6 Referências Bibliográficas

- 1. SOID, S. N.; ZAINAL, Z. A. Spray and combustion characterization for internal combustion engines using optical meauring techniques-A review. **Energy**, v. 36, p. 724-741, 2011.
- AUGUSTO, A. C.; PEREIRA, N.; GOMES, D. A. The situation of biofuels in Brazil: New generation technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 14, p. 3041-3049, 2012.
- 3. PETERS, N. **Turbulent Combustion**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 11 p.
- 4. BARLOW, R. S. Laser diagnostic and their interplay with computations to understand turbulent combustion. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 31, p. 49-75, 2007.
- 5. KOHSE-HÖINGHAUS, K. et al. Combustion at the focus: laser diagnostics and control. **Proceeding of the Combustion Institute**, v. 30, p. 89-123, 2005.
- 6. BRAY, K. N. The challenge of turbulent combustion. **Proceedings of the Combustion Institute**, v. 26, p. 1-26, 1996.
- 7. LIU, H. Science and Engineering of Droplets. New Yersey: Noyes Publications, 2000.
- ALVA, L. E. Caracterização numérica e experimental de uma chama turbulenta não pré-misturada. Dissertação de Mestrado-Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 169. 2008.
- EGÚSQUIZA, J. C. Estudo experimental de chamas turbulentas não prémisturadas de etanol e ar usando diagnóstico laser. Dissertação de Mestrado-Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 134. 2012.
- 10. NOVGORODCEV, A. R. Estudo numérico e experimental da combustão turbulenta não pré-misturada de um jato de hidrogênio e ar. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade

Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, p. 200. 2012.

- 11. CAETANO, N. R. Estudo experimental de chamas turbulentas não prémisturadas empregando simultaneamente as técnicas de diagnostico laser, PLIF e PIV. Tese de Doutorado-Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2012.
- 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, v. 31, p. 75-121, 2005.
- 13. ZENG, W. et al. Atomization and vaporization for flash-boiling multi-hole spray with alcohol fuels. **Fuel**, v. 95, p. 287-297, 2009.
- 14. DÜWEL, I. et al. Application of fuel tracers with different volatilities for planar LIF/Mie drop sizing in evaporating systems. 9th International conference on liquid atomization and spray systems. Sorrento: [s.n.]. 2003.
- 15. KRONEMAYER, H. Laser-based temperature diagnostics in practical combustion systems. Tese de Doutorado-Facultade de Ciências Fisicas e Matemáticas, Universidade Ruprecht-Karls. Heidelberg, p. 169. 2007.
- 16. DÜWEL, I. Spray combustion diagnostics with tracer-based laser induced fluorescence imaging. Tese de Doutorado-Facultade de Ciências Fisicas e Matemáticas, Universidade Ruprecht-Karls. Heidelberg, p. 149. 2007.
- 17. FANSLER, T. D. et al. Quantitative liquid and vapor distribution measurements in evaporing fuel spray using laser-induced exciplex fluorescence. **Measurement Science and Technology**, v. 20, p. 13, 2009.
- DUWEL, I. et al. Spectroscopic characterization of the fluorobenzene/DEMA tracer system for laser-induced exciplex fluorescence for the quantitative study of evaporating fuel sprays. Applied Physics B, v. 97, p. 909-918, 2009.
- PFEIFER, C.; KUHM, D.; CLASS, A. G. Coupled measurement of droplet size distribution and velocity distribution in a fuel spray with digital imaging analysis under elevated pressure. 15th International symposium on applications of laser techniques to fluid mechanics. Lisboa, Portugal: [s.n.]. 2010.
- 20. SCHNEIDER, C.; PFEIFER, C.; KUHN, D. Coupled investigation of droplet size, droplet velocity and droplet shape in a fuel spray under high

pressure conditions. 24th European on Liquid Atomization and Spray Systems. Estoril, Portugal: [s.n.]. 2011.

- 21. LEE, S.; KIM, W.; YOON, W. Spray formation by a swirl spray jet in low speed cross-flow. Journal of Mechanical Science and Technology, v. 24, p. 559-568, 2010.
- 22. ANAND, T. N. C.; MADAN MOHAN, A.; RAVIKRISHNA, R. V. Spray characterization of gasoline-ethanol blends from a multi-hole port fuel injector. **Fuel**, v. 102, p. 613-623, 2012.
- 23. GUILDENBECHER, D. R.; LÓPEZ-RIVERA, C.; SOJKA, P. E. Secondary atomization. **Experiments in Fluids**, v. 46, p. 371–402, 2009.
- 24. GHAEMI, S.; RAHIMI, P.; NOBES, D. S. Measurement of droplet centricity and velocity in the spray field of an effervescent atomizer. 14th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics. Lisboa: [s.n.]. 2008. p. 1-12.
- 25. BERG, T. et al. Comparasion of particle size and velocity investigation in sprays carried out by means of different measurement techniques. 10th International conference on liquid atomization and spray systems. Kyoto: Paper ID ICLASS06-151. 2006.
- 26. ALDÉN, M. et al. Visualization and understanding of combustion processes using spatially and temporally resolved laser diagnostic tecniques. Proceedings of the Combustion Institute, v. 33, p. 69-97, 2011.
- 27. DALLY, B.; FLETCHER, D.; MASRI, A. Flow and mixing fields of turbulent bluff-body jets and flames. **Combustion Theory and Modelling**, v. 2, n. 2, p. 193-219, 1998.
- 28. DALLY, B. B. et al. Instantaneous and Mean Compositional Structure of Bluff-Body Stabilized Nonpremixed Flames. **Combustion and Flame**, v. 114, p. 119-148, 1998.
- 29. SPRAY SYSTEMS CO. Literature-Industral Spray Products catalog. 70. Disponivel em: <http://www.spray.com/cat70pt/cat70ptpdf/ssco_cat70pt_e.pdf>. Acesso em: 30 out. 2012.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, G. N. E. B. REGULAMENTO TÉCNICO ANP Nº 3/2011. Diario Oficial da Uniao, 10 Fevereiro 2011. 95-96.

- 31. DAL, A. J. Análise de desempenho de um motor ciclo Otto alimentado com álcool de 75 INPM. Tese de doutorado-Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 231. 2008.
- 32. GARDEN QUÍMICA LTDA. Álcool Hidratado 96 % FISPQ, 2013. Disponivel em: <http://www.gardenquimica.com.br/fispq_domissanitarios/alcool_hidratado_ 96.pdf>. Acesso em: 06 Janeiro 2013.
- 33. LAKOWICZ, J. R. Principles of Fluorescence Spectroscopy. 3rd. ed. [S.l.]: Springer, 2010.
- 34. DOS SANTOS, L. R. Medições de Temperaturas de Chamas de Etanol Utilizando Fluorescência Induzida por Laser. Tese de doutorado-Instituto de Química, Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 131. 2005.
- 35. LEIPERTZ, A. et al. Laser-Induced Fluorescence. In: LACKNER, M.; WINTER, F.; AGARWAL, A. **Handbook of Combustion**. Weinheim, Germany: Wiley-VCH, v. II, 2010. Cap. 8, p. 219-242.
- 36. ANDRESE, P. et al. Laser induced fluorescence with tunable excimer lasers as a possible method for instantaneous temperature field measurements at high pressures: checks with an atmospheric flame. **Applied Optics**, v. 27, p. 365-378, 1988.
- KOHSE-HOINGHAUS, K. Laser Techniques for the Quantitative Detection of Reactive Intermediates in Combustion Systems. Progress in Energy and Combustion Science, v. 20, p. 203-297, 1994.
- 38. LAVISION. Tunable LIF Manual. Göttingen, Germany: , 2009.
- SMYTH, K.; CROSLEY, D. Detection of Minor Species with Laser Techniques. In: KOSHE-HÖINGHAUS, K.; JEFFRIES, J. Applied Combustion Diagnostics. 1a. ed. New York: Taylor & Francis, 2002. Cap. 2, p. 9-68.
- 40. SICK, V.; WERMUTH, N. Single-shot imaging of OH radicals and simultaneous OH radical/acetone imaging with a tunable Nd :YAG laser. **Applied Physics B**, v. 79, p. 139-143, 2004.
- 41. LAVISION. Laser Shutter Manual. Göttingen, Germany: , 2007.
- 42. ECKBRETH, A. Laser Diagnostics for Combustion Temperature and Species. 2a. ed. New York, EEUU: Taylor & Francis, 1996.

- 43. TEIXEIRA, P.; APARECIDA, C. Velocimetria por Imagens de Partículas. 1ra. ed. : Editorial Papel Brasil, 2010.
- 44. LAVISION. Flow Master Manual. Göttingen, Germany: , 2007.
- 45. RAFFEL, M. et al. **Particle Image Velocimetry**. 2da. ed. Berlin: Springer, 2007.
- 46. PRASAD, A. Stereoscopic particle image velocimetry. **Experiments in** Fluids, v. 29, p. 103-116, 2000.
- 47. TROPEA, C.; YARIN, A.; JOHN, F. Handbook of Experimental Fluid Mechanics. 1ra. ed. Berlin: Springer, 2007.
- 48. ADRIAN, R. Twenty years of particle image velocimetry. **Experiments in** Fluids, v. 39, p. 159-169, 2005.
- 49. KEANE, R. Optimization of particle image velocimeters. Part I: Double pulsed systems. **Measurement Science and Technology**, v. 1, n. 11, p. 1202-1215, 1990.
- 50. LI, T.; NISHIDA, K.; HIROYASU, H. Droplet size distribution and evaporation characteristics of fuel spray by a swirl type atomizer. **Fuel**, v. 90, p. 2367-2376, 2011.
- 51. LAVISION. Imager Intense Manual. Göttingen, Germany: , 2005.
- 52. LAVISION. NanoStar Manual. Göttingen, Germany: , 2007.
- 53. CHIGIER, N. Optical Imaging of Sprays. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 17, p. 211-262, 1991.
- 54. LEE, C.; WU, C. H.; HOOPES, J. A. Simultaneous particle size and concentration meaurements. Flow Measurement and Instrumentation, v. 20, p. 189-199, 2009.
- 55. LAVISION. SizingMaster Shadow Manual. Göttingen, Germany: , 2007.
- 56. KASHDAN, J. T.; SHRIMPTON, J. S.; WHYBREW, A. A digital analysis technique for quantitative characterization of high-speed sprays. **Optics and Laser in Engineering**, v. 45, p. 106-115, 2007.
- 57. HAY, K.; LIU, Z.; HANRATTY, T. A backlighted imaging technique for particle size measurement in two-phase flow. **Experiments in Fluids**, v. 25,

p. 226-232, 1998.

- 58. PODCZECK, F.; RAHMAN, S.; NEWTON, J. Evaluation of a standardised procedure to assess the shape of pellets using image analysis. **International Journal of Pharmaceutics**, v. 192, p. 123-138, 1999.
- 59. ALMEIDA-PRIETO, S.; BLANCO, J.; OTERO, F. Image analysis of the shape of granulated powder grains. **Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 93, p. 621-634, 2004.
- GHAEMI, S.; RAHIMI, P.; NOBES, D. Assessment of parameters for distinguishing droplet shape in a spray field using image-based techniques. Atomization and Spray, v. 19(9), p. 809-831, 2009.
- 61. KAPULLA, R. et al. Droplet Sizing Performance of Different Shadow Sizing Codes. 16 Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik. Karlsruhe, Germany: Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie GALA. 2008. p. 38.1-38.8.
- 62. KLAPP, J. et al. Fluid Dynamics in Physics, Engineering and Environmental Applications. 1ra. ed. Berlin, Germany: Springer, 2013. 121-137 p.
- 63. KIM, K.; KIM, S. Drop sizing and depth-of-field correction in TV imaging. **Atomization and Spray**, v. 4, p. 65-78, 1994.
- 64. BRAZA, M.; PERRIN, R.; HOARAU, Y. Turbulence properties in the cylinder wake at high Reynolds number. Journal of Fluids and Structures, v. 22, p. 757-771, 2006.
- 65. TECPLOT, INC. tecplot.360 210 User Manual. Bellevue, U.S.A: [s.n.], 2012.
- 66. POPE, S. B. **Turbulent Flows**. 1ra. ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2000.
- 67. LUMLEY, J. Computational modelling of turbulent flows. Advances in Applied Mechanics, v. 18, p. 123-176, 1978.
- 68. HARTMANN, H. et al. Assessment of larger eddy and RANS stirred tank simulations by means of LDA. **Chemical Engineering Science**, v. 59, p. 2419-2432, 2004.
- 69. LEFEBVRE, A. H. Atomization and Sprays. 1ra. ed. United Sates: Taylor and Francis, 1989.

- 70. BORGHI, R.; CHAMPION, M. **Modélisation et Théorie des Flammes**. [S.1.]: Ed. Technip, 2000. 402 p.
- 71. HUANG, R.; LIN, C. Velocity field of a bluff-body wake. Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, v. 85, p. 31-45, 2000.
- 72. PALERO, V.; IKEDA, Y. Droplet-size-classified stereoscopic PIV for spray characerization. Measurement Science and Technology, v. 13, p. 1050-1057, 2002.
- 73. MOFFAT, R. J. Contributions to the Theory of Single-Sample Uncertainty Analysis. Journal of Fluids Engineering-Transactions of The ASME, v. 104, p. 250-258, 1982.

Apêndice A

Determinação da incerteza do número de Reynolds

Apresenta-se a metodologia seguida para estimar os níveis de incerteza associados à determinação do valor do número de Reynolds do escoamento anular de ar e do spray de combustível. Foi seguida a metodologia para o calculo de propagação de incertezas, conforme descrito no trabalho de [73].

Um resultado "R" é consequência de determinadas operações matemáticas que envolvem um numero "N" de medidas experimentais independentes, x_i ,

$$R = R(x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + \dots + x_N),$$
(A1)

cada uma delas com suas incertezas experimental, δx_i , para uma mesma probabilidade de ocorrência. O resultado "R" tem como incerteza a seguinte expressão:

$$\delta R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} \delta x_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} \delta x_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} \delta x_n \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (A2)$$

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

Cada medida experimental pode e deve ser adequadamente reportada com seu respectivo valor de incerteza, segundo alguma das seguintes formas:

$$x_i = \hat{x}_i \pm \delta x_i$$
 ou $x_i = \hat{x}_i \pm \frac{\delta x_i}{x_i}$, (A3)

onde δx_i é chamado de intervalo de *incerteza absoluta*, e $\delta x/x$ é conhecida como intervalo de *incerteza relativa* com o valor de x_i .

A determinação da faixa de incerteza deve ser representada em testes onde a resultado desejado "R" é resultado de medidas x_i . Pode-se calcular como o desvio padrão das medidas de x_i ou também é comum utilizar os valores fornecidos pelos fabricantes. O número de Reynolds é definido segundo:

$$Re = \frac{\rho VD}{\mu} , \qquad (A4)$$

onde, *V* é a velocidade media do escoamento, *D* é o diâmetro característico, ρ é μ são a densidade e a viscosidade dinâmica do fluido.

A incerteza na medição do número de Reynolds pode ser estimada segundo a equação A2, como:

$$\delta Re = \left[\left(\frac{\partial Re}{\partial V} \delta V \right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial D} \delta D \right)^2 + \left(\frac{\partial Re}{\partial \rho} \delta \rho \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial \mu} \delta \mu \right)^2 \right]^{1/2}.$$
 (A5)

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

$$\frac{\partial Re}{\partial D} = \frac{V \cdot \rho}{\mu},\tag{A6}$$

$$\frac{\partial Re}{\partial \rho} = \frac{V \cdot D}{\mu},\tag{A7}$$

$$\frac{\partial Re}{\partial \mu} = \frac{-V \cdot D \cdot \rho}{\mu^2}.$$
 (A8)

As derivadas parciais podem ser substituídas na equação A4 e logo a incerteza relativa na medição do número de Reynolds pode ser estimada.

a) A incerteza do numero de Reynolds do escoamento anular de etanol Re_a , pode ser calculado como:

$$\frac{\delta R e_a}{R e_a} = \pm \left[\left(\frac{\delta V_a}{V_a} \right)^2 + \left(\frac{\delta D_a}{D_a} \right)^2 + \left(\frac{\delta \rho_a}{\rho_a} \right)^2 + \left(\frac{\delta \mu_a}{\mu_a} \right)^2 \right]^{1/2}.$$
 (A9)

O diâmetro foi medido com um paquímetro de resolução de 0,1 mm, assim a incertezas absoluta e relativa do diâmetro do obstáculo (D_b = 60,0 mm), são de $\delta D_a = 0,05 mm$ e $\frac{\delta D_a}{D_a} = 0,08$ %, respectivamente.

A velocidade do escoamento de ar foi medida por meio de um anemômetro de fio quente (*Dwyer*, *S471 DTA*). Este anemômetro foi calibrado pela empresa *Skilltech*, a qual calculou uma incerteza de 0,17 *m/s* para medidas de velocidade de 7,0 *m/s* [11], correspondendo a um desvio de 2,4 %. O fabricante adopta uma postura conservadora e indica uma incerteza e medição de $\frac{\delta Va}{Va} = 3,0$ %, a qual será assumida para todos os casos.

Frequentemente a densidade do ar não e medida diretamente, mas é calculada levando em conta as condições experimentais de temperatura, pressão e umidade relativa a seu ponto de orvalho. Medir estes parâmetros, no estado atual de implementação do laboratório não é possível, pois as condições do ar

proveniente do exterior, não são conhecidas. Portanto, se utilizara uma densidade teórica para todos os casos. Para uma pressão ambiente de 101400 *Pa*, 24°*C* e 50 % de umidade relativa, uma densidade de $\rho_a = 1,1747 \ kg/m^3$ com uma incerteza de $\delta \rho_a / \rho_a = 3$ % é assumida. O mesmo para a viscosidade $\mu_a = 183,175 \cdot 10^{-7} \ N \cdot s/m^2$ e $\delta \mu_a / \mu_a = 1$ %. Portanto, a incerteza no cálculo do número de Reynolds é igual a:

$$\frac{\delta R e_a}{R e_a} = \pm \left[(0,03)^2 + (0,0008)^2 + (0,03)^2 + (0,01)^2 \right]^{1/2}, \tag{A9}$$
$$\boxed{\frac{\delta R e_a}{R e_a} = 4,36 \%}$$

b) A incerteza do numero de Reynolds do etanol Re_e , pode ser calculada como:

$$\frac{\delta R e_e}{R e_e} = \pm \left[\left(\frac{\delta V_e}{V_e} \right)^2 + \left(\frac{\delta d_b}{d_b} \right)^2 + \left(\frac{\delta \rho_e}{\rho_e} \right)^2 + \left(\frac{\delta \mu_e}{\mu_e} \right)^2 \right]^{1/2}.$$
 (A9)

O diâmetro d_b do orifício do atomizador foi medido por um microscópio óptico invertido *Carl Zeiss Axiovert 40 MAT*, usando magnificação de 5x e uma câmara *pixelink* de 1280x1024 *pixels*. Para estes parâmetros, a Figura 65 mostra o orifício do atomizador, a imagem apresenta uma resolução de 1,17 μ m/pixel. Assim, as incertezas absoluta e relativa do diâmetro, são de $\delta d_b = 0,585 \,\mu m$ e $\delta d_b/d_b = 0,12$ %, respectivamente.



Figura 65 Orifício do atomizador medido com microscópio.

Utilizando-se a equação A2, calculam-se as incertezas relativas da velocidade de injeção de etanol.

A velocidade do jato de combustível é dada por:

$$V_e = \frac{\dot{\forall}}{\left(\frac{\pi d_b^2}{4}\right)},\tag{A10}$$

onde, \forall é a vazão volumétrica medida com um rotâmetro de resolução 0,1 *GPH*, ou seja, pelo qual a incerteza absoluta e relativa é de 0,05 *GPH* (52,6 × 10^{-3} cm³/s), respectivamente. Segundo a equação A2 a incerteza na medição da velocidade do jato pode ser estimada por

$$\delta V_e = \left[\left(\frac{\partial V_e}{\partial \dot{\forall}} \delta \dot{\forall} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_e}{\partial d_b} \delta d_b \right)^2 \right]^{1/2}, \tag{A11}$$

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

$$\frac{\partial V_e}{\partial \dot{\forall}} = \frac{4}{\pi d_b^2} \,, \tag{A12}$$

$$\frac{\partial V_e}{\partial d_b} = \frac{-8\dot{\forall}}{\pi d_b^3} \,. \tag{A13}$$

As derivadas parciais podem ser substituídas na equação A11 e, logo, a incerteza relativa na medição da velocidade do jato pode ser estimada por:

$$\frac{\delta V_e}{V_e} = \pm \left[\left(\frac{\delta \dot{\forall}}{\dot{\forall}} \right)^2 + \left(-2 \frac{\delta d_b}{d_b} \right)^2 \right]^{1/2}.$$
 (A14)

Na Tabela 6 são mostrados os resultados do cálculo de incertezas para as vazões, V_e , de etanol empregado.

Tabela 6 Valores de incerteza da velocidade do spray de etanol para as vazões estudadas.

Casos	$\dot{\forall}$ (cm^3/s)	$\delta \dot{\forall}$ (cm^3/s)	δ∀́/∀́ (%)	<i>V_e</i> (<i>m/s</i>)	$\frac{\delta V_e/V_e}{(\%)}$
<i>A</i> , <i>D</i>	2,25	52,6 · 10 ⁻³	2,34	11,68	2,35
B , E	3,37	52,6 · 10 ⁻³	1,56	17,51	1,58

Note-se que a incerteza da velocidade e semelhante à da vazão devido à insignificante incerteza no diâmetro do orifício do injetor.

As incertezas na densidade e na viscosidade do etanol empregado neste estudo foram obtidas por Egúsquiza [9] para uma temperatura de injeção de etanol de 20 °C. A incerteza da densidade é da ordem de $\delta \rho_e = 46,68 \ kg/m^3$ e $\delta \rho_e / \rho_e = 6,25 \%$. A incerteza da viscosidade é da ordem de $\delta \mu_e = 0,0014 \ mPa \cdot s \in \delta \mu_e / \mu_e = 0,12 \%$.

Finalmente, as incertezas relativas nas variáveis medidas utilizadas para calcular o número de Reynolds são mostradas na tabela 7.

Tabela 7 Valores de incerteza das variáveis empregadas no calculo do numero de Reynolds da injeção de etanol.

Casos	$\delta ho_e/ ho_e$ (%)	$\delta d_b/d_b$ (%)	δμ _e /μ _e (%)	$\frac{\delta V_e/V_e}{(\%)}$	$\delta R_e/R_e$ (%)
<i>A</i> , <i>D</i>	6,25	0,12	0,12	2,35	6,68
B , E	6,25	0,12	0,12	1,58	6,45

Note-se que o valor da incerteza do número de Reynolds é dominado pela incerteza da densidade, recomenda-se medir a densidade do etanol com equipamentos mais exatos.

Componentes do campo de velocidades e do tensor de Reynolds para os casos 1 e 2 do escoamento anular de ar.





Figura 66 Evolução das componentes do tensor de Reynolds na direção (x) no caso 1 para diferentes alturas acima do obstáculo (a) $R_{xx}/(V_{y_max})^2$, (b) $R_{yy}/(V_{y_max})^2$, (c) $R_{zz}/(V_{y_max})^2$.

131



Figura 67 Evolução das componentes do tensor de Reynolds na direção (x) no caso 1 para diferentes alturas acima do obstáculo (a) $R_{xx}/(V_{y_max})^2$, (b) $R_{yy}/(V_{y_max})^2$, (c) $R_{zz}/(V_{y_max})^2$, (d) $R_{xy}/(V_{y_max})^2$, (e) $R_{xz}/(V_{y_max})^2$ e (f) $R_{yz}/(V_{y_max})^2$.





Figura 68 Evolução das componentes do tensor de Reynolds na direção (x) no caso 2 para diferentes alturas acima do obstáculo (a) $R_{xx}/(V_{y_max})^2$, (b) $R_{yy}/(V_{y_max})^2$, (c) $R_{zz}/(V_{y_max})^2$.

133



Figura 69 Evolução das componentes do tensor de Reynolds na direção (x) no caso 2 para diferentes alturas acima do obstáculo (a) $R_{xx}/(V_{y_max})^2$, (b) $R_{yy}/(V_{y_max})^2$, (c) $R_{zz}/(V_{y_max})^2$, (d) $R_{xy}/(V_{y_max})^2$, (e) $R_{xz}/(V_{y_max})^2$ e (f) $R_{yz}/(V_{y_max})^2$.

Estimativa das incertezas na técnica Shadowgraphy

As imagens de calibração da profundidade do campo podem ser empregadas para estimar os erros incorridos na medição dos diâmetros das gotas. A Figura 70 mostra os diâmetros e centricidades medidas pelo algoritmo para cada círculo presente na placa de calibração.



Figura 70 Resultados da medição do diâmetro e centricidade dos círculos da placa de calibração da profundidade de campo.

Todos os círculos do mesmo tamanho ficam agrupados numa mesma linha vertical e seu afastamento das linhas verticais (10, 20, 40, 60, 100 e 200 μ m) evidencia os erros cometidos na medição. Ao calcular a centricidade destes círculos e, contrariamente ao esperado, valores menores que c < 1 são encontrados. Os círculos de menor diâmetro, 10 μ m, apresentam os menores valores de centricidade, em comparação com os círculos de 200 um. Isto está relacionado à menor quantidade de pixel que são usados para representar os círculos no primer caso.

Na Tabela 8 são mostradas as incertezas estimadas. Neste trabalho, se assume como a incerteza para tamanho de gota a máxima diferença entre o valor nominal dos círculos e seu valor medição pelo algoritmo.

Tabela 8 Máximas incertezas estimadas para os círculos da placa decalibração da profundidade de campo.

d [µm]	$\delta d/d$
10	23,5 %
20	15,5 %
40	8,7 %
60	6,9 %
100	4,7 %
200	3,0 %