

## 6. Referência Bibliográfica

ALVA E.L. *Caracterização numérica e experimental de uma chama turbulenta não pré-misturada*. Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

ALVAREZ, A.M. *Desenvolvimento de um queimador de gás natural para estudos da combustão em escoamentos turbulentos*. Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

BAHATTIN, M. *Experimental determination of suitable ethanol-gasoline blend rate at high compression ratio for gasoline engine*. *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, pp. 396 - 404, 2007.

BARLOW, R.S. *Laser diagnostics and their interplay with computations to understand turbulent combustion*. *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 31, pp. 49 – 75, 2005.

BAUMANN, ROBERT., FERRANTE, C., KNEUPER, E., DEEG, E.W. & BRAUCHLE, C. *Influence of Confinement on the Solvation and Rotational Dynamics of Coumarin 153 in Ethanol*. *American Chemical Society*, vol. 107, pp. 2422 – 2430, 2011.

BOXX, I., STOHR, M., CARTER, C. & MEIER, W. *Temporally resolved planar measurements of transient phenomena in a partially pre-mixed swirl flame in a gas turbine model combustor*. *Combustion and Flame*, vol. 157, pp. 1510 – 1525, 2010.

BOYARSHINOV, B.F. & FEDOROV, S. *Measurement of Temperature and Concentration of OH in Combustion of Hydrogen and Ethanol LIF*. Combustion, Explosion, and Shock Waves, vol. 40, No. 5, pp. 511 – 515, 2004.

BOYARSHINOV, B.F., FEDOROV, S. & TITKOV, V.I. *Distribution of OH and CH radicals in the boundary layer with ethanol combustion*. Combustion, Explosion, and Shock Waves, vol. 41, No. 4, pp. 379 – 385, 2005.

BOYARSHINOV, B.F. *Effect of Heat Transfer on the Distributions of OH and CH Radicals in the Boundary Layer with Ethanol Combustion*. Combustion, Explosion, and Shock Waves, vol. 44, No. 6, pp. 619 – 629, 2008.

CAETANO, N. *Estudo Experimental de Chamas Turbulentas não Pré-Misturadas Empregando Técnicas de Diagnóstico Laser, PLIF e PIV, Simultaneamente*. Tese de doutorado do Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CLEMENS, N. T., PAUL, P.H., MUNGAL, M.G. *The structure of OH fields in high Reynolds number turbulent jet diffusion flames*. Combustion Science and Technology, vol. 28, pp. 129 – 165, 1997.

DAILY, J.W. *Laser induced fluorescence spectroscopy in flames*. Prog. Energy Combust. Sci, vol. 23, pp. 133-199, 1997.

DALLY, B.B., MASRI, A.R., BARLOW, R.S., & FIECHTNER, G.J. *Instantaneous and Mean Compositional Structure of Bluff-Body Stabilized Nonpremixed Flames*. Combustion and Flame, vol. 114, pp. 119 – 148, 1998.

DENVIR, D.J., CONROY, E. *Electron multiplying CCD technology: The new ICCD*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 573, pp. 95-97, 2002.

DONBAR, J.M., WATSON, K.A., LYONS, K.M., CARTER, C.D. *Simultaneous two-shot CH planar laser-induced fluorescence and particle image velocimetry measurements in lifted CH<sub>4</sub>/air diffusion flames*. Proceedings of the Combustion Institute, vol. 29, pp. 1905–1912, 2002.

DUWEL, I., GE, H.W., KRONEMAYER, H., DIBBLE, R., GUTHEIL, E., SCHULZ, C. & WOLFRUM, J. *Experimental and numerical characterization of a turbulent spray flame*. Proceedings of the Combustion Institute, vol. 31, pp. 2247 – 2255, 2007a.

DUWEL, I., KUNZELMANN, T., SCHORR, J., WOLFRUM, J. *Application of fuel tracers with different volatilities for planar LIF/MIE drop sizing in evaporating systems*. Proceedings of the Combustion Institute, vol. 31, pp. 1149 – 1175, 2007b.

ECKBRETH, ALAN C. *Laser Diagnostics for combustion temperature and species*. Second Edition, New York, 1996.

GE, H.-W., GUTHEIL, E. *Joint PDF Modeling of Non-reacting and Reacting Turbulent Spray Flows*. Anais do 19th National ISHMA T-ASME Heat and Mass Transfer Conference, paper UG-017, pp. 1-10, 2008.

GOUNDER, J. D., STARNER, S. H., MASRI, A. R. *Effects of Droplet Loading in Turbulent Spray Ethanol Flames*. Fourth Australian Conference on Laser Diagnostics in Fluid Mechanics and Combustion, pp. 49-52, 2006.

GRISCH, F., BRESSON, A., BOUCHARDY, P., & ATTAL-TRETOUT, B. *Advanced optical diagnostic applied to dynamic flames and turbulent jets*. Aerospace Science and Technology, vol. 6, pp. 465-479, 2002.

GOODGER, E.M. *Hydrocarbon Fuels; Production; Properties and Performance of Liquids and Gases*, Macmillan, London, 1975.

HOLLER, F. J. *Princípios de Análise Instrumental*, 6.ed. Editora Bookman, 2009.

HULT, J., MEIER, U., MEIER, W., HARVERY, A., KAMINSKI, C.F. *Experimental analysis of local flame extinction in a turbulent jet diffusion flame by high repetition 2-D laser techniques and multi-scalar measurements*. Proceedings of the combustion institute, vol. 30, pp. 701 – 709, 2005.

JIANG, N., PATTON, R.A., LEMPERT, W.R. & SUTTON, J.A. *Development of high-repetition rate CH PLIF imaging in turbulent non-premixed flames*. Proceedings of the Combustion Institute, vol. 33, pp. 767 – 774, 2011.

JORNAL DA ENERGIA. Patrocínio pela Revista GTD Energia Elétrica. Apresenta textos sobre Geração, Hidroelétricas, Nuclear e Biomassa. Disponível em: <[http://www.jornaldaenergia.com.br/ler\\_noticia](http://www.jornaldaenergia.com.br/ler_noticia)>. Acesso em: 7 oct. 2010.

JUDDOO, M. & MASRI, A.R. *High-speed OH-PLIF imaging of extinction and re-ignition in non-premixed flames with various levels of oxygenation*. Combustion and Flame, vol. 158, pp. 902 – 914, 2011.

KAISER, S.A., FRANK, J.H. *Spatial scales of extinction and dissipation in the near field of non-premixed turbulent jet flames*. Proceedings of the combustion institute, vol. 32, pp. 1639 – 1646, 2009.

KOBAN, W. & KOCH, J.D. *Oxygen quenching of toluene fluorescence at elevated temperatures*. Applied Physics B Lasers and Optics, vol. 80, pp. 777 – 784, 2005.

KOTHNUR, P.S., TSURIKOV, M.S., CLEMENS, N.T., DONBAR, J.M. & CARTER, C.D. *Planar imaging of CH, OH, and velocity in turbulent non-premixed jet flames*. Proceedings of the Combustion Institute, vol. 29, pp. 1921 – 1927, 2002.

LA VISION GmbH, Davis 7.2, *Energy Monitor*, Printed in Germany, Göttingen, 2007.

LA VISION GmbH, Davis 7.2, *Highspeed IRO*, Printed in Germany, Göttingen, 2007.

LA VISION GmbH, Davis 7.2, *Sheet Optics*, Printed in Germany, Göttingen, 2007.

LA VISION GmbH, Davis 7.2, *Tunable LIF*, Printed in Germany Göttingen, 2007.

MASRI, A.R., GOUNDER, J.D. *Turbulent spray flames of acetone and ethanol fuels approaching extinction*. Proceedings of Sixth Mediterranean Combustion Symposium, 2009.

MARLEY, S.K., WELLE, E.J., LYONS, K.M. & ROBERTS, W.L. *Effects of leading edge entrainment on the double flame structure in lifted ethanol spray flames*. Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 29, pp. 23-31, 2004.

MARUSZEWSKI, K. *Spectroscopic properties of pure and Coumarin 153-doped thin films of sol-gel silica xerogels*, Journal of Molecular Structure, vol. 479, pp. 53–58, 1999.

MOFFAT, R.J. *Contributions to the theory of single-sample uncertainty analysis*. Stanford University, 1982.

PAUL, P.H., DURANT, J.L. & GRAY, J.A. *Collisional electronic quenching of OH measured at high temperature in a shock tube*. Journal Chemical Physics, vol. 102, pp. 8378 – 8384, 1995.

PARK, CH., CHOI, Y., KIM, CH., OH, S., LIM, G. & MORIYOSHI, Y. *Performance and exhaust emission characteristics of a spark ignition engine using ethanol and ethanol-reformed gas*. Fuel, vol. 89, pp. 2118 - 2125, 2010.

PERRYS, R.H. & GREEN, D.W. *Perrys Chemical Engineers Handbook*. 6.ed. McGraw-Hill, New York, 2008.

RAFFEL M., WILLERT C.E., WERELEY S.T. & KOMPENHANS J. Particle. *Image Velocimetry – A Practical Guide*. Second Edition Springer Berlin Heidelberg, New York, 2007.

RAMAN, V. & PITTSCH, H., Consistent hybrid LES-FDF simulation of turbulent reactive flows, Combustion Flame. 3rd M.I.T. Conference on Computational Fluid and Solid Mechanics, 2005.

ROSE, J. W. & COOPER, J.R. *Technical Data on Fuel*, 7<sup>th</sup> ed., British National Committee, World Energy Conference, London, 1977.

SADANANDAN, R., STOHR, M., MEIER, W., *Simultaneous OH-PLIF and PIV measurements in a gas turbine model combustor*. Applied Physics B: Lasers and Optics, vol. 90, pp. 609-618, 2008.

SANTOS, L.R. *Medições de temperaturas de chamas de etanol utilizando fluorescência induzida por laser*. Tese de Doutorado do Instituto de Química da USP, São Paulo, 2005.

SACOMANO, F., *Simulações de chamas turbulentas de etanol com modelo de turbulência k-ε*. Dissertação de Mestrado do Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

SCHULZ, C. & SICK, V. *Tracer-LIF Diagnostics: quantitative measurement of fuel concentration, temperature and fuel/air ratio in practical combustion systems*. Progress in Energy and Combustion Science, vol. 31, pp. 75 - 121, 2005.

SILVEIRA, J.L., BOLLINI, L., CAETANO, A., SANTANA, J. & ZANZI, R., *The benefits of ethanol use for hydrogen production in urban transportation*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 13, pp. 2525 - 2534, 2009.

STATHATOS, E., LIANOS, P., LAVRENCIC, U. & ORELL, B. *Study of laser action of Coumarin-153 incorporated in sol-gel made silica/poly (propylene oxide) nanocomposite gels*. Chemical Physics Letters, vol. 345, pp. 381 – 385, 2001.

STEINBERG, A.M., BOXX, I., ARNDT, C.M., FRANK, J.H. & MEIER, W. *Experimental study of flame-hole reignition mechanisms in a turbulent non-premixed jet flame using sustained multi-kHz PIV and crossed-plane OH-PLIF*. Proceedings of the combustion institute, vol. 33, pp. 1663 – 1672, 2011.

TAMURA, M., BERG, P.A. & HARRINGTON, J.E. *Collisional Quenching of CH(A), OH(A), and NO(A) in low Pressure Hydrocarbon Flames*. Combustion and Flame, vol. 114, pp. 502 – 514, 1998.

TSUJISHITA, M. & HIRANO, A. *Two-dimensional quenching lifetime measurement of OH:  $A^2 \Sigma^+ (v' = 1)$  and NO:  $A^2 \Sigma (v' = 0)$  in atmospheric-pressure flames*. Applied Physics B Lasers and Optics, vol. 62, pp. 255 – 262, 1996.

YU, K.H., PARR, T.P., WILSON, K.J., SCHADOW, K.C. & GUTMARK, E.J. *Active control of liquid-fueled combustion using periodic vortex-droplet interaction*. Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion/The Combustion Institute, pp. 2843-2850, 1996.

## Apêndice

### A Determinação da incerteza do número de Reynolds.

O presente apêndice destina-se a apresentar a metodologia utilizada para estimativa dos níveis de incerteza associados à determinação do valor do número de Reynolds do jato de combustível.

Nesta avaliação foi adotada a metodologia para o cálculo de propagação de incertezas, conforme descrito no trabalho de Moffat et al., 1982.

Considerando um resultado  $R$ , de uma operação que dependa da medição de  $N$  grandezas independentes,  $x_i$ , cada uma delas com suas incertezas experimental,  $\delta_{x_i}$ , com uma mesma probabilidade de ocorrência, a incerteza do resultado  $R$  pode ser avaliada como:

$$\delta R = \left\{ \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} \delta x_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} \delta x_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} \delta x_n \right)^2 \right\}^{1/2}, \quad (A1)$$

onde, as derivadas parciais representam a sensibilidade do resultado a cada variável medida.

Uma forma adequada de reportar uma medida experimental é mediante seu valor de incerteza:

$$x \pm \delta x \text{ ou } x \pm \frac{\delta x}{x},$$

onde  $\delta x$  é chamada incerteza absoluta e  $\delta x/x$  é conhecida como incerteza relativa do valor de  $x$ .

A determinação da faixa de incerteza pode ser representada em testes onde são feitas várias medidas e pode-se calcular o desvio padrão e ou mais comum é utilizar os valores fornecidos pelos fabricantes.

O número de Reynolds do jato de combustível é definido segundo:

Apêndice A  
Determinação da incerteza do número de Reynolds

$$Re_j = \frac{U_j D_j \rho_c}{\mu_c}, \quad (A2)$$

onde,  $U_j$  é a velocidade media do jato de combustível,  $D_j$  é o diâmetro do jato central,  $\rho$  e  $\mu$  são densidade e viscosidade dinâmica do combustível respectivamente.

Segundo a equação A1, a incerteza na medição do número de Reynolds pode ser estimada por.

$$\delta Re = \left\{ \left( \frac{\partial Re}{\partial U_j} \delta U_j \right)^2 + \left( \frac{\partial Re}{\partial D_j} \delta D_j \right)^2 + \left( \frac{\partial Re}{\partial \rho} \delta \rho \right)^2 + \left( \frac{\partial Re}{\partial \mu} \delta \mu \right)^2 \right\}^{1/2}, \quad (A3)$$

A contribuição para a incerteza de  $Re_j$  devido à incerteza de cada variável utilizada em seu calculo é dada por.

$$\frac{\partial Re}{\partial D_j} = \frac{U_j \cdot \rho}{\mu}, \quad (A4)$$

$$\frac{\partial Re}{\partial \rho} = \frac{U_j \cdot D_j}{\mu}, \quad (A5)$$

$$\frac{\partial Re}{\partial \mu} = \frac{-U_j \cdot D_j \cdot \rho}{\mu^2}, \quad (A6)$$

As derivadas parciais podem ser substituídas na equação A3 e logo a incerteza relativa na medição do número de Reynolds pode ser estimada por:

$$\frac{\delta Re}{Re} = \pm \left\{ \left( \frac{\delta U_j}{U_j} \right)^2 + \left( \frac{\delta D_j}{D_j} \right)^2 + \left( \frac{\delta \rho}{\rho} \right)^2 + \left( \frac{\delta \mu}{\mu} \right)^2 \right\}^{1/2} \quad (A7)$$

O diâmetro foi medido com um paquímetro com relógio da marca *Digimess* de resolução de 0,02 mm, assim as incertezas absoluta e relativa do diâmetro ( $D_j = 0,51$  mm) são de 0,01 mm e  $\pm 2$  %, respectivamente.

Utilizando-se a equação A1, calcula-se as incertezas relativas da velocidade do jato, densidade e viscosidade do combustível respectivamente.

A velocidade do jato de combustível é definida segundo a equação:

$$U_j = \frac{\dot{V}}{\left( \frac{\pi D_j^2}{4} \right)} \quad (A8)$$

onde,  $\dot{V}$  é a vazão volumétrica medida em um rotâmetro de resolução 0,1 GPH. Para 1 GPH a incerteza absoluta e relativa são de 0,05 GPH e  $\pm 5$  %,

Apêndice A  
Determinação da incerteza do número de Reynolds

respectivamente. Segundo a equação A1 a incerteza na medição da velocidade do jato pode ser estimada por

$$\delta U_j = \left\{ \left( \frac{\partial U_j}{\partial \dot{V}} \delta \dot{V} \right)^2 + \left( \frac{\partial U_j}{\partial D_j} \delta D_j \right)^2 \right\}^{1/2}, \quad (\text{A9})$$

A contribuição para a incerteza de  $U_j$  devido à incerteza de cada variável utilizada em seu cálculo é dada por:

$$\frac{\partial U_j}{\partial \dot{V}} = \frac{4}{\pi D_j^2}, \quad (\text{A10})$$

$$\frac{\partial U_j}{\partial D_j} = \frac{-8\dot{V}}{\pi D_j^3}, \quad (\text{A11})$$

As derivadas parciais podem ser substituídas na equação A9 e, logo, a incerteza relativa na medição da velocidade do jato pode ser estimada por:

$$\frac{\delta U_j}{U_j} = \pm \left\{ \left( \frac{\delta \dot{V}}{\dot{V}} \right)^2 + \left( 2 \frac{\delta D_j}{D_j} \right)^2 \right\}^{1/2}, \quad (\text{A12})$$

Na tabela 5 são mostrados os resultados do cálculo para os casos do escoamento inerte com água e casos com escoamento reativo com etanol:

**Tabela 8 Valores das incertezas da velocidade de jato para os testes com água, para 4 bar de pressão.**

| Caso | Vazão         | $\delta x$         | Vel.       | $\delta x/x$ | $\delta x$                 | Vel.     |
|------|---------------|--------------------|------------|--------------|----------------------------|----------|
|      | Jato<br>(GPH) | Rotâmetro<br>(GPH) | Jato (m/s) | Vel.<br>(%)  | Jato<br>Vel. Jato<br>(m/s) | ar (m/s) |
| 1    | 1             | ±0,05              | 5,15       | 6,4          | ±0,33                      | 7,0±0,02 |
| 2    | 1             | ±0,05              | 5,15       | 6,4          | ±0,33                      | 3,5±0,01 |
| 3    | 1,65          | ±0,05              | 8,49       | 5,0          | ±0,42                      | 7,0±0,02 |
| 4    | 1,65          | ±0,05              | 8,49       | 5,0          | ±0,42                      | 3,5±0,01 |

**Tabela 9** Valores das incertezas da velocidade de jato de combustível para os testes com etanol, para 3,7 bar de pressão e 0,58 de fator de correção do rotâmetro.

| Caso | Vazão         | $\delta x$ | Vel.       | $\delta x/x$ | $\delta x$        | Vel.            |
|------|---------------|------------|------------|--------------|-------------------|-----------------|
|      | Jato<br>(GPH) | Rotâmetro  | Jato (m/s) | Vel.<br>(%)  | Jato<br>Vel. Jato | ar (m/s)        |
| 5    | 1             | $\pm 0,05$ | 2,95       | 9,5          | 0,28              | 8,75 $\pm$ 1,31 |
| 6    | 1,65          | $\pm 0,05$ | 4,86       | 6,5          | 0,32              | 8,50 $\pm$ 1,27 |

A densidade do combustível é definida segundo a equação:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{A13})$$

onde,  $m$  é a massa medida com uma balança de escala de fundo de 0,01 g,  $V$  é o volume do líquido medido em um vidro de escala de fundo 25 ml, pelo qual as incertezas absolutas de  $m$  e  $V$  são  $\pm 0,005$  e  $\pm 12,5$  respectivamente. Segundo a equação A1, a incerteza na medição da densidade do jato pode ser estimada:

$$\delta\rho = \left\{ \left( \frac{\partial\rho}{\partial m} \delta m \right)^2 + \left( \frac{\partial\rho}{\partial V} \delta V \right)^2 \right\}^{1/2}. \quad (\text{A14})$$

A contribuição para a incerteza da densidade, devido à incerteza de cada variável utilizada em seu cálculo é dada por:

$$\frac{\partial\rho}{\partial m} = \frac{1}{V}, \quad (\text{A15})$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial V} = \frac{-m}{V^2}. \quad (\text{A16})$$

As derivadas parciais podem ser substituídas na equação A14 e logo a incerteza relativa na medição da densidade do combustível pode ser estimada por:

$$\frac{\delta\rho}{\rho} = \pm \left\{ \left( \frac{\delta m}{m} \right)^2 + \left( \frac{\delta V}{V} \right)^2 \right\}^{1/2}, \quad (\text{A17})$$

Na tabela 7 são mostrados os resultados do cálculo:

**Tabela 10** Valores das incertezas em cada variável medida utilizados na estimativa na incerteza da densidade da água e etanol.

| Fluido | Massa<br>(g) | $\delta x$<br>balança | Volume<br>(ml) | $\delta x$<br>Volume | Densidade<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $\delta x/x$<br>Densidade<br>(%) | $\delta x$<br>Densidade<br>(kg/m <sup>3</sup> ) |
|--------|--------------|-----------------------|----------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------------|---|
| Água   | 187,88       | ±0,01                 | 200            | ±12,5                | 939,4                             | 6,25                             | ±58,7   |
| Etanol | 149,38       | ±0,01                 | 200            | ±12,5                | 749,9                             | 6,25                             | ±46,68  |

A viscosidade do **etanol** é definida segundo a equação (Perry et al., 1999) na faixa de temperatura entre 0 e 30°C:

$$\mu = 1,747 - 0,0256 \times T, \quad (\text{A18})$$

onde, T é a temperatura do fluido. Segundo a equação A1, a incerteza na medição da velocidade do jato pode ser estimada por

$$\delta\mu = \frac{\partial\mu}{\partial T} \delta T. \quad (\text{A19})$$

A contribuição para a incerteza da viscosidade devido à incerteza de cada variável utilizada em seu cálculo é dada por:

$$\delta\mu = 0,0256 \times \delta T. \quad (\text{A20})$$

A incerteza absoluta do termopar é de ±0,06 por tanto as derivadas parciais podem ser substituídas na equação A19 e, logo, a incerteza absoluta na medição da viscosidade do combustível pode ser estimada.

A viscosidade da **água** é definida segundo a equação (Perry et al., 1999) na faixa de temperatura entre 0 e 100°C:

$$\mu = (0,6919 + 0,0153 \times T)^{-1,58}, \quad (\text{A21})$$

onde, T é a temperatura do fluido, segundo a equação A1:

$$\delta\mu = \frac{\partial\mu}{\partial T} \delta T, \quad (\text{A22})$$

A contribuição para a incerteza da viscosidade devido à incerteza de cada variável utilizada em seu cálculo é dada por:

Apêndice A  
Determinação da incerteza do número de Reynolds

$$\delta\mu = 0,0242(0,6919 + 0,0153 \times T)^{-2,58}, \quad (A23)$$

As derivadas parciais podem ser substituídas na equação A22 e logo a incerteza absoluta na medição da viscosidade da água pode ser estimada. Na seguinte tabela são mostrados os resultados do cálculo para etanol e água:

**Tabela 11 Valores das incertezas em cada variável medida utilizados na estimativa na incerteza da viscosidade de etanol e água.**

| Fluido | Temperatura<br>(°C) | $\delta x$<br>Termopar | Viscosidade<br>(m.Pa.s) | $\delta x/x$<br>Viscosidade<br>(%) | $\delta x$<br>Viscosidade<br>(m.Pa.s) |
|--------|---------------------|------------------------|-------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Água   | 20                  | ±0,06                  | 1,005                   | 0,15                               | ±0,0015                               |
| Etanol | 20                  | ±0,06                  | 1,235                   | 0,12                               | ±0,0014                               |

Finalmente, a incerteza relativa para o número de **Reynolds** mediante o calculo segundo a equação A7 é mostrado nas tabelas 9 e 10.

**Tabela 12 Valores das incertezas em cada variável medida utilizados na estimativa na incerteza do Número de Reynolds para água.**

| Caso | Vel.<br>Jato<br>(m/s) | $\delta x/x$<br>(%) | Densidade<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $\delta x/x$<br>(%) | Viscosidade<br>(mPa.s) | $\delta x/x$<br>(%) | Re   | $\delta x/x$<br>(%) | $\delta x$ |
|------|-----------------------|---------------------|-----------------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|------|---------------------|------------|
| 1    | 5,15                  | 6,4                 | 939,4                             | 6,25                | 0,001                  | 0,15                | 2625 | 13,3                | ±348       |
| 2    | 5,15                  | 6,4                 | 939,4                             | 6,25                | 0,001                  | 0,15                | 2625 | 13,3                | ±348       |
| 3    | 8,49                  | 5,0                 | 939,4                             | 6,25                | 0,001                  | 0,15                | 4331 | 12,6                | ±547       |
| 4    | 8,49                  | 5,0                 | 939,4                             | 6,25                | 0,001                  | 0,15                | 4331 | 12,6                | ±547       |

**Tabela 13 Valores das incertezas em cada variável medida utilizados na estimativa na incerteza do Número de Reynolds para etanol.**

| Caso | Vel.<br>Jato<br>(m/s) | $\delta x/x$<br>(%) | Densidade<br>(kg/m <sup>3</sup> ) | $\delta x/x$<br>(%) | Viscosidade<br>(mPa.s) | $\delta x/x$<br>(%) | Re   | $\delta x/x$<br>(%) | $\delta x$ |
|------|-----------------------|---------------------|-----------------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|------|---------------------|------------|
| 5    | 2,95                  | 9,5                 | 746,9                             | 6,25                | 0,0012                 | 0,15                | 1015 | 15,0                | ±152       |
| 6    | 4,86                  | 6,5                 | 746,9                             | 6,25                | 0,0012                 | 0,15                | 1674 | 13,3                | ±223       |

## B Sistema de aquecimento elétrico do combustível.

A montante do nebulizador também se encontra o sistema de pré-aquecimento elétrico do combustível o qual é constituído por duas fitas flexíveis enroladas ao redor da tubulação a montante ao queimador segundo a Figura 25. O sistema de aquecimento foi projetado para permitir a mudança da fase do combustível líquido para a fase de vapor no momento da atomização, isto é quando o etanol chegar ao queimador nas condições normais de operação, 1 bar. O sistema de aquecimento incrementa a temperatura do líquido até o ponto de vaporização, 78°C (a condições de 1 bar). Cabe ressaltar que durante o escoamento do combustível pela tubulação, o etanol permanecera em estado líquido à pressão, 3,7 bar. Espere-se que a queda de pressão através do injetor permita vaporizar o combustível. A energia necessária para realizar o aquecimento foi determinada mediante a soma do calor sensível mais o calor latente de vaporização:

$$E_{aq} = \dot{m} \cdot (C_p \cdot \Delta T + C_L), \quad (B1)$$

$$\dot{m} = \frac{W^Q}{PC}, \quad (B2)$$

onde,  $E_{aq}$  [W] é a energia de aquecimento,  $\dot{m}$  [kg/s] é a vazão mássica do etanol,  $C_p$  [kJ/kg.K] é o calor específico do etanol,  $\Delta T$  é a variação térmica de 23°C a 78°C e  $C_L$  é o calor latente de vaporização para o etanol. Foi utilizada uma vazão mássica de  $\dot{m} = 0,4$  g/s, para 10 kW de potência do queimador. Então a energia de aquecimento para vaporizar o etanol para  $C_p = 2,5$  kJ/kg.K (Rose et al., 1977),  $\Delta T = 55$ K,  $C_L = 1263,8$  kJ/kg (Refprop, ver8-NIST) é de 560,2 W. Para cumprir este requisito de potência transferida para o líquido coloca-se um conjunto de resistências elétricas flexíveis enroladas ao redor da tubulação de fornecimento de combustível, como se mostra na Figura 74. O sistema de aquecimento elétrico é constituído por duas fitas de modelos HRTFI-1-1,8-CP, 432W, e HRTFI-1-0,6-CP, 144W, com comprimentos de 1830 mm e 600 mm respectivamente.

Apêndice B  
Sistema de aquecimento elétrico do combustível

Os dois para alta temperatura, de 110 V, com revestimento de tipo tecido Nomex, fornecido por *Higher Co.*



**Figura 74** Tubulação de aço inox com aquecimento elétrico. Adaptado por *Higher Co.*

Note-se que embora instalado e testado com água, este sistema de aquecimento não foi utilizado, pois falhou no momento dos ensaios. Pretende-se investigar o efeito do aquecimento do combustível em trabalhos futuros.