

Julio Cesar Egúsquiza Goñi

**Estudo experimental de chamas turbulentas não pré-
misturadas de etanol e ar usando diagnóstico laser**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-
Rio.

Orientador: Prof. Luís Fernando Figueira da Silva

Rio de Janeiro

Março de 2012

Julio Cesar Egúsquiza Goñi

**Estudo experimental de chamas turbulentas não pré-
misturadas de etanol e ar usando diagnóstico laser**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Luís Fernando Figueira da Silva

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC - Rio

Prof. Luis Fernando Alzuguir Azevedo

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC - Rio

Prof. Amir Antônio Martins de Oliveira Júnior

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 26 de março de 2012

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Julio Cesar Egúsquiza Goñi

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Pontifícia Universidade Católica do Perú em 2006. Possui experiência profissional como Engenheiro de Mecânico na área de Operações de Petróleo e Gás Natural.

Ficha Catalográfica

Egúsquiza Goñi, Julio Cesar

Estudo experimental de chamas turbulentas não pré-misturadas de etanol e ar usando diagnóstico laser / Julio Cesar Egúsquiza Goñi, ; orientador: Luís Fernando Figueira da Silva. – 2012.

144 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Spray. 3. Combustão. 4. Turbulência. 5. Fluorescência induzida por laser. 6. Espalhamento Mie. I. Silva, Luís Fernando Figueira da. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD:621

A Leoncio Egúsquiza Egúsquiza
meu pai.

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Luís Fernando Figueira da Silva pelo estímulo e parceria para a realização deste trabalho.

Ao meus amigos Nattan Caetano, Júlio Cuisano e Gustavo Dorregaray por todo apoio, paciência e compreensão.

Aos meus pais, pela educação, atenção e carinho de todas as horas.

À minha esposa Milagros, pelas importantes contribuições e palavras de apoio.

Ao CAPES, RNC e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

À PETROBRAS pelo suporte financeiro destinado à infra-estrutura do laboratório e ao meu treinamento.

Aos meus colegas da PUC-Rio.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

A todos os professores e funcionários do Departamento pelos ensinamentos e pela ajuda.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

Resumo

Egúsqiza Goñi, Julio César; Figueira da Silva, Luís Fernando. **Estudo experimental de chamas turbulentas não pré-misturadas de etanol e ar usando diagnóstico laser**. Rio de Janeiro, 2012. 144p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Técnicas ópticas não intrusivas foram utilizadas para obter imagens instantâneas e médias de chamas turbulentas não pré-misturadas de etanol e ar estabilizadas num queimador tipo “*bluff-body*”. O espalhamento Mie, PLIF (fluorescência induzida em um plano laser) e PIV (velocimetria por imagem de partículas) determinaram a distribuição da densidade de gotas no spray, intensidade da fluorescência do radical OH, para mapear a zona de reação da chama, e o campo da velocidade do ar, respectivamente. Inicialmente propriedades de sprays de água são comparadas quando se variam as vazões de combustível e de ar, mostrando assimetria de duas zonas de máxima intensidade de espalhamento Mie próximas do bocal de injeção, nos casos de maior vazão de jato, e nos casos de menor vazão, o fechamento do filme líquido ocorre na zona central. Em seguida foram estudados dois regimes de combustão que correspondem a duas vazões de combustível, para os quais foram caracterizadas, a partir do sinal de fluorescência do radical OH, a estrutura instantânea e a média das chamas turbulentas o que permitiu identificar zonas de extinção. A superposição das imagens médias do OH-PLIF e de espalhamento Mie permitem evidenciar, no caso de menor vazão, que o spray é completamente envolto pela chama, o que representa um comportamento clássico para o desenvolvimento e uso de modelos de combustão. No caso de maior vazão, o spray interage fortemente com o processo de combustão, sendo este um caso que se afasta das situações clássicas.

Palavras-chave

Spray; combustão; turbulência; fluorescência induzida por laser; espalhamento Mie.

Abstract

Egúsquiza Goñi, Julio César; Figueira da Silva, Luís Fernando (Advisor). **Turbulent nonpremixed ethanol-air flame experimental study using laser diagnostics**. Rio de Janeiro, 2012. 144p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A turbulent nonpremixed ethanol spray flame is characterized through experiments using laser diagnostics. The spray burner has been designed to generate a stable flame with the use of a bluff body. The experiments include spatially-resolved measurements of visualization of droplets distribution (Mie scattering), OH fluorescence intensity, which indicates the reaction zone (Planar laser-induced fluorescence, PLIF) and mean air-flow velocity (Particle imaging velocimetry, PIV). Initially, water sprays results are compared corresponding to different flow rates, showing two asymmetric maximum intensity zones of Mie scattering, which are found near the nozzle at jet velocities. For low flow velocity, coalescence of droplets occurs in the central zone. Then two combustion regimes have been studied, using OH PLIF that corresponds to two different fuel flow rates. The instantaneous and average structure of turbulent flames, allowed identifying local extinction regions. Combined Mie scattering/PLIF results allowed determining, in the case of smallest fuel flow rates, that the spray is surrounded by the flame, which represents a classical situation for the development of combustion models for turbulent flames. In the case of larger flow rate, discrepancies from the classical behavior were observed, since droplets interact strongly with the combustion process.

Keywords

Spray; combustion; turbulence; laser induced fluorescence; Mie scattering.

Sumário

1. Introdução	22
1.1. Objetivos	25
1.2. Estrutura do texto	26
2. Revisão Bibliográfica	27
2.1. Características gerais de alguns queimadores de escala de laboratório	28
2.2. Técnicas laser PLIF, espalhamento Mie e PIV para estudos de chamas turbulentas	31
2.2.1. Estudos de chamas turbulentas gasosas para detecção das zonas de reação	31
2.2.2. Estudos de chamas turbulentas de spray de etanol	37
2.3. Instalações experimentais para medições de PLIF e PIV	47
2.4. Considerações finais	51
3. Metodologia Experimental	53
3.1. Queimador tipo bluff-body	53
3.2. Instalação experimental da alimentação do combustível	54
3.2.1. Sistema de armazenamento e alimentação do combustível	56
3.2.2. Nebulizador do combustível	56
3.2.3. Medição de vazão do combustível	57
3.3. Técnica de espalhamento Mie	58
3.4. Sistema de fluorescência Induzida por plano laser PLIF	61
3.4.1. Fenômeno de luminescência, fluorescência e fosforescência	62
3.4.2. Sinal de fluorescência	66
3.4.3. Efeito de desativação colisional	67
3.4.4. Equipamento de medição de PLIF	70
3.4.5. Seleção do espectro de fluorescência do radical OH	81
3.4.6. Calibração do laser PLIF	83
3.5. Sistema PIV para medição da velocidade do ar	85

3.6. Incertezas experimentais	87
3.6.1. Incerteza no cálculo do número de Reynolds	88
3.6.2. Incertezas nos resultados de PLIF	88
3.6.2.1. Incerteza na técnica de seleção de comprimento de onda de excitação	88
3.6.2.2. Incerteza na técnica da óptica de detecção das imagens	91
3.6.2.3. Incerteza na técnica de pós-processamento	91
3.6.2.4. Incerteza total da técnica PLIF	92
3.7. Comentários finais	93
4. Resultados e Discussões	95
4.1. Escoamento quimicamente inerte	96
4.2. Escoamento reativo	107
4.2.1. Resultado do espalhamento Mie do spray de etanol	108
4.2.2. Imagens PLIF da combustão do spray de etanol	114
4.2.2.1. Caso 5	114
4.2.2.2. Caso 6	117
4.2.2.3. Comparação dos casos 5 e 6	119
4.2.3. Comparação das imagens PLIF-OH e do espalhamento Mie	121
4.2.4. PIV do ar	122
5. Conclusões e Perspectivas	125
5.1 Sugestões para aperfeiçoamento e continuidade	128
6. Referência Bibliográfica	130
Apêndice	137
A Determinação da incerteza do número de Reynolds.	137
B Sistema de aquecimento elétrico do combustível.	143

Lista de figuras

- Figura 1 – Chama estabilizada com um queimador bluff-body com mistura de CH_4/H_2 em ar utilizado por Dally et al., 1998: (a) fotografia da luminosidade da chama, (b) linhas do escoamento médio no tempo, (c) imagem de OH, (d) campo de temperatura instantânea. As figuras (b), (c) e (d) foram obtidas por simulação LES, por Raman e Pitch (2005). 29
- Figura 2 – Esquema do combustor usado por Masri e Gounder (2009). 30
- Figura 3 – (a) Queimador co-flow analisado por Düwel et al., 2007. (b) Combustor DRL utilizado por Boxx et al., 2010. 31
- Figura 4 – Imagens de PLIF-OH para H_2/ar em chamas não pré-misturadas, (a) $\text{Re}=30\,000$, (b) $\text{Re}=75\,000$, (c) $\text{Re}=150\,000$. Os números da direita representam a distância da base do queimador com diâmetro de jato de 5 mm. Chamas estudadas por Clemens et al., 1997. 32
- Figura 5 – (a) Imagens instantâneas de OH-PLIF, (b) imagens médias de OH-PLIF, (c) imagens de acetona-PLIF, (d) imagens misturadas de OH-PLIF e acetona-PLIF, em chamas H_2/ar ($\text{Mach}=2$) estudadas por Grisch et al., 2002. 33
- Figura 6 – (esquerdo) imagem de CH-PLIF, (direito) imagem de OH-PLIF. As linhas negras na imagem marcam o centro das estruturas de CH. As imagens em 2D foram estudadas por Kothnur et al., 2002. 34
- Figura 7 – Imagens simultâneas de OH-PLIF/PIV. As zonas de reação (linhas negras) estão superpostas com os campos de velocidade axial. As zonas de cor vermelho representam altas velocidades axial, os de cor verde são de baixa velocidade e os de cor azul representam fortes velocidades negativas. Imagens analisadas por Boxx et al., 2010. 35
- Figura 8 – Imagens de OH-PLIF das chamas: B10 (90% Metano, 10% O_2) e chama B20 (80% Metano, 20% O_2) analisadas por Juddoo e Masri (2011). Os rompimentos, fechamentos e pacotes de combustível são representados por setas, quadros e círculos respectivamente. 36
- Figura 9 – Imagens de 5 mm x 8 mm simultâneas com campos de vorticidade (azul: $-30000\, \text{s}^{-1}$, vermelho: $30000\, \text{s}^{-1}$) e com medições de OH-PLIF representadas por linhas negras. A localização dos segmentos de chama é identificada por setas de linhas de pontos negros. Os vórtices são representados por seta de cor branca. Imagens estudadas por Steinberg et al., 2011. 37

- Figura 10 – Fluxo de ar sem injeção de combustível em quatro instantes diferentes, (b) injeção após do desprendimento dos vórtices, (c) injeção antes do desprendimento dos vórtices. Contornos escuros marcam a presença das gotas e os contornos claros os vórtices gerados no combustor dump utilizado por Yu et al., 1996. 38
- Figura 11 – Combustor dump: (a) Chama sincronizada. (b) Chama não sincronizada. Fotografia da chama analisada por Yu et al., 1996. 39
- Figura 12 – Medições de temperaturas e concentrações de OH em chamas de etanol estudadas por Boyarshinov e Fedorov (2004). A coordenada (y) é medida em direção normal à frente de chama, a qual é normalizada pelo valor correspondente a temperatura máxima ($y_F = 1,78$ mm). 40
- Figura 13 – (a) (1) Distribuições de OH, (2) temperatura, (3) CH, resultados de Boyarshinov et al., 2005. (b) Intensidade de liberação de calor em chamas de etanol, resultados de Boyarshinov (2008). A coordenada (y) é medida em direção normal à frente de chama, a qual é normalizada pelo valor correspondente a temperatura máxima ($y_F = 1,78$ mm). 41
- Figura 14 – Queimador com estruturas de chamas duplas (luminescência azul) e imagens de OH-PLIF. (a) Caso sem co-flow (0,0 m/s) com zonas de extinção, (b) Caso com coflow (0,29 m/s) sem zonas de extinção. Imagens utilizadas por Marley et al., 2004. 42
- Figura 15 – (a) Diâmetro SMD do spray de etanol em 2 bar de pressão de injeção e 0,32 m/s de velocidade de co-flow, (b) fotografia da chama dupla de etanol e ar em uma área de 44x36 mm² com uma pressão de injeção de 2 bar e velocidade de coflow de 0,32 m/s, estudada por Düwel et al., 2007. 43
- Figura 16 – Imagens simultâneas de LIF-OH e espalhamento Mie na posição $x_D=15$ em chamas de etanol. Adaptado de Masri e Gounder (2009). 45
- Figura 17 – Comparação entre as distribuições de tamanho de gotículas dos resultados calculados na simulação com os dados experimentais de Masri e Gounder (2009). Adaptado Sacomano (2011). 46
- Figura 18 – Instalação experimental do PLIF utilizado por Marley et al., 2004 para caracterizar chamas turbulentas com etanol e ar. 47
- Figura 19 – Instalação experimental simultânea CH-PLIF/OH-PLIF/PIV utilizada por Kothnur et al., 2002 48
- Figura 20 – Instalação experimental de OH-PLIF e PIV simultânea em chamas turbulentas de metano e ar. Equipamento utilizado por Boxx et al., 2010. 49

Figura 21 – Instalação experimental PLF de alta velocidade utilizada por Juddoo e Masri (2011) para medições da fluorescência de OH em chamas turbulentas com misturas de metano e oxigênio.	50
Figura 22 – Instalação experimental utilizando pulso burst como sistema de bombeamento do OPO, para medições de CH-PLIF, utilizado por Jiang et al., 2011.	51
Figura 23 – Análise da relação sinal-ruído SNR das imagens de CH-PLIF analisadas por Jiang et al., 2011.	51
Figura 24 – Vista geral esquemática do queimador bluff body.	54
Figura 25 – Vista geral esquemática do sistema de ensaios construído. A dimensão da janela de medição é de 120 mm de comprimento e 90 mm de largura.	56
Figura 26 – Padrão de cone oco do bico-injetor. Adaptado do Spraying Systems Co.	57
Figura 27 – Configuração óptica de magnificação da imagem, na captura da fluorescência do radical OH. Adaptado, La Vision – Tunable LIF et al., 2007.	60
Figura 28 – Diâmetro da gota na imagem na matriz CCD do sistema de captura do espalhamento Mie.	61
Figura 29 – Estado eletrônico singleto (S) e tripleto (TR). Comparação relativa da energia dos estados energéticos fundamental (o) e excitados (1,2). Adaptado, Schulz et al., 2005.	64
Figura 30 – Diagrama parcial de níveis de energia para um sistema fotoluminescente. Adaptado, Holler et al., 2009.	65
Figura 31 – Stern-Volmer (SV) do tolueno para pressão parcial de 350 mbar. Adaptado, Koban et al., 2005.	69
Figura 32 – Campo de concentrações do OH-PLIF em chamas de difusão com misturas H ₂ /ar. Adaptado, Boyarshinov et al., 2004.	71
Figura 33 – Diagrama de emissão e absorção da molécula em estudo em sincronia o laser e filtros da câmera. Adaptado, La Vision – Tunable LIF et al., 2007.	72
Figura 34 – Diagrama de identificação dos equipamentos LA VISION GmbH. Adaptado, La Vision – Tunable LIF et al., 2007.	73
Figura 35 – (a) e (b) Espectros de absorção e emissão eletrônica do Coumarin 153 em solução com etanol respectivamente. Adaptado, Maruszewski et al., 1999.	74
Figura 36 – Diagrama de lentes para formação de plano laser. Adaptado, La Vision - Sheet Optics et al., 2007.	77
Figura 37 – Processo de intensificador de sinal da câmera ICCD. Adaptado, La Vision - Highspeed IRO et al., 2007.	78

Figura 38 – Sensibilidade típica para o foto-catodo S20. Adaptado, La Vision - Highspeed IRO et al., 2007. As curvas de eficiência quântica são calculadas em função da relação de operação do foto-catodo, Pr (mA/W) mediante a seguinte equação: $Q_e = 1,24Pr\lambda$.	79
Figura 39 – Eficiência quântica da câmera CCD. Adaptado, La Vision - Highspeed IRO et al., 2007.	80
Figura 40 – Espectros de absorção e emissão espontânea da molécula OH, medidas em (nm). Adaptado, Santos et al., 2005.	82
Figura 41 – Espectro de absorção e emissão do OH, Adaptado, La Vision – Tunable LIF et al., 2007.	83
Figura 42 – (a) iluminação do campo de medição das câmeras PLIF e PIV. (b) montagem do alvo no queimador bluff-body para sua calibração. Imagem do laboratório da combustão e turbulência da Puc-Rio.	85
Figura 43 – Esquema da instalação simultânea dos sistemas OH-PLIF e PIV, utilizado no presente trabalho. Adaptado, La Vision, Flow Master Getting Started et a., 2007.	87
Figura 44 – Resposta do sinal de fluorescência do radical OH induzida por laser em função do comprimento de onda da excitação	89
Figura 45 – Ângulo de abertura da lente cilíndrico divergente do sistema óptico do plano laser. Acordo a geometria da figura é apresentada a seguinte relação: $\tan\alpha = df/2f$. Adaptado La Vision - Sheet Optics et al., 2007.	90
Figura 46 – (esquerda) Imagem média do PLIF sem correção. (direita) Imagem média do PLIF corrigida.	92
Figura 47 – Imagem obtida em luz direta do escoamento do spray de água no caso 1.	97
Figura 48 – Padrões de desempenho para o sistema de pulverização.	98
Figura 49 – Imagens instantâneas do comportamento do Spray em escoamento inerte obtida por espalhamento Mie. Caso (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d) 4.	99
Figura 50 – Imagens médias do comportamento do spray em escoamento inerte obtida por espalhamento Mie. Caso (a) 1, (b) 2, (c) 3, (d).	100
Figura 51 – Evolução da intensidade das imagens média da Figura 50 na direção transversal (x), para posições longitudinais espaçadas de 5 mm a partir da superfície do queimador. — 5, - • • - 10, •• 15, --- 20, - • - 25 mm. (esquerda) Caso 1, (direita) Caso 2.	101
Figura 52 – Evolução logarítmica da intensidade das imagens média da Figura 50 na direção transversal (x), para posições longitudinais espaçadas de 5 mm a partir da superfície do queimador. — 5, - • • - 10, •• 15, --- 20, - • - 25 mm. (esquerda) Caso 1, (direita) Caso 2.	102

Figura 53 – Evolução da intensidade das imagens média da Figura 50 na direção transversal (x), para posições longitudinais espaçadas de 10 mm a partir da superfície do queimador. - • • - 10, - • - 20, — 30, • • • 40, — 50 mm. (esquerda) Caso 3, (direita) Caso 4.	103
Figura 54 – Evolução logarítmica da intensidade das imagens média da Figura 50 na direção transversal (x), para posições longitudinais espaçadas de 10 mm a partir da superfície do queimador. - • • - 10, - • - 20, — 30, • • • 40, — 50 mm. (esquerda) Caso 3, (direita) Caso 4.	103
Figura 55 – Decréscimo da intensidade na linha de centro do queimador ($x = 0$) para os quatro casos não reativo com água.	104
Figura 56 – Evolução logarítmica do decréscimo da intensidade na linha de centro do queimador ($x = 0$) para os quatro casos não reativo com água.	105
Figura 57 – Decréscimo nas duas direções de máxima intensidade, nos casos 3 (esquerda) e 4 (direita). As duas zonas de máximas intensidades são representadas por: — intensidade no lado esquerda da chama, e - • - intensidade no lado direito da chama.	106
Figura 58 – Decréscimo nas duas direções de máxima intensidade em escala logarítmica, nos casos 3 (esquerda) e 4 (direita). As duas zonas de máximas intensidades são representadas por: — intensidade no lado esquerda da chama, e - • - intensidade no lado direito da chama.	106
Figura 59 – Fotografia das chamas turbulentas de spray de etanol. Casos (a) 5 e (b) 6.	107
Figura 60 – Imagens instantâneas do espalhamento Mie obtidas do spray de etanol em combustão. (a) $Re = 1015$, (b) $Re = 1674$.	108
Figura 61 – Imagens médias do comportamento do spray em combustão obtida por espalhamento Mie. (a) $Re = 1015$, (b) $Re = 1674$.	109
Figura 62 – Evolução da intensidade das imagens médias da Figura 61 na direção transversal (x), para posições longitudinais espaçadas de 10 mm a partir da superfície do queimador. - • • - 10, - - - 20, — 30, — 40, • • • 50 mm. Caso (esquerda) 5, (direita) 6.	110
Figura 63 – Evolução logarítmica da intensidade das imagens médias da Figura 61 na direção transversal (x), para posições longitudinais espaçadas de 10 mm a partir da superfície do queimador. - • • - 10, - - - 20, — 30, — 40, • • • 50 mm. Caso (esquerda) 5, (direita) 6.	110
Figura 64 – Decréscimo da intensidade na linha de centro do queimador ($x = 0$) para os casos reativos. Caso (esquerda) 5, (direita) 6.	111

Figura 65 – Evolução logarítmica do decréscimo da intensidade na linha de centro do queimador ($x = 0$) para os casos reativos. Caso (esquerda) 5, (direita) 6.	112
Figura 66 – Decréscimo das duas zonas de máxima intensidade na direção do escoamento do spray para os caso 5 (esquerda) e 6 (direita). As duas zonas de máximas intensidades são representadas por: — zona de máxima intensidade no lado direito da chama, e - • - zona de máxima intensidade no lado esquerdo da chama.	113
Figura 67 – Evolução logarítmica do decréscimo das duas zonas de máxima intensidade na direção do escoamento do spray para os caso 5 (esquerda) e 6 (direita). As duas zonas de máximas intensidades são representadas por: — zona de máxima intensidade no lado direito da chama, e - • - zona de máxima intensidade no lado esquerdo da chama.	113
Figura 68 – Imagens de PLIF-OH no caso 5, obtidas para chamas de etanol e ar. (a, b, c, d, e) imagens instantâneas, (f) imagem média, ($Re = 1015$, $Var = 8,75$ m/s).	116
Figura 69 – Imagens de PLIF-OH no caso 6, obtidas para chamas de etanol e ar. (a, b, c, d, e) imagens instantâneas, (f) imagem media, ($Re = 1674$, $Var = 8,5$ m/s).	118
Figura 70 – Evolução da intensidade da imagem média (esquerda) e da imagem RMS (direita) na direção transversal (x), para posições longitudinais espaçadas de 10 mm a partir da superfície do queimador. - • - 20, — 30, — 40, - • • - 50, ••• 60 mm, para o caso 5.	120
Figura 71 – Evolução da intensidade da imagem média (esquerda) e da imagem RMS (direita) na direção transversal (x), para posições longitudinais espaçadas de 10 mm a partir da superfície do queimador. - • - 20, — 30, — 40, - • • - 50, ••• 60 mm, para o caso 6.	120
Figura 72 – Superposição das imagens médias do PLIF-OH e espalhamento Mie: (esquerda) Caso 5, (direita) Caso 6.	121
Figura 73 – Evolução da velocidade média do ar na direção transversal (y), para posições longitudinais espaçadas de 10 mm a partir da superfície do queimador. ••• 20, — 30, - • - 40, — 50, - • • - 60 mm.	123
Figura 74 – Tubulação de aço inox com aquecimento elétrico. Adaptado por Higher Co.	144

Lista de tabelas

Tabela 1 - Características do bico injetor e os parâmetros de operação.	57
Tabela 2 - Parâmetros para o calculo do fator de conversão do Parâmetros de operação do bico injetor.	57
Tabela 3 - Parâmetros para o calculo do fator de conversão do Rotâmetro.	58
Tabela 4 - Fluorescência máxima para o <i>Coumarin</i> 153 em diferentes misturas. Dados retirados de Stathatos et al., 2001.	75
Tabela 5 - Parâmetros do escoamento para os casos inertes com água, com pressão de operação de 4 bar.	96
Tabela 6 - Parâmetros do escoamento para os casos reativos com Spray de etanol, com pressão de operação de 3,7 bar.	96
Tabela 7 - Resumo comparativo do spray para os testes inertes e reativos.	124
Tabela 8 - Valores das incertezas da velocidade de jato para os testes com água, para 4 bar de pressão.	139
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.	140
Tabela 10 - Valores das incertezas em cada variável medida utilizados na estimativa na incerteza da densidade da água e etanol.	141
Tabela 11 - Valores das incertezas em cada variável medida utilizados na estimativa na incerteza da viscosidade de etanol e água.	142
Tabela 12 - Valores das incertezas em cada variável medida utilizados na estimativa na incerteza do Número de Reynolds para água.	142
Tabela 13 - Valores das incertezas em cada variável medida utilizados na estimativa na incerteza do Número de Reynolds para etanol.	142

Lista de variáveis

Letras Latinas

A_{10} – Coeficiente de Einstein da taxa relativa de emissão espontânea (s^{-1})

B – Constante de Boltzman

c – Velocidade da luz (m/s)

C – Concentração (m^{-3})

C_L – Calor Latente (J/kg)

C_p – Calor específico (kJ/kg.K)

D – Diâmetro do corpo rombudo do bluff-body (mm)

D_i – Diâmetro interno da gota (mm)

d – Diâmetro da boquilha de injetor (mm)

d_p – Diâmetro da partícula (mm)

d_{img} – Diâmetro da imagem na matriz CCD (μm)

d_{diff} – Diâmetro da imagem pela difração da luz (μm)

d_g – Diâmetro real da gota (μm)

d_f – Diâmetro do feixe laser (mm)

E – Energia interna total da molécula (J)

E_{aq} – Potencia de aquecimento do combustível (W)

E_{el} – Energia interna elétrica de uma molécula (J)

E_{vib} – Energia interna vibracional de uma molécula (J)

E_{rot} – Energia interna de rotação de uma molécula (J)

f – Distancia focal da lente (mm)

f_B – Fração de Boltzman

F – Sinal da fluorescência (s^{-1})

F_O – Sinal da fluorescência sem efeito *quenching* (s^{-1})

H – Altura de folha laser (mm)

h – Constante de Planck (J.s)

h – Largura da resolução espacial

I_{corr} – Intensidade corrigida para cada pixel da imagem

I_{img} – Intensidade de cada pixel da imagem adquirida

I_{rf} – Intensidade de referência definida no software

I_{ME} – Intensidade equivalente medida pelo monitor de energia a cada pulso

k_f – Taxa relativa de população devido à fluorescência (s^{-1})

k_{CI} – Taxa relativa de população devido à conversão interna (s^{-1})

k_{CIS} – Taxa relativa de população devido ao cruzamento Inter sistema (s^{-1})

k_{tot} – Taxa relativa de população total (s^{-1})

k_q – Taxa relativa das colisões quenching (s^{-1})
 \tilde{k}_q – Coeficiente da taxa relativa das colisões quenching (m^3/s)
 k_{SV} – Coeficiente de Stern-Volmer (m^3)
 L – Comprimento da resolução espacial
 n_q – Densidade de população de espécies quenching (m^{-3})
 m – Massa do etanol (kg)
 \dot{m} – Vazão mássica (kg/s)
 M – Magnificação da imagem
 N – Numero de gotas
 N_0 – Densidade de população de elétrons no estado fundamental
 N_1 – Densidade de população de elétrons no estado excitado
 p – Pressão (bar)
 P – Taxa de emissão de radiação por pre-disociação (s^{-1})
 PC – Poder calorífico (MJ/kg)
 Pr – Relação de operação do foto-catodo (mA/W)
 q – Diâmetro normalizado
 Q – Taxa de desativação por efeito quenching (s^{-1})
 Q_e – Eficiência quântica do foto-catodo (%)
 R – Fator de correção do rotâmetro
 r' – Numero quântico rotacional no estado fundamental
 r'' – Numero quântico rotacional no estado excitado
 SG – Gravidade específica
 T – Temperatura (K)
 t – Espessura de floha laser (mm)
 u_s – Velocidade estequiométrica (m/s)
 V – Volumen de etanol (ml)
 v' – Numero quântico vibracional no estado fundamental
 v'' – Numero quântico vibracional no estado excitado
 U_c – Velocidade axial (m/s)
 \dot{W} – Potencia (kW)

Letras gregas

λ – Comprimento de onda (m)

ν – Frequência (s^{-1})

Ω – Ângulo sólido (°)

α – Ângulo de divergência do feixe

α_m – Fração molar de espécies

ξ – Fração de mistura

\dot{V} – Vazão volumétrica (m^3/s)

ρ – Densidade (kg/m^3)

ϕ – Eficiência quântica

τ – Tempo de duração da fluorescência (s)

χ – Dissipação escalar (°)

σ_Q – Seção transversal (\AA^2)

Superescritos

Q – Queimador

Subscritos

o – Estado energético fundamental da molécula

1,2 – Estados energéticos excitados da molécula

l – Laser

m – Espécies moleculares

f – Fluorescência

q – Quenching

aq – Aquecimento

s – Estequiometria

c – Central

inj – Injetor

Siglas

CE – Conversão externa
 CI – Conversão interna
 CIS – Cruzamento inter sistema
 CCD – Charged coupled device
 CMOS –
 CNG – Gás natural comprimido
 DNS – Simulação numérica direta
 HS-IRO – High Speed Intensifier Relais Optic
 HSS6 – High-Speed-Star 6
 ICCD – Intensificador charged coupled device
 IRO – Intensified Relay Optics
 LII – Incandescência induzida por laser
 LIF – Fluorescência induzida por laser
 LDV - Laser Doppler Velocimetry
 LES – Large Eddy Simulation
 LPC – Lean premixed combustion
 LPP – Lean-premixed prevaporized
 MCI – Motores de combustão interna
 MCP – Placa de micro canais
 Nd:YAG – Laser de estado solido de Neodímio (Nd^{3+}) e ítrio de alumínio ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)
 OPO – Oscilador paramétrico ótico
 PDA – Phase Doppler Anemometer
 PIV – Particle Imaging Velocimetry
 PLIF – Fluorescência induzida em um plano laser
 PDF – Probability density functions
 RANS – Reynolds Averaged Navier Stokes
 RMS – Root mean square
 RV – Relaxação vibracional
 RQL – Rich-burn quick-quenching lean-burn
 RON – Read Out Noise
 So – Estado singleto no estado fundamental
 S1, S2 – Estados singletos no estado excitado
 SV – Stern-Volmer
 SMD – Sauter Mean Diameter.
 CGN – Gás Natural comprimido
 SNR – Relação Sinal Ruído
 ECDL – External-cavity diode laser
 TNF – Turbulent Nonpremixed Flame
 TR1 – Estado tripleto no estado excitado

UV – Radiação ultravioleta

Compostos químicos

Al_2O_3 - Alumina

CO – Monóxido de carbono

CO_2 – Dióxido de carbono

CH_4 – Metano

H_2 – Hidrogênio

H_2O – Água

NO – Monóxido de nitrogênio

NO_x – Óxido nitroso

OH – Hidroxila

C – Carbono

O_2 – Oxigênio

N_2 – Nitrogênio

TiO_2 – Dióxido de Titânio