores das constantes do modelo de ajuste para a temperatura do termômetro bulbo úmido Termopar e valores das condições do ar.

| Condições do ar |        |          |           | Constantes para o modelo $Y(T) = A \cdot \exp(-T/B) + C + D \cdot T$ utilizando Termopar |          |       |        |       |        |        |         |
|-----------------|--------|----------|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------|----------|-------|--------|-------|--------|--------|---------|
| v (m/s)         | ± U(v) | u.r. (%) | ± U(u.r.) | A                                                                                        | ± U(A)   | B     | ± U(B) | C     | ± U(C) | D      | ± U(D)  |
| 0,73            | 0,011  | 26,83    | 0,04      | 8,87                                                                                     | 6,64E-10 | 26,83 | 0,03   | 11,67 | 0,005  | -0,001 | 4,0E-05 |
| 1,43            | 0,002  | 23,16    | 1,00      | 12,72                                                                                    | 1,18E-09 | 19,56 | 0,03   | 11,33 | 0,012  | -0,003 | 1,7E-05 |
| 1,42            | 0,003  | 23,21    | 0,97      | 13,88                                                                                    | 2,77E-09 | 19,86 | 0,09   | 10,34 | 0,019  | 0,003  | 2,4E-04 |
| 1,44            | 0,003  | 89,94    | 1,96      | 8,82                                                                                     | 6,74E-10 | 17,59 | 0,03   | 13,69 | 0,006  | -0,002 | 3,2E-05 |
| 1,44            | 0,005  | 100,00   | 2,29      | 6,87                                                                                     | 3,55E-10 | 15,84 | 0,02   | 14,67 | 0,004  | -0,001 | 7,1E-06 |
| 2,14            | 0,002  | 15,88    | 0,94      | 13,37                                                                                    | 9,96E-10 | 19,44 | 0,03   | 9,75  | 0,008  | 0,002  | 7,1E-05 |
| 2,11            | 0,001  | 83,74    | 1,92      | 11,44                                                                                    | 2,74E-09 | 17,07 | 0,09   | 11,37 | 0,020  | 0,005  | 2,6E-04 |
| 2,13            | 0,004  | 96,47    | 2,18      | 9,33                                                                                     | 3,36E-10 | 15,63 | 0,01   | 12,51 | 0,003  | -0,001 | 2,8E-05 |
| 2,13            | 0,010  | 100,00   | 2,28      | 8,00                                                                                     | 2,18E-10 | 15,10 | 0,01   | 12,93 | 0,002  | 0,001  | 2,0E-05 |
| 2,06            | 0,014  | 100,00   | 2,26      | 6,93                                                                                     | 2,28E-10 | 13,96 | 0,01   | 13,99 | 0,002  | 0,001  | 2,6E-05 |
| 2,17            | 0,003  | 100,00   | 2,23      | 6,43                                                                                     | 5,91E-10 | 14,68 | 0,03   | 15,03 | 0,005  | 0,000  | 3,3E-05 |
| 2,84            | 0,001  | 44,01    | 1,39      | 11,11                                                                                    | 1,23E-09 | 16,44 | 0,04   | 10,51 | 0,012  | -0,001 | 5,5E-05 |
| 2,87            | 0,001  | 25,29    | 0,95      | 9,88                                                                                     | 8,38E-10 | 15,28 | 0,03   | 12,31 | 0,008  | -0,001 | 4,9E-05 |
| 2,84            | 0,001  | 87,54    | 1,92      | 8,74                                                                                     | 4,64E-10 | 16,72 | 0,02   | 12,96 | 0,005  | -0,001 | 1,4E-05 |
| 2,83            | 0,012  | 95,14    | 2,09      | 9,28                                                                                     | 1,13E-09 | 17,71 | 0,05   | 12,71 | 0,011  | 0,001  | 5,1E-05 |
| 2,84            | 0,026  | 100,00   | 2,31      | 7,48                                                                                     | 1,50E-10 | 15,62 | 0,01   | 13,68 | 0,001  | -0,001 | 8,5E-06 |
| 2,81            | 0,012  | 100,00   | 2,33      | 5,61                                                                                     | 3,43E-10 | 14,15 | 0,02   | 15,51 | 0,003  | 0,001  | 2,7E-05 |

B é a constante de tempo  $\tau$  de para cada curva experimental avaliada em cada uma das condições de medição (velocidade e umidade do ar).

#### 4.10.

#### **Relação linear entre as quantidades de interesse na utilização do psicrômetro de bulbo úmido e a constante de tempo determinada pelo modelo exponencial linear.**

Na procura de um modelo que relacione a constante de tempo do psicrômetro com a velocidade do ar e o conteúdo de umidade, foi aplicado o modelo da regressão linear múltipla aos dados reportados nas Tabelas 19 e 20, levando em consideração a constante de tempo determinada para esse modelo de ajuste de dados.

A equação de regressão linear múltipla para o psicrômetro operando com termômetros tipo PT-100 é:

$$t = 75,5 - 9,73v - 0,08ur \quad (97)$$

As incertezas das constantes e do ajuste para uma confiabilidade do 95,45% ( $k = 2$ ) são:

Tabela 21 : Incerteza das constantes do ajuste para o Pt-100

|              |       |      |
|--------------|-------|------|
| $U(\beta_0)$ | $\pm$ | 0,74 |
| $U(\beta_1)$ | $\pm$ | 0,33 |
| $U(\beta_2)$ | $\pm$ | 0,01 |
| $U_{adj}$    | $\pm$ | 1,52 |

Observa-se que, para a condição inicial velocidade do ar zero e a umidade relativa também zero, a constante de tempo é 75,5s. Por cada incremento de 1m/s no valor da velocidade, a constante de tempo diminui em 9,73s; o tempo de resposta para uma velocidade do ar de 3m/s e uma umidade de 50% é: 42,32s.

Portanto, a constante de tempo é principalmente dependente da velocidade do ar, tendo a umidade uma influência secundária na resposta do psicrômetro operando com termômetro tipo PT-100.

No caso do psicrômetro operando com Termopares, a equação de regressão linear múltipla é:

$$t = 25,58 - 2,85 \cdot v - 0,03 \cdot ur \quad (98)$$

As incertezas das constantes e do ajuste para uma confiabilidade do 95,45% ( $k = 2$ ) são:

Tabela 22 : Incerteza das constantes do ajuste para o termopar

|              |       |       |
|--------------|-------|-------|
| $U(\beta_0)$ | $\pm$ | 0,63  |
| $U(\beta_1)$ | $\pm$ | 0,26  |
| $U(\beta_2)$ | $\pm$ | 0,01  |
| $U_{adj}$    | $\pm$ | 0,938 |

Observa-se que, para a condição inicial de velocidade do ar zero e a umidade relativa também zero, a constante de tempo é 25,58s. Por cada incremento de 1m/s no valor da velocidade, a constante de tempo diminui em 2,85s; o tempo de resposta para uma velocidade do ar de 3m/s e uma umidade de 50% é: 15,53s.

Nas condições de referencia o psicrômetro com termopar é mais eficiente.