NEWTON KIYOSHI FUKUMASU

Análise experimental da influência da frequência de injeção de
combustível em chamas pulsadas de spray de etanol

São Paulo

2014

NEWTON KIYOSHI FUKUMASU

Análise experimental da influência da frequência de injeção de
combustível em chamas pulsadas de spray de etanol

Tese apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Doutor em
Ciências

Área de Concentração:
Energia e Fluidos

Orientador:
Prof. Dr. Guenther C. Krieger Filho

São Paulo

2014

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 31 de outubro de 2014

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Catálogo-na-publicação

Fukumasu, Newton Kiyoshi

Análise experimental da influência da frequência de injeção de combustível em chamas pulsadas de spray de etanol / N.K.

Fukumasu – versão corr. – São Paulo, 2014.

156 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Combustão 2.Etanol 3.Interferometria por Efeito Doppler (PDI) 4.Fluorescência Induzida por Laser (LIF) I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.

*Dedico este trabalho aos meus pais
pelo incentivo e apoio recebidos
na realização de mais uma etapa
da minha vida alcançada com sucesso.*

Agradecimentos

Ao professor Dr. Guenther Carlos Krieger Filho pela orientação, apoio, aprendizado e amizade ao longo da realização deste trabalho.

Ao professor Dr. Jurandir Itizo Yanagihara pelas discussões e amizade.

Aos professores Dr. Roberto Martins de Souza e Dra. Izabel Fernanda Machado pela amizade, apoio e forte incentivo à finalização deste trabalho.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pela disponibilidade de suas instalações para a execução deste trabalho, sem as quais não seria possível alcançar os resultados obtidos.

Aos colegas do Laboratório de Engenharia Térmica e Ambiental pelas contribuições na realização dos experimentos deste trabalho, em especial ao Rafael da Cruz Ribeiro Berti e ao Marcelo Laurentys Airoidi pelo auxílio e discussões técnicas.

Aos colegas do Laboratório de Fenômenos de Superfície pela amizade, em especial para Erika Fernanda Prados, Vanessa Seriacopi e Cristiano Fernandes Lagatta pelo convívio diário e inúmeras paradas para o tão estimado café da tarde.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio financeiro concedido pelo projeto 2010/51310-1.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio financeiro.

Resumo

É consenso que o crescente consumo de combustíveis fósseis na geração de potência tem provocado uma maior degradação do meio ambiente. Para mitigar os efeitos adversos desse consumo, novas fontes e usos sustentáveis de energia são necessários. O uso de etanol na atual geração de motores de combustão interna demanda informações detalhadas sobre os processos de nebulização, evaporação, mistura e combustão das gotas desse combustível. Adicionalmente, novas estratégias de injeção de combustível em MCIs com injeção direta estão em desenvolvimento, como a injeção estratificada. Essa estratégia consiste na injeção de combustível em elevadas frequências durante as etapas de admissão e combustão do ciclo motor. Neste trabalho, técnicas avançadas de diagnóstico a laser são utilizadas para analisar a influência da frequência de injeção de combustível no processo de combustão de sprays pulsados de etanol, em que as chamas resultantes são estabilizadas por um *swirler*. A técnica de interferometria por efeito Doppler (PDI) foi utilizada para medir o diâmetro e a componente axial da velocidade das gotas. O campo de velocidades do escoamento de ar foi avaliado pela técnica de velocimetria por imagens de partículas (PIV) em duas taxas de aquisição (7,4 Hz e 2.000 Hz) para avaliar tanto valores médios quanto rastrear estruturas coerentes no escoamento. O mesmo sistema PIV foi utilizado para identificar a posição de aglomerados de gotas pela técnica de espalhamento Mie ao longo de eventos individuais de injeção. Já a técnica de fluorescência induzida por laser do radical hidroxila (LIF-OH) foi utilizada com taxa de aquisição de 4.700 Hz para rastrear a região com presença deste radical próximo ao queimador utilizado. Imagens da luminescência química espontânea foram obtidas para observar características globais das chamas. O queimador, posicionado em um ambiente aberto, é composto por um dispositivo *swirler* e um injetor automotivo. As frequências de injeção de 100 Hz, 250 Hz e

400 Hz foram escolhidas para as análises por produzirem chamas com características que variam desde uma chama estável e ancorada ao queimador até o comportamento similar a uma chama suspensa e instável. Etanol anidro líquido foi utilizado como combustível e fornecido ao injetor à pressão e vazão constantes para todos os casos. Os resultados indicaram que a variação na frequência de injeção produziu sprays com diferentes densidades. A menor frequência de injeção produziu um spray com maior densidade, em que as gotas formaram um aglomerado pouco sensível ao escoamento de ar na linha de centro do queimador. Esse aglomerado produz uma chama ancorada ao queimador com formato alongado e estreito. Já a maior frequência de injeção produziu um spray com menor densidade, permitindo que a dinâmica das gotas seja mais susceptível ao escoamento de ar. Essa maior influência do escoamento de ar promoveu uma maior dispersão espacial das gotas e um processo de combustão com maior susceptibilidade à instabilidades locais do escoamento. Essas instabilidades locais foram associadas a passagem periódica de estruturas coerentes do escoamento de ar através da região de reação das chamas, produzindo uma chama com presença intermitente do radical OH e ausência de emissão de luminescência química espontânea próximo a saída do queimador.

Abstract

The increase in consumption of petroleum-based fuels promotes environmental degradation and, to mitigate the adverse effects of this consumption, new sustainable sources and uses of energy are required. The use of ethanol as an option to conventional fuels on current generation of engines and gas turbines requires detailed information on atomization, evaporation, mixture and combustion processes of ethanol droplets. In addition, new strategies to fuel injection in ICEs are being developed, such as the stratified fuel injection. In this strategy, fuel is injected in higher injection frequencies along the air intake and combustion phases of the engine cycle. In this work, advanced techniques of laser diagnostic are applied to analyze the influence of fuel injection frequency on the behavior of the combustion process of pulsed ethanol sprays, in which the resulting flames are stabilized by a swirler. The Phase Doppler Interferometry (PDI) technique is applied to measure both diameter and axial velocity of droplets produced by the injector under different conditions of injection frequency. The velocity field of the airflow is evaluated by the Particle Image Velocimetry (PIV) using two repetition rates (7,4 Hz and 2.000 Hz) to evaluated both mean values and to track coherent structures in the flow. The PIV equipment is also used to evaluate the position of droplet groups by Mie scattering during the individual injection events. A high repetition rate (4.700 Hz) Laser Induced Fluorescence of hydroxyl radical (LIF-OH) system is applied to track the region with presence of OH in a vertical plane near the exit of the burner. Images of spontaneous chemical luminescence are acquired to analyze general aspects of the flames. The burner consists on a swirler and an automotive injector and is positioned in an open space with quiescent air. The analyzed injection frequencies are 100 Hz, 250Hz and 400 Hz, presenting characteristics ranging from a stable anchored flame to a lifted-like unstable

flame. Liquid anhydrous ethanol is delivered to the injector with constant pressure and flow rate for all cases. Results show different spray densities produced by the change in the injection frequency. The case with lower injection frequency produced higher spray densities, in which the formation of large groups of droplets prevents the influence of the recirculating airflow on droplet dynamics. This case presented an anchored, elongated, narrow and stable flame. The case with higher injection frequency produced lower spray densities, in which droplet dynamics are more susceptible to the velocities of the airflow. This influence of the airflow promotes spatial dispersion of droplets, been more prone to instabilities on the local combustion process. These local instabilities are associated to the influence of periodic coherent structures of the flow passing through the reaction zone, which leads to the intermittent presence of OH and the absence of spontaneous chemical luminescence near the injection plane of the burner.

Lista de Figuras

2.1	Regimes do processo de formação de gotas em um spray. Adaptado de Jenny et al. [5].	7
2.2	Modos de combustão das gotas em um spray: combustão de gotas individuais, combustão interna e externa de um grupo de gotas e combustão de folha externa. Adaptado de Chiu et al. [7].	8
2.3	Esboço do escoamento a jusante de um dispositivo rotacionador do tipo <i>swirler</i> . Adaptado de Wahid [8].	10
2.4	Estruturas de um escoamento helicoidal típico: região de recirculação, região de cisalhamento e escoamento externo. As setas indicam o movimento do ar nas diversas regiões.	11
2.5	Influência do número de <i>Swirl</i> no escoamento helicoidal: a) contorno de temperatura e linhas de corrente, b) contornos de vorticidade e c) superfície de mesmo valor para a vorticidade do escoamento. Adaptado de Huang e Yang [10].	12
2.6	Queimador utilizado para analisar a influência da excitação acústica sobre as estruturas coerentes do escoamento de ar. Adaptado de O'Connor e Lieuwen [11].	13
2.7	Identificação das estrutura associadas ao movimento do PVC no campos de velocidades do escoamento de ar nos instantes: a) $t=0,5$ ms; b) $t=13,5$ ms e c) $t=17,1$ ms. Adaptado de O'Connor e Lieuwen [11].	14
2.8	Esboço das estruturas do PVC ao longo do tempo. Adaptado de O'Connor e Lieuwen [11].	15

2.9	Queimador utilizado para a análise da influência do PVC sobre a dinâmica de uma chama pré-misturada de metano/ar. Adaptado de Moeck et al. [12].	16
2.10	Influência do PVC na dinâmica de uma chama pré-misturada de metano/ar. Imagens obtidas por espalhamento Mie de traçadores líquidos que permitem identificar as regiões com baixa temperatura. O ângulo ϕ se refere a posição do PVC ao longo do perímetro do <i>swirler</i> . Adaptado de Moeck et al. [12].	16
2.11	Influência do PVC na intensidade luminosa de uma chama pré-misturada de metano/ar. O ângulo ϕ se refere a posição do PVC ao longo do perímetro do <i>swirler</i> . Adaptado de Moeck et al. [12].	17
2.12	Queimador utilizado para analisar a interação de estruturas coerentes do escoamento de um chama metano/ar. Adaptado de Stöhr et al. [13].	19
2.13	Análise do escoamento de ar no queimador da figura 2.12: a) Linhas de corrente do escoamento analisado, em que as setas indicam possíveis estruturas coerentes associadas à região de cisalhamento do escoamento de ar; b) decomposição do campo de velocidades nos modos de maior energia utilizando a técnica POD. Adaptado de Stöhr et al. [13].	20
2.14	Campo de velocidades a jusante de um cilindro: a) velocidade média do escoamento de ar, b) projeção do modo 1 no campo de velocidades e c) projeção do modo 2 no campo de velocidades. Adaptado de Cammilleri et al. [14].	21
2.15	Densidade espectral potência dos coeficientes da POD dos modos 1 e 2. Adaptado de Cammilleri et al. [14].	22
2.16	Configurações de queimador utilizado para o estudo do processo de extinção: a) chamas pré-misturadas, b) chamas não pré-misturadas e c) chamas de spray. Adaptado de Cavaliere et al. [15].	24
2.17	Chamas características obtidas para as configurações de queimador da figura 2.17: a) chamas pré-misturadas, b) chamas não pré-misturadas e c) chamas de spray. Adaptado de Cavaliere et al. [15].	24

2.18	Evolução das regiões de produção de OH com a aproximação das condições de extinção das chamas. Adaptado de Cavaliere et al. [15].	25
2.19	Queimador utilizado para a observar da interação entre as gotas e a região de produção de OH em chamas com condições próximas à extinção. Adaptado de Masri e Gounder [16].	26
2.20	Distribuição de diâmetros de gotas para as chamas de etanol com condições próximas à extinção. Adaptado de Masri e Gounder [16].	27
2.21	Distribuição de diâmetros de gotas para as chamas de etanol com condições próximas à extinção. Adaptado de Masri e Gounder [16].	27
3.1	Franjas de interferência formada entre dois feixes laser. Adaptado de Artium Inc. [20].	30
3.2	Exemplo de um sinal temporal obtido pela variação do padrão de interferência. Adaptado de Artium Inc. [20].	30
3.3	Difração da luz causada pela passagem de uma partícula na região das franjas de interferência: a) Partícula menor com maior curvatura superficial; b) Partícula maior com menor curvatura superficial. Fonte: Manual do sistema PDI [20]	31
3.4	Diferença esquemática na mudança de fase do sinal tipo Doppler devido ao tamanho da partícula: a) Partícula menor com menor mudança de fase ϕ e b) Partícula maior com maior mudança de fase ϕ . Fonte: Manual do sistema PDI [20]	32
3.5	Disposição espacial do sistema PDI.	34
3.6	Imagens obtidas pela técnica de Espalhamento Mie de dois sprays de etanol: a) spray com menor densidade e b) spray com maior densidade.	38
3.7	Procedimento geral da técnica PIV. Adaptado de Dantec Dynamics Inc. [23]	39

3.8	Posicionamento das câmeras na configuração estereoscópica. Os ângulos α e θ indicam, respectivamente, o plano do sensor de imagens e do plano das lentes em relação ao plano iluminado pela luz laser. Adaptado de Dantec Dynamics Inc. [23]	41
3.9	Posicionamento do sistema PIV estereoscópico.	42
3.10	Posicionamento do sistema PIV com alta taxa de aquisição.	43
3.11	Imagem para cálculo dos parâmetros de calibração nas análises feitas com o sistema TRPIV. A reta em vermelho representa a distância utilizada para o cálculo do fator de escala α_e .	45
3.12	Imagens do alvo de calibração para as análises feitas com o sistema SPIV: a) imagem vista pela câmera 1 e b) imagem vista pela câmera 2. Os marcadores possuem distância de 11 mm e diâmetros de 3 mm. O marcador de identificação de origem possui diâmetro de 5 mm. Os marcadores de identificação dos eixos do sistema de coordenadas possuem diâmetro de 2 mm. As linhas verdes identificam os marcadores utilizados na composição da matriz de calibração.	46
3.13	Imagem de espalhamento Mie pelas gotas em um spray de etanol. Limiar definido entre 9 e 12 no histograma da imagem para a separação entre as fases líquida (clara) e gasosa (escura).	47
3.14	Mecanismos de transmissão de energia na transição do sistema $X^2\Pi - A^2\Sigma$. As cores representam: transição de absorção (verde), transição de emissão (vermelho), transição rotacional (marrom) e transição vibracional (ciano). Adaptado de Santos [29].	50
3.15	Espectro de absorção para o radical OH livre. Duas regiões são observadas, centradas em 283 nm e 310 nm. Adaptado de Dante Dynamics Inc. [30].	51
3.16	Coefficientes para as linhas de transição da molécula OH no sistema $X^2\Pi - A^2\Sigma$: a) coeficientes de absorção para o sistema $X^2\Pi - A^2\Sigma(1,0)$ e b) coeficientes de emissão para o sistema $X^2\Pi - A^2\Sigma(0,0)$. Adaptado de Santos [29].	52

3.17	Sistema utilizado nas análises da fluorescência induzida por laser do radical OH.	52
3.18	Visão interna do Laser corante utilizado para a produção do feixe laser com comprimento de onda de 283 nm para a excitação eletrônica do radical OH.	54
3.19	Eficiência de diversos corantes utilizados para a produção de feixes laser, excitados por um feixe laser com comprimento de onda de 532 nm. A Rodamina 590 (6G) é a que apresenta melhor eficiência para emissão de feixe laser com comprimento de onda de 566 nm. Adaptado de Dantec Dynamics Inc. [30].	55
3.20	Imagem instantânea obtida com a técnica LIF-OH de uma chama de etanol. O limiar foi definido em 7 no histograma de intensidade luminosa, permitindo a identificação da região de produção do radical OH. Valores abaixo desse limiar foram considerados como ruído de fundo.	57
4.1	Dispositivos que compõe a bancada de testes utilizada neste trabalho para a análise das chamas de spray pulsado de etanol.	59
4.2	Queimador projetado para a produção das chamas de spray de etanol.	60
4.3	Dispositivo rotacionador de ar do tipo <i>swirler</i> axial utilizado neste trabalho, composto por 10 aletas inclinadas de $\alpha_s = 65^\circ$ em relação ao eixo vertical e diâmetros interno e externo de $d_i = 17$ mm e $d_e = 40$ mm, respectivamente.	61
4.4	Bico injetor automotivo comercial modelo 0280150747 da Robert Bosch GmbH.	62
4.5	Características de um pulso PWM: tempo de um pulso e período de um ciclo. O <i>duty cycle</i> é definido como a razão entre tempo de um pulso e período de um ciclo	63
4.6	Circuito utilizado para o acionamento do injetor de combustível; D1 e D2 são diodos IN4007, R1 é um resistor de 100 Ohms, P1 é um potenciômetro de 5.000 Ohms e T1 é o transistor 3DD13007K.	64
4.7	Comparação entre a duração e a quantidade de eventos de injeção para os casos analisados (ESF100, ESF250 e ESF400).	68

5.1	Caracterização dos parâmetros de injeção (frequência e <i>Duty Cycle</i>) que sustentam o processo de combustão nas chamas de etanol (região cinza).	71
5.2	Vazão média de combustível necessária para a manutenção de chamas estáveis em função do tempo de injeção por ciclo. Os casos analisados em detalhes são ESF100 (quadrado), ESF250 (círculo) e ESF400 (triângulo).	72
5.3	Imagens instantâneas da luminescência química espontânea dos casos estudados: a) ESF100; b) ESF250 e c) ESF400.	73
5.4	Imagens médias da luminescência química espontânea dos casos estudados: a) ESF100; b) ESF250 e c) ESF400.	74
5.5	Evolução temporal da posição dos aglomerados de gota para os casos: a) ESF100, b) ESF250 e c) ESF400.	75
5.6	Evolução temporal da área ocupada pelo spray nas imagens de uma seção diametral do queimador.	76
5.7	Imagens médias da luminescência química sobreposta aos símbolos que representam as posições analisadas com o sistema PDI nos planos $z/R_s=0,1$ (círculos), $z/R_s=0,6$ (triângulos) e $z/R_s=1,1$ (estrelas) para os casos: a) ESF100; b) ESF250 e c) ESF400.	77
5.8	Função densidade de probabilidade do diâmetro das gotas de etanol no plano de injeção do queimador ($z/R_s = 0,1$) para posições radiais r/R_s : a) 0,0; b) 0,05; c) 0,10; d) 0,15; e) 0,20 e f) 0,25.	78
5.9	Função densidade de probabilidade do diâmetro das gotas de etanol no plano de injeção do queimador ($z/R_s = 0,6$) para posições radiais r/R_s : a) 0,0; b) 0,1; c) 0,2; d) 0,3; e) 0,4 e f) 0,5.	79
5.10	Função densidade de probabilidade do diâmetro das gotas de etanol no plano de injeção do queimador ($z/R_s = 1,1$) para posições radiais r/R_s : a) 0,0; b) 0,1; c) 0,2; d) 0,3; e) 0,4 e f) 0,5.	80
5.11	Função densidade de probabilidade da componente axial da velocidade das gotas de etanol no plano de injeção do queimador ($z/R_s = 0,1$) para posições radiais r/R_s : a) 0,0; b) 0,05; c) 0,10; d) 0,15; e) 0,20 e f) 0,25.	81

5.12	Função densidade de probabilidade da componente axial da velocidade das gotas de etanol no plano de injeção do queimador ($z/R_s = 0,6$) para posições radiais r/R_s : a) 0,0; b) 0,1; c) 0,2; d) 0,3; e) 0,4 e f) 0,5.	82
5.13	Função densidade de probabilidade da componente axial da velocidade das gotas de etanol no plano de injeção do queimador ($z/R_s = 1,1$) para posições radiais r/R_s : a) 0,0; b) 0,1; c) 0,2; d) 0,3; e) 0,4 e f) 0,5.	83
5.14	Correlação entre diâmetro e componente axial da velocidade das gotas de etanol na linha de centro do queimador no plano $z/R_s = 0,1$ para os casos: a) ESF100; b) ESF250 e c) ESF400.	86
5.15	Correlação entre diâmetro e componente axial da velocidade das gotas de etanol na linha de centro do queimador no plano $z/R_s = 1,1$ para os casos: a) ESF100; b) ESF250 e c) ESF400.	87
5.16	Imagens instantâneas da fluorescência induzida do radical OH na região próxima à saída do queimador para o intervalo de 0 ms a 5,06 ms da chama ESF100.	91
5.17	Imagens instantâneas da fluorescência induzida do radical OH na região próxima à saída do queimador para o intervalo de 5,28 ms a 10,34 ms da chama ESF100. Os círculos em vermelho indicam a distorção na região de produção de OH devido à recomposição do escoamento de recirculação durante o período que antecede a injeção de combustível.	92
5.18	Imagens instantâneas da fluorescência induzida do radical OH na região próxima à saída do queimador para o intervalo de 0 ms a 5,06 ms da chama ESF250.	93
5.19	Imagens instantâneas da fluorescência induzida do radical OH na região próxima à saída do queimador para o intervalo de 5,28 ms a 10,34 ms da chama ESF250. Os círculos vermelhos indicam a evolução da interação entre uma possível estrutura coerente do escoamento e a região de produção de OH, de forma que a deformação do escoamento nesta região induz à extinção local da chama.	94

5.20	Imagens instantâneas da fluorescência induzida do radical OH na região próxima à saída do queimador para o intervalo de 0 ms a 5,06 ms da chama ESF400. O círculo vermelho indica a região de extinção do perfil de OH, a qual ocorre de forma periódica.	95
5.21	Imagens instantâneas da fluorescência induzida do radical OH na região próxima à saída do queimador para o intervalo de 5,28 ms a 10,34 ms da chama ESF400. O círculo vermelho indica a região de extinção do perfil de OH, a qual ocorre de forma periódica.	96
5.22	Imagens do formato médio das chamas e da região média de produção do radical OH (região colorida) para as chamas: a) ESF100; b) ESF250 e c) ESF400.	97
5.23	Imagens instantâneas da fluorescência do radical OH para o caso ESF400 em instantes que representam um ciclo com frequência aproximada de produção/extinção de OH de 10 Hz na região próxima à saída do queimador. O sinal analisado para determinação da frequência de produção/extinção de OH foi obtido na região do círculo preto.	97
5.24	Sinal de intensidade luminosa obtido na região intermitente de produção do radical OH (círculo preto na figura 5.23) da chama ESF400.	98
5.25	Espectro de frequências do sinal de intensidade luminosa na região de produção intermitente de OH da chama ESF400. Figura menor indica o detalhe do espectro para a faixa de frequência de 0Hz a 50Hz.	98
5.26	Posição de alguns dos planos transversais ao queimador, analisados pela técnica PIV: Plano A - $r/R_s = 0,0$; Plano B - $r/R_s = 0,25$; Plano C - $r/R_s = 1,0$ e Plano D - $r/R_s = 2,0$	100
5.27	Magnitude da velocidade média do escoamento no plano diametral do queimador (Plano A).	101
5.28	Vetores de velocidade média sobrepostos ao contorno da componente axial da velocidade no detalhe da região próxima ao queimador no Plano A, obtidos com técnica SPIV para o escoamento de ar sem reação de combustão.	102

5.29	Reconstrução tridimensional do campo de velocidades médias obtidos com a técnica SPIV para 38 planos transversais ao queimador. As superfícies indicam mesma velocidade do escoamento de ar (avermelhado: 7,5 m/s; esverdeado: 4,0 m/s e azulado: -0,2 m/s) nas vistas: a) lateral e b) superior.	103
5.30	Contornos do módulo da velocidade do escoamento de ar nos planos z/R_s : a) 0,24; b) 0,5; c) 1,0; d) 1,5; e) 2,0 e f) 2,5. Reconstrução tridimensional das análises feitas com a técnica SPIV para o escoamento de ar sem reação de combustão.	104
5.31	Contornos da componente axial da velocidade média do escoamento de ar nos planos z/R_s : a) 0,24; b) 0,5; c) 1,0; d) 1,5; e) 2,00 e f) 2,5. Reconstrução tridimensional das análises feitas com a técnica SPIV para o escoamento de ar sem reação de combustão.	105
5.32	Componente axial da velocidade, obtida com a técnica SPIV, nas posições z/R_s : a) 0,24; b) 0,5; c) 1,0; d) 1,5; e) 2,0 e f) 2,5.	106
5.33	Velocidade tangencial diametral, obtida com a técnica SPIV, nas posições z/R_s : a) 0,24; b) 0,5; c) 1,0; d) 1,5; e) 2,0 e f) 2,5.	107
5.34	Vetores de velocidade média sobrepostos ao contorno do módulo das velocidades paralelas ao plano de medição em $z/R_s = 0,5$. Análise feita com a técnica TR-PIV para o escoamento de ar sem reação de combustão.	108
5.35	Espectro de frequências do campo de velocidades para o escoamento helicoidal sem combustão. Figura menor indica o detalhe do espectro para a faixa de frequência de 0Hz a 50Hz.	109
5.36	Fração da energia acumulada para os modos do escoamento, obtidos pela técnica POD.	109
5.37	Espectro de frequências com excitação ao redor de 10 Hz para os modos com energia acumulada de até 50%: a) modo 2; b) modo 9; c) modo 10; d) modo 20; e) modo 21 e f) modo 30.	110
5.38	Linhas de corrente sobrepostas ao módulo do campo de velocidades obtido pela projeção do modo 2 no escoamento helicoidal.	111

5.39	Linhas de corrente sobrepostas ao módulo do campo de velocidades obtido pela projeção conjugada dos modos com excitação em 10 Hz (modos 9, 10, 20, 21 e 30) no escoamento helicoidal para os instantes: a) $t=0,0$ s, b) $t=0,049$ s, c) $t=0,10$ s e d) $t=0,151$ s.	112
6.1	Componente axial da velocidade média das gotas com diâmetro inferior a $20\text{ }\mu\text{m}$ ($S_t \leq 0,1$) ao longo da linha de centro do queimador, para os casos ESF100 (quadrado), ESF250 (círculo) e ESF400 (triângulo). A componente axial da velocidade média do escoamento sem combustão (losango) foi obtida com a técnica SPIV.	114
6.2	Sobreposição dos diâmetros dos picos nas posições radiais das funções PDF e a posição de produção do radical OH a jusante do queimador: a) $z/R_s = 0,1$; b) $z/R_s = 0,6$ e c) $z/R_s = 1,1$	117
6.3	Vórtice derivado do PVC na região próxima ao queimador. Adaptado de [12].	120
6.4	Estruturas vorticais no escoamento helicoidal: a) PVC ou <i>Precessing Vortex Core</i> e Vórtice na OSL ou <i>Outer Shear Layer</i> e b) extinção local e re-ignição do processo de combustão devido à distorção no escoamento pela passagem de estruturas coerentes. Adaptado de [13].	121

Lista de Tabelas

3.1	Valores medidos do diâmetro médio linear (d_{10}), diâmetro médio de Sauter (d_{32}) e componente axial da velocidade (Va_d) das gotas para 3 condições de injeção de gotas.	36
4.1	Valores limites para os parâmetros de injeção de combustível utilizados no mapeamento do queimador	66
4.2	Valores dos parâmetros de injeção de combustível para os casos analisados com diferentes padrões de combustão	67
5.1	Tempos de injeção e quantidade de combustível injetado por ciclo para os casos analisados	72
5.2	Posições de medição da distribuição de diâmetros e velocidades das gotas .	77

Lista de símbolos

G : número de grupo

Le : número Lewis

Sh : número de Sherwood

S : número de Swirl

S_t : número de Stokes

r : distâncias no eixo radial

z : distâncias no eixo axial ou longitudinal

Re : número de Reynolds

n_d : número de gotas

d_d : diâmetro médio das gotas

d_g : diâmetro de uma partícula/gota

l_d : distância média entre gotas

d_i : diâmetro interno das aletas do *swirler*

d_e : diâmetro externo das aletas do *swirler*

R_s : raio do *swirler*

α_s : ângulo de inclinação das aletas

L_c : comprimento da parte cilíndrica do queimador

t_c : espessura da parte cilíndrica do queimador

d_{ic} : diâmetro interno da parte cilíndrica do queimador

f_D : frequência Doppler

V_d : velocidade de partículas/gotas

V_{a_d} : componente axial da velocidade das partículas/gotas

δ : espaçamento entre franjas

λ : comprimento de onda

γ : ângulo de interseção entre feixes laser

δ_d : espaçamento entre franjas distorcido devido a passagem de uma partícula

λ_d : comprimento de onda distorcido devido a passagem de uma partícula

F : distância focal

s : fator de calibração

Δ_f : comprimento de onda

ϕ : mudança de fase de um sinal Doppler

ϕ_{12} , ϕ_{13} e ϕ_{23} : mudança de fase de um sinal Doppler nos foto-deteciores

S_{12} , S_{13} e S_{23} : distâncias entre foto-deteciores

K_{12} , K_{13} e K_{23} : fatores de calibração do sistema PDI

PA : área de interseção dos feixes laser

t_{tot} : tempo total de medição

$n_{c(i)}$: quantidade corrigida de partículas/gotas

$v_{i,j}$: velocidade corrigida das partículas/gotas

n_i : quantidade total de partículas/gotas medidas

τ : tempo característico do movimento de uma partícula/gota

U_0 : velocidade do fluido medida ao longe (sem perturbações)

L_d : comprimento característico percorrido por uma partícula/gota

ρ_d : massa específica das partículas/gotas

μ_f : viscosidade dinâmica do fluido

α : ângulo do plano do sensor CMOS em relação ao plano de medição

θ : ângulo do plano da lente em relação ao plano de medição

α_e : fator de escala

L_m : comprimento real no plano de medição

n_p : número de pixels relativo ao comprimento real L_m

L_p : comprimento físico dos pixels

A_g : área instantânea da área ocupada pelas partículas/gotas

n_h : número de pixels medido

Q_1 : linha de excitação eletrônica

f_i : frequência de injeção

n_{rpm} : rotação do motor

n_{ic} número de injeções por ciclo

t_s : tempo para percorrer o perímetro do *swirler*

Sumário

Resumo	i
Abstract	iii
Lista de Figuras	v
Lista de Tabelas	xv
Lista de símbolos	xvi
1 Introdução	1
1.1 Objetivo	3
1.2 Organização do texto	4
2 Revisão bibliográfica	5
2.1 Combustão de sprays	6
2.2 Caracterização de chamas em escoamentos <i>swirl</i> ou helicoidais	9
2.3 Caracterização de estruturas coerentes pelo método POD	18
2.4 Caracterização de chamas produzidas por sprays	22
3 Diagnóstico a laser	28
3.1 Interferometria por efeito Doppler - PDI	29
3.1.1 Equipamento	33

3.1.2	Calibração	34
3.1.3	Metodologia das análises com a técnica PDI	34
3.1.4	Incertezas	35
3.2	Espalhamento Mie e Velocimetria por Imagens de Partículas	37
3.2.1	Espalhamento Mie	37
3.2.2	Velocimetria por imagens de partículas - PIV	38
3.2.3	Equipamento com baixa taxa de aquisição utilizado para a técnica SPIV	41
3.2.4	Equipamento com alta taxa de aquisição utilizado para as técnicas TR-PIV-2D e Espalhamento Mie	43
3.2.5	Calibração dos sistemas	45
3.2.6	Análise por espalhamento Mie	46
3.2.7	Metodologia das análises com as técnicas TR-PIV-2D e SPIV	48
3.2.8	Incertezas nas medições por Espalhamento Mie e PIV	49
3.3	Fluorescência Induzida por Laser do radical OH	49
3.3.1	Equipamento	52
3.3.2	Metodologia das análises com a técnica LIF	56
4	Bancada experimental	58
4.1	Queimador aberto	59
4.2	Sistema de injeção de combustível	61
4.2.1	Injetor de combustível	61
4.2.2	Sistema controle do injetor	62
4.2.3	Dispositivos auxiliares de alimentação de combustível e ar	64
4.3	Estruturas de suporte auxiliares	65
4.4	Parâmetros de operação do queimador	66

	xxi
5 Resultados	69
5.1 Caracterização do queimador	70
5.2 Análise das chamas selecionadas	74
5.2.1 Evolução espacial do spray	74
5.2.2 Caracterização do spray	76
5.2.3 Região de reação das chamas	88
5.2.4 Escoamento de ar na região de injeção	99
6 Discussão	113
6.1 Influência da densidade do spray no escoamento de ar	113
6.2 Influência do processo de combustão no diâmetro das gotas	116
6.3 Influência de estruturas coerentes do escoamento de ar no processo de com- bustão intermitente	118
7 Conclusões	122
8 Sugestão para trabalhos futuros	125
9 Referências Bibliográficas	127

Capítulo 1

Introdução

É consenso que a crescente demanda por energia promove o aumento no consumo de combustíveis fósseis e provoca uma maior degradação do meio ambiente. Para mitigar os efeitos adversos causados pelo consumo desses combustíveis, novas fontes e usos sustentáveis de energia estão em desenvolvimento. Dados da Agência Internacional de Energia (IEA) de 2006 [1] indicaram que o uso de energia sustentável representava de 13% a 15% da energia primária consumida mundialmente, porém os dados de 2010 [2] mostraram que apenas 3% do combustível utilizado no transporte mundial rodoviário é sustentável.

O desenvolvimento tanto da produção quanto do uso de combustíveis sustentáveis ocorre de forma intensa no Brasil desde 1975 com o advento do programa Pró-Álcool. Esse programa tinha por objetivo a substituição do uso de combustíveis derivados do petróleo pelo uso de etanol derivado da cana de açúcar nos sistemas automotivos. Dados do Ministério de Minas e Energia [3] indicaram que em 2012 cerca de 48% da frota de veículos leves foi projetada para operar com alguma mistura entre etanol e gasolina. Devido a alta demanda no consumo de combustíveis, a proporção desta mistura é, usualmente, definida por meio da relação custo/benefício e não pelo possível benefício ao meio ambiente.

Novos projetos, tanto de veículos automotivos quanto de sistemas geradores de potência, procuram utilizar o etanol como fonte de energia. Entretanto, a aceitação deste combustível enfrenta alto nível de resistência devido tanto às limitações na produção quanto às discussões sobre o uso da terra para produzir combustível no lugar de alimentos. Apesar dessas restrições limitarem o uso de etanol no mercado global, elas favorecem o desenvolvimento de novas tecnologias em território nacional. Nesse âmbito, centros nacionais de pesquisa estão contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias inovadoras, como a injeção direta e a ignição por compressão em motores de combustão interna ou o uso de etanol em turbinas a gás. Estes centros buscam utilizar novas tecnologias, como técnicas experimentais de diagnóstico a laser e modelos numéricos complexos, no desenvolvimento destes sistemas.

O uso de etanol líquido como combustível em sistemas de geração de potência demanda quebra da fase líquida contínua em fases discretas (gotas) para facilitar a evaporação e promover a reação de combustão. Em um motor de combustão interna (MCI)

automotivo ou em uma turbina a gás, esse processo de formação de gotas ocorre próximo aos bicos de injeção devido, principalmente, à diferença entre a pressão do líquido e a do ambiente em que o spray é injetado. Em um MCI, os sprays são produzidos de forma pulsada e a frequência de injeção é associada à rotação desses motores. Com a variação na rotação dos MCIs, os sprays apresentam características específicas projetadas para promover os processos de evaporação e da mistura combustível/ar, objetivando a maior taxa de liberação de energia durante o processo de combustão. Adicionalmente, diferentes estratégias de injeção de combustível em motores de injeção direta são adotadas para melhorar as taxas de mistura e liberação de calor, como a estratégia de injeção estratificada de combustível. A injeção estratificada consiste na injeção direta de combustível dentro da câmara de reação do MCI em diferentes instantes da etapa de admissão e combustão, o que demanda a necessidade do estudo do comportamento de sprays injetados em frequências elevadas.

Neste trabalho, técnicas avançadas de diagnóstico a laser são utilizadas para caracterizar sprays de etanol produzidos em diferentes frequências de injeção e o processo de combustão das gotas nas chamas resultantes. Estas técnicas permitem medir as características tanto dos sprays quanto das chamas, como a medição das distribuições dos diâmetros e velocidades das gotas, o campo de velocidades da fase gasosa e a localização espacial tanto das gotas quanto da região de produção do radical hidroxila (OH) durante um evento de injeção.

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é avaliar experimentalmente a influência da frequência de injeção sobre as características dos sprays formados, do processo de combustão das gotas e da interação entre as gotas e o escoamento de ar utilizado para estabilizar as chamas. Para garantir a estabilidade das chamas, um escoamento *swirl* ou helicoidal de ar é utilizado.

A medição com as técnicas avançadas de diagnóstico permitem estudar os fenômenos fundamentais envolvidos na combustão de sprays, como a influência da frequência de

injeção de combustível no padrão de dispersão das gotas, a interação entre as gotas e o escoamento de ar, a estabilidade das chamas e a possível extinção/ignição local do processo de combustão. Adicionalmente, técnicas com alta taxa de aquisição permitem avaliar a evolução temporal de estruturas vorticais coerentes no escoamento de ar e sua influência na dispersão do radical OH.

1.2 Organização do texto

Este texto está dividido em 8 capítulos, dos quais o capítulo 2 apresenta breve revisão sobre o processo de formação de gotas e características do escoamento helicoidal e de chamas de etanol. Os fundamentos das técnicas ópticas e detalhes dos sistemas de diagnóstico utilizados neste trabalho são apresentados no capítulo 3.

A metodologia de produção das chamas de etanol utilizadas neste trabalho é apresentada no capítulo 4. O capítulo 5 apresenta os resultados da caracterização das chamas e discussões parciais que envolvem cada técnica de medição. Já o capítulo 6 apresenta discussão global dos resultados, integrando as diferentes técnicas de diagnóstico. As conclusões deste trabalho são apresentadas no capítulo 7. Sugestões de trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 8.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

Neste trabalho são estudadas chamas produzidas com sprays pulsados de etanol e estabilizadas por um escoamento *swirl*. Para isso, a seção 2.1 apresenta uma revisão sobre a formação de sprays e combustão de gotas. Já a seção 2.2 identifica as principais características de um escoamento helicoidal e sua influência no processo de estabilização de uma chama. O uso da técnica de decomposição ortogonal própria ou *Proper Orthogonal Decomposition* (POD) é apresentado na seção 2.3 para a identificação espaço-temporal de estruturas coerentes em um escoamento helicoidal. Por fim, a seção 2.4 apresenta uma breve revisão de chamas de sprays.

2.1 Combustão de sprays

O processo de atomização ou formação de gotas em um spray depende de fatores geométricos do atomizador, das propriedades do líquido a ser atomizado e do escoamento ambiente em que o spray está imerso. Lin e Reitz [4] apresentam uma revisão sobre os principais processos de formação de gotas a partir de um jato de líquido e associam determinadas características do spray à interação dos mecanismos físicos nesses processos. Em linhas gerais, o processo de atomização de um líquido produz uma fase discreta (gotas) no escoamento gasoso e, de acordo com Jenny et al. [5], esse processo é ilustrado na figura 2.1 e apresenta três regimes de formação de gotas: denso, diluído e muito diluído.

No regime denso, a injeção de um jato líquido em um ambiente gasoso produz instabilidades de Kelvin-Helmholtz na região de interface entre as duas fases. Essas instabilidades na direção axial evoluem e formam instabilidades no plano transversal do escoamento, conhecidas por instabilidades de Rayleigh-Taylor. As instabilidades transversais são responsáveis por produzir gotas não esféricas com grandes diâmetros e filamentos alongados de líquido (ligamentos). O processo de formação das gotas não esféricas e dos ligamentos é denominado atomização ou nebulização primária. A atomização ou nebulização secundária ocorre quando as gotas grandes e os ligamentos são quebrados, produzindo gotas esféricas com menores diâmetros. Nos processos de nebulização primária e secundária, a colisão e a coalescência entre duas ou mais gotas dominam a dinâmica da fase discreta.

Figura 2.1 – Regimes do processo de formação de gotas em um spray. Adaptado de Jenny et al. [5].

O regime diluído é caracterizado pela ausência de processos adicionais de atomização. Nesse regime as interações entre duas gotas podem ser negligenciadas devido à maior distância entre elas, porém os efeitos de modulação turbulenta ou transferência de energia turbulenta entre as gotas e a fase gasosa são significativos. Já no regime muito diluído, a transferência de energia turbulenta pode ser negligenciada, de forma que as gotas se tornam traçadores do escoamento.

Os regimes denso, diluído e muito diluído apresentam diferentes quantidade de gotas em um determinado volume (densidade do spray) e, devido à interação entre as gotas nesses regimes, essa densidade modifica diretamente os processos de evaporação e mistura do combustível com o escoamento de ar. Chiu e Liu [6] e Chiu et al. [7] desenvolveram modelos para representar os modos de combustão de gotas esféricas em função da densidade do spray. Esses modelos consideram uma nuvem de gotas circundada por uma chama difusiva, em que todo o combustível é provido pelas gotas e todo o ar para reação é fornecido de fora dessa nuvem. Os modos de combustão de gotas são apresentados na figura 2.2 em função do número de grupo (G) (equação 2.1). o número de grupo G é função do número de Lewis (Le), do número de Sherwood (Sh), do número de gotas (n_d),

do diâmetro médio das gotas (d_d) e da distância média entre duas gotas (l_d).

$$G = \frac{3}{4} Le Sh n_d^{\frac{2}{3}} \frac{d_d}{l_d} \quad (2.1)$$

Figura 2.2 – Modos de combustão das gotas em um spray: combustão de gotas individuais, combustão interna e externa de um grupo de gotas e combustão de folha externa. Adaptado de Chiu et al. [7].

Quatro modos de combustão de gotas são identificados na figura 2.2: combustão de gotas individuais, combustão interna de grupos, combustão externa de grupos e combustão de folha externa. O modo de combustão de gotas individuais ($G \ll 10^{-2}$) é identificado pela formação de uma chama ao redor de uma única gota, em que essa chama consome todo o combustível evaporado por esta única gota.

No modo de combustão interna de grupos de gotas ($10^{-2} \leq G \leq 10^{-1}$), uma folha de chama se desenvolve no centro da nuvem e envolve um pequeno grupo de gotas. Essas gotas envolvidas pela folha contribuem de forma conjunta para o processo de evaporação e sustentação da chama. Já o modo de combustão externa de grupos de gotas ($10^{-1} \leq G \leq 10^2$) ocorre quando todas as gotas da nuvem estão contribuindo de forma conjunta para a formação da folha de chama.

Para densidades de spray elevadas, a folha de chama pode ser formada a uma distância suficientemente grande do centro da nuvem, limitando sua interação às gotas mais externas da nuvem. Dessa forma, a temperatura diminui no centro da nuvem e as gotas nessa região deixam de participar do processo de evaporação. Esse modo é denominado combustão de folha externa ($G \geq 10^2$) e, dependendo da distância entre essa folha de chama e o centro da nuvem, instabilidades no processo de combustão devido à diminuição da quantidade de combustível evaporado podem levar à extinção da chama.

Neste trabalho, a identificação do modo de combustão das gotas foi realizado apenas de forma qualitativa com base na densidade e comportamento dos sprays analisados, pois o cálculo do número de grupo (equação 2.1) ficou prejudicado devido à dificuldade de se estimar o valor da distância média entre gotas (l_d).

2.2 Caracterização de chamas em escoamentos *swirl* ou helicoidais

A passagem do ar utilizado no processo de combustão, denominado ar primário, por um dispositivo *swirler* produz um escoamento helicoidal como o esboçado por Wahid [8] na figura 2.3. Escoamentos helicoidais típicos apresentam três regiões distintas (figura 2.4): região de recirculação, região de cisalhamento e escoamento externo. Usualmente, a região de recirculação apresenta escoamento de ar com sentido contrário ao escoamento externo e é formada no centro do escoamento helicoidal. Este movimento de recirculação de ar permite estabilizar o processo de combustão, pois misturas entre ar, combustível evaporado e gases quentes são trazidas para a região próxima à saída do queimador.

A região de cisalhamento representa a fronteira entre o escoamento recirculante

Figura 2.3 – Esboço do escoamento a jusante de um dispositivo rotacionador do tipo *swirler*. Adaptado de Wahid [8].

e o exterior. Nessa fronteira, o campo de velocidades apresenta inversão no sentido longitudinal, o que produz instabilidades no escoamento. A intensidade dessas instabilidades está associada ao número de *Swirl* (equação 2.2) do *swirler*, apresentada por Rochaya [9]. O número de *Swirl* representa a razão entre a quantidade de movimento tangencial e a axial do escoamento de ar a jusante do *swirler*. A equação 2.2 é uma simplificação da razão entre as quantidades de movimento para o caso de um *swirler* axial. Nesta equação, d_i e d_e são os diâmetros interno e externo das aletas do *swirler* e α_s é a inclinação das aletas com relação ao eixo axial/longitudinal do sistema.

$$S = \frac{2}{3} \left(\frac{1 - \left(\frac{d_i}{d_e}\right)^3}{1 - \left(\frac{d_i}{d_e}\right)^2} \right) \tan(\alpha_s) \quad (2.2)$$

Com o aumento no número de *Swirl*, Huang e Yang [10] verificaram o aumento tanto da região de recirculação quanto na intensidade das instabilidades produzidas na região de cisalhamento (figura 2.5). A figura 2.5a indica, por meio das linhas de corrente obtidas por simulação numérica, o aumento da região de recirculação com o aumento do número de *Swirl*. Esse aumento da região de recirculação ocorre devido à maior quantidade de movimento tangencial induzida ao escoamento de ar. Na figura 2.5b,

Figura 2.4 – Estruturas de um escoamento helicoidal típico: região de recirculação, região de cisalhamento e escoamento externo. As setas indicam o movimento do ar nas diversas regiões.

vórtices são visualizados em um plano diametral devido à alta vorticidade do escoamento. Para o caso com maior número de *Swirl*, o escoamento apresenta maior quantidade e complexidade dessas estruturas vorticais. As regiões que apresentam coerência no campo de velocidades, como os vórtices da figura 2.5b, serão chamadas de estruturas coerentes neste trabalho.

A figura 2.5c apresenta a superfície de mesmo valor de vorticidade do escoamento, permitindo identificar o formato tri-dimensional das estruturas coerentes. Nessa figura, para o caso com menor número de *Swirl*, é possível identificar uma estrutura coerente com formato helicoidal na região de cisalhamento. Entretanto, para o caso com maior número de *Swirl*, a dificuldade de se identificar estruturas coerentes individuais é maior. Observa-se que o aumento no número de *Swirl* promove não apenas a formação de maior quantidade

de estruturas coerentes mas também o aumento na interação entre essas estruturas.

Figura 2.5 – Influência do número de *Swirl* no escoamento helicoidal: a) contorno de temperatura e linhas de corrente, b) contornos de vorticidade e c) superfície de mesmo valor para a vorticidade do escoamento. Adaptado de Huang e Yang [10].

Huang e Yang observaram, também, que as estruturas coerentes na região de cisalhamento foram formadas pelo mecanismo de Kelvin-Helmholtz, de modo similar a um escoamento sobre degrau. Entretanto, no caso de um escoamento helicoidal, as instabilidades ocorrem tanto na direção axial quanto na azimutal do escoamento de ar. Essas instabilidades giram ao redor da linha de centro e permanecem coerentes por várias voltas até serem dissipadas.

O'Connor e Lieuwen [11] avaliaram a interação entre as estruturas instáveis no escoamento helicoidal e a excitação acústica forçada no ar a montante do queimador. O queimador utilizado (figura 2.6) possui um *swirler* axial para estabilizar uma chama pré-misturada de gás natural e ar. O campo de velocidades do escoamento helicoidal foi medido pela técnica de Velocimetria por Imagens de Partículas ou *Particle Image Velocimetry* (PIV) com alta taxa de aquisição (10.000 Hz) em dois planos ortogonais: um plano diametral e outro paralelo a saída do queimador. Adicionalmente, imagens de luminescência química espontânea foram obtidas simultaneamente às análises PIV.

Os resultados permitiram observar a evolução temporal do campo de velocidades e, assim, rastrear a formação de estruturas coerentes devido às instabilidades no escoamento. Estruturas coerentes na região central foram identificadas no escoamento de ar

sem excitação acústica e sem reação. O'Connor e Lieuwen associaram essas estruturas ao movimento de precessão de um vórtice no núcleo do escoamento ou *precessing vortex core* (PVC). O movimento de PVC no campo de velocidades ao longo do tempo é identificado na figura 2.7 e esboçado na figura 2.8. Os casos com variação da frequência de excitação acústica permitiu tanto amplificar quanto suprimir estruturas coerentes estáveis (região de recirculação) e instáveis (PVC e vórtices na região de cisalhamento) do escoamento helicoidal.

Figura 2.6 – Queimador utilizado para analisar a influência da excitação acústica sobre as estruturas coerentes do escoamento de ar. Adaptado de O'Connor e Lieuwen [11].

No caso do escoamento reativo, foi observado que a presença da chama promove um amortecimento das flutuações de velocidade do escoamento de ar. O espectro de frequências do campo de velocidades indica um predomínio de flutuações com frequências abaixo de 200 Hz. Adicionalmente, foram observadas oscilações/instabilidades na emissão espontânea de luminescência química na região de cisalhamento. Essas oscilações são causadas pela passagem de estruturas coerentes produzidas pelo mecanismo de Kelvin-Helmholtz, observadas pelo gradiente de vorticidade na figura 2.5b. Essas estruturas coerentes provocam gradientes no campo de velocidades que podem levar à extinção local

Figura 2.7 – Identificação das estruturas associadas ao movimento do PVC no campos de velocidades do escoamento de ar nos instantes: a) $t=0,5$ ms; b) $t=13,5$ ms e c) $t=17,1$ ms. Adaptado de O'Connor e Lieuwen [11].

do processo de combustão.

As instabilidades na região de cisalhamento ocorrem preferencialmente na direção longitudinal do escoamento, enquanto que no plano transversal a estrutura predominante é o PVC. Moeck et al. [12] analisaram a interação entre o movimento do PVC e a região de combustão. A chama estudada, produzida no queimador apresentado na figura 2.9,

Figura 2.8 – Esboço das estruturas do PVC ao longo do tempo. Adaptado de O'Connor e Lieuwen [11].

consiste em uma pré-mistura de metano e ar. A velocidade do escoamento foi medida pela técnica de velocimetria por efeito Doppler ou *Laser Doppler Velocimetry* (LDV) com o uso de gotas de óleo como traçadores para as regiões frias. Para a medição de velocidades na região com alta temperatura, foi utilizado dióxido de Zircônio (ZrO_2) como partículas traçadoras. Adicionalmente, foram obtidas imagens do espalhamento Mie dos traçadores na região de baixa temperatura (figura 2.10) e de luminescência química espontânea produzida pelo processo de combustão (figura 2.11).

Com a sequência de imagens obtidas com o espalhamento Mie dos traçadores na região fria do escoamento (figura 2.10), é possível observar a evolução da posição angular (ϕ) do PVC nos planos longitudinal e transversal à saída do queimador. O movimento periódico do PVC provoca a deformação do escoamento de ar, induzindo um processo de combustão oscilante ou intermitente. A oscilação da região de combustão também é observada pela variação da luminescência química espontânea da chama, como visto na figura 2.11. Nesta figura, a região escura apresenta menor intensidade luminosa e é associada à passagem do PVC, a qual promove uma significativa distorção no campo de velocidades do escoamento que pode levar à extinção local do processo de combustão.

Figura 2.9 – Queimador utilizado para a análise da influência do PVC sobre a dinâmica de uma chama pré-misturada de metano/ar. Adaptado de Moeck et al. [12].

Figura 2.10 – Influência do PVC na dinâmica de uma chama pré-misturada de metano/ar. Imagens obtidas por espalhamento Mie de traçadores líquidos que permitem identificar as regiões com baixa temperatura. O ângulo ϕ se refere a posição do PVC ao longo do perímetro do *swirler*. Adaptado de Moeck et al. [12].

Figura 2.11 – Influência do PVC na intensidade luminosa de uma chama pré-misturada de metano/ar. O ângulo ϕ se refere a posição do PVC ao longo do perímetro do *swirler*. Adaptado de Moeck et al. [12].

2.3 Caracterização de estruturas coerentes pelo método POD

As estruturas coerentes em escoamentos turbulentos com alto número de *Swirl* apresentam interações e formatos complexos (figura 2.5c) que podem dificultar a sua identificação. Entretanto, como essas estruturas coerentes concentram a maior parte da energia cinética do escoamento, a aplicação de métodos estatísticos que fazem a decomposição do movimento do escoamento em modos de maior energia permite a identificação e separação dessas estruturas. Stöhr et al. [13] analisaram o escoamento reativo dentro do queimador da figura 2.12 utilizando metano como combustível. O campo de velocidades do escoamento foi medido com a técnica PIV estereoscópico (SPIV) com duas taxas de aquisição: 5 Hz e 5.000 Hz. A menor taxa de aquisição permitiu medir o escoamento médio em uma grande área do queimador. Com a maior taxa foi medido o campo de velocidades com alta resolução temporal em uma área menor do queimador. Partículas de dióxido de Titânio (TiO_2) foram utilizadas como traçadores do movimento do escoamento de ar. A presença do radical OH foi medida pela técnica de fluorescência induzida por laser ou *Laser Induced Fluorescence* (LIF) simultaneamente às análises de SPIV com taxa de aquisição de 5.000 Hz. Adicionalmente, tanto imagens de luminescência química espontânea quanto o sinal de oscilação de pressão dentro da câmara foram obtidos.

Os resultados da técnica SPIV na seção diametral do queimador (figura 2.13a) indicam a existência de estruturas coerentes tanto na região central do escoamento quanto na região de cisalhamento. Entretanto, a identificação das estruturas coerentes nessa figura é prejudicada devido ao complexo comportamento do campo de velocidades. Assim, a aplicação do método estatístico da decomposição ortogonal própria ou *proper orthogonal decomposition* (POD) permite identificar as estruturas (modos) com maior energia no escoamento, como mostra a figura 2.13b. Nessa figura, são observados dois modos com maior energia (modos 1 e 2) associados às estruturas coerentes na região cisalhante formadas pelo mecanismo de Kelvin-Helmholtz. O modo 3 indica a existência de uma estrutura coerente no centro do escoamento associada ao tubo de exaustão do queimador. Não foi possível identificar as estruturas coerentes associadas ao PVC devido ao plano analisado ser longitudinal, uma vez que estas estruturas apresentam maior energia no

plano transversal ao escoamento.

Figura 2.12 – Queimador utilizado para analisar a interação de estruturas coerentes do escoamento de um chama metano/ar. Adaptado de Stöhr et al. [13].

A aplicação da transformada rápida de Fourier ou *Fast Fourier Transform* (FFT) na variação temporal dos coeficientes de cada modo da decomposição POD permite identificar a frequência em que esses modos são excitados no escoamento. Cammilleri et al. [14] aplicaram o método de decomposição estatística no cálculo dos modos de maior energia presentes na esteira de vórtices do escoamento de ar a jusante de um cilindro. O campo de velocidades médias, obtido pela técnica PIV com taxa de aquisição de 500 Hz, é apresentado na figura 2.14a. As figuras 2.14b e 2.14c ilustram a projeção espacial dos dois modos com maior energia (modo 1 e modo 2) no campo de velocidades. Estes modos apresentam estruturas coerentes simétricas no escoamento de ar na região da esteira de vórtices.

As densidades espectrais de potência, obtidas com a FFT da variação temporal dos coeficientes dos modos 1 e 2, são apresentadas na figura 2.15. Nessa figura, observa-se

Figura 2.13 – Análise do escoamento de ar no queimador da figura 2.12: a) Linhas de corrente do escoamento analisado, em que as setas indicam possíveis estruturas coerentes associadas à região de cisalhamento do escoamento de ar; b) decomposição do campo de velocidades nos modos de maior energia utilizando a técnica POD. Adaptado de Stöhr et al. [13].

que os modos apresentam linhas espectrais com maior energia na frequência ao redor de 11,5 Hz. Com o número de Strouhal de 0,208, calculado com as condições de entrada do escoamento, a frequência teórica de liberação de vórtices pelo mecanismo von Kármán é calculada em 11,8 Hz. Assim, a semelhança entre os valores das frequências tanto medida (11,5 Hz) quanto teórica (11,8 Hz) permitiu a Cammilleri et al. associarem as estruturas coerentes presentes nos modos 1 e 2 à formação e convecção periódica de vórtices na esteira de von Kármán. Dessa forma, o método estatístico POD permitiu identificar estruturas coerentes associadas aos modos de maior energia em um determinado escoamento e, com o cálculo da densidade espectral de potência para a variação temporal dos coeficientes de cada modo, é possível identificar as frequências de excitação dos modos e sua projeção sobre o campo de velocidades.

Figura 2.14 – Campo de velocidades a jusante de um cilindro: a) velocidade média do escoamento de ar, b) projeção do modo 1 no campo de velocidades e c) projeção do modo 2 no campo de velocidades. Adaptado de Cammilleri et al. [14].

Figura 2.15 – Densidade espectral potência dos coeficientes da POD dos modos 1 e 2.

Adaptado de Cammilleri et al. [14].

2.4 Caracterização de chamas produzidas por sprays

O uso de técnicas ópticas com altas taxas de aquisição permite observar fenômenos transitórios, como a ignição e extinção de uma chama. Cavaliere et al. [15] mediram as diferenças na produção do radical OH entre chamas pré-misturadas, não pré-misturadas e de spray ao se aproximaram da extinção. As configurações utilizadas de queimador são apresentadas na figura 2.16, em que apenas a forma como o combustível é injetado no queimador foi modificada. Este queimador utiliza um *swirler* axial para estabilizar o processo de combustão e os combustíveis utilizados foram o metano para as chamas gasosas e n-heptano para a chama spray. A visualização da luminescência química espontânea e da fluorescência induzida por laser do radical OH foram obtidas por um sistema de diagnóstico a laser com alta taxa de aquisição (5.400 Hz). Adicionalmente, a luz espalhada pelas gotas (espalhamento Mie) na chama de spray foi capturada para determinar a posição destas gotas em relação a chama. As diferentes configurações do queimador produziram chamas com características apresentadas na figura 2.17.

Cavaliere et al. [15] observaram que chamas pré-misturadas (figura 2.17a) apresentaram luminescência química espontânea com coloração azul ao longo de todo o queimador, chegando até as paredes. Já as chamas não pré-misturada (figura 2.17b) e de spray

(figura 2.17c) são estabilizadas na região central do queimador e apresentaram coloração amarelada na base da chama, o que indica a formação de fuligem nessa região. A extinção das chamas foi provocada pela variação da vazão de ar na entrada do queimador.

A figura 2.18 indica a evolução no formato das regiões com presença do radical OH ao se aproximar das condições de extinção do processo de combustão. Para a chama pré-misturada, essa região muda pouco no centro do queimador, porém esse radical desaparece na região próxima às laterais do queimador. A chama não pré-misturada apresenta presença intermitente de OH na região de cisalhamento do escoamento. Apesar de Cavaliere et al. [15] não apresentarem uma explicação para essa produção intermitente, eles especulam que a variação na presença de OH está associada a extinção local do processo de combustão devido à passagem de estruturas coerentes do escoamento. A análise da chama de spray indica regiões finas de produção de OH comparadas às chamas de metano. Cavaliere et al. [15] indicam que as regiões de produção de OH apresentam intermitência aleatória associada à extinções locais no processo de combustão e, ao se aproximar das condições de extinção global da chama, essas regiões evoluem para a completa fragmentação e extinção da chama.

Em chamas de spray, a interação entre as gotas e as regiões de produção de OH determinam a estabilidade do processo de combustão. Masri e Gounder [16] mediram características de chamas de spray próximas à condição de extinção no queimador apresentado na figura 2.19. Este queimador utiliza uma chama piloto para estabilizar as chamas de spray. O spray foi caracterizado pela distribuição de diâmetros e velocidades longitudinais das gotas pela técnica de velocimetria por efeito Doppler. A interação entre as gotas e as regiões com presença de OH foi observada pela medição simultânea com as técnicas LIF e espalhamento Mie. Adicionalmente, um termopar foi utilizado para medir a temperatura da fase gasosa ao longo das chamas. Tanto acetona quanto etanol foram utilizados como combustível.

Para a chama de etanol, Masri e Gounder observaram o aumento da quantidade de gotas com o aumento do número de Reynolds do escoamento de ar em regiões a jusante do queimador (posição $x/D=30$ na figura 2.20). Na região próxima à saída do queimador ($x/d=0,3$), não foram identificadas variações significativas na distribuição de gotas com o

Figura 2.16 – Configurações de queimador utilizado para o estudo do processo de extinção: a) chamas pré-misturadas, b) chamas não pré-misturadas e c) chamas de spray. Adaptado de Cavaliere et al. [15].

Figura 2.17 – Chamas características obtidas para as configurações de queimador da figura 2.17: a) chamas pré-misturadas, b) chamas não pré-misturadas e c) chamas de spray. Adaptado de Cavaliere et al. [15].

aumento do número de Reynolds. O perfil espacial do radical OH e a localização das gotas são apresentados na figura 2.21 para as chamas de etanol. Nessa figura, Masri e Gounder determinaram a existência de duas regiões com radical OH na chama mais estável, em que a região central foi associada a uma possível pré-mistura de combustível evaporado. A existência de gotas simultaneamente ao radical OH é atribuída pelos autores à diferença

Figura 2.18 – Evolução das regiões de produção de OH com a aproximação das condições de extinção das chamas. Adaptado de Cavaliere et al. [15].

entre as espessuras das folhas laser utilizadas para o diagnóstico, de modo que a folha laser utilizada na técnica de espalhamento Mie apresentava maior espessura. Assim, uma gota pode ter espalhado luz sem estar no plano iluminado pela técnica LIF. A chama intermediária apresentou radical OH em regiões largas ao redor da linha de centro do queimador. A ausência do radical OH na porção central do escoamento foi associada à interação entre o processo de mistura e a passagem das gotas nessa região. Na chama com menor estabilidade, foi observada uma assimetria da região de presença de OH, a qual Masri e Gounder associaram à extinção local da chama devido às condições do escoamento. Dessa forma, no caso da chama menos estável, o aumento da quantidade de gotas na linha de centro da região a jusante do queimador ($x/D=30$) foi associada à menor intensidade do processo de evaporação dessas gotas, pois são observadas regiões de extinção local na chama que induz menor liberação de calor nessa região.

Figura 2.19 – Queimador utilizado para a observar da interação entre as gotas e a região de produção de OH em chamas com condições próximas à extinção. Adaptado de Masri e Gounder [16].

Figura 2.20 – Distribuição de diâmetros de gotas para as chamas de etanol com condições próximas à extinção. Adaptado de Masri e Gounder [16].

Figura 2.21 – Distribuição de diâmetros de gotas para as chamas de etanol com condições próximas à extinção. Adaptado de Masri e Gounder [16].

Capítulo 3

Diagnóstico a laser

As técnicas de diagnóstico utilizadas neste trabalho são a interferometria por efeito Doppler (PDI), a velocimetria por imagens de partículas (PIV), o espalhamento Mie pelas gotas de combustível e a fluorescência induzida por laser do radical hidroxila (LIF-OH). Essas técnicas permitem caracterizar o escoamento de ar, o processo de combustão e o spray combustível com relação às distribuições de diâmetros e velocidade longitudinal das gotas de combustível, os campos de velocidade do escoamento de ar, o movimento das gotas de etanol e a região de reação de combustão próxima ao queimador. Adicionalmente, foram utilizadas imagens de luminescência química espontânea para a determinação de características globais das chamas.

3.1 Interferometria por efeito Doppler - PDI

A técnica de Interferometria por efeito Doppler ou *Phase Doppler Interferometry* (PDI), comumente chamada também de *Phase Doppler Particle Analyzer - PDPA*, utiliza a difração da luz por partículas sólidas ou líquidas na medição do diâmetro e das velocidades das partículas em um escoamento. Esta técnica foi intensamente desenvolvida por Bachalo et al. [17, 18, 19] na década de 1980 e consiste na medição interferométrica de um padrão de franjas produzido pela interseção entre dois feixes laser (figura 3.1). A passagem de uma partícula esférica através desse padrão de franjas, reflete e/ou refrata a luz e produz um sinal tipo Doppler nos fotodetectores de um receptor. Esse sinal (figura 3.2) consiste em uma componente Doppler de alta frequência (f_D) sobreposta a uma componente de baixa frequência com distribuição Gaussiana. A frequência Doppler (f_D) deste sinal é obtida com a aplicação da Transformada Rápida de Fourier e filtros digitais/analógicos.

A velocidade da partícula (V_d) é proporcional à frequência Doppler (f_D) e ao espaçamento entre as franjas de interferência (δ), como indicado pela equação 3.1. O espaçamento entre franjas, dado pela equação 3.2, é proporcional ao comprimento de onda do laser (λ) e ao ângulo de interseção entre os feixes laser (γ). Para a determinação das três componentes de velocidade de uma partícula, são necessários 3 pares de feixe laser com comprimento de onda distintos e posicionados em ângulos conhecidos, não necessariamente ortogonais. Filtros ópticos são utilizados na matriz de fotodetectores para

Figura 3.1 – Franjas de interferência formada entre dois feixes laser. Adaptado de Artium Inc. [20].

Figura 3.2 – Exemplo de um sinal temporal obtido pela variação do padrão de interferência. Adaptado de Artium Inc. [20].

separar os comprimentos de onda, permitindo a medição das componentes da velocidade de forma independente.

$$V_d = f_D \cdot \delta \quad (3.1)$$

$$\delta = \frac{\lambda}{2} \left(\sin \left(\frac{\gamma}{2} \right) \right)^{-1} \quad (3.2)$$

Uma partícula, ao passar através do padrão de interferência, atua como uma lente que provoca uma distorção no espaçamento entre as franjas como apresentado pela figura

3.3. Dessa forma, utilizando a equação 3.3, é possível obter o diâmetro de uma partícula esférica (d_g) ao se medir o espaçamento entre franjas (δ) e o comprimento de onda (λ) provocado pela passagem dessa partícula. Nesta equação F é a distância focal e s é um fator de calibração.

Figura 3.3 – Difração da luz causada pela passagem de uma partícula na região das franjas de interferência: a) Partícula menor com maior curvatura superficial; b) Partícula maior com menor curvatura superficial. Fonte: Manual do sistema PDI [20]

$$d_p = \frac{F\delta}{s\lambda} \quad (3.3)$$

O comprimento de onda (λ) utilizado na equação 3.3 é proporcional às mudanças de fase do sinal (ϕ_{12} , ϕ_{13} e ϕ_{23}) e às distâncias entre os fotodetectores (S_{12} , S_{13} e S_{23}). A figura 3.4 apresenta, de forma esquemática, a diferença de fase em um sinal tipo Doppler, devido à passagem de partículas com diferentes diâmetros.

No sistema utilizado neste trabalho, o cálculo de λ é feito com base em uma função de ponderação (equação 3.4), em que os fatores K_{12} , K_{13} e K_{23} são constantes

Figura 3.4 – Diferença esquemática na mudança de fase do sinal tipo Doppler devido ao tamanho da partícula: a) Partícula menor com menor mudança de fase ϕ e b) Partícula maior com maior mudança de fase ϕ . Fonte: Manual do sistema PDI [20]

ópticas obtidas na calibração do equipamento no fornecedor.

$$\lambda = 360 \left(\frac{K_{12}S_{12}}{\phi_{12}} + \frac{K_{13}S_{13}}{\phi_{13}} + \frac{K_{23}S_{23}}{\phi_{23}} \right) (K_{12} + K_{13} + K_{23})^{-1} \quad (3.4)$$

Os sprays são, usualmente, caracterizados por médias estatísticas como o diâmetro médio linear e de Sauter. Entretanto, neste trabalho foram utilizadas distribuições de diâmetros e velocidades com base nas funções de densidade de probabilidade, o que permite observar maiores detalhes, como a existência distribuições multi-modais.

Adicionalmente, médias condicionadas ao diâmetro das gotas foram obtidas para determinar a velocidade do escoamento. Essa determinação é possível pois partículas com número de Stokes (equação 3.5) abaixo de 0,1 são carregadas pelo escoamento e seguem as linhas de corrente, possuindo velocidades similares ao fluido carregador. Na equação 3.5, τ é um tempo característico do movimento de uma partícula, U_0 é a velocidade do fluido não perturbado e L_d é o comprimento característico percorrido por uma partícula. O tempo característico das partículas é calculado, neste trabalho, pela equação 3.6, em que ρ_d é a densidade das partículas e μ_f é a viscosidade do fluido.

$$S_n = \frac{\tau U_0}{L_d} \quad (3.5)$$

$$\tau = \frac{\rho_d d_d}{18\mu_f} \quad (3.6)$$

As principais restrições ao uso da técnica PDI são a quantidade de partículas no ponto de medição e o formato dessas partículas. Esta técnica foi desenvolvida com o princípio de medição para uma partícula esférica e isolada, isto é, se houver duas ou mais partículas no volume de medição ou esta partícula apresentar um formato diferente do esférico, a medida realizada é descartada em tempo real pelo processador de sinais do sistema. Esse descarte das medições inválidas é definido pelo nível de distorções no sinal obtido, como ruído excessivo e/ou grandes diferenças na frequência do sinal medido.

3.1.1 Equipamento

O equipamento utilizado neste trabalho foi o PDI-300 MD da Artium Technologies Inc., o qual permite a medição pontual da distribuição de diâmetros e velocidades das gotas. Este sistema é composto por dois módulos emissores de feixes laser e um módulo receptor. O primeiro módulo emissor apresenta dois feixes laser com comprimento de onda de 532 nm e 473 nm, dispostos em planos ortogonais. Já o segundo módulo emissor apresenta um feixe laser no comprimento de onda de 561 nm, o qual deve ser alinhado no mesmo plano do feixe de 473 nm. Essa disposição dos feixes permite a medição das três componentes de velocidade. O feixe principal (comprimento de onda de 532 nm) mede simultaneamente uma componente da velocidade e o diâmetro da partícula. Os feixes laser são contínuos e produzidos com tecnologia Nd:YAG de estado sólido bombeado por diodo (DPSS), com potência média de 300 mJ para o feixe de 532 nm e 180 mJ para cada um dos outros dois feixes. Estes feixes são divididos em 2 pares com mesmo comprimento de onda e alinhados de forma a se interceptarem no ponto focal do módulo receptor. Dessa forma, o encontro de dois feixes permite a formação das franjas de interferência.

O posicionamento deste sistema é apresentado na figura 3.5, em que o ângulo entre as linhas de centro dos emissores e a linha de centro do receptor é de 40 graus. O posicionamento foi feito de modo a alinhar o feixe com comprimento de onda de 532 nm à direção axial/longitudinal do queimador. Lentes com distância focal de 1000 mm foram usadas em ambos os módulos (emissor e receptor), minimizando a exposição do sistema às altas temperaturas da chama e permitindo medições de diâmetro de gota na faixa de 1 μm a 200 μm e módulo da componente axial da velocidade de 200 m/s, de acordo com o

fabricante. Filtros ópticos são utilizados na matriz de fotodetectores para a separação dos sinais oriundos dos feixes com diferentes comprimentos de onda e da iluminação ambiente, o que permite o uso deste equipamento em sistemas com combustão, pois todo o espectro de radiação visível é atenuado ou bloqueado, exceto as linhas espectrais dos comprimentos de onda dos feixes laser.

Figura 3.5 – Disposição espacial do sistema PDI.

3.1.2 Calibração

Os parâmetros de calibração do sistema PDI-300 MD são definidos durante a montagem do equipamento na fábrica. Esses parâmetros são bloqueados e não podem ser alterados pelos usuários finais do sistema. De acordo com o fabricante, o sistema não necessita de calibração adicional.

3.1.3 Metodologia das análises com a técnica PDI

A configuração de posicionamento adotada (figura 3.5) permite o uso do sistema em modo *forward scattering*, isto é, neste modo os fotodetectores do receptor são estimulados pela refração direta dos feixes laser pelas gotas de combustível, o que apresenta a melhor relação entre sinal e ruído e permite obter melhores taxas de aquisição. Devido a forma com que o sistema faz as medições de diâmetro e velocidade, neste trabalho apenas o feixe de 532 nm foi utilizado de forma a maximizar a taxa de aquisição. O uso de apenas

esse feixe limita a caracterização das gotas à medição do diâmetro e da componente axial de velocidade.

De acordo com Kim et al. [21] e Düwel et al. [22], é usual realizar medições de, no mínimo, 20.000 gotas válidas para obter momentos estatísticos invariáveis no tempo e curvas suaves de distribuição. Assim, para manter este número de gotas válidas, o tempo de medição foi variável, pois a taxa de aquisição de gotas válidas sofre influência das restrições dessa técnica (quantidade e formato das gotas).

3.1.4 Incertezas

Na medição de qualquer grandeza existem incertezas que contribuem para a variação dessa medição. As incertezas podem ser divididas em dois tipos: Tipo A e Tipo B. As incertezas do tipo A são associadas à variações estatísticas na medição, enquanto que as incertezas do tipo B representam outros fatores além dos associados às variações estatísticas.

A incerteza média do tipo B, segundo o fabricante, é de $0,5 \mu\text{m}$ para a medição de diâmetros e $0,1 \text{ m/s}$ para a medição de velocidades das gotas utilizando as lentes com distância focal de 1000 mm e o sistema posicionado na configuração *forward scattering*.

As incertezas do tipo A consideram variações estatísticas do escoamento e condições ambientes e foram determinadas, neste trabalho, pela repetibilidade de medições. Dessa forma, foram realizadas medidas para 3 frequências diferentes de injeção com 3 repetições e mínimo de 20.000 gotas válidas por medição. Cada conjunto é representativo de uma condição específica de injeção das gotas. Na tabela 3.1 são apresentados os valores para os diâmetros médio linear e de Sauter, além da componente axial média da velocidade das gotas.

Considerando os 3 conjuntos de medição e a incerteza do Tipo B, a média quadrática dos valores de desvio padrão para os diâmetros médios linear e de Sauter são, respectivamente, $6,69 \mu\text{m}$ (9,6 %) e $5,64 \mu\text{m}$ (5,1 %). Para a componente axial da velocidade, a média quadrática do desvio padrão é de $0,99 \text{ m/s}$ (18,7 %). As porcentagens são dadas em função do valor médio.

Tabela 3.1 – Valores medidos do diâmetro médio linear (d_{10}), diâmetro médio de Sauter (d_{32}) e componente axial da velocidade (Va_d) das gotas para 3 condições de injeção de gotas.

Caso	d_{10} (μm)	d_{32} (μm)	Va_d (m/s)
Caso A	47,1	91,5	8,81
	46,3	91,5	7,98
	49,1	93,5	9,93
Média	47,5	92,2	8,91
Desvio padrão	1,4	1,5	0,98
Caso B	78,2	118,7	3,58
	82,0	123,5	3,69
	86,6	127,2	3,62
Média	82,3	123,1	3,63
Desvio padrão	4,2	4,3	0,05
Caso C	77,5	117,5	3,48
	75,5	116,2	3,65
	85,0	122,4	3,36
Média	79,3	118,7	3,50
Desvio padrão	5,0	3,3	0,15

3.2 Espalhamento Mie e Velocimetria por Imagens de Partículas

3.2.1 Espalhamento Mie

A técnica de espalhamento Mie consiste na captura da luz espalhada elasticamente por partículas imersas em um escoamento. A intensidade de luz espalhada é proporcional às propriedades das partículas iluminadas, como seu formato, tamanho e índices de refração, absorção e emissão. Devido ao efeito cumulativo, a intensidade luminosa da luz refletida e/ou refratada é diretamente proporcional à quantidade de partículas que são iluminadas simultaneamente em uma determinada região.

A figura 3.6 apresenta a luz capturada por espalhamento Mie de dois sprays de etanol com diferentes quantidades de gota. Nesta figura, a luz incidente é produzida por uma folha laser plana posicionada diametralmente ao injetor. Para sprays com menor densidade, como o apresentado pela figura 3.6a, é possível identificar gotas individuais e, conseqüentemente, rastrear a posição dessas gotas ao longo do escoamento. Com o auxílio de imagens sequenciais, é possível calcular a velocidade e trajetória dessas gotas. Esse cálculo é a base da técnica de velocimetria por imagens de partículas ou *Particle Image Velocimetry* (PIV), apresentada abaixo.

Em sprays com maior densidade (figura 3.6b), a existência de aglomerados de gotas e o comportamento de grupo dessas gotas promovem um efeito cumulativo na luz espalhada, o que permite identificar apenas regiões com aglomerado de gotas ao invés de gotas individuais. No centro da figura 3.6b, observa-se uma grande região de luminosidade constante, composta por vários agrupamentos de gotas que colaboram entre si no espalhamento da luz e impedem a visualização, com os elementos ópticos disponíveis, de gotas individuais.

Com a definição de um limiar (binarização da imagem) é possível determinar o contorno de agrupamentos de gotas pelo valor de intensidade do pixel, isto é, pixels com valor acima do limiar indicam a presença de gotas. Dessa forma, é possível observar a evolução da área ocupada pelas gotas em uma dada seção transversal do escoamento.

Essa área apresenta correlação direta com a densidade do spray e pode ser utilizada nos casos em que a técnica PDI não é válida (sprays muito densos ou opacos) ou quando medições contínuas são realizadas em ambientes com eventos pulsáteis, pois o cálculo da área é obtido ao longo de um evento de injeção e considera toda a área iluminada pelas gotas em um determinado plano.

Figura 3.6 – Imagens obtidas pela técnica de Espalhamento Mie de dois sprays de etanol: a) spray com menor densidade e b) spray com maior densidade.

3.2.2 Velocimetria por imagens de partículas - PIV

A técnica PIV permite medir as componentes do campo de velocidades em um determinado plano do escoamento por meio da análise do movimento de partículas traçadoras que são carregadas pelo escoamento. A figura 3.7 apresenta o procedimento geral dessa técnica, em que um feixe circular pulsado de laser é expandido no formato de uma folha, a qual é utilizada para iluminar as partículas traçadoras. Pela técnica de espalhamento Mie, uma partícula traçadora reflete/refrata a luz incidente, o que permite identificar sua posição a cada instante.

As imagens são capturadas por câmeras digitais, as quais possuem resolução espacial limitada pelo número de pixels do sensor utilizado. A cada pixel é designado um volume de medição iluminado pela folha laser. Quando apenas as componentes de velocidade paralelas à folha laser são medidas (PIV-2D), é usual posicionar o sensor de imagens paralelo ao plano iluminado. Esse posicionamento permite uma correlação direta

Figura 3.7 – Procedimento geral da técnica PIV. Adaptado de Dantec Dynamics Inc. [23]

entre a área sensível do pixel e o volume observado no escoamento, porém a folha laser deve ser fina para limitar a visualização de partículas com movimento perpendicular ao plano analisado e espessa o suficiente para evitar que as partículas atravessem rapidamente o plano iluminado no período entre dois pulsos laser.

O uso de um laser pulsado permite obter um conjunto de duas imagens subsequentes, com intervalo de tempo entre as imagens definido pelo intervalo entre dois pulsos laser. Esse conjunto de imagens permite medir o deslocamento das partículas e, conseqüentemente, obter as componentes do vetor velocidade. Para se calcular os deslocamentos, as imagens são divididas em regiões conhecidas por Janelas de Interrogação (JDI). Essas janelas agrupam diversos pixels em uma imagem, isto é, ao se aplicar uma JDI de 8 x 8 pixels em uma imagem composta por 2048 x 2048 pixels, é obtido um campo de velocidades composto por 256 x 256 vetores.

O tamanho ideal da JDI é função do movimento e do número de partículas no volume de medição. Neste trabalho, as dimensões da JDI são definidas como, no mínimo, 3 vezes a distância característica percorrida pelas partículas durante o intervalo de tempo

analisado. Essa distância característica é definida em função da sobreposição entre duas imagens consecutivas do movimento das partículas e é identificada em função da direção preferencial do movimento dessas partículas.

O número de partículas dentro da JDI influencia diretamente o cálculo da velocidade, pois a determinação dos deslocamentos é feita de forma estatística por meio da correlação espacial entre as duas imagens. Um número limitado de partículas dentro da JDI não permite a identificação estatística do movimento do escoamento pelo algoritmo utilizado. Já um grande número de partículas pode prejudicar a identificação do movimento das partículas, uma vez que a imagem pode não apresentar resolução suficiente para identificar os agrupamentos de partículas, aumentando a incerteza na medição das velocidades.

A qualidade dos resultados obtidos com a técnica PIV depende da escolha adequada das partículas traçadoras. Essas partículas devem possuir características que permitam representar e observar os movimentos do escoamento analisado. Dessa forma, duas características importantes desses traçadores são a massa específica e as dimensões. As partículas traçadoras devem apresentar densidade semelhante a do fluido analisado, diminuindo os efeitos de inércia e gravitacionais sobre seu movimento. Já as dimensões das partículas devem ser uniformes para apresentar um comportamento regular no espalhamento da luz incidente.

Neste trabalho, a técnica PIV estereoscópico (SPIV) é utilizada para medir as três componentes do vetor velocidade no plano do objeto de medição ou plano laser. Nessa técnica, câmeras visualizam as partículas traçadoras por dois ângulos distintos (figura 3.8), produzindo um conjunto de duas imagens subsequentes por câmera. Cada conjunto de imagens é processado de forma semelhante à técnica PIV, produzindo campos de velocidade em planos paralelos ao sensor de cada câmera. Esses dois conjuntos de vetores de velocidade são combinados e projetados no sistema de coordenadas solidário ao plano de medição, de acordo com os ângulos da figura 3.8. Isso permite a obtenção das três componentes de velocidade do escoamento no plano analisado. Para se observar o movimento das partículas perpendicular ao plano de medição, a folha laser deve apresentar espessura compatível com a velocidade das partículas e o tempo de exposição das câmeras,

isto é, a espessura da folha deve ser grande o suficiente para permitir a identificação de uma mesma partícula em imagens subsequentes.

Figura 3.8 – Posicionamento das câmeras na configuração estereoscópica. Os ângulos α e θ indicam, respectivamente, o plano do sensor de imagens e do plano das lentes em relação ao plano iluminado pela luz laser. Adaptado de Dantec Dynamics Inc. [23]

As técnicas SPIV e 2D-PIV foram utilizadas na análise do escoamento helicoidal produzido pela passagem de ar pelo *swirler*. Um sistema de baixa taxa de aquisição de 7,4 Hz foi utilizado na técnica SPIV. Já para a técnica PIV-2D, um sistema com taxa de aquisição de 5.000 Hz foi utilizado (TR-PIV-2D). Esse sistema de alta taxa de aquisição também foi utilizado nas análises de espalhamento Mie pelas gotas dos sprays pulsados de combustível para medir a evolução da área ocupada.

3.2.3 Equipamento com baixa taxa de aquisição utilizado para a técnica SPIV

O equipamento convencional para as análises SPIV foi fornecido pela Dantec Dynamics Inc. e permite obter imagens planares de partículas suspensas no escoamento com taxa de aquisição de até 15 Hz para imagens únicas (*single frame*) ou até 7,4 Hz para um conjunto de duas imagens (*double frame*). O sistema utilizado é composto por um módulo de emissão laser, duas câmeras com alta resolução, dispositivos de correção

de foco e elementos ópticos. O uso de duas câmeras, posicionadas de acordo com a figura 3.9, é necessário para a medição das três componentes da velocidade do escoamento em um plano usando a técnica de SPIV.

Figura 3.9 – Posicionamento do sistema PIV estereoscópico.

O módulo emissor (NANO L 200-15, Litron Inc.) é um sistema baseado em um gerador Nd:YAG de dupla cavidade que produz um feixe laser com comprimento de onda de 1.064 nm. Este feixe passa por um cristal dobrador, reduzindo seu comprimento de onda para 532 nm, com até 200 mJ/pulso a 15 Hz por cavidade. Este feixe é expandido pelo conjunto óptico em uma folha laser com 100 mm de altura por 1 mm de espessura.

Duas câmeras digitais de alta resolução foram utilizadas para capturar as imagens em posição. Cada câmera possui sensor CCD com uma matriz de 2.048 x 2.048 pixels, sendo que cada pixel possui tamanho de 20 μm por 20 μm . A taxa máxima de captura é de até 15 quadros por segundo. Estas câmeras não possuem memória interna, de modo que todas as imagens são transferidas imediatamente para um computador e a quantidade de imagens é limitada pela memória disponível neste sistema. A taxa de conversão analógico/digital foi definida em 8 bits/pixel e o tempo de exposição é de 1 μs com *shutter* mecânico automatizado. As lentes utilizadas (CZ1405-174 Planar T*, Zeiss Inc.) possuem distância focal de 50 mm e profundidade de campo de f/1,4. Na menor distância de foco, a área máxima para visualização foi de 140 x 140 mm². Um filtro óptico passa banda, centrado em 532 nm $\pm$ 10 nm, foi posicionado na frente das lentes para permitir apenas a observação da reflexão do feixe pelas partículas, atenuando toda a iluminação

ambiente.

As câmeras foram instaladas sobre dispositivos *scheimpflug* de modo a permitir o foco das imagens mesmo com um grande ângulo entre o plano da lente e o plano da imagem. Esse dispositivo é necessário para definir os ângulos entre os planos de medição, das lentes e dos sensores nas câmeras (figura 3.8).

3.2.4 Equipamento com alta taxa de aquisição utilizado para as técnicas TR-PIV-2D e Espalhamento Mie

O equipamento para as análise com alta resolução temporal (TR) foi fornecido pela Dantec Dynamics Inc. e permite obter imagens planares de partículas suspensas no escoamento com taxas de repetição de até 10.000 Hz para imagens únicas (*single frame*) ou 5.000 Hz para conjunto de duas imagens (*double frame*). Este sistema, na configuração apresentada pela figura 3.10, é composto por um módulo de emissão laser, uma câmera de alta velocidade e elementos ópticos.

Figura 3.10 – Posicionamento do sistema PIV com alta taxa de aquisição.

O módulo emissor (modelo LDY 302, Litron Inc.) é um sistema gerador Nd:YFL de dupla cavidade que produz um feixe laser com comprimento de onda de 1.054 nm. Este

feixe passa por um cristal dobrador que reduz o comprimento de onda para 527 nm, com até 15 mJ/pulso a 1.000 Hz por cavidade. Este feixe é expandido por conjunto óptico em uma fina folha laser com 100 mm de altura por 1 mm de espessura e posicionado em um plano paralelo a saída do queimador (figura 3.10).

Uma câmera digital de alta velocidade (modelo Phantom[®] v3.11, Vision Research Inc.) foi utilizada para capturar as imagens das partículas. Essa câmera possui sensor CMOS com uma matriz de 1.280 x 800 pixels, sendo que cada pixel possui tamanho de 20 μm por 20 μm . Nesta resolução a taxa máxima de captura é de até 3.250 quadros por segundo, porém, com a redução do número de pixels ativos, é possível obter taxas de captura de até 500.000 quadros por segundo (128 x 8 pixels ativos). A memória RAM interna desta câmera é de 16 GBs, o que permite armazenar até 23.722 imagens com 12 bits/pixel para conversão analógico/digital. O tempo de exposição é de 1 μs com *shutter* mecânico automatizado.

Para as análises de espalhamento Mie, a folha laser foi posicionada em um plano vertical e diametral do queimador. Uma lente com distância focal de 50 mm e uma profundidade de campo de f/1,4 (CZ1405-174 Planar T*, Zeiss Inc.) foi utilizada para a visualização das gotas de combustível. Esse arranjo permite a visualização de uma área máxima de 180 x 100 mm², o que permite observar o desenvolvimento longitudinal das gotas.

Nas análises de velocimetria TR-PIV-2D, a folha laser foi posicionada em um plano horizontal e paralelo à saída do queimador na altura de $z/R_s = 0,5$. Este plano foi escolhido por permitir observar a existência de estruturas coerentes associadas ao PVC. Uma lente com distância focal de 100 mm e profundidade de campo de f/2,8 (AT-X M100 Pro D, Kenko Tokina Co. Ltd.) foi utilizada para a visualização das partículas. Essa configuração de lente permite uma área de visualização de 130 x 130 mm². As partículas traçadoras utilizadas nessa técnica foram geradas pelo mesmo equipamento empregado nas análises de velocimetria SPIV, o qual será apresentado na seção 3.2.7.

Para ambas as técnicas (TR-PIV-2D e Espalhamento Mie), um filtro óptico passa banda, centrado em 532 nm $\pm$ 10 nm, foi utilizado para permitir apenas a observação da reflexão do feixe laser pelas partículas, atenuando toda a iluminação ambiente.

3.2.5 Calibração dos sistemas

A calibração dos sistemas ópticos permite definir a relação entre as distâncias reais e as medidas pelo sensor da câmera. Qualquer representação métrica permite obter os parâmetros de calibração. Em análises bi-dimensionais, em que apenas os vetores paralelos ao plano são medidos, uma régua comum posicionada paralela ao plano de medição é suficiente para o cálculo do fator de calibração. A figura 3.11 foi utilizada para determinar os parâmetros de calibração nas análises TR-PIV-2D. O fator de escala nesta imagem é de $\alpha_e = 9,202$, dado pela equação 3.7, em que L_m é o comprimento real, n_p é o número de pixels na imagem ao longo do comprimento utilizado e L_p é o comprimento de cada pixel no sensor da câmera.

Figura 3.11 – Imagem para cálculo dos parâmetros de calibração nas análises feitas com o sistema TRPIV. A reta em vermelho representa a distância utilizada para o cálculo do fator de escala α_e .

$$\alpha_e = \frac{L_m}{n_p L_p} \quad (3.7)$$

No sistema PIV estereoscópico, a calibração é feita por uma imagem com características geométricas bem definidas que permitem tanto o cálculo dos parâmetros de calibração quanto a composição das imagens obtidas pelas duas câmeras. A imagem do alvo de calibração, vista por cada uma das câmeras, é apresentada pela figura 3.12. Este alvo consiste em marcadores circulares com diâmetro de 3 mm e distância entre centros de 11 mm. O marcador de identificação da origem possui diâmetro de 5 mm, e os marcadores

utilizados para definir os eixos do sistema de coordenadas possuem 2 mm. Nesta figura, as retas em verde indicam os marcadores usados no cálculo da matriz de mudança de base para a projeção dos vetores de velocidade do plano dos sensores para o plano de medição.

Figura 3.12 – Imagens do alvo de calibração para as análises feitas com o sistema SPIV: a) imagem vista pela câmera 1 e b) imagem vista pela câmera 2. Os marcadores possuem distância de 11 mm e diâmetros de 3 mm. O marcador de identificação de origem possui diâmetro de 5 mm. Os marcadores de identificação dos eixos do sistema de coordenadas possuem diâmetro de 2 mm. As linhas verdes identificam os marcadores utilizados na composição da matriz de calibração.

3.2.6 Análise por espalhamento Mie

O spray combustível foi utilizado para espalhar a luz incidente na técnica de espalhamento Mie, permitindo identificar e rastrear as regiões com gotas produzidas durante cada evento de injeção. A sequência temporal dessas imagens permite observar a evolução da área ocupada pelas gotas ao longo de múltiplos eventos de injeção. As análises foram limitadas à região próxima a saída do queimador. Em cada imagem, são identificadas as áreas ocupadas pelas gotas (individuais ou agrupadas) por meio da intensidade luminosa espalhada. O conjunto óptico utilizado não permite visualizar gotas individuais ou aglomerados de gotas com diâmetro inferior a $10\ \mu\text{m}$, por estas apresentarem tamanho inferior à área útil de um pixel do sensor da câmera.

Com a definição de um limiar para a intensidade luminosa, é possível estabelecer o perímetro de gotas individuais ou aglomerado de gotas. Neste trabalho, as imagens foram obtidas com intervalo de tempo de $100\ \mu\text{s}$, escolhido de forma a respeitar a regra do deslocamento de $1/3$ do comprimento característico da JDI. O limiar de intensidade foi definido com valor mínimo de 9 (ruído de fundo) e máximo de 12 no histograma de luminosidade (8 bits). Com esse limiar, as regiões claras da imagem 3.13 representam a área ocupada pelas gotas (A_g). Esta área é calculada pela equação 3.8, em que n_h é o número de pixels medido com intensidade superior a 11 do histograma.

$$A_g = n_h (L_p \alpha_e)^2 \quad (3.8)$$

Figura 3.13 – Imagem de espalhamento Mie pelas gotas em um spray de etanol. Limiar definido entre 9 e 12 no histograma da imagem para a separação entre as fases líquida (clara) e gasosa (escura).

3.2.7 Metodologia das análises com as técnicas TR-PIV-2D e SPIV

No caso das análises de velocimetria por imagens de partículas (PIV), o programa Dynamic Studio[®] da Dantec Dynamics Inc. é utilizado para capturar as imagens e realizar seu processamento. Em ambas as medições (TR-PIV-2D e SPIV), foram utilizados traçadores líquidos em forma de gotas esféricas com diâmetro médio de $4,0 \pm 0,08 \mu\text{m}$. Esses traçadores são compostos por óleo vegetal de cadeia longa denominado Di-Ethyl-Hexyl-Sebacat ($C_{26}H_{50}O_4$) e foram produzidos pelo gerador FT700CE da Dantec Dynamics Inc., o qual é fabricado e calibrado para produzir gotas esféricas com variação de até 2% do diâmetro nominal.

As análises SPIV foram realizadas com frequência de 7,4 Hz para a captura do conjunto de duas imagens por câmera (*double frame*), com um total de 200 conjuntos por análise. O intervalo de tempo entre as duas imagens em cada conjunto foi definido em 20 μs . O movimento das partículas neste intervalo permite utilizar uma JDI com dimensões de 16 x 16 pixels, baseado no limite do movimento das partícula como 1/3 do comprimento da JDI. Um algoritmo de correlação cruzada adaptativa [23] foi utilizado para o cálculo dos vetores de velocidade. Neste algoritmo, 4 camadas com diferentes dimensões de JDI foram utilizadas para determinar os vetores velocidade. Adicionalmente, um filtro Gaussiano passa baixa com largura de (1/k) de 0,2 foi aplicado para atenuar componentes de alta frequência e melhorar a razão entre sinal e ruído. A validação dos vetores calculados e identificação de possíveis valores espúrios foi realizada pelo critério de mínimo comprimento de cada vetor em relação a um vetor base. Os vetores espúrios identificados foram substituídos pelo critério de mediana local entre vetores vizinhos.

Nas análises TR-PIV-2D, foi utilizada a frequência de 2 kHz em modo *double frame*. Foram capturados 3.000 conjuntos de duas imagens consecutivas, com intervalo de tempo de 250 μs . Essa configuração permitiu o uso de JDIs com 16 x 16 pixels. O mesmo algoritmo de correlação cruzada adaptativa foi utilizado para o cálculo dos vetores de velocidade, porém foram aplicadas 5 camadas com diferentes dimensões de JDI na determinação dos vetores na JDI original (16 x 16 pixels). Uma função janela do tipo gaussiana com largura de (1/k) de 1,33 foi aplicada no processamento dos sinais para

minimizar os efeitos de borda. Um filtro Gaussiano passa baixa com largura de $(1/k)$ de 0,33 foi aplicado para atenuar componentes de alta frequência e melhorar a razão entre sinal e ruído. Devido ao uso de uma função janela, a região nas bordas das JDIs são prejudicadas nos cálculos dos vetores. Para minimizar esse efeito de borda, uma sobreposição de 55% do comprimento entre as JDIs é utilizada neste trabalho.

3.2.8 Incertezas nas medições por Espalhamento Mie e PIV

A dificuldade em estimar todas as incertezas associadas à medição do campo de velocidades em um escoamento complexo, restringe a determinação das incertezas associadas apenas ao fator de ampliação, ao deslocamento das partículas nas imagens, ao intervalo de tempo entre as imagens e às condições do escoamento. Estas incertezas são produzidas tanto pelo equipamento quanto pelos traçadores utilizados, de modo que as incertezas devido ao cálculo das velocidades pelos algoritmos de correlação apresentam maior grau de dificuldade de estimação.

Em linhas gerais, a ordem de grandeza das incertezas na medição de velocidades pela técnica PIV é de 5% do valor da magnitude da velocidade não perturbada (ao longe). Esse valor é compatível com diversos trabalhos, entre eles o de Cenedese et al. [24], Yang et al. [25] e Nogenmyr et al. [26]. Os efeitos devido aos gradientes térmicos, como avaliado por Pfadler et. al [27], não são considerados neste trabalho, pois as análises de velocimetria PIV foram realizadas apenas em escoamentos à temperatura ambiente. As incertezas associadas à medição da área ocupada pelas gotas com a técnica de espalhamento Mie são semelhantes as incertezas associadas à técnica PIV, pois essas incertezas estão associadas ao sistema de medição utilizado.

3.3 Fluorescência Induzida por Laser do radical OH

Durante o processo de combustão, são produzidas diversas espécies químicas intermediárias e/ou estáveis. As espécies intermediárias, como os radicais hidroxila (OH), óxido de nitrogênio (NO) e hidrocarbonetos (CH), podem ser utilizadas para determinar características do processo de combustão, tais como a região de reação, temperatura

dos gases, formação de poluentes e interação entre estruturas coerentes do escoamento e o processo de combustão. Técnicas baseadas em espectroscopia permitem observar a existência dessas espécies químicas por meio da energia liberada devido à transição entre os diversos estados eletrônicos de uma molécula. Para o radical OH, o estado fundamental e o estado de primeira excitação são, respectivamente, os estados eletrônicos $A^2\Pi$ e $X^2\Sigma$, como indicado por Lucht [28] e Santos [29]. A transição de absorção ou excitação ($X^2\Pi \rightarrow A^2\Sigma$) permite à molécula sair do estado fundamental e atingir o estado de primeira excitação. Uma vez no estado excitado, a molécula de OH passa pela transição de decaimento espontâneo ($X^2\Pi \leftarrow A^2\Sigma$), emitindo um fóton em determinado comprimento de onda. A figura 3.14 ilustra, de forma qualitativa, a transição entre os estados $X^2\Pi$ e $A^2\Sigma$. Na transição de decaimento, mecanismos de transferência de energia (vibracionais, rotacionais e de colisão) podem induzir a transição do sistema $X^2\Pi \leftarrow A^2\Sigma$, influenciando diretamente a intensidade do sinal de fluorescência. Entre esses mecanismos, a supressão eletrônica colisional (*quenching*) provoca o decaimento sem a emissão de fótons e é diretamente influenciada pelas condições de pressão e temperatura do ambiente de análise.

Figura 3.14 – Mecanismos de transmissão de energia na transição do sistema $X^2\Pi - A^2\Sigma$. As cores representam: transição de absorção (verde), transição de emissão (vermelho), transição rotacional (marrom) e transição vibracional (ciano). Adaptado de Santos [29].

Na técnica de fluorescência induzida por laser ou *Laser Induced Fluorescence* (LIF), as espécies são excitadas em sistemas eletrônicos como o $X^2\Pi \rightarrow A^2\Sigma$ pela absorção

da radiação eletromagnética fornecida por um feixe laser. Após serem excitadas, essas espécies decaem liberando um fóton (fluorescência) que pode ser capturado e, assim, permitir medir sua intensidade e localização no escoamento.

Neste trabalho, a técnica LIF é aplicada para o radical OH, o qual apresenta o espectro de absorção apresentado pela figura 3.15. Nesse espectro, são observadas duas regiões bem definidas, centradas em 283 nm e 310 nm. A figura 3.16 indica os coeficientes de absorção e emissão para uma molécula livre de OH. A maior absorção de energia pela molécula de OH ocorre para a linha de excitação eletrônica $Q_1(6)$ do sistema $X^2\Pi - A^2\Sigma(1,0)$ (figura 3.16a) para a faixa de comprimentos de onda de 284 nm e 286 nm. Quando excitada na linha $Q_1(6)$, a transição de decaimento com maior emissão de energia ocorre para o sistema $X^2\Pi - A^2\Sigma(0,0)$ na faixa de comprimento de onda de 308 nm a 310 nm (figura 3.16b). Dessa forma, a linha $Q_1(6)$ permite obter uma boa relação entre absorção/emissão para a molécula de OH.

Figura 3.15 – Espectro de absorção para o radical OH livre. Duas regiões são observadas, centradas em 283 nm e 310 nm. Adaptado de Dante Dynamics Inc. [30].

Figura 3.16 – Coeficientes para as linhas de transição da molécula OH no sistema $X^2\Pi - A^2\Sigma$: a) coeficientes de absorção para o sistema $X^2\Pi - A^2\Sigma(1,0)$ e b) coeficientes de emissão para o sistema $X^2\Pi - A^2\Sigma(0,0)$. Adaptado de Santos [29].

3.3.1 Equipamento

A análise de fluorescência induzida por laser foi realizada com um equipamento com alta taxa de aquisição, fornecido pela Dantec Dynamics Inc.. Este sistema permite obter imagens planares do radical OH com taxa máxima de repetição de 4.800 Hz e é composto por um laser de bombeio, um laser corante, um intensificador de imagens, uma câmera de alta velocidade e elementos ópticos. Esses dispositivos e suas posições são apresentados pela figura 3.17.

Figura 3.17 – Sistema utilizado nas análises da fluorescência induzida por laser do radical OH.

O laser de bombeio (modelo INNOSLAB IS12II-E, Edgewave GmbH) utiliza um sistema Nd:YAG de cavidade única para produzir um feixe laser com comprimento de onda de 1.064 nm e 14 mJ/pulso a 2.000 Hz. Este feixe passa por um cristal dobrador de frequências, reduzindo o comprimento de onda para 532 nm com até 6 mJ/pulso a 2.000 Hz. A duração do pulso laser deste sistema é de 12 ns com máxima taxa de aquisição de até 30.000 Hz.

O feixe produzido pelo laser de bombeio é utilizado para produzir um novo feixe laser por um sistema de laser corante (Credo da Sirah Lasertechnik GmbH). A figura 3.18 apresenta o circuito interno do laser corante utilizado neste trabalho. Este sistema possui dois estágios de conversão: ressonador e amplificador. O estágio ressonador utiliza o corante Rodamina 590 (6G) dissolvido em etanol anidro na concentração de 0,135 g/L para a absorção do feixe de 532 nm e emissão de um feixe com comprimento de onda de 566 nm. Devido à baixa energia produzida pelo estágio ressonador, o feixe de 566 nm é amplificado em um segundo estágio de conversão que também utiliza Rodamina 590 (6G) mas na concentração de 0,09 g/L. O corante Rodamina 590 (6G) foi escolhido por apresentar melhor eficiência na faixa de emissão em 566 nm (figura 3.19). O conjunto sintonizador é utilizado para ajustar o comprimento de onda do feixe laser produzido.

Após a amplificação, o feixe laser passa por um cristal BBO (Borato de Bário ou BaB_2O_4), o qual dobra a frequência, produzindo um novo feixe com comprimento de onda de 283,4561 nm e precisão de 0,1 pm. Um prisma Pellin-Broca, o qual separa no espaço os feixes com diferentes comprimentos de onda, é utilizado para bloquear parte do feixe não convertido de 566 nm. Devido às perdas de conversão do sistema corante, o feixe de 283 nm é produzido com no máximo 0,54 mJ/pulso a 4.500 Hz, medido por um medidor de potência térmica (Juno Rohs da Ophir Optronics Solutions Ltd.). Ao sair do laser corante, o feixe é expandido pelo conjunto óptico da figura 3.17 em uma folha laser fina com 100 mm de altura por 1 mm de espessura. Esta folha laser foi posicionada em um plano diametral vertical na saída do queimador.

A fluorescência do radical OH no comprimento de onda de 309 nm (transição do sistema $X^2\Pi \rightarrow A^2\Sigma(0,0)$), é visualizada pelo conjunto lente, intensificador de imagens e câmera digital de alta velocidade. A lente utilizada, produzida pela Sodern, é otimizada

Figura 3.18 – Visão interna do Laser corante utilizado para a produção do feixe laser com comprimento de onda de 283 nm para a excitação eletrônica do radical OH.

para comprimentos de onda na faixa de 250 nm a 410 nm e possui distância focal de 100 mm com profundidade de campo de $f/2,8$. O uso de uma lente específica para o espectro UV permite melhorar a razão entre sinal e ruído da imagem analisada, de acordo com Böhm et al. [31].

O intensificador de imagens (modelo C10880-03C, Hamamatsu Photonics K.K.) é utilizado para intensificar e converter as imagens em UV para o espectro visível (VIS). Este dispositivo consiste em um estágio de conversão de luz UV em elétrons e dois estágios de conversão de elétrons em luz visível. Estes dois últimos estágios são necessários devido à baixa intensidade do sinal de fluorescência induzida pelo laser de alta repetição (baixa energia por pulso). O estágio de conversão UV-elétrons consiste em um cátodo de

Figura 3.19 – Eficiência de diversos corantes utilizados para a produção de feixes laser, excitados por um feixe laser com comprimento de onda de 532 nm. A Rodamina 590 (6G) é a que apresenta melhor eficiência para emissão de feixe laser com comprimento de onda de 566 nm. Adaptado de Dantec Dynamics Inc. [30].

elementos Multialkali com resposta espectral na faixa de 185 nm a 900 nm. Os estágios de conversão elétrons-VIS consistem em duas matrizes de fósforo P46. A janela de saída consiste em uma placa de vidro feito com silicato de boro e possui diâmetro de 16,6 mm. O orifício de entrada do sinal UV possui diâmetro de 25 mm. A máxima taxa de aquisição deste intensificador é de 200.000 Hz, com tempo de exposição na faixa entre 10 ns a 9,99 ms. Este conjunto permite um ganho de luminosidade de até 10^6 (lm/m²)/px. Neste trabalho, a configuração de tempo de exposição de 5,0 ns e ganho de 620 foram utilizados, permitindo identificar apenas a fluorescência induzida e reduzindo e/ou bloqueando a luminescência espontânea do radical OH e de outras fontes externas.

A câmera utilizada (modelo Phantom[®] v3.11, Vision Research Inc.) possui sensor CMOS com uma matriz de 1.280 x 800 pixels com taxa máxima de captura, nesta resolução, de 3.250 fps. Entretanto, ao se reduzir do número de pixels ativos, é possível obter taxas de captura de até 500.000 fps (128x8 pixels). A memória RAM interna desta câmera é de 16 GB, o que permite armazenar até 23.722 imagens com 8 bits/pixel para conversão analógico/digital. O tempo mínimo de exposição é de 1 μ s com *shutter* mecânico

automatizado.

Um filtro passa banda centrado em $309 \text{ nm} \pm 2 \text{ nm}$ foi utilizado para auxiliar na redução da incidência de luz ambiente e da luminescência química espontânea das chamas.

3.3.2 Metodologia das análises com a técnica LIF

A definição de um limiar para a intensidade luminosa do sinal de fluorescência do radical OH permite identificar a região de formação deste radical. Imagens sequenciais permitem rastrear o formato desta região ao longo dos múltiplos eventos de injeção de combustível. Neste trabalho foram analisadas, aproximadamente, 3.400 imagens com intervalo de $208,3 \mu\text{s}$ totalizando 0,7 segundo para cada um dos casos.

A figura 3.20 representa uma imagem obtida do sinal de fluorescência induzida para uma chama de etanol. Nesta figura, o limiar foi definido com valor 7 no histograma de intensidade luminosa (8 bits). Valores abaixo desse limiar foram considerados como ruído de fundo. Dessa forma, as regiões coloridas indicam a presença do radical OH em um determinado instante. Apesar do gradiente de cores ser proporcional à quantidade de moléculas de OH, neste trabalho o sinal de fluorescência foi utilizado apenas para indicar a região de existência deste radical e não para quantificar a concentração ou outra característica da região de reação.

Figura 3.20 – Imagem instantânea obtida com a técnica LIF-OH de uma chama de etanol. O limiar foi definido em 7 no histograma de intensidade luminosa, permitindo a identificação da região de produção do radical OH. Valores abaixo desse limiar foram considerados como ruído de fundo.

Capítulo 4

Bancada experimental

Neste trabalho, chamas de spray pulsado de etanol foram produzidas em uma bancada experimental, composta por queimador aberto, sistema de injeção de combustível, dispositivos auxiliares de alimentação ar/combustível e estruturas de suporte. A figura 4.1 indica, de forma esquemática, os diversos dispositivos que compõe a bancada utilizada.

Figura 4.1 – Dispositivos que compõe a bancada de testes utilizada neste trabalho para a análise das chamas de spray pulsado de etanol.

4.1 Queimador aberto

O queimador utilizado neste trabalho foi derivado de uma câmara de combustão utilizada no acionamento de uma micro-turbina a gás, operada apenas com combustíveis gasosos. Para o uso com combustíveis líquidos, este queimador foi modificado, permitindo o acoplamento de um injetor automotivo comercial. A figura 4.2 apresenta os dispositivos que constituem o queimador: cilindro de suporte, um dispositivo rotacionador do tipo *swirler* axial e injetor de combustível. Todos estes dispositivos foram alinhados concentricamente e posicionados na vertical, com a chama desenvolvida no sentido oposto ao da

ação da gravidade.

A estrutura de apoio do queimador, projetada com perfis de alumínio com 45 mm de largura, foi acoplada a um sistema de posicionamento eletromecânico, permitindo a translação independente nos três eixos ortogonais. O sistema de posicionamento modelo C142-4 (ISEL Inc.) consiste de uma base acoplada a guias lineares que são atuadas por motores de passo. Este sistema permite a translação de até 600 mm com precisão de 0,05 mm, de acordo com o fabricante.

Figura 4.2 – Queimador projetado para a produção das chamas de spray de etanol.

O corpo cilíndrico do queimador foi construído em aço e utilizado para a fixação concêntrica do *swirler* e do injetor de combustível. Este cilindro possui comprimento de $L_c = 800$ mm, parede com espessura de $t_c = 3$ mm e diâmetro interno de $d_{ic} = 70$ mm. O comprimento do corpo do queimador foi calculado de forma a fornecer um perfil homogêneo de velocidades a montante do *swirler*.

O dispositivo rotacionador de ar do tipo *swirler* axial, apresentado pela figura 4.3, foi projetado com 10 aletas axiais fixas, inclinadas de $\alpha_s = 65^\circ$ em relação ao eixo vertical. Essas aletas possuem diâmetro interno de $d_i = 17$ mm e diâmetro externo de $d_e = 40$ mm. Essa configuração produz um número de *Swirl* geométrico de $S = 1,61$ dado pela equação 4.1. Segundo Rochaya [9], este número de *Swirl* permite o estabelecimento de uma região de recirculação com intensidade suficiente para se manter o processo de

combustão de uma chama gasosa. O número de *Swirl* é teórico e não considera os efeitos do processo de combustão e da existência das gotas. O *swirler* foi fixado na extremidade superior do cilindro de suporte com o auxílio de uma rosca.

$$S = \frac{2}{3} \left(\frac{1 - \left(\frac{d_{i_{sw}}}{d_{e_{sw}}} \right)^3}{1 - \left(\frac{d_{i_{sw}}}{d_{e_{sw}}} \right)^2} \right) \tan(\alpha_{sw}) \quad (4.1)$$

Figura 4.3 – Dispositivo rotacionador de ar do tipo *swirler* axial utilizado neste trabalho, composto por 10 aletas inclinadas de $\alpha_s = 65^\circ$ em relação ao eixo vertical e diâmetros interno e externo de $d_i = 17$ mm e $d_e = 40$ mm, respectivamente.

4.2 Sistema de injeção de combustível

O sistema de injeção de combustível é constituído de: injetor de combustível, sistema de controle do injetor e dispositivos auxiliares.

4.2.1 Injetor de combustível

O injetor automotivo (0280150747, Robert Bosch GmbH.) apresentado pela figura 4.4 é composto por uma válvula solenoide e foi selecionado para a produção do spray pulsado de etanol. Este injetor foi desenvolvido para uso em motores de combustão interna

com alimentação de combustível via sistema de admissão de ar (*Port Fuel Injection* ou PFI). Injetores utilizados em sistemas PFI não são projetados de forma a garantir uma nebulização fina ($d_g \leq 20 \mu\text{m}$) de combustível, pois a evaporação das gotas se dá devido ao contato com o coletor de admissão e com as válvulas da câmara de combustão, em que ambos apresentam temperaturas elevadas durante a operação do motor.

Hastes radiais dispostas a 120° foram utilizadas para posicionar o injetor de forma concêntrica ao *swirler* (figura 4.2). Adicionalmente, um anel de vedação foi colocado no acoplamento entre o injetor e o *swirler* para evitar fluxo de ar entre os dois dispositivos.

Figura 4.4 – Bico injetor automotivo comercial modelo 0280150747 da Robert Bosch GmbH.

4.2.2 Sistema controle do injetor

Os sistemas automotivos de injeção eletrônica permitem o controle da quantidade de combustível injetado por meio da combinação entre a frequência de injeção e o tempo de abertura da válvula do injetor. Diferentes combinações produzem sprays com características que afetam diretamente os processos de evaporação e mistura das gotas, influenciando o comportamento das chamas de etanol.

Para garantir a flexibilidade na escolha dos parâmetro de injeção, um sistema de controle que utiliza um sinal elétrico com largura de pulso modulado (*Pulse Width Modulation* ou PWM) foi desenvolvido neste trabalho. O uso de um sinal PWM permite associar a frequência e o tempo de abertura da válvula com o período e a razão cíclica

(*duty cycle*) do sinal, respectivamente. O *duty cycle* de um pulso é definido pela figura 4.5, sendo a razão entre o tempo do pulso e o período do ciclo.

Figura 4.5 – Características de um pulso PWM: tempo de um pulso e período de um ciclo. O *duty cycle* é definido como a razão entre tempo de um pulso e período de um ciclo

Na produção de diferentes sinais PWM, foi utilizado o módulo *Arduino Due* devido ao baixo custo, facilidade de programação e alto desempenho. Este módulo utiliza o micro-controlador Atmel SAM3X8E com tecnologia ARM Cortex M3 de 32 bits RISC, além de 54 portas de entrada/saída digital, 12 portas analógicas, 4 portas seriais UART e 2 conversores analógico/digital. A frequência de operação deste módulo é de 84 MHz, o que garante a estabilidade na geração dos pulsos PWM.

O circuito eletrônico da figura 4.6 foi desenvolvido para amplificar a tensão do sinal PWM gerado e fornecer energia ao injetor. Este circuito é constituído por um transistor (T1), dois diodos (D1 e D2), um potenciômetro (P1) e uma resistência (R1). O transistor selecionado (3DD13007K, Jilin Sino Microelectronics Co. Limited) possui resposta de alta velocidade e alta voltagem. Os diodos (IN4007) foram utilizados para garantir o isolamento entre a placa de geração dos pulsos PWM e o solenoide do injetor, bloqueando possíveis correntes elétricas residuais. Um potenciômetro de 5.000 Ohms e uma resistência de 100 Ohms foram incluídos para regular a corrente no circuito. A alimentação do sistema foi realizada por uma fonte estabilizada de 12 V e 120 W.

Figura 4.6 – Circuito utilizado para o acionamento do injetor de combustível; D1 e D2 são diodos IN4007, R1 é um resistor de 100 Ohms, P1 é um potenciômetro de 5.000 Ohms e T1 é o transistor 3DD13007K.

4.2.3 Dispositivos auxiliares de alimentação de combustível e ar

O combustível foi fornecido a condições constantes de pressão (300 kPa) e temperatura (35°C) em todas as análises. O diagrama da linha de injeção de combustível é apresentado na figura 4.1.

Um reservatório de 50 litros de etanol anidro foi acoplado a uma bomba de combustível comercial (228234103R, Continental Automotive Solutions Ltda.). Esta bomba automotiva foi escolhida devido à sua facilidade de integração com o sistema de injeção e possuir pressão de trabalho de até 600 kPa. A temperatura do combustível foi mantida constante com o uso de um trocador de calor acoplado à linha de combustível, composto por um tubo de cobre em espiral imerso em um banho térmico autorregulado (Banho Ultratermostato IOPE 521/2DE de 2.300 W). Um filtro com malha de 70 μm foi utilizado para evitar que pequenas partículas fossem carregadas até o medidor de vazão e ao injetor. Adicionalmente, uma válvula reguladora de pressão e um sistema de desvio foram utilizados para manter a pressão e a vazão desejadas.

A vazão de combustível foi medida na linha de admissão por um medidor com

princípio de medição por deslocamento positivo utilizando a tecnologia de engrenagens ovais (MG004A511, Trimec Inc.). A faixa de medição da vazão de combustível é de 0,11 g/s a 7,97 g/s com incerteza de, aproximadamente, 1% na temperatura de trabalho entre -20°C e +120°C. Termopares tipo K foram utilizados para medir a temperatura no reservatório e na admissão do injetor de combustível, permitindo o controle manual da potência do banho térmico.

O ar utilizado para alimentar o queimador é provido por uma linha de ar comprimido mantida a 800 kPa. Todo o ar de alimentação das chamas é forçado a passar pelo *swirler*, entretanto a configuração de chama aberta permite que ar adicional possa ser fornecido à chama. Este ar adicional não é quantificado e foi desprezado neste trabalho. A vazão de ar foi obtida por um medidor de vazão com princípio de medição por frequência de desprendimento de vórtices (*Vortex Flowmeter 8800A*, Rosemount Inc.). A faixa de operação desse medidor é de 1,5 g/s a 43,9 g/s para pressões de até 600 kPa, apresentando variação de até 5% de acordo com o fabricante. Um filtro regulador de pressão (B72G-3AK-AL3-RMN, Norgren Ltda.) foi colocado a montante do medidor de vazão, permitindo a regulação tanto da pressão quanto da vazão de ar no queimador, além da filtragem de possíveis contaminantes sólidos. A temperatura do ar na linha de alimentação foi medida por um termopar tipo K. Na calibração dos termopares com o banho auto-regulável, as temperaturas medidas apresentaram oscilação de até 2% em torno dos valores nominais.

Os termopares e os medidores de vazão possuem saídas analógicas em função da tensão ou da corrente elétrica. A conversão analógico/digital foi realizada por um sistema de aquisição de dados com capacidade para 22 canais de conversão analógico/digital de 22 bits e frequência de aquisição de até 10 Hz (34970A, Agilent Inc.).

4.3 Estruturas de suporte auxiliares

As estruturas de suporte auxiliares foram utilizadas para posicionar o sistema de diagnóstico e fornecer segurança durante a operação do queimador.

A estrutura de suporte do sistema de diagnóstico foi montada com perfis de

alumínio com largura de 100 mm para garantir a estabilidade e rigidez do conjunto. Essa estrutura foi necessária para manter o alinhamento e a posição dos equipamentos de emissão e recepção dos feixes laser. Os perfis utilizados permitiram flexibilidade na montagem e posicionamento dos sistemas de diagnóstico.

Uma estrutura de segurança foi projetada para a extração dos gases de combustão, limitando o comprimento total das chamas e a dispersão das gotas não totalmente consumidas. Esta estrutura, semelhante a uma capela, possui altura de 1.000 mm acima do queimador e seção transversal retangular com 1.000 mm x 800 mm, não influenciando a região de análise das chamas produzidas pelo queimador.

4.4 Parâmetros de operação do queimador

O queimador utilizado foi inicialmente projetado para o uso com combustíveis gasosos e, dessa forma, foram necessárias modificações para seu uso com combustíveis líquidos (etanol). Com isso, uma nova caracterização das combinações dos parâmetros de injeção se faz necessária para avaliar os limites de operação do sistema, isto é, foram testados diversas combinações dos parâmetros de injeção de combustível para se obter um mapa dos diversos das chamas passíveis de análise. Neste trabalho, a vazão de ar no queimador foi mantida constante enquanto foram variados os parâmetros de injeção de combustível. A tabela 4.1 apresenta as faixas analisadas para estes parâmetros e os resultados serão apresentados na seção 5.1.

Tabela 4.1 – Valores limites para os parâmetros de injeção de combustível utilizados no mapeamento do queimador

Parâmetro	Limite inferior	Limite superior
Frequência do injetor (Hz)	100	600
<i>Duty cycle</i> do injetor (%)	25	70

A existência de chamas estáveis ou com instabilidades locais foi utilizada como critério para definir os limites de operação do queimador. Visualmente, verificaram-se três padrões distintos de combustão: chamas ancoradas longas, chamas ancoradas curtas

e chamas descoladas (*lifted*). Os parâmetros relacionados aos padrões observados são apresentados pela tabela 4.2. Os casos analisados foram nomeados de acordo com a frequência de injeção e o prefixo ESF ou *Ethanol Spray Flame*.

Tabela 4.2 – Valores dos parâmetros de injeção de combustível para os casos analisados com diferentes padrões de combustão

Caso	Frequência de injeção (Hz)	<i>Duty cycle</i> do injetor (%)	Padrão de combustão
ESF100	100	29	Chama ancorada longa
ESF250	250	43	Chama ancorada curta
ESF400	400	59	Chama descolada

Nos casos da tabela 4.2, as condições de pressão, vazão e temperatura a montante do injetor de combustível foram, respectivamente, de 300 ± 50 kPa; $438,3 \pm 6,5$ mg/s e $35,0 \pm 0,7^\circ\text{C}$. O ar para a reação de combustão foi fornecido ao queimador com vazão e temperatura de, respectivamente, $6,6 \pm 0,7$ g/s e $27,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$. Essa vazão de ar produziu um número de Reynolds de, aproximadamente, $R_e = 7.667$, baseado no diâmetro externo do *swirler*.

A figura 4.7 apresenta o sinal PWM gerado para cada caso analisado. Nesta figura, a amplitude do sinal foi escalonada para facilitar a visualização, uma vez que o sinal possui amplitude constante de 12 V, como descrito na seção 4.2.2. A escala de tempo utilizada (10 ms) é referente ao caso com maior período de injeção (ESF100). Dessa forma, enquanto o caso ESF100 apresenta apenas um evento de injeção nesse período, os casos ESF250 e ESF400 apresentam 3 e 4 eventos de injeção, respectivamente.

Figura 4.7 – Comparação entre a duração e a quantidade de eventos de injeção para os casos analisados (ESF100, ESF250 e ESF400).

Capítulo 5

Resultados

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos para a caracterização do queimador (seção 5.1) e das chamas de spray pulsado de etanol (seção 5.2) selecionadas para esse trabalho.

Adicionalmente, nas seções 5.2.1 e 5.2.2 serão apresentados aspectos dos sprays de etanol com diferentes frequências de injeção. As regiões de existência do radical OH para as chamas com as diferentes frequências de injeção serão apresentadas na seção 5.2.3. Por fim, na seção 5.2.4 serão apresentadas características do escoamento de ar que permitirão compreender melhor a interação entre as gotas, a região de reação e o escoamento de ar helicoidal.

5.1 Caracterização do queimador

A caracterização do queimador objetiva o mapeamento dos parâmetros de injeção de combustível que produzem e sustentam o processo de combustão. A figura 5.1 apresenta a combinação destes parâmetros de injeção das gotas de etanol. A região cinza nesta figura identifica as combinações que permitiram observar chamas com luminescência química espontânea ao longo do tempo de análise, não sofrendo extinção global do processo de reação. Combinações fora desta região não produzem chamas que sustentam o processo de combustão durante um longo período de tempo ($t \geq 1$ min).

A fronteira estabelecida pelos losangos brancos na figura 5.1 indica um comportamento linear do tempo de abertura da válvula (*duty cycle*) em função da frequência de injeção para até 550 Hz. Acima dessa frequência, o comportamento do injetor deixa de ser linear e apresenta saturação no valor do *duty cycle* de 70%.

Essa saturação é devida à dinâmica do movimento da válvula do injetor, a qual foi projetada para operar em frequências menores, isto é, na operação regular de um motor convencional, a frequência de abertura da válvula de injeção de combustível (f_i) é função da velocidade do motor (n_{rpm}) e do número de injeções por ciclo (n_{ic}), como apresentado pela equação 5.1. Supondo 1 injeção por ciclo em um motor 4 tempos operando a 6.000 rpm, a frequência de abertura da válvula é $f_i = 25$ Hz. Apesar deste valor está abaixo da faixa utilizada neste trabalho (100 Hz a 600 Hz), o comportamento do injetor é linear

na faixa de 100 Hz a 550 Hz. Dessa forma, o uso deste injetor não implicou em grandes variações na produção das gotas de etanol nos caso estudados.

$$f_i = \frac{n_{rpm}}{60} n_{ic} \quad (5.1)$$

Figura 5.1 – Caracterização dos parâmetros de injeção (frequência e *Duty Cycle*) que sustentam o processo de combustão nas chamas de etanol (região cinza).

A figura 5.2 apresenta a vazão média de combustível para os parâmetros de fronteira (losangos brancos) da figura 5.1. Verifica-se que a vazão mínima de combustível injetado permanece constante até 300 Hz e aumenta para maiores frequências de injeção.

Na figura 5.2 os símbolos quadrado, círculo e triângulo representam, respectivamente, os casos com frequências de injeção de 100 Hz (ESF100), 250 Hz (ESF250) e 400 Hz (ESF400) para vazão média de combustível de $438,3 \pm 6,5$ mg/s. A tabela 5.1 apresenta os tempos de injeção e a respectiva massa de combustível nebulizada por evento de injeção. Nesta tabela, a massa de combustível injetada por ciclo diminui com o aumento da frequência de injeção devido à restrição da vazão média de combustível ser constante. Entretanto, o número de eventos de injeção aumenta proporcionalmente à frequência de injeção.

A figura 5.3 apresenta imagens instantâneas das chamas para os casos ESF100, ESF250 e ESF400. Já a figura 5.4 mostra a média temporal da luminescência química

Figura 5.2 – Vazão média de combustível necessária para a manutenção de chamas estáveis em função do tempo de injeção por ciclo. Os casos analisados em detalhes são ESF100 (quadrado), ESF250 (círculo) e ESF400 (triângulo).

Tabela 5.1 – Tempos de injeção e quantidade de combustível injetado por ciclo para os casos analisados

Caso	Período do ciclo de injeção (ms)	Tempo de abertura do injetor por ciclo (ms)	Massa de combustível injetada por ciclo (mg)
ESF100	10,0	2,90	4,38
ESF250	4,0	1,68	1,73
ESF400	2,5	1,47	1,09

espontânea destas chamas. Nesta figura, o limiar de intensidade luminosa foi mantido constante nos três casos, permitindo a comparação direta entre as chamas. Formatos diferentes, provocados apenas pela variação dos parâmetros de injeção de combustível, são observados para as chamas estudadas. Visualmente, a chama ESF100 (figuras 5.3a e 5.4a) apresenta formato mais alongado e estreito, com diâmetro médio próximo ao diâmetro do injetor de combustível. Já as chamas ESF250 (figuras 5.3b e 5.4b) e ESF400 (figuras 5.3c e 5.4c), apresentam formato mais curto e largo, com diâmetro máximo próximo ao diâmetro externo do *swirler*. Para a chama ESF400 é possível identificar uma região próxima ao queimador que não apresenta luminescência química espontânea, sugerindo o

comportamento de uma chama suspensa ou *lifted flame*.

Figura 5.3 – Imagens instantâneas da luminescência química espontânea dos casos estudados: a) ESF100; b) ESF250 e c) ESF400.

Estes casos (ESF100, ESF250 e ESF400) foram selecionados para estudo detalhado, pois observa-se que a frequência de injeção leva a comportamentos diferentes tanto da luminescência química espontânea emitida pelas chamas (figura 5.3) quanto no aspecto de estabilidade do processo de combustão, em que a chama ESF100 indica maior estabilidade comparada à chama ESF400.

Figura 5.4 – Imagens médias da luminescência química espontânea dos casos estudados: a) ESF100; b) ESF250 e c) ESF400.

5.2 Análise das chamas selecionadas

5.2.1 Evolução espacial do spray

A figura 5.5 apresenta o espalhamento Mie das gotas de etanol para os casos selecionados (ESF100, ESF250 e ESF400) na região próxima à saída do queimador. Nestas figuras, os instantes $t=0,5$ ms, $t=1,0$ ms, $t=1,5$ ms e $t=2,0$ ms foram escolhidos de forma a manter o mesmo intervalo de tempo a partir do início de injeção ($t=0$ ms), independentemente da frequência utilizada no injetor. O período escolhido permite observar a evolução espacial do spray de etanol imerso em um ambiente reativo ao longo de um único evento de injeção. O limiar na intensidade do sinal de espalhamento Mie foi mantido constante entre os casos, permitindo identificar diretamente a região com maior número de gotas.

Apesar da figura 5.5 não permitir observar gotas individuais, devido à baixa resolução espacial da câmera utilizada, é possível identificar a evolução do movimento de aglomerados de gotas. No caso ESF100 (figura 5.5a) é visualizada uma grande região de gotas aglomeradas ao longo da linha de centro, a qual persiste até o instante $t=1,5$ ms

Figura 5.5 – Evolução temporal da posição dos aglomerados de gota para os casos: a) ESF100, b) ESF250 e c) ESF400.

sem sofrer influência significativa do escoamento de ar.

Para os casos ESF250 (figura 5.5b) ESF400 (figura 5.5c), observa-se uma maior dispersão dos aglomerados visíveis de gotas. Esse movimento das gotas permite uma maior interação com o escoamento de ar, identificada pela maior quantidade de gotas na região perimetral do spray devido à interação com a região de recirculação no centro do escoamento.

A evolução temporal da área ocupada pelo spray nos casos da figura 5.5 é apresentada na figura 5.6. Nessa figura, são relacionados diversos eventos de injeção para os casos analisados, dentro de um período de 70 ms. Observa-se que o caso ESF100 apresenta os maiores valores de área ocupada por gotas ao longo do processo de injeção, porém o período em que existem gotas na região analisada é limitado a 50% do ciclo de

injeção. Essa grande variação na densidade do spray não ocorre para o caso ESF400, no qual a área ocupada é aproximadamente constante ao longo do tempo. O caso ESF250 apresenta comportamento intermediário entre os outros dois, pois a densidade do spray pode ser associada diretamente com a quantidade de massa de combustível injetada por ciclo (tabela 5.1).

Figura 5.6 – Evolução temporal da área ocupada pelo spray nas imagens de uma seção diametral do queimador.

5.2.2 Caracterização do spray

A densidade do spray influencia diretamente o comportamento das chamas, porém as figuras 5.5 e 5.4 não permitem identificar detalhes da estrutura interna do spray, como a distribuição de diâmetros e velocidades das gotas. Essas informações são obtidas com a técnica PDI para as posições indicadas na figura 5.7, em que os círculos, triângulos e estrelas representam as posições axiais de $z/R_s = 0,1$, $z/R_s = 0,6$ e $z/R_s = 1,1$, respectivamente. Nessas posições, foram analisados os pontos radiais indicados pela tabela 5.2 em

um plano diametral do queimador.

Figura 5.7 – Imagens médias da luminescência química sobreposta aos símbolos que representam as posições analisadas com o sistema PDI nos planos $z/R_s = 0,1$ (círculos), $z/R_s = 0,6$ (triângulos) e $z/R_s = 1,1$ (estrelas) para os casos: a) ESF100; b) ESF250 e c) ESF400.

Tabela 5.2 – Posições de medição da distribuição de diâmetros e velocidades das gotas

Símbolo	Posição longitudinal (z/R_s)	Posição radial (r/R_s)		Incremento radial
		Inicial	Final	
Círculos	0,1	0,0	0,25	0,05
Triângulos	0,6	0,0	0,5	0,1
Estrelas	1,1	0,0	0,5	0,1

As figuras 5.8 a 5.13 apresentam a função densidade de probabilidade (PDF) dos diâmetros e das velocidades axiais das gotas de combustível nas posições da tabela 5.2. As PDFs foram obtidas com base em 20.000 gotas individuais medidas com o método PDI ao longo de múltiplos ciclos de injeção.

No plano de injeção (figura 5.8), as PDFs apresentam comportamento semelhante entre os casos analisados ao redor da linha de centro do queimador com pequenas dife-

Figura 5.8 – Função densidade de probabilidade do diâmetro das gotas de etanol no plano de injeção do queimador ($z/R_s = 0,1$) para posições radiais r/R_s : a) 0,0; b) 0,05; c) 0,10; d) 0,15; e) 0,20 e f) 0,25.

renças na região da borda do spray. O caso ESF100 apresenta aumento na densidade de probabilidade de se encontrarem gotas com maiores diâmetros ($60 \mu\text{m}$ a $100 \mu\text{m}$) além de uma transição significativa dos máximos das funções entre a linha de centro ($10 \mu\text{m}$ na figura 5.8a) e a borda do spray ($25 \mu\text{m}$ na figura 5.8f). O caso ESF400 apresenta uma PDF centrada em $10 \mu\text{m}$ para todas as posições radiais neste plano. Como esperado, o

Figura 5.9 – Função densidade de probabilidade do diâmetro das gotas de etanol no plano de injeção do queimador ($z/R_s = 0,6$) para posições radiais r/R_s : a) 0,0; b) 0,1; c) 0,2; d) 0,3; e) 0,4 e f) 0,5.

caso ESF250 apresenta comportamento intermediário entre os casos ESF100 e ESF400 e, conseqüentemente, aspectos deste caso serão discutidos apenas quando apresentarem diferenças significativas quando comparado aos outros casos.

Ainda no plano de injeção, a figura 5.11 indica que o caso ESF100 apresenta componente axial da velocidade (longitudinal) das gotas com máximos em 2,0 m/s e 7,5

Figura 5.10 – Função densidade de probabilidade do diâmetro das gotas de etanol no plano de injeção do queimador ($z/R_s = 1,1$) para posições radiais r/R_s : a) 0,0; b) 0,1; c) 0,2; d) 0,3; e) 0,4 e f) 0,5.

m/s na linha de centro (figura 5.11a) e transiciona para uma função centrada em 8,0 m/s (figura 5.11f). Já o caso ESF400 apresenta uma função centrada em valores na faixa entre 2,5 m/s a 5,0 m/s, variando em função da posição radial. Essas PDFs de velocidade indicam que o spray do caso ESF100 apresenta, de forma consistente, gotas com maior componente axial da velocidade na comparação com o caso ESF400. Também é observada uma baixa quantidade de gotas com velocidade negativa em todos os casos, indicando que

Figura 5.11 – Função densidade de probabilidade da componente axial da velocidade das gotas de etanol no plano de injeção do queimador ($z/R_s = 0,1$) para posições radiais r/R_s : a) 0,0; b) 0,05; c) 0,10; d) 0,15; e) 0,20 e f) 0,25.

a maioria das gotas apresenta movimento de afastamento do injetor.

Nos planos a jusante do queimador (figura 5.9 para $z/R_s = 0,6$ e figura 5.10 para $z/R_s = 1,1$), o caso ESF100 apresenta distribuições similares entre as posições radiais. Porém, ocorre a transição entre os máximos das funções PDF de diâmetro, de $12\ \mu\text{m}$ na linha de centro (figuras 5.9a e 5.10a) para $35\ \mu\text{m}$ na borda do spray (figuras 5.9f e

Figura 5.12 – Função densidade de probabilidade da componente axial da velocidade das gotas de etanol no plano de injeção do queimador ($z/R_s = 0,6$) para posições radiais r/R_s : a) 0,0; b) 0,1; c) 0,2; d) 0,3; e) 0,4 e f) 0,5.

5.10f). Adicionalmente, não são observadas variações significativas das PDFs de diâmetro ao longo da linha de centro (figuras 5.8a, 5.9a e 5.10a), ou seja, o formato das funções é mono-modal e está centrado entre 10 μm e 12 μm nessas posições. Dessa forma, o spray formado no caso ESF100 conserva grande parte de suas características ao longo da linha de centro.

Figura 5.13 – Função densidade de probabilidade da componente axial da velocidade das gotas de etanol no plano de injeção do queimador ($z/R_s = 1, 1$) para posições radiais r/R_s : a) 0,0; b) 0,1; c) 0,2; d) 0,3; e) 0,4 e f) 0,5.

As figuras 5.9 e 5.10 mostram que o caso ESF400 apresenta funções PDF com formato mono-modal centrado em $35 \mu\text{m}$ (plano $z/R_s = 0, 6$) e $45 \mu\text{m}$ (plano $z/R_s = 1, 1$) em todas as posições radiais analisadas, exceto na linha de centro (figuras 5.9a e 5.10a). Na linha de centro são observadas PDFs com formato bi-modal, o que indica probabilidades significativas de se encontrarem gotas com diâmetros pequenos ($d_d < 100 \mu\text{m}$) e grandes ($d_d > 100 \mu\text{m}$). A mudança no modo da PDF sugere a transição de uma função mono-

modal centrada em $10 \mu\text{m}$ no plano $z/R_s = 0, 1$ para uma bi-modal com picos em $45 \mu\text{m}$ e $150 \mu\text{m}$ no plano $z/R_s = 1, 1$.

O caso ESF250 apresenta comportamento semelhante ao ESF400 na transição das PDFs de diâmetro, sugerindo que as elevadas frequências de injeção antecipam a transição entre os modos das funções PDF.

As figuras 5.12 e 5.13 apresentam PDFs com formato mono-modal ou com tendência bi-modal (figuras 5.13a e 5.13b) centradas em $7,5 \text{ m/s}$ para o caso ESF100. Já para o caso ESF400, as figuras 5.12a, 5.12b e 5.13a indicam funções bi-modais com máximos centrados em $-2,5 \text{ m/s}$ e $5,0 \text{ m/s}$. A velocidade negativa indica um possível efeito do escoamento recirculante na dinâmica das gotas, induzindo um movimento em direção à saída do queimador. Já o máximo da função PDF ao redor de $5,0 \text{ m/s}$ é uma característica de formação de gotas do injetor, também observada no plano de injeção (figura 5.11).

Para todos os casos, observa-se um aumento na dispersão nas PDFs de velocidade com o aumento da distância radial em relação à linha de centro. Esse aumento ocorre devido à influência do escoamento sobre a velocidade das gotas, o que produz um amplo espectro para a componente axial da velocidade. Na região da borda do *swirler* ($r/R_s > 0,4$), observa-se uma maior influência do escoamento de ar sobre a dinâmica das gotas, independentemente da frequência de injeção, pois todos os casos apresentam distribuições PDF semelhantes para a componente axial da velocidade (longitudinal) das gotas.

A correlação entre o diâmetro e a velocidade (CDV) das gotas na linha de centro para os casos analisados é apresentada na figura 5.14 para o plano de injeção ($z/R_s = 0, 1$) e na figura 5.15 para um plano a jusante do queimador ($z/R_s = 1, 1$).

No plano de injeção (figura 5.14), o caso com spray de maior densidade (ESF100) apresenta gotas com diâmetros pequenos ($d_d < 20 \mu\text{m}$) e componente axial da velocidade na faixa entre $15,2 \text{ m/s}$ e $20,5 \text{ m/s}$, além de uma maior dispersão para gotas grandes ($d_d > 100 \mu\text{m}$) na faixa de velocidades entre $7,5 \text{ m/s}$ e $17,5 \text{ m/s}$. Para o caso de menor densidade (ESF400), observa-se um padrão de gotas com diâmetros intermediários (entre $d_d > 20 \mu\text{m}$ e $d_d < 75 \mu\text{m}$) e alta velocidade (entre $12,5 \text{ m/s}$ e 25 m/s), além da ausência tanto de gotas pequenas ($d_d < 10 \mu\text{m}$) quanto de gotas grandes ($d_d > 100 \mu\text{m}$) com velocidades acima de $10,0 \text{ m/s}$.

No plano a jusante do queimador (figura 5.15), apesar do caso ESF100 apresentar uma redução no número de gotas com menor diâmetro ($d_d < 60 \mu\text{m}$) e alta velocidade ($V_d > 16 \text{ m/s}$), o formato da CDV não se altera significativamente durante a evolução do spray na linha de centro. Tanto a similaridade no formato das CDVs entre os planos $z/R_s = 0,1$ e $z/R_s = 1,1$ quanto a observação de que apenas gotas com diâmetros inferiores a $15 \mu\text{m}$ apresentam componente axial negativa para a velocidade no plano $z/R_s = 1,1$ (figura 5.15a), sugerem reduzida influência da zona de recirculação do escoamento de ar na dinâmica das gotas durante os eventos de injeção.

Os casos ESF250 e ESF400 apresentam uma maior quantidade de gotas com componente axial negativa da velocidade no plano $z/R_s = 1,1$ (figuras 5.15b e 5.15c). Como o injetor produz gotas com componente axial positiva da velocidade, devido à diferença de pressão no bico de injeção, a grande quantidade de gotas com velocidade negativa indica uma influência significativa do escoamento da região de recirculação sobre a dinâmica das gotas. Essa influência do escoamento acoplado à baixa densidade do spray promovem uma maior dispersão das gotas.

A figura 5.15c indica que o formato bi-modal do caso ESF400 (5.10a) é formado por dois mecanismos: gotas residuais produzidas durante o evento de injeção e gotas carregadas pelo escoamento. As gotas residuais são identificadas na figura 5.15c pelas gotas com diâmetro na faixa entre $30 \mu\text{m}$ e $60 \mu\text{m}$ com velocidades entre $7,5 \text{ m/s}$ e 20 m/s . Essas gotas são produzidas durante o evento de injeção e, devido à alta componente axial da velocidade, atravessam as regiões de recirculação e de combustão sem apresentar redução significativa de diâmetros e da componente axial da velocidade.

Já o mecanismo de gotas carregadas pelo escoamento é caracterizado pela influência significativa do escoamento de ar da zona de recirculação sobre a dinâmica das gotas. Essa influência aumenta a dispersão e reduz a componente axial da velocidade das gotas, como pode ser identificado na figura 5.15c para as gotas grandes ($d_d > 80 \mu\text{m}$).

Figura 5.14 – Correlação entre diâmetro e componente axial da velocidade das gotas de etanol na linha de centro do queimador no plano $z/R_s = 0,1$ para os casos: a) ESF100; b) ESF250 e c) ESF400.

Figura 5.15 – Correlação entre diâmetro e componente axial da velocidade das gotas de etanol na linha de centro do queimador no plano $z/R_s = 1,1$ para os casos: a) ESF100; b) ESF250 e c) ESF400.

5.2.3 Região de reação das chamas

As figuras 5.16 a 5.21 apresentam a sequência de imagens do radical OH durante um período de 10,34 ms para os casos estudados. Essas figuras foram divididas em dois períodos: de 0 a 5,06 ms e de 5,28 a 10,34 ms, de forma que as figuras 5.16 e 5.17 apresentam o radical OH para o caso ESF100, as figuras 5.18 e 5.19 para o caso ESF250 e as figuras 5.20 e 5.21 para o caso ESF400. No período total de 10,34 ms, é possível acompanhar a evolução da região com presença de OH durante um evento de injeção para o caso ESF100 e múltiplos eventos de injeção para os casos ESF250 e ESF400. Devido à baixa energia por pulso do feixe laser, é possível visualizar tanto a emissão induzida pelo radical OH produzido pelo processo de combustão quanto à fluorescência das moléculas de etanol nas gotas de combustível.

Para o caso ESF100, como indicado pela tabela 5.1, o evento de injeção de combustível ocorre durante o período de 0 ms a 2,9 ms da figura 5.16. Como no caso do espalhamento Mie, a baixa resolução da câmera permite identificar somente aglomerados de gotas, localizados ao longo do centro das imagens. Entretanto, é possível visualizar a interação entre as gotas injetadas e o radical OH, como mostrado no período de 1,54 ms a 2,86, em que um aglomerado de gotas passa através de uma região com radical OH, induzindo a extinção local do processo de combustão nessa região seja pela evaporação de combustível em excesso ou pela deformação do campo de velocidades. Adicionalmente, a região com radical OH ao longo do período de 3,96 ms a 8,58 ms não exibe grandes distorções, apresentando uma região simétrica e estável. Essa simetria sugere a existência de distribuição homogênea de combustível evaporado, associada ao processo de mistura provocado pelo movimento do escoamento recirculante, isto é, após a passagem das gotas, a região de recirculação é restabelecida trazendo combustível evaporado para o centro da chama e redistribuindo-o ao longo da região de cisalhamento do escoamento. Esse processo é visualizado na região demarcada pelos círculos vermelhos na figura 5.17 durante o período de 8,36 ms a 10,34 ms, em que se observa a deformação do perfil de OH nos instantes que antecedem um novo evento de injeção.

O caso ESF250 possui período de injeção de 1,67 ms (tabela 5.1), permitindo que até três eventos de injeção sejam observados ao longo das figuras 5.18 e 5.19. Esses

eventos são visualizados nos períodos de 0 ms a 1,54 ms, 4,18 ms a 5,72 ms e 8,36 ms a 9,90 ms. Nestas figuras, a região com radical OH apresenta formato em “V”, com maior diâmetro na parte superior devido à maior interação das gotas com o movimento do escoamento recirculante, favorecendo o movimento radial (para fora da linha de centro do queimador) das gotas de combustível. Ao longo do período escolhido, não se observa uma interação significativa entre as gotas e a região com presença de OH. Entretanto, nas regiões demarcadas com círculos vermelhos na figura 5.19 entre os instantes 6,60 ms e 7,92 ms, é possível visualizar a extinção local da existência de OH devido à possível passagem de uma estrutura coerente (vórtice) do escoamento de ar nesta região.

A chama ESF400 apresenta até quatro eventos de injeção ao longo das figuras 5.20 e 5.21. Devido à maior frequência de injeção, a identificação dos períodos de injeção fica prejudicada. A dificuldade de ser observar os eventos de injeção independentes nesse caso foi prevista na figura 5.6, pois a área ocupada pelas gotas não apresenta variações significativas durante os eventos de injeção. Assim como no caso ESF250, a maior interação das gotas com o escoamento de ar promove um formato em “V” para o perfil de OH. Adicionalmente, o círculo vermelho no instante 1,32 ms da figura 5.20 indica uma região com extinção persistente ao longo do período de 0 ms a 5,06 ms. Já na figura 5.21, o círculo vermelho no instante 8,36 ms indica que a região com extinção persistente oscila entre os lados da chama durante o período de 8,36 ms a 10,34 ms.

A figura 5.22 apresenta a região média com presença do radical OH (região colorida) sobreposta ao formato médio visível das chamas analisadas (figura 5.4). Nesta figura, é possível constatar que todas as chamas apresentaram perfil médio de OH ao longo de toda a região analisada. Na parte superior dos perfis médios é observada uma maior dispersão na existência de OH associada à pulsação provocada pela injeção do spray. Essa dispersão produz maior variância no sinal de fluorescência, a qual é amplificada para baixas frequências de injeção, como pode ser visto para a chama ESF100 (figura 5.4a).

As figuras 5.22a e 5.22b indicam que os casos ESF100 e ESF250 apresentam produção de OH no contorno externo da chama visível e ocorrem desde a base da chama. Essa configuração é também observada nas imagens instantâneas das figuras 5.16 a 5.19.

Já a região média com presença do radical OH na chama ESF400 (figura 5.22c)

indica que existe radical OH mesmo na região em que não há luminescência química espontânea, próximo à saída do queimador. Observando-se as figuras 5.20 e 5.21, verifica-se que este caso apresenta intermitência do radical OH na região da base da chama, isto é, do instante 0 ms até 5,06 ms, o perfil de OH do "lado esquerdo" apresenta maior comprimento que o perfil do "lado direito" na região próxima ao queimador, como indicado pelo círculo vermelho no instante 1,32 ms (figura 5.20). Essa tendência é invertida durante os instantes de 7,6 ms a 10,34 ms, em que o perfil de OH do "lado direito" apresenta maior comprimento que o perfil do "lado esquerdo", como indicado pelo círculo vermelho no instante 8,36 ms (figura 5.21).

Ao se analisar a região com radical OH ao longo de um período maior, a figura 5.23 é obtida. Essa figura permite a visualização da evolução temporal da região de produção de OH para instantes sequenciais com maior intervalo de tempo entre as imagens. Partindo-se da figura 5.23a, observa-se um perfil de OH com comprimento similar em ambos os lados da chama, porém ausente na região próxima ao queimador. Essa condição evolui para a figura 5.23b, em que a extinção local ocorre no "lado direito" da chama, enquanto que o "lado esquerdo" apresenta um perfil de OH que "busca chegar" ao plano de injeção. A figura 5.23c indica que, após a extinção local do "lado direito" da chama, ambos os lados apresentam radical OH novamente. Entretanto, essa condição evolui para a figura 5.23d, em que o "lado esquerdo" apresenta extinção local enquanto que o "lado direito" apresenta produção de OH até a saída do queimador. Logo, é possível observar um ciclo de oscilação do radical OH em ambos os "lados" da chama.

De modo a quantificar essa frequência de oscilação do radical OH, uma região do "lado direito" da figura 5.23a foi observada ao longo do tempo, produzindo o sinal de intensidade da figura 5.24. Este sinal apresenta formato semelhante a uma senóide, o que indica a existência do radical OH de forma periódica ao longo do tempo. A densidade espectral de potência deste sinal (figura 5.25) mostra que os processos de extinção/ignição local ocorrem a uma frequência próxima de 10 Hz. Não são observados máximos isolados ou harmônicos na frequência de 400 Hz, o que indica que o processo de produção/extinção periódica não apresenta correlação direta com os eventos de injeção de combustível. Portanto, essa produção/extinção periódica de OH está possivelmente associada a outros fatores, como às estruturas coerentes presentes no escoamento de ar.

Figura 5.16 – Imagens instantâneas da fluorescência induzida do radical OH na região próxima à saída do queimador para o intervalo de 0 ms a 5,06 ms da chama ESF100.

Figura 5.17 – Imagens instantâneas da fluorescência induzida do radical OH na região próxima à saída do queimador para o intervalo de 5,28 ms a 10,34 ms da chama ESF100. Os círculos em vermelho indicam a distorção na região de produção de OH devido à recomposição do escoamento de recirculação durante o período que antecede a injeção de combustível.

Figura 5.18 – Imagens instantâneas da fluorescência induzida do radical OH na região próxima à saída do queimador para o intervalo de 0 ms a 5,06 ms da chama ESF250.

Figura 5.19 – Imagens instantâneas da fluorescência induzida do radical OH na região próxima à saída do queimador para o intervalo de 5,28 ms a 10,34 ms da chama ESF250. Os círculos vermelhos indicam a evolução da interação entre uma possível estrutura coerente do escoamento e a região de produção de OH, de forma que a deformação do escoamento nesta região induz à extinção local da chama.

Figura 5.20 – Imagens instantâneas da fluorescência induzida do radical OH na região próxima à saída do queimador para o intervalo de 0 ms a 5,06 ms da chama ESF400. O círculo vermelho indica a região de extinção do perfil de OH, a qual ocorre de forma periódica.

Figura 5.21 – Imagens instantâneas da fluorescência induzida do radical OH na região próxima à saída do queimador para o intervalo de 5,28 ms a 10,34 ms da chama ESF400. O círculo vermelho indica a região de extinção do perfil de OH, a qual ocorre de forma periódica.

Figura 5.22 – Imagens do formato médio das chamas e da região média de produção do radical OH (região colorida) para as chamas: a) ESF100; b) ESF250 e c) ESF400.

Figura 5.23 – Imagens instantâneas da fluorescência do radical OH para o caso ESF400 em instantes que representam um ciclo com frequência aproximada de produção/extinção de OH de 10 Hz na região próxima à saída do queimador. O sinal analisado para determinação da frequência de produção/extinção de OH foi obtido na região do círculo preto.

Figura 5.24 – Sinal de intensidade luminosa obtido na região intermitente de produção do radical OH (círculo preto na figura 5.23) da chama ESF400.

Figura 5.25 – Espectro de frequências do sinal de intensidade luminosa na região de produção intermitente de OH da chama ESF400. Figura menor indica o detalhe do espectro para a faixa de frequência de 0Hz a 50Hz.

5.2.4 Escoamento de ar na região de injeção

O escoamento resultante da passagem de ar pelo *swirler* foi medido pela técnica PIV em experimentos independentes com duas taxas de aquisição: 7 Hz e 2.000 Hz. As análises com a taxa de 7 Hz foram realizadas em modo estereoscópico para planos transversais ao queimador. A figura 5.26 apresenta algumas posições dos planos analisados. Os planos A e D estão localizados, respectivamente, no centro ($r/R_s = 0,0$) e na borda ($r/R_s = 2,0$) do queimador. Os planos B e C estão localizados nas posições $r/R_s = 0,25$ e $r/R_s = 1,0$, respectivamente. No total foram feitas medições em 38 planos transversais espaçados a cada 2 mm. Na região central, 3 planos foram espaçados em 1 mm para permitir melhor medição das velocidades próximo ao centro do queimador. As medições dos campos de velocidades nesses planos permitiu a reconstrução tridimensional do escoamento, como será discutido abaixo. A figura 5.27 apresenta o contorno do módulo da velocidade média no plano diametral A.

A assimetria do escoamento médio no plano diametral (Plano A) é associada ao não alinhamento deste plano com aletas do *swirler*. A figura 5.28 apresenta detalhe da região próxima ao queimador com os vetores de velocidade no Plano A. Nesta figura é possível identificar duas estruturas coerentes toroidais formadas pela recirculação do escoamento na base do queimador. Essas estruturas são responsáveis pelo estreitamento da região de recirculação, como visto na figura 5.29, a qual apresenta a reconstrução tridimensional do escoamento de ar com os 38 planos analisados. Tal reconstrução é possível, pois as velocidades médias do escoamento apresentarem correlação espacial, uma vez que os planos não foram analisados simultaneamente. A figura 5.29 indica superfícies de mesma componente axial da velocidade do escoamento de ar: superfície vermelha na base do queimador indica a velocidade de 7,5 m/s, superfície externa verde representa a velocidade de 5,5 m/s e a superfície interna azul no centro do escoamento indica a velocidade de -0,2 m/s.

A superfície de alta velocidade (superfície avermelhada) mostra o efeito do número finito de aletas do *swirler* sobre o escoamento de ar, isto é, são formadas 10 estruturas independentes de alta componente axial da velocidade na base do queimador devido à passagem de ar pelas 10 aletas do *swirler*. A superfície azulada no centro da figura 5.29

Figura 5.26 – Posição de alguns dos planos transversais ao queimador, analisados pela técnica PIV: Plano A - $r/R_s = 0,0$; Plano B - $r/R_s = 0,25$; Plano C - $r/R_s = 1,0$ e Plano D - $r/R_s = 2,0$.

indica a região de recirculação de ar produzida pelo movimento helicoidal do escoamento. Essa região apresenta componente axial negativa de velocidade, o que possibilita trazer gases quentes do processo de combustão a jusante para o plano de injeção do queimador. Nas chamas analisadas, os gases quentes recirculantes podem auxiliar na evaporação do spray de etanol, fornecendo energia para a sustentação do processo de combustão.

As figuras 5.30 e 5.31 apresentam, respectivamente, o módulo da velocidade média e a média da componente axial da velocidade do escoamento de ar nos planos z/R_s : a) 0,24; b) 0,5; c) 1,0; d) 1,5; e) 2,00 e f) 2,5. Essas figuras são paralelas ao plano de injeção e são obtidas pela reconstrução tridimensional do escoamento médio.

Figura 5.27 – Magnitude da velocidade média do escoamento no plano diametral do queimador (Plano A).

As 10 regiões com alta velocidade na figura 5.30a indicam, como visto na figura 5.29, o número finito de aletas do *swirler*. Devido ao processo de mistura do ar e a natureza helicoidal do escoamento produzido pelo *swirler*, esses gradientes na velocidade afetam apenas a região próxima à saída do queimador ($z/R_s < 1,0$), se dissipando ao longo do escoamento ($z/R_s > 1,0$). Nas figuras 5.31b e 5.31c a região de recirculação no centro do escoamento é identificada pelas velocidades inferiores a -1.0 m/s. Nesta região, o escoamento flui em direção ao plano de injeção do queimador e apresenta maior intensidade entre os planos $z/R_s = 0,5$ (figura 5.31b) e $z/R_s = 1,0$ (figura 5.31c).

Os perfis das componentes axial e tangencial da velocidade no plano diametral ao longo da direção radial são apresentados pelas figuras 5.32 e 5.33, respectivamente. A figura 5.32 apresenta velocidades axiais negativas na região central do escoamento. A mínima componente axial da velocidade (-2,0 m/s) ocorre no centro do escoamento para o plano $z/R_s = 0,5$ (figura 5.32b). As máximas velocidades axiais (de 4,5 a 7,5 m/s

Figura 5.28 – Vetores de velocidade média sobrepostos ao contorno da componente axial da velocidade no detalhe da região próxima ao queimador no Plano A, obtidos com técnica SPIV para o escoamento de ar sem reação de combustão.

na figura 5.32) e tangenciais (de -6,0 a 6,0 m/s na figura 5.33) ocorrem na região entre $r/R_s = 0,6$ e $0,8$ ao longo das posições z/R_s analisadas.

Novamente, devido ao não alinhamento do plano analisado com as aletas do *swirler*, são visualizadas assimetrias nos perfis de velocidade das figuras 5.32 e 5.33.

A técnica PIV com alta taxa de aquisição (TR-PIV-2D) permite rastrear estruturas coerentes presentes no escoamento de ar e que podem influenciar diretamente o comportamento das chamas. Esta técnica foi aplicada para se determinar quais estruturas coerentes poderiam levar à instabilidade do processo de combustão intermitente observado na figura 5.23. Dessa forma, apenas o plano posicionado em $z/R_s = 0,5$ e paralelo à saída do queimador foi analisado. O período total de análise foi de 1.500 ms, o que produziu 3.000 imagens do escoamento a uma taxa de 2.000 Hz. Somente as componentes

Figura 5.29 – Reconstrução tridimensional do campo de velocidades médias obtidos com a técnica SPIV para 38 planos transversais ao queimador. As superfícies indicam mesma velocidade do escoamento de ar (avermelhado: 7,5 m/s; esverdeado: 4,0 m/s e azulado: -0,2 m/s) nas vistas: a) lateral e b) superior.

da velocidade paralelas ao plano foram medidas. A figura 5.34 apresenta os vetores da velocidade média sobrepostos ao contorno do módulo da velocidade.

Figura 5.30 – Contornos do módulo da velocidade do escoamento de ar nos planos z/R_s : a) 0,24; b) 0,5; c) 1,0; d) 1,5; e) 2,0 e f) 2,5. Reconstrução tridimensional das análises feitas com a técnica SPIV para o escoamento de ar sem reação de combustão.

A figura 5.35 apresenta a aplicação da FFT no sinal do módulo de velocidade para se obter a densidade espectral de potência (PSD). Nesta figura são identificados máximos em diversas frequências, incluindo possíveis harmônicos (máximos múltiplos de uma frequência fundamental) que representam a formação de estruturas coerentes no escoamento. No detalhe da figura 5.35, para as frequências de até 60 Hz, ocorrem máximos ao redor das frequências de 10 Hz e 40 Hz. O máximo ao redor de 40 Hz representa a frequência fundamental de alguns máximos harmônicos e é associado ao tempo que uma partícula suspensa no escoamento leva para percorrer o perímetro do escoamento, isto é, para uma partícula com velocidade tangencial de 5,2 m/s na posição $r/R_s = 1,0$ (figura 5.33b) o tempo para percorrer o perímetro do *swirler* é de $t_s = 2\pi 20 / 5.200 = 0,024$ s ou 41,7 Hz.

O máximo ao redor da frequência de 10 Hz indica a existência de uma estrutura coerente com alta energia e de baixa frequência, produzida a cada 0,1 s. Para identificar qual é essa estrutura coerente, a técnica POD ou decomposição ortogonal dos vetores

Figura 5.31 – Contornos da componente axial da velocidade média do escoamento de ar nos planos z/R_s : a) 0,24; b) 0,5; c) 1,0; d) 1,5; e) 2,00 e f) 2,5. Reconstrução tridimensional das análises feitas com a técnica SPIV para o escoamento de ar sem reação de combustão.

do campo de velocidade foi utilizada. Esta técnica permite calcular a parcela de energia contida nas estruturas coerentes (modos) do escoamento. Os modos podem representar uma ou mais estruturas coerentes. A figura 5.36 apresenta a fração de energia acumulada associada aos modos do escoamento no plano analisado. Nessa figura, 50% da energia do escoamento está contida em apenas 60 modos, de um total de 3000 modos.

A aplicação da FFT nos coeficientes da POD desses 60 modos de maior energia, permite identificar quais modos apresentam maiores densidades espectrais de potência para a frequência de 10 Hz. As PSDs dos modos excitados à 10 Hz são apresentadas na figura 5.37. Adicionalmente, na figura 5.37a, é identificado o modo com a frequência fundamental de 40 Hz (modo 2). A projeção do modo 2 no campo de velocidades (figura 5.38) indica claramente o movimento tangencial médio produzido no escoamento de ar pelo *swirler*. Na figura 5.38 as linhas de corrente apenas indicam o fluxo de ar associado às estruturas coerentes do escoamento.

Figura 5.32 – Componente axial da velocidade, obtida com a técnica SPIV, nas posições z/R_s : a) 0,24; b) 0,5; c) 1,0; d) 1,5; e) 2,0 e f) 2,5.

A projeção temporal conjugada dos modos 9, 10, 20, 21 e 30 sobre o campo de velocidades é apresentada pela figura 5.39, para os instantes $t=0,0$ s, $t=0,049$ s, $t=0,10$ s e $t=0,151$ s. Nas figuras 5.39a e 5.39c, é possível observar estruturas coerentes similares, as quais ocorrem à cada 0,10 s ou 10 Hz. Essas estruturas similares são identificadas no centro e na lateral do escoamento. Devido ao formato e a periodicidade dessas estruturas, estas podem ser associadas ao PVC (estrutura central) e ao VOSL (estrutura lateral) presentes

Figura 5.33 – Velocidade tangencial diametral, obtida com a técnica SPIV, nas posições z/R_s : a) 0,24; b) 0,5; c) 1,0; d) 1,5; e) 2,0 e f) 2,5.

em um escoamento helicoidal com alto número de *Swirl*. Igualmente à figura 5.38, as linhas de corrente na figura 5.39 apenas indicam o fluxo de ar associado às estruturas coerentes de maior energia projetadas no campo de velocidades.

Figura 5.34 – Vetores de velocidade média sobrepostos ao contorno do módulo das velocidades paralelas ao plano de medição em $z/R_s = 0,5$. Análise feita com a técnica TR-PIV para o escoamento de ar sem reação de combustão.

Figura 5.35 – Espectro de frequências do campo de velocidades para o escoamento helicoidal sem combustão. Figura menor indica o detalhe do espectro para a faixa de frequência de 0Hz a 50Hz.

Figura 5.36 – Fração da energia acumulada para os modos do escoamento, obtidos pela técnica POD.

Figura 5.37 – Espectro de frequências com excitação ao redor de 10 Hz para os modos com energia acumulada de até 50%: a) modo 2; b) modo 9; c) modo 10; d) modo 20; e) modo 21 e f) modo 30.

Figura 5.38 – Linhas de corrente sobrepostas ao módulo do campo de velocidades obtido pela projeção do modo 2 no escoamento helicoidal.

Figura 5.39 – Linhas de corrente sobrepostas ao módulo do campo de velocidades obtido pela projeção conjugada dos modos com excitação em 10 Hz (modos 9, 10, 20, 21 e 30) no escoamento helicoidal para os instantes: a) $t=0,0$ s, b) $t=0,049$ s, c) $t=0,10$ s e d) $t=0,151$ s.

Capítulo 6

Discussão

Neste trabalho, devido a complexidade dos fenômenos envolvidos, a discussão foi dividida em três seções: análise da influência da densidade do spray sobre o escoamento de ar (seção 6.1); análise da influência do processo de combustão sobre o diâmetro das gotas (seção 6.2) e análise da influência das estruturas coerentes do escoamento de ar sobre o processo de combustão intermitente (seção 6.3).

6.1 Influência da densidade do spray no escoamento de ar

O aumento na frequência de injeção de combustível, como observado na figura 5.6, diminui a área ocupada pelas gotas na região próxima ao queimador. A variação na área ocupada indica, proporcionalmente, a variação na densidade do spray em uma dada região. Essa variação de densidade ocorre devido a diferença da quantidade de massa fornecida a cada evento de injeção para manter a vazão média de combustível constante ($438,3 \pm 6,5$ mg/s). Apesar de estar acima das frequências de operação usuais na aplicação em motores de combustão interna, o injetor opera de forma consistente e reproduzível na faixa de frequências escolhidas, pois as curvas PDF de diâmetro das gotas na região próxima ao injetor apresentam formato estreito (baixo desvio padrão) para as diferentes frequências (figura 5.8). No caso de operação não repetitiva do injetor, as curvas PDF de diâmetro

apresentariam um patamar largo, indicando maior desvio padrão e, consequentemente, maior dispersão dos diâmetros medidos.

A interação entre as gotas e o escoamento de ar pode ser analisado por meio do movimento das gotas que apresentam um baixo número de Stokes (S_t). De acordo com a equação 3.5, as gotas com diâmetro inferior a $20,0 \mu\text{m}$ apresentam número de Stokes inferior a 0,1 para as condições analisadas. Esse valor de S_t indica que o movimento dessas gotas é dominado pela dinâmica do escoamento de ar (gotas traçadoras). A componente axial da velocidade média das gotas com baixo número de Stokes é apresentada na figura reffig:res:spray:injecao para os casos ESF100 (quadrado), ESF250 (círculo) e ESF400 (triângulo) ao longo da linha de centro do queimador. Nesta figura, a velocidade média do escoamento de ar sem combustão (losangos), a qual foi obtida pela técnica SPIV, é incluída para simples comparação com as velocidades médias das gotas dos diferentes casos.

Figura 6.1 – Componente axial da velocidade média das gotas com diâmetro inferior a $20 \mu\text{m}$ ($S_t \leq 0,1$) ao longo da linha de centro do queimador, para os casos ESF100 (quadrado), ESF250 (círculo) e ESF400 (triângulo). A componente axial da velocidade média do escoamento sem combustão (losango) foi obtida com a técnica SPIV.

O caso ESF100 apresenta a maior quantidade de massa injetada em cada ciclo e, conseqüentemente, a maior densidade de spray. Essa maior densidade é observada pela aglomeração das gotas na linha de centro do queimador durante um evento de injeção (figura 5.5). A passagem desse aglomerado de gotas promove perturbações e distorções no escoamento recirculante que seria formado pelo movimento helicoidal. Com a distorção do escoamento, que pode levar até a interrupção do escoamento recirculante, o escoamento de ar nessa região não exerce influência significativa no movimento das gotas, o que é observado pela velocidade média elevada e positiva das gotas nessa região, mesmo para gotas com baixo número de Stokes (figura 6.1). Dessa forma, as gotas traçadoras indicam que não há escoamento recirculante nessa região para este caso.

Após a passagem desse aglomerado de gotas, a região com escoamento de ar com velocidade negativa pode ser recomposta, o que é observado pelo formato médio da luminescência química espontânea e pelo formato da região média de existência do radical OH (figura 5.22). Observa-se que ambos os formatos seguem o contorno da região de recirculação (figura 5.28) próxima à saída queimador. Adicionalmente, o formato curvo do perfil de OH na base da chama (figura 5.22a) está associado à existência de estruturas coerentes na saída do queimador que auxiliam na mistura ar/combustível nessa região e apresentam movimento toroidal, levando os gases do centro do queimador para fora da região da chama.

A baixa densidade do spray nos casos ESF250 e ESF400 se deve à baixa quantidade de combustível injetada por ciclo. Menores densidades permitem uma maior interação entre as gotas e o escoamento de ar na região de recirculação, em que cada gota é influenciada pelo escoamento de forma independente, pois não existe um aglomerado de gotas capaz de alterar o movimento do escoamento de ar. Nestes casos, as gotas com baixo número de Stokes apresentam componente axial da velocidade média próximas ao do escoamento sem reação de combustão para posições axiais acima 12 mm ($z/R_s \geq 0,6$). Essa similaridade indica uma grande influência do escoamento de ar sobre a dinâmica das gotas, em que a componente axial da velocidade média no plano de injeção das gotas com número de Stokes inferior a 0,1 está ao redor de 3,25 m/s e evolui para -1,8 m/s na posição $z/R_s \geq 0,6$. Essa evolução indica que a influência do escoamento de ar é forte o suficiente para inverter o movimento das gotas pequenas ($St \leq 0,1$) nessa região.

6.2 Influência do processo de combustão no diâmetro das gotas

A variação na densidade do spray provoca diferentes modos de combustão das gotas como apresentado por Chiu e Liu [6] e Chiu et al. [7]. No caso ESF100, a densidade elevada do spray pode favorecer o modo de combustão em grupo das gotas. Esse modo permite que as gotas mantenham suas características (diâmetro e velocidade) ao longo da direção longitudinal do escoamento. Os casos ESF250 e ESF400 apresentam menor densidade e, conseqüentemente, permitem maior interação com o escoamento de ar. A menor densidade de spray permite que o processo de combustão das gotas ocorra de forma individual, em que o combustível liberado por cada gota é queimado ao seu redor.

A influência do processo de combustão ao longo do eixo radial pode ser visualizada na figura 6.2. Essa figura apresenta os diâmetros para os máximos globais das funções PDFs das figuras 5.8 a 5.10 sobrepostos a região média de existência do radical OH (figura 5.22). Essas regiões médias de OH são apresentadas na figura 6.2 pelas zonas hachuradas com cores preta (ESF100), vermelha (ESF250) e verde (ESF400).

A figura 6.2 indica que, para o caso ESF100, a região com radical OH ocorre concomitantemente com um aumento na probabilidade de se encontrarem gotas de maior diâmetro medidas nos três planos analisados. Esse aumento sugere que as gotas com menor diâmetro foram consumidas ao redor na região em que ocorre o processo de combustão mais intenso.

O caso ESF250 apresenta resultados similares ao caso ESF100 para o plano $z/R_s = 0,1$ (figura 6.2a). No plano $z/R_s = 0,6$, a figura 6.2b indica que a maioria das gotas apresentam diâmetros superiores a $30 \mu\text{m}$ até a posição $r/R_s \leq 0,4$. Na posição r/R_s próximo a $0,6$ ocorre uma maior probabilidade de existirem gotas pequenas ($d_d = 22 \mu\text{m}$) que são consumidas na região de combustão, centrada em r/R_s próximo a $0,8$. No plano $z/R_s = 1,1$ (figura 6.2c), o diâmetro de máximo da função PDF é elevado e varia pouco ao passar pela região de combustão. A ausência de gotas pequenas tanto no plano $z/R_s = 1,1$ quanto na região central do plano $z/R_s = 0,6$ sugere que estas gotas são carregadas pelo escoamento recirculante para a região de cisalhamento, o que

Figura 6.2 – Sobreposição dos diâmetros dos picos nas posições radiais das funções PDF e a posição de produção do radical OH a jusante do queimador: a) $z/R_s = 0,1$; b) $z/R_s = 0,6$ e c) $z/R_s = 1,1$.

permite o aumento da probabilidade de ter gotas pequenas na região $r/R_s \leq 0,6$ do plano $z/R_s = 0,6$.

Para o caso ESF400, a figura 6.2a indica a ausência de uma região média com presença de OH, o que está possivelmente associado às gotas apresentarem um perfil sem variações significativas de diâmetro. Similar ao caso ESF250 no plano $z/R_s = 1,1$, o caso ESF400 no plano $z/R_s = 0,6$ (figura 6.2b) apresenta um perfil constante para o diâmetro de máxima probabilidade das gotas. Entretanto, devido à proximidade com o plano de injeção e à ausência de uma região média com OH em $z/R_s = 0,1$, este caso sugere que as gotas com pequenos diâmetros foram carregadas pelo escoamento recirculante para regiões a montante do plano $z/R_s = 0,6$, o que favoreceu a formação do perfil constante de diâmetros na figura 6.2a. No plano $z/R_s = 1,1$, a região de produção de OH para o caso ESF400 está além da posição radial de medição dos diâmetros das gotas, não permitindo determinar a interação entre essas duas características do sistema.

6.3 Influência de estruturas coerentes do escoamento de ar no processo de combustão intermitente

A maior frequência de injeção de combustível resultou em um spray com menor densidade (EFS400) e, devido à forte interação com o escoamento de ar, foi obtida uma chama que emite pouca ou nenhuma luminescência química espontânea na região próxima ao queimador (figuras 5.3 e 5.4). A simples observação dessas figuras sugere um comportamento similar a uma chama suspensa ou *lifted*. Entretanto, a fluorescência média do radical OH (figura 5.22) indica a existência de reação de combustão nesta região.

Com o uso do sistema com alta taxa de aquisição para medir a região com presença de OH, observa-se uma intermitência na produção deste radical. Essa intermitência apresenta uma frequência de, aproximadamente, 10,1 Hz (figura 5.23) e, ao analisar o sinal temporal e sua densidade espectral de potência (PSD), observa-se que essa frequência não possui harmônicos com a frequência de injeção de combustível (400 Hz). Dessa forma, a ausência de frequências em 400 Hz indica que a região com presença intermitente do radical OH não apresenta correlação direta com o processo de injeção.

Devido à grande influência do escoamento de ar sobre a dinâmica das gotas no caso ESF400 (figura 6.1), a intermitência da região com OH pode ser associada à instabilidades no escoamento helicoidal. Moeck et. al [12] observaram na figura 2.10 uma grande estrutura produzida pelo escoamento helicoidal, conhecida por precessão do núcleo vortical (PVC). Essa estrutura é capaz de induzir à extinção local da chama devido a gradientes de velocidade que causam flutuações nos processos de mistura e combustão.

A análise da densidade espectral de potência do escoamento não reativo indica a existência de uma estrutura coerente do escoamento formada a, aproximadamente, 10 Hz (figura 5.35). O formato dessa estrutura pode ser observado na figura 5.39, a qual apresenta similaridades com o campo de velocidades derivado tanto da estrutura apresentada por Moeck et al. [12] na figura 6.3 quanto das estruturas apresentadas por Huang e Yang [10] na figura 2.5c, isto é, o escoamento de ar analisado apresenta duas estruturas vorticais como esperado para escoamentos com alto número de *Swirl*: o núcleo com movimento de precessão (PVC) e estruturas vorticais na região cisalhante do escoamento (VOSL). A estrutura VOSL é visualizada na figura 2.5c como a estrutura coerente externa, reconstruída na figura 6.4a pelas análises POD realizadas por Stöhr et al. [13].

A estrutura VOSL está associada à liberação de vórtices pelo mecanismo de Kelvin-Helmholtz na direção axial, observável pelo contorno de vorticidade na figura 2.5b para um plano diametral do escoamento. Como observado por Stöhr et al. [13] na figura 6.4b, estruturas coerentes como o PVC e o VOSL influenciam diretamente o processo local de mistura combustível/ar. Assim, a interação entre essas estruturas coerentes e a região de produção de OH pode levar à extinção local da chama e, devido à natureza periódica dessas estruturas, observa-se a produção intermitente do radical OH e a ausência de luminescência química espontânea.

Figura 6.3 – Vórtice derivado do PVC na região próxima ao queimador. Adaptado de [12].

Figura 6.4 – Estruturas vorticais no escoamento helicoidal: a) PVC ou *Precessing Vortex Core* e Vórtice na OSL ou *Outer Shear Layer* e b) extinção local e re-ignição do processo de combustão devido à distorção no escoamento pela passagem de estruturas coerentes. Adaptado de [13].

Capítulo 7

Conclusões

Neste trabalho, foram analisadas as influências da frequência de injeção de combustível sobre o comportamento das chamas pulsadas de spray de etanol estabilizadas por um *swirler*. As chamas produzidas com as frequências de injeção de 100 Hz, 250 Hz e 400 Hz foram analisadas com as técnicas de interferometria por efeito Doppler (PDI), espalhamento Mie, velocimetria por imagens de partículas e fluorescência induzida por laser do radical OH. Essas técnicas permitiram caracterizar: a distribuição de diâmetros e velocidades das gotas, a área ocupada pelas gotas ao longo dos ciclos de injeção, a velocidade do escoamento helicoidal produzido pelo *swirler* e a localização tanto das gotas quanto da região de produção de OH. Adicionalmente, imagens de luminescência química espontânea foram utilizadas para identificar o formato médio das chamas e características globais do processo de combustão.

Com as características do escoamento, dos sprays e da região com presença do radical OH, é possível concluir que:

- o comportamento linear do injetor permite seu uso na faixa de frequências entre 100 Hz e 550 Hz;
- o aumento na frequência de injeção de combustível diminuiu a área ocupada pelas gotas na região próxima ao queimador em cada evento de injeção e, consequentemente, a densidade do spray nessa região;
- a variação da densidade do spray influenciou tanto a interação do spray com o escoamento de ar quanto o formato das chamas;
- o caso com frequência de injeção intermediária (ESF250) apresentou a combinação de características de ambos os casos ESF100 e ESF400.

O caso com maior densidade de gotas (ESF100) indicou:

- a formação de um aglomerado de gotas pelo injetor que conserva as características do spray (diâmetros e velocidades das gotas) ao longo da linha de centro;
- a região com possível recirculação de ar produzido pelo escoamento helicoidal não afetou significativamente a passagem das gotas na direção longitudinal;

- a região com presença do radical OH ocorre de forma contínua e ancorada à saída do queimador.

O caso com menor densidade de gotas (ESF400) indicou:

- a menor densidade do spray favoreceu uma maior susceptibilidade da dinâmica das gotas ao escoamento de ar na região de recirculação;
- a influência significativa do escoamento helicoidal acoplado à baixa densidade de gotas promoveram uma maior dispersão das gotas, em que estas gotas são carregadas pelo escoamento recirculante para a região de cisalhamento do escoamento de ar;
- essa chama apresentou luminescência química espontânea similar à uma chama suspensa (*lifted*), a qual ocorreu devido à combustão intermitente na região próxima ao plano de injeção;
- o processo de combustão intermitente, identificado pela oscilação na presença do radical OH, ocorreu à uma frequência próxima de 10 Hz e não foram observados máximos na frequência de 400 Hz, o que indica que o processo de combustão intermitente não apresenta correlação direta com os eventos de injeção de combustível;
- a aplicação da técnica POD na análise do escoamento helicoidal indicou a formação de estruturas coerentes do escoamento ar com frequência próxima de 10 Hz;
- as estruturas indicadas pela análise POD podem ser associadas às estruturas PVC e VSOL, as quais possuem grande energia cinética turbulenta e são capazes de interromper o processo de combustão de forma periódica, inibindo a formação do radical OH e a emissão de luminescência química espontânea.

Capítulo 8

Sugestão para trabalhos futuros

Trabalhos futuros podem continuar o desenvolvimento tanto o queimador utilizado quanto das técnicas de diagnóstico. Assim, no desenvolvimento do queimador as sugestões são:

- medir e identificar a interação entre as gotas e o escoamento de ar durante o processo de combustão;
- verificar a existências das estruturas coerentes do escoamento helicoidal nas diferentes chamas;
- observar a evaporação de combustível para identificar regiões com diferentes proporções de mistura ar/combustível;
- caracterizar as propriedades dos sprays de forma condicionada à frequência de injeção;
- avaliar a influência da transição dinâmica entre frequências de injeção sobre o comportamento das chamas e
- avaliar o comportamento das chamas para diferentes frequências mas com mesma quantidade de massa por evento de injeção e não ciclo de injeção.

Quanto ao desenvolvimento e uso das técnicas de diagnóstico, as sugestões são:

- desenvolver a medição simultânea de LIF-OH e PIV em altas taxas de repetição;
- modificar o sistema LIF para observar a dispersão de combustível evaporado utilizando um traçador luminescente e
- caracterizar as gotas com o sistema PDI sintonizado em diferentes instantes do evento de injeção.

Capítulo 9

Referências Bibliográficas

- [1] International Energy Agency. Renewable energy: Rd&d priorities. 2006.
- [2] International Energy Agency. Clean energy progress report. 2011.
- [3] MME. Boletim mensal dos combustíveis renováveis. 49, 2012.
- [4] S.P. Lin and R.D. Reitz. Drop and spray formation from liquid jet. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 30:85–105, 1998.
- [5] P. Jenny, D. Roekaerts, and N. Beishuizen. Review: Modeling of turbulent dilute spray combustion. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38:846–887, 2012.
- [6] H.H. Chiu and T.M. Liu. Group combustion of liquid droplets. *Combustion Science and Technology*, 17:127–142, 1977.
- [7] H.H. Chiu, H.Y. Kim, and E.J. Croke. Internal group combustion of liquid droplets. *Proc. Combustion Institute*, 19:971–980, 1982.
- [8] M.A. Wahid, N.M. Jaafar, and F.N. Ani. Studies on the effect of swirl intensity and fuel mixtures on combustion and flame characteristics of a swirl burner. 2006.
- [9] D. Rochaya. *Numerical simulation of spray combustion using bio-mass derived liquid fuels*. PhD thesis, School of mechanical engineering of the Cranfield University, 2007.
- [10] Y. Huang and V. Yang. Effect of swirl on combustion dynamics in a lean-premixed swirl-stabilized combustor. *Proc. Combustion Institute*, 30:1775–1782, 2005.

- [11] J. O'Connor and T. Lieuwen. Recirculation zone dynamics of a transversely excited swirl flow and flame. *Physics of Fluids*, 24:075107, 2012.
- [12] J.P. Moeck, J.F. Bourgouin, D. Durox, T. Schuller, and S. Candel. Nonlinear interaction between a precessing vortex core and acoustic oscillations in a turbulent swirling flame. *Combustion and Flame*, 2012.
- [13] M. Stöhr, I. Boxx, C.D. Carter, and W. Meier. Experimental study of vortex-flame interaction in a gas turbine model combustor. *Combustion and Flame*, 159:2636–2649, 2012.
- [14] A. Cammilleri, F. Gueniat, J. Carlier, L. Pastur, E. Memin, F. Lusseyran, and G. Artana. Pod-spectral decomposition for fluid flow analysis and model reduction. *Theoretical Computational Fluid Dynamics*, 27:787–815, 2013.
- [15] D.E. Cavaliere, J. Kariuk, and E. Mastorakos. A comparison of the blow-off behaviour of a swirl-stabilized premixed, non-premixed nad spray flames. *Flow, Turbulence and Combustion*, 91:347–372, 2013.
- [16] A.R. Masri and J.D. Gounder. Turbulent spray flames of acetone and ethanol fuels approaching extinction. *Proceeding of MCS*, 2009.
- [17] W. D. Bachalo. Method for measuring the size and velocity of spheres by dual-beam light scatter interferometry. *Applied Optics*, 19:363–370, 1980.
- [18] W. D. Bachalo and M. J. Houser. Phase/doppler spray analyzer for simultaneous measurements of drop size and velocity distributions. *Optical Engineering*, 23:583–590, 1984.
- [19] W. D. Bachalo and M. J. Houser. Spray drop size and velocity measurements using the phase/doppler particle analyzer. *Proceedings of the 3rd international conference on liquid atomization and spray systems*, 1985.
- [20] Artium Inc. Pdi-300 md user manual. 2010.

- [21] H.J. Kim, S.H. Park, and C.S. Lee. A study on the macoscopic spray behavior and atomization characteristics of biodiesel and dimethyl ether sprays under increased ambient pressure. *Fuel processing technology*, 91:354–363, 2010.
- [22] I. Düwel, H.W. Ge, H. Kronemayer, R. Dibble, E. Gutheil, C. Schulz, and J. Wolfrum. Experimental and numerical characterization of a turbulent spray flame. *Proc. Combustion Institute*, 31:2247–2255, 2007.
- [23] Dantec Dynamics Inc. 2d piv reference manual. 2005.
- [24] A. Cenedese, G. Doglia, G.P. Romano, D. de Michele, and G. Tanzini. Lda and piv velocity measurements in free jets. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 9:125–134, 1994.
- [25] B. Yang, Y. Wang, and J. Liu. Piv measurements of two phase velocity fields in aeolian sediment transport using fluorescent tracer particles. *Measurement*, 44:708–716, 2011.
- [26] K.J. Nogenmyr, C. Fureby, X.S. Bai, R. Collin, and M. Linne. Large eddy simulation and laser diagnostic studies on a low swirl stratified premixed flame. *Combustion and Flame*, 156:25–36, 2009.
- [27] S. Pfadler, J. Kerl, F. Beyrau, A. Leipertz, A. Sadiki, J. Scheuerlein, and F. Dinkelacker. Direct evaluation of the subgrid scale scalar flux in turbulent premixed flames with conditioned dual-plane stereo piv. *Proceedings of the Combustion Institute*, 32:1723–1730, 2009.
- [28] R.P. Lucht. Application of laser-induced spectroscopy for combustion and plasma diagnostics. *Optical Engineering*, 11, 1987.
- [29] L. R. Santos. Medições de temperaturas de chamas de etanol utilizando fluorescência induzida por laser. *Tese de doutorado - Universidade de São Paulo - SP - Brasil*, 2005.
- [30] Dantec Dynamics Inc. Lif reference manual. 2008.

- [31] B. Böhm, C. Heeger, R.L. Gordon, and A. Dreizler. New perspectives on turbulent combustion: multi-parameter high-speed planar laser diagnostics. *Flow, Turbulence and Combustion*, 86:313–341, 2011.