2. Revisão Bibliográfica

Nas últimas décadas o resultado da aplicação de técnicas de diagnóstico laser em chamas turbulentas tem aumentado significativamente o conhecimento existente a respeito de fenômenos relacionados à interação entre turbulência e a cinética química. Dentre estes, destacam-se a (i) extinção local, (ii) interação entre grandes e pequenas escalas turbulentas, (iii) estabilização de chama e (iv) formação de NOx. As chamas turbulentas envolvem interações complexas entre escoamento e cinética química sobre ampla escala espacial e temporal. Estas interações de turbulência e cinética química afetam a estrutura da chama, os processos de reação, as relações entre concentrações das espécies e a formação de poluentes.

Nesta seção será discutido o conteúdo das principais referências bibliográficas que serviram de base para a elaboração do presente trabalho experimental. Com o objetivo de apresentar os principais métodos utilizados na análise experimental de chamas turbulentas de spray, este capítulo é dividido em três partes. A primeira traz uma breve revisão das caraterísticas gerais de alguns queimadores de escala de laboratório, em particular o queimador bluff-body. A segunda parte apresenta uma ampla revisão dos resultados obtidos com a utilização da técnica de PLIF aplicada simultaneamente com a técnica PIV e espalhamento Mie, divididos para chamas turbulentas gasosas e de spray de etanol. Esta parte descreve em linhas gerais as diferentes abordagens utilizadas nos estudos nos quais a técnica PLIF foi empregada para deteccão da zona de reação mediante a fluorescência do radical OH. A terceira parte consiste em uma descrição dos equipamentos envolvidos nestas técnicas de PLIF e PIV e utilizados nos trabalhos citados, visando apresentar a evolução dos componentes e situar as instalações da PUC-Rio, utilizadas para a realização deste trabalho, em relação às demais existentes atualmente.

2.1. Características gerais de alguns queimadores de escala de laboratório

Experiências de escala laboratorial são projetadas para isolar aspectos específicos da fenomenologia presente em aplicações práticas, por exemplo, a interação entre turbulência e cinética química. Para este fim, os experimentos devem permitir explorar, pela variação de parâmetros relevantes, os efeitos importantes. Este tipo de estudo experimental permite o desenvolvimento e a validação de modelos de combustão.

A utilização de queimadores com configurações geométricas simples, onde as condições de contornos possam ser medidas com facilidade, é desejável. Quando se consideram queimadores mais complexos, o conhecimento completo das condições de contorno é impossível. Dentre as situações interessantes e particularmente desafiadoras para modelagem são aquelas nas quais o comportamento da chama é sensível a pequenas variações das condições de contorno, particularmente quando a chama está perto da condição de instabilidade.

De modo geral, a literatura mostra que medições de espectros de velocidades, estatísticas de orientação e curvatura da chama são úteis para comparação com os resultados numéricos. A taxa de dissipação escalar, presença de estruturas coerentes (vórtices) e taxa de deformação da zona de reação, também são parâmetros importantes para compreender a interação entre turbulência e cinética química da combustão. Estes são usualmente calculados a partir de campos de velocidades e de escalares derivados de imagens e, consequentemente, apresentam desafios significativos para o diagnóstico laser, ao nível de exatidão (relação sinal ruído) e da resolução espacial.

Os queimadores *bluff-body* foram objeto de estudos que utilizam técnicas de diagnóstico laser em combustão porque permitem um amplo acesso óptico e apresentam zonas de recirculação dos produtos de combustão que podem servir para estabilizar a chama. A recirculação na parte baixa do *bluff-body* permite incrementar o tempo de residência dos gases em combustão e a alta temperatura destes gases serve como uma fonte de ignição estável para a chama. Além de isso, o queimador é representativo de diferentes dispositivos de combustão práticos. A motivação original do estudo deste queimador é de validar e desenvolver modelos de combustão turbulenta.

Barlow et al., 2005, modificaram o queimador *bluff-body* da Universidade de Sydney para incluir um anel de ar *swirling*. Esta modificação, aplicada ao estudo de chamas *swirling* de CH₄, CH₄/ar e CH₄/H₂, introduz dificuldades de modelagem adicionando instabilidades de chama e vórtices de grandes escalas. Na Figura 1(a), (b) e (c) se mostra uma fotografia da luminosidade da chama de CH_4/H_2 com ar estabilizada no queimador *bluff-body* de Dally et al. (1998) e as simulações numéricas correspondentes em LES (Simulação numérica das grandes escalas). Podem ser vistas as linhas de corrente do escoamento médio, caracterizado por vórtices anulares e imagens de OH. O retângulo na Figura 1(a) indica a região da Figura 1(b). Raman e Pitch et al., 2005, na Figura 1(d) mostram também, o campo de temperatura instantânea simulada em LES.



Figura 1 Chama estabilizada com um queimador *bluff-body* com mistura de CH_4/H_2 em ar utilizado por Dally et al., 1998: (a) fotografia da luminosidade da chama, (b) linhas do escoamento médio no tempo, (c) imagem de OH, (d) campo de temperatura instantânea. As figuras (b), (c) e (d) foram obtidas por simulação LES, por Raman e Pitch (2005).

Masri e Gounder et al., 2009, estudaram um combustor tipo *bluff-body*, mostrado esquematicamente na Figura 2, com uma chama piloto anular a qual é utilizada para estabilizar a chama de spray de etanol. Um atomizador ultrassônico foi posicionado a 215 mm a montante do plano de saída do bocal, o qual gerou gotículas com quantidade de movimento linear nula e um diâmetro médio de Sauter (*Sauter Mean Diameter*. SMD) de 40 μ m. O injetor por onde as gotículas foram lançadas tem 10,5 mm de diâmetro interno, o qual é envolto por uma chama piloto anular localizada 7 mm a montante do plano de saída. Uma entrada de ar auxiliar, com escoamento paralelo à chama, de 104 mm de diâmetro, envolve o bocal e a chama piloto. Esta entrada forneceu ar à velocidade de 4,5 m/s com intensidade de turbulência menor que 1,0%. O combustor foi confinado em um túnel de vento vertical com seção transversal quadrada com 290 mm de lado que fornece uma velocidade de 4,5 m/s, também com intensidade de turbulência menor que 1,0%.





A Figura 3 mostra outros tipos de queimadores utilizados no estudo da combustão. O queimador tipo *co-flow*, Figura 3(a), é muito utilizado com técnicas de diagnostico laser (Marley et al., 2004, Duwel et al., 2007). Este tipo de queimador foi empregado em estudos da estabilização de chamas tipo jato. Neste combustor, utilizado por Duwel et al., 2007, a chama é estabilizada sem a

utilização de chama piloto ou corpo rombudo, o que pode facilitar a definição de condições de contorno para simulações numéricas. O injetor de cone oco tem um diâmetro de 10 mm, o qual é fixo no centro de uma placa multiperfurada, destinada a homogeneizar o escoamento de ar.



Figura 3 (a) Queimador *co-flow* analisado por Düwel et al., 2007. (b) Combustor DRL utilizado por Boxx et al., 2010.

Na Figura 3(b) mostra-se outro modelo de queimador em escala de laboratório, projetado para gerar diferentes níveis de turbulência. Este queimador DLR, que simula o funcionamento de turbinas a gás, foi utilizado no estudo de chamas parcialmente pré-misturadas, por Steinberg et al., 2011 e Jiang et al., 2011. Este tipo de queimador fornece grande liberação de energia em pequenos volumes, e tem boas características de ignição e estabilidade em ampla faixa de operação (Boxx et al., 2010). Como é mostrado na Figura 3(b) este queimador possui dois escoamentos de ar ao redor do bico injetor de combustível. A chama obtida tem forma de cone e existem zonas de recirculação internas e externas.

2.2. Técnicas laser PLIF, espalhamento Mie e PIV para estudos de chamas turbulentas

2.2.1. Estudos de chamas turbulentas gasosas para detecção das zonas de reação

Clemens et al., 1997, apresentam resultados obtidos para chamas não prémisturadas, caracterizando a espessura da zona de reação, mediante técnica OH- PLIF, com diferentes números de Reynolds. A espessura é determinada na direção normal à zona de reação, locais onde reagentes são convertidos em produtos, de combustão. Os resultados mostram que, as chamas com maior número Reynolds têm uma zona de reação, em média, mais espessa, tal como o mostrado na Figura 4 para uma chama H₂/ar.



Figura 4 Imagens de PLIF-OH para H₂/ar em chamas não pré-misturadas, (a) Re=30 000, (b) Re=75 000, (c) Re=150 000. Os números da direita representam a distância da base do queimador com diâmetro de jato de 5 mm. Chamas estudadas por Clemens et al., 1997.

Este estudo confirmou que a turbulência influência fortemente a taxa de mistura dos reagentes em processos de combustão. Zonas de reação médias com maior espessura permitem alcançar uma maior potência específica, quando comparado com escoamentos laminares, permitindo assim o projeto de equipamentos de combustão mais compactos para uma dada demanda de potência.

Grisch et al., 2002 obtiveram resultados de OH-PLIF em uma chama de H_2/ar , tais como aquel mostrado na Figura 5. Nesta figura o escoamento é da esquerda para direita, o H_2 situa-se no centro e o ar ao seu redor.



Figura 5 (a) Imagens instantâneas de OH-PLIF, (b) imagens médias de OH-PLIF, (c) imagens de acetona-PLIF, (d) imagens misturadas de OH-PLIF e acetona-PLIF, em chamas H₂/ar (Mach=2) estudadas por Grisch et al., 2002.

As imagens instantâneas do radical OH, Figura 5(a), permitem visualizar a influência do movimento turbulento sobre a combustão. A Figura 5(b) mostra uma média de 60 imagens e permite constatar que a média da espessura da zona de reação é de 6 mm, e é relativamente constante, porém a concentração média do OH diminui ao longo do escoamento. O estudo de Grisch et al., 2002 ilustra outra aplicação frequente das técnicas LIF, que é a de determinar o comportamento do escoamento turbulento mediante a utilização de traçadores do combustível, como acetona. Os traçadores devem ter uma grande faixa de absorção de luz, e assim, podem ser facilmente excitados por laser UV. Por exemplo, para a acetona a excitação na faixa entre 220 e 320 nm é empregada. O rendimento de fluorescência da molécula de acetona (aprox. 0,21%) permite utilizar pequena concentração desta no fluido. A grande faixa de emissão de fluorescência (350 -550 nm) facilita a captura das imagens. Grisch et al., 2002 utilizaram 2% de acetona como traçador no H_2 , 282 nm de comprimento de onda excitação, para o qual os sinais de fluorescência são pouco dependentes da temperatura. A Figura 5(c) mostra que a fluorescência da acetona tem estrutura similar à da Figura 5(a)

mostrando vórtices coerentes. A Figura 5(d) mostra a superposição dos resultados do OH-PLIF e do acetona-PLIF.

Kothnur et al., 2002, mediram a luminescência dos radicais OH e CH em chamas turbulentas não pré-misturadas mediante técnicas PLIF em dois planos paralelos. A mistura em estudo é composta de 30% de metano e 70% de nitrogênio. O número de Reynolds do jato de combustível é de 18,600. Os radicais OH e CH marcam, respectivamente, zonas de recombinação de radicais e da decomposição do combustível. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 6, em termos das imagens das estruturas de CH/OH. As concentrações de CH representam o limite da zona de reação (linhas negras) e as concentrações de OH indicam a espessura da zona de reação (de cor azul - negro). Segundo Donbar et al., 2002, o perfil do CH tem forte correlação com a orientação da chama e zonas de extinção locais, pois o radical CH é considerado como marcador do limite da zona de reação em chamas não pré-misturadas e pré-misturadas.



Figura 6 (esquerdo) imagem de CH-PLIF, (direito) imagem de OH-PLIF. As linhas negras na imagem marcam o centro das estruturas de CH. As imagens em 2D foram estudadas por Kothnur et al., 2002.

Boxx et al., 2010 apresentaram imagens simultâneas de OH-PLIF e PIV, em uma chama com *swirl* parcialmente pré-misturada de gás natural, em um combustor tipo DRL. A Figura 7 mostra imagens de OH-PLIF, da zona de reação, superpostas às imagens obtidas do PIV do campo de velocidade. Uma região de alta velocidade axial (cor vermelho) ocorre perto da zona de extinção, mostrada em todos os quadros com linhas negras, indicando que o incremento das altas taxas de vorticidade é um dos fenômenos que causam a extinção local da chama. O rompimento da zona de reação acontece na Figura 7 sendo localizada em y = 15 mm e x = -8 mm.



Figura 7 Imagens simultâneas de OH-PLIF/PIV. As zonas de reação (linhas negras) estão superpostas com os campos de velocidade axial. As zonas de cor vermelho representam altas velocidades axial, os de cor verde são de baixa velocidade e os de cor azul representam fortes velocidades negativas. Imagens analisadas por Boxx et al., 2010.

Outro fenômeno que pode ser observado na Figura 7 são os pacotes de OH, gerados por regiões de gases não queimados, os quais são fontes de autoignição das misturas combustível / ar. As repentinas aparições e rápida expansão dos pacotes de OH podem representar um mecanismo adicional de estabilidade da chama. Geralmente estes pacotes acontecem nas zonas de baixa velocidade axial localizados em y = 12 mm, x = 4 mm.

Juddoo e Masri (2011), trabalham com OH-PLIF e altas taxas de repetição (5kHz), em seu estudo da extinção em chamas estabilizadas de gás natural comprimido, (chamas CGN-O₂ similar as chamas Sydney B10, B20) com várias concentrações de O₂. São estudados três tipos de estruturas: (i) rompimento, (ii) fechamentos e (iii) pacotes de combustível. As imagens de OH-PLIF são utilizadas como um marcador da zona de reação e uma ruptura do perfil de OH é considerada uma extinção local. A Figura 8 mostra imagens instantâneas de OH-PLIF das chamas B10 e B20. A sequência temporal é de esquerda a direita com um intervalo de 0,2 ms entre cada imagem. O tamanho das imagens é de 36 mm de altura e 50 mm de largura. Os rompimentos são contrabalançados pela ocorrência dos fenômenos de fechamentos, representados por setas e retângulos.



O fechamento corresponde a uma reconexão gradual das bordas do perfil OH nas regiões altas da chama, o que permite manter estável a combustão.

Figura 8 Imagens de OH-PLIF das chamas: B10 (90% Metano, 10% O₂) e chama B20 (80% Metano, 20% O₂) analisadas por Juddoo e Masri (2011). Os rompimentos, fechamentos e pacotes de combustível são representados por setas, quadros e círculos respectivamente.

Quando as chamas tendem a se apagar, os pacotes de combustível, representados por círculos, são os principais responsáveis por autoignição e tendem a crescer e propagar-se. Uma conclusão deste estudo é que a ocorrência de extinção local aumenta com a velocidade do combustível, levando a um apagamento da combustão.

Steinberg et al., 2011 estudaram experimentalmente os mecanismos de reignição (ou fechamentos) em uma mistura de 22,1%CH₄ / 33,2%H₂ / 44,7%N₂ não pre-misturada em chamas DLR, utilizando de forma simultâneas técnicas laser PLIF e PIV em altas taxas de repetição (10kHz). Os autores enfatizam que os processos de extinção da chama são prejudiciais para a estabilidade, emissão de poluentes e eficiência dos dispositivos de combustão.

Na Figura 9 é mostrado como o processo de re-ignição é gerado devido ao transporte turbulento de segmentos de chama. Segundo a sequência dos quadros, uma estrutura de vórtices, representada com uma seta de cor branca, ajuda a juntar os extremos da zona de reação para eliminar o rompimento da chama. Segundo Kaiser e Frank (2009) e Hult et al. (2005), o gás dentro das zonas de extinção ou rompimentos é mistura de reagentes não queimados com produtos quentes situado a uma temperatura entre os gases frescos (aprox. 295 K) e a temperatura de chama adiabática (aprox. 2100 K).



Figura 9 Imagens de 5 mm x 8 mm simultâneas com campos de vorticidade (azul: -30000 s⁻¹, vermelho: 30000 s⁻¹) e com medições de OH-PLIF representadas por linhas negras. A localização dos segmentos de chama é identificada por setas de linhas de pontos negros. Os vórtices são representados por seta de cor branca. Imagens estudadas por Steinberg et al., 2011.

2.2.2. Estudos de chamas turbulentas de spray de etanol

A necessidade de desenvolver um controle eficaz em dispositivos de combustão de combustíveis líquidos motivou o trabalho de, Yu et al., 1996, onde a interação entre o spray e as estruturas de grandes escalas turbulentas são estudadas em um combustor *dump*. Utiliza-se etanol pressurizado a 275 kPa e injetores pulsantes com frequências máximas de 1000 Hz. A distribuição espacial do spray foi medida mediante imagens do espalhamento Mie. A distribuição da densidade das gotas injetadas é uniforme na faixa de frequência investigada. Na prática as gotas de menor tamanho são desejáveis para o controle dos processos de

combustão porque seguem o movimento do escoamento e melhoram a eficiência da queima do combustível, como consequência da rápida vaporização. A fase dos pulsos de injeção do combustível foi controlada e variada para se adiantar ou atrasar em relação à frequência de desprendimento dos vórtices.

Resultados típicos são mostrados na Figura 10. A visualização do escoamento do combustível é realizada mediante à injeção de partículas de fumaça com o ar e os mapas de contorno da distribuição espacial de gotículas de etanol mostram os efeitos de injeção em cada fase para 120 Hz. São realizadas três experiências: na parte (a) encontram-se imagens planares do espalhamento Mie das partículas de fumaça que representam o escoamento do ar sem injeção de combustível. É possível constatar a presença de vórtices de grandes escalas.



Figura 10 (a) Fluxo de ar sem injeção de combustível em quatro instantes diferentes, (b) injeção após do desprendimento dos vórtices, (c) injeção antes do desprendimento dos vórtices. Contornos escuros marcam à presença das gotas e os contornos claros os vórtices gerados no combustor *dump* utilizado por Yu et al., 1996.

Na sequência (b) a injeção de combustível acontece após o desprendimento dos vórtices. Pode-se verificar que as gotas situam-se no núcleo do escoamento do fluido. Na sequência (c) a injeção acontece antes ou simultaneamente ao desprendimento dos vórtices, quando as gotas são transportadas para o perímetro dos vórtices. As experiências mostram que as características da chama, em particular seu comprimento e intensidade, podem ser controladas mediante uma boa sincronização da injeção de combustível com o desprendimento dos vórtices. Isto pode ser constatado na Figura 11, onde se mostra imagens de chamas com e sem sincronização, caso em que chamas curtas de fortes intensidades são obtidas quando comparadas com uma operação não sincronizada.



Figura 11 Combustor *dump*: (a) Chama sincronizada. (b) Chama não sincronizada. Fotografia da chama analisada por Yu et al., 1996.

Boyarshinov e Fedorov (2004) utilizaram técnicas LIF para medir concentrações de OH em chamas com misturas de etanol/ar. Nos experimentos, utiliza-se uma esfera de 15 mm de diâmetro feita de aço inoxidável cuja superfície porosa é mantida impregnada por etanol. A esfera é colocada em escoamento de ar com uma velocidade de $0,7 \pm 0,12$ m/s, esta velocidade não nula do escoamento é escolhida a fim de garantir que a chama de etanol evaporado permaneça imóvel. A correlação entre temperatura e concentração de OH foi estudada. Os resultados são mostrados na Figura 12, onde a máxima distribuição do OH é deslocada 0,4 mm em relação à temperatura máxima em direção à zona de oxidante. A temperatura foi medida por um termopar de *platinum-rhodium* com 50 µm de diâmetro.

Boyarshinov et al., 2005 complementam os resultados de Boyarshinov e Fedorov (2004) com medições de concentrações de CH, marcador da localização da zona de reação, mostrando que a concentração de CH é deslocada com respeito à máxima temperatura em direção a zona do combustível. Na Figura 13(a) mostram-se as distribuições de concentrações de OH, de CH e a temperaturas, medidas a partir da direção normal à frente de chama, a qual é normalizada pelo valor de y correspondente a temperatura máxima ($y_F = 1,78 mm$). A concentração máxima de OH é de $\approx 4,3 \times 10^{16} cm^{-3}$, o que corresponde a uma concentração em volume de $r_{OH} \approx 1\%$.



Figura 12 Medições de temperaturas e concentrações de OH em chamas de etanol estudadas por Boyarshinov e Fedorov (2004). A coordenada (y) é medida em direção normal à frente de chama, a qual é normalizada pelo valor correspondente a temperatura máxima ($y_F = 1,78$ mm).

Boyarshinov (2008) utilizara os dados experimentais para calcular as taxas de liberação de calor, e assim, determinar a localização da frente de chama, a qual coincide com a região de máxima temperatura. A Figura 13(b) mostra o ponto máximo da taxa de liberação de calor ($Q_d \approx 600 \frac{MW}{m^3}$, $T \approx 2000 K$). Boyarshinov (2008) determinam que as medições de máximas concentrações de OH e CH correspondem a pontos onde a taxa de liberação de calor é zero. Nota-se que as concentrações máximas de CH e OH não representam, então, a posição da frente de chama no processo de combustão.



Figura 13 (a) (1) Distribuições de OH, (2) temperatura, (3) CH, resultados de Boyarshinov et al., 2005. (b) Intensidade de liberação de calor em chamas de etanol, resultados de Boyarshinov (2008). A coordenada (y) é medida em direção normal à frente de chama, a qual é normalizada pelo valor correspondente a temperatura máxima ($y_F = 1, 78$ mm).

Utilizando um queimador *coflow* com etanol e ar, Marley et al., 2004 mostraram a importância da velocidade do ar para a eliminação das zonas de extinção. O queimador permite velocidades do ar entre 0 e 0,29 m/s. Um injetor de spray de 0,23 mm de diâmetro é utilizado com uma pressão 482 kPa e vazão de 2,2 l/h. O spray utilizado é de tipo polidisperso o qual garante uma melhor vaporização e gera vapor de combustível ao atingir a zona de reação, aumentando a probabilidade de combustão parcialmente pré-misturada. O número de Reynolds calculado na saída do spray é de 2050.

No primeiro quadro da Figura 14(a) e (b) podem ser claramente vistas duas estruturas da chama de cada lado da linha central do spray para cada caso estudado, inicialmente sem velocidade de ar (não *co-flow*) e com 0,29 m/s, respectivamente. Esta estrutura de chama dupla é facilmente observável devido à luminosidade característica de cor azul. No segundo quadro da Figura 14(a) é interessante notar que não ocorre extinção e existe um ligeiro descolamento de altura da chama, em média, de 14,1 mm, como consequência de um arrastre de ar ao início da combustão.



Figura 14 Queimador com estruturas de chamas duplas (luminescência azul) e imagens de OH-PLIF. (a) Caso sem *co-flow* (0,0 m/s) com zonas de extinção, (b) Caso com *coflow* (0,29 m/s) sem zonas de extinção. Imagens utilizadas por Marley et al., 2004.

Nos quadros seguintes mostram-se extinções importantes sem presença de *co-flow*. As zonas de extinção são resultado de um fraco arrastre de ar ambiente, devido ao não-*coflow*. A condição de não-*coflow* produz altos fluxos de gotas não vaporizadas e possivelmente altas taxas de deformação da zona de reação. Os resultados exibem zonas de extinção em aproximadamente 55% das imagens OH-PLIF. Na Figura 14(b) mostra-se o caso em que a velocidade do *co-flow* é de 0,29 m/s, alterações significativas do escoamento na fase gasosa e da estrutura de chama dupla podem ser verificadas. O descolamento é de 21,3 mm nestas condições. Os resultados indicam que as zonas duplas de reação são continuas e não apresentam extinção.

Com o objetivo de avaliar os processos de combustão de sprays em etanol, Düwel et al., 2007a, apresentaram análises experimentais e numéricas de chamas turbulentas de spray de etanol. A chama turbulenta de etanol é caracterizada através de experimentos usando técnicas laser de espalhamento Mie/LIF e PDA (*Phase Doppler Anemometer*) para a medição de tamanho e velocidade de gotas, respectivamente. A instalação do chama spray de etanol utiliza um combustor tipo *coflow*. A chama se estabiliza com um pré-aquecimento de 45 °C. A faixa de vazão do etanol líquido empregada é de 0,39 - 0,54 g/s, a velocidade do ar esta situada entre 0,0 m/s e 0,64 m/s. A realização simultânea do espalhamento Mie e da

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

técnica LIF mediante a fluorescência do tolueno como traçador do combustível permite medir o diâmetro médio SMD, calculado, por:

$$SMD = \frac{S_{LIF}}{S_{Mie}} = \frac{C_{LIF}}{C_{Mie}} \frac{\sum_{i=1}^{N} D_i^3}{\sum_{i=1}^{N} D_i^2},$$
 (2.1)

onde *N* representa o número de gotas e D_i o diâmetro da gota, os valores de C_{LIF} , C_{Mie} são constantes do sinal LIF e espalhamento Mie respectivamente. Assim os sinais do LIF e espalhamento Mie medem respectivamente o volume e a área total de gota para um dado volume de controle como é mostrado na Figura 15(a). A variação da concentração do traçador depende principalmente da diferença entre a pressão de vapor do traçador e combustível. Pelo tanto o traçador, *tolueno*, apresenta propriedades de evaporação similares ao combustível. Duwel et al., 2007b, mostram as características do *tolueno* em etanol, o traçador apresenta temperatura de ebulição de 110 °C e a faixa de excitação de fluorescência entre 280 e 330 nm.



Figura 15 (a) Diâmetro SMD do spray de etanol em 2 bar de pressão de injeção e 0,32 m/s de velocidade de *co-flow*, (b) fotografia da chama dupla de etanol e ar em uma área de 44x36 mm² com uma pressão de injeção de 2 bar e velocidade de *coflow* de 0,32 m/s, estudada por Düwel et al., 2007a

Os resultados mostram que existem duas zonas de reação na chama. A Figura 15(b), mostra uma primeira zona, interna, a 1 mm do injetor e a segunda zona de chama está localizada entre 5 e 15 mm do injetor, dependendo da pressão de injeção do combustível, a qual é variada entre 1,4 e 2,6 bar. Entretanto as simulações não conseguiram prever a chama dupla que foi observada experimentalmente, mas confirmam uma boa aproximação da distribuição de

tamanhos de gotas foi alcançada na proximidade do injetor. Dando continuidade ao trabalho de Düwel et al., 2007, Ge et al., 2008 argumentam que, normalmente, os fenômenos de chama dupla, com duas regiões de reação, similares aquelas obtidas por Marley et al., 2004 devem-se à presença de recirculações no escoamento. Porém no caso em questão, parte do etanol líquido vaporiza-se imediatamente após a atomização. Este vapor formado mistura-se com o ar da entrada auxiliar *co-flow*, e a chama interna se desenvolve. A chama externa forma-se pela evaporação das demais gotas, o que dá origem à chama dupla.

Masri e Gounder (2009) utilizaram técnicas de LIF-OH em conjunto com espalhamento Mie para a análise da estrutura de chamas turbulentas de spray de etanol. Medições são feitas em varias posições axiais. As chamas de etanol foram denominadas EtF3, EtF6, EtF8 com velocidades de jato de 24, 36 e 48 m/s, respectivamente. As técnicas LIF-OH e espalhamento Mie foram utilizadas para visualizar a zona de reação e evidenciar as gotículas dentro do escoamento reativo. A questão-chave é determinar se a zona de reação encontra-se ao redor de gotas simples ou envolve nuvens de gotículas.

As imagens 2D mostradas na Figura 16 são resultado das técnicas LIF e espalhamento Mie, onde foco é mostrar o contorno da zona de reação ao redor das gotas do spray dentro do escoamento turbulento. A distribuição de gotículas encontra-se ligeiramente saturada com gotículas maiores no eixo central do plano de saída do bocal, com um decaimento gradual na direção radial até a zona de reação. Devido à evaporação rápida, a concentração de gotículas diminui conforme aumenta o afastamento do plano de saída do bocal. A distribuição das gotículas não tem muita variação com o incremento de velocidade de jato.

A imagem de LIF-OH da chama EtF3, na Figura 16, apresenta duas zonas de reação, uma interior devido a pré-mistura entre o combustível vaporizado e o ar de arrasto. No segundo quadro as gotículas são envolvidas pela chama EtF6. A chama EtF8 apresenta zonas de extinção, produto do incremento da velocidade de jato. É importante destacar que as incertezas de todas as medições realizadas pelos autores do experimento em questão não foram apresentadas.

Gounder et al., 2006 complementam os resultados de Masri e Gounder (2009), e afirmam que em chamas de etanol e ar, a queima das nuvens de gotículas acontece quando as gotículas são rodeadas pelas chamas de zonas pré misturadas. As grandes gotas ($d = 100 \mu m$) atravessam zonas de chamas pré-

misturada e o processo de queima acontece quando são envolvidas em zonas de chamas não pré-misturadas. As gotas quebram a zona de reação (pré-misturadas) devido às altas velocidades de jato, simultaneamente quando o ar de arrasto transporta gotas de grande tamanho.



Figura 16 Imagens simultâneas de LIF-OH e espalhamento Mie na posição xD=15 em chamas de etanol. Adaptado de Masri e Gounder (2009).

Sacomano (2011) apresenta simulações numéricas das chamas turbulentas de spray de etanol e ar. O foco do trabalho foi desenvolver um modelo matemático robusto. Neste trabalho, simulações de chamas spray turbulentas com misturas de etanol e ar efetuaram-se nas condições do experimento de Masri e Gounder (2009).

A formulação Euleriana–Lagrangiana foi aplicada para calcular o desenvolvimento do spray. A modelagem do spray é descrita por modelos de movimentação e evaporação de gotículas, as interações entre elas, o acoplamento interfásico e, a dispersão turbulenta, como também a modulação de turbulência.

O modelo de turbulência $k - \varepsilon$ padrão foi utilizado para descrever o transporte turbulento. O modelo de combustão folha de chama foi escolhido, por ser um modelo simplificado de uma única reação global, tendo sido adaptado para contabilizar os efeitos do resfriamento evaporativo na modelagem do spray, justamente com as funções de densidade de probabilidade (função β -PDF's). Nas proximidades do bocal de injeção as gotículas de maiores diâmetros apresentam aproximação razoável dos dados experimentais. Na Figura 17 mostra-se a



comparação da distribuição de tamanhos de gotas calculados com as medidas por Masri e Gounder (2009).

Figura 17 Comparação entre as distribuições de tamanho de gotículas dos resultados calculados na simulação com os dados experimentais de Masri e Gounder (2009). Adaptado Sacomano (2011).

Para avaliar a modelagem da evaporação de gotículas foi feita a comparação da distribuição de seus tamanhos calculados nas simulações com os dados medidos experimentalmente. A principal justificativa para as discrepâncias observadas nas comparações entre os perfis de velocidade média é atribuída à modelagem da turbulência. Ao observar os resultados da Figura 17, nota-se que as discrepâncias observadas nas comparações entre o componente axial de velocidade média não interferiram significativamente no processo de evaporação. Pode-se concluir que a influência do campo de velocidade no processo de evaporação foi bem modelado. Entretanto, o módulo da velocidade da fase gasosa influencia o processo de dispersão das gotículas. Porém, como observado na Figura 17, a dispersão foi razoavelmente bem prevista, tendo em vista que boa distribuição de tamanho de gotículas foi alcançada no domínio de cálculo.

2.3. Instalações experimentais para medições de PLIF e PIV

No trabalho de Marley et al., 2004, as imagens planares da fluorescência do radical OH são capturadas na faixa de emissão 306 – 312 nm, o comprimento de onda utilizado pelo laser de excitação é de 281,25 nm, segundo se mostra na Figura 18.



Figura 18 Instalação experimental do PLIF utilizado por Marley et al., 2004 para caracterizar chamas turbulentas com etanol e ar.

Um sistema de lentes fornece uma plano laser de altura de 38 mm que atravessa a linha central do queimador com uma energia de 3 mJ/pulso. É empregada uma câmera ICCD (*Intensificador charged coupled device*) com taxa de repetições de 250 – 10k Hz e quadros de 576 x 384 pixel correspondentes a 31 mm de altura e 21 mm de largura. As imagens do radical OH determinam a existência de uma dupla estrutura de chama que é característica de chamas turbulentas com spray.

Kothnur et al., 2002 mediram a luminescência dos radicais OH e CH mediante técnicas PLIF em dois planos paralelos. O esquema da instalação experimental é mostrado na Figura 19. Para a medição de PIV se utilizou um par de lasers do estado sólido de Nd:YAG com comprimento de onda 532 nm. O combustível e ar foram dopados com partículas de alumina (Al_2O_3) de 0,5 µm. A dispersão foi detectada por uma câmera CCD de 1k x 1k pixels. A resolução espacial é de 0,7 mm com uma janela de 32 x 32 pixels. O sistema PLIF utilizou laser Nd:YAG como bombeamento de um laser corante e um cristal de dobramento de frequência para as medições do radical OH e CH. Foram

utilizados os espectros de absorção dos radicais de CH-PLIF e OH-PLIF de 390,3 nm e 281,34 nm respectivamente. As imagens planares da fluorescência do radical CH e OH foram capturadas nas faixas de emissão 420 – 440 nm e 308 – 312 nm, respectivamente.



Figura 19 Instalação experimental simultânea CH-PLIF/OH-PLIF/PIV utilizada por Kothnur et al., 2002.

Mais recentemente, técnicas laser tem sido desenvolvidas para permitir medidas em taxas de repetição de até 10kHz com o uso de câmeras digitais de alta velocidade. Boxx et al., 2010 apresentaram imagens simultâneas de OH-PLIF e PIV de alta velocidade (5 kHz de taxa repetição) e 0,8 s de tempo de aquisição, em uma chama com *swirl* parcialmente pré-misturada de gás natural. A Figura 20 mostra uma descrição dos equipamentos utilizados no diagnóstico laser. O sistema PLIF utiliza um laser de bombeamento Nd:YLF com 3,8 mJ/pulso (19 W na saída) para 523 nm e 8,5 ns de duração de pulso. O laser corante utiliza *Rhodamine* 6G em etanol e fornece 283 nm com 100 µJ/pulso (0,5 W na saída). O sinal de fluorescência foi capturado em 310 nm, com uma câmera CMOS acoplada a um intensificador.



Figura 20 Instalação experimental de OH-PLIF e PIV simultânea em chamas turbulentas de metano e ar. Equipamento utilizado por Boxx et al., 2010.

O sistema PIV utiliza um laser de estado sólido Nd:YAG e duas câmeras CMOS. O laser fornece 2,6 mJ/pulso (13 W na saída) em 532 nm e a duração do pulso é de 14 ns. A separação dos pulsos do sistema PIV é de 20 μ s, e o pulso de excitação do OH-PLIF encontra-se entre o primeiro e segundo pulso do PIV para cada ciclo de medida. A resolução espacial é de 1 mm, a incerteza aleatória do PIV foi estimada em ±0,3 m/s.

Juddoo e Masri (2011) trabalham com OH-PLIF e taxas de repetição de 5 kHz, na Figura 21 é mostrado um esquema do sistema de alta velocidade com um laser de bombeamento Nd:YAG com 12W de potência e tempo de iluminação do laser pulsante de 10 ns. O laser corante utiliza *Rhodamine* 6G em etanol, fornecendo um feixe do laser no estado fundamental de 566 nm, a frequência é dobrada em um cristal BBO para produzir um laser UV de 283,01 nm com uma media de 750 mW e 5kHz (150 µJ/pulso). O sistema de detecção consiste em uma câmera de alta velocidade CMOS com intensificador de alta velocidade. As imagens de OH-PLIF foram capturadas com uma taxa de repetição de 5kHz em 1024x1024 pixels e com uma resolução de 54 µm/pixel.



Figura 21 Instalação experimental PLF de alta velocidade utilizada por Juddoo e Masri (2011) para medições da fluorescência de OH em chamas turbulentas com misturas de metano e oxigênio.

Dentre as novas técnicas laser que estão sendo utilizadas nas pesquisas em combustão, destacam os lasers *pulse burst* e o oscilador paramétrico ótico OPO. O primeiro é um laser desenvolvido para fornecer altas energias por pulso e o segundo está sendo utilizado em substituição dos lasers corantes. Jiang et al., 2011 desenvolveram novos estudos com estas técnicas. Os autores obtiveram imagens CH-PLIF para a análise da dinâmica das chamas e medições da relação sinal / ruído (SNR). As medições são feitas utilizando altas taxas de repetição, (10kHz), com o comprimento de onda na faixa UV de 390 nm com 0,4 mJ/pulso para à fluorescência do radical CH.

As imagens planares da fluorescência do radical CH foi capturado na faixa de emissão 430 nm. A tecnologia de *pulse burst* utiliza uma *flashlamp* para bombeamento de um laser de estado sólido que pode ser Nd:YAG. O sistema *pulse burst* é capaz de gerar altas taxas de energia no estado fundamental 1064 nm (400 mJ/pulso). As energias por pulso são limitadas para 1064 nm (130 mJ) no fundamental e 355 nm (40 mJ) no terceiro harmônico. A Figura 22 mostra como é misturado os sinais de saída do OPO, 615 nm, laser *pulse burst*, 1064 nm, e laser de diodo ECDL (*External-cavity diode laser*) para gerar pulsos de 390 nm no sistema CH-PLIF. Na Figura 23 se mostra o valor da SNR da imagem CH-PLIF, onde para as linhas 1 (de cor azul) e 2 (de cor vermelho) o valor da razão sinal /

ruído (SNR ~ 7) é aceitável, com relação as medições de baixas repetições (~10 Hz).



Figura 22 Instalação experimental utilizando pulso *burst* como sistema de bombeamento do OPO, para medições de CH-PLIF, utilizado por Jiang et al., 2011.



Figura 23 Analise da relação sinal-ruído SNR das imagens de CH-PLIF analisadas por Jiang et al., 2011.

2.4. Considerações finais

Muitos dos estudos incluídos no presente trabalho foram mostrados nos diferentes Workshops TNF (*Turbulent Nonpremixed Flame*), os quais facilitam a colaboração de resultados de pesquisas experimentais e computacionais, e permitem a comparação de dados experimentais e modelos numéricos. A natureza não intrusiva das técnicas laser aliada à capacidade de fornecer altas energias por pulso e o constante crescimento das velocidades de repetições, melhorando as resoluções espaciais e temporais, são fatores que apontam para uma popularização

no futuro próximo. Como limitação óbvia desta técnica, deve-se mencionar a necessidade de informações quantitativas de incerteza experimental.

Uma das principais conclusões da presente revisão é a existência de uma estrutura dupla de chamas de spray de etanol obtida nos trabalhos de Düwel et al., 2007, Marley et al., 2004 e Masri e Gounder (2009). Um fenômeno abordado é a dinâmica de rompimentos das zonas de reação que diminui com o aumento da velocidade do ar em queimadores *co-flow* e aumenta com incremento da velocidade do jato de combustível em combustores RDL, segundo Marley et al., 2004 e Juddoo e Masri (2011) respectivamente. Outro fenômeno abordado por Juddoo e Masri (2011) é a autoignição, promovida por pacotes de OH, que ocorre em regiões do combustível não queimado o que ajudam a manter a chama estável. O trabalho de Boxx et al., 2010 demostra que a interação dos vórtices com alta taxa de deformação gera zonas de extinção (ou rompimentos) locais no interior da chama. Cabe ressaltar no trabalho de Steinberg et al., 2011 a interação dos vórtices é responsável pelos processos de re-ignição (ou fechamentos da zona de reação) e, finalmente, Jiang et al., 2011 permite ter uma visão geral das novas tecnologias de medição que estão sendo utilizadas atualmente.

O presente trabalho tem como objetivo contribuir para o usode técnicas ópticas aplicadas em chamas turbulentas não pré-misturadas de spray de etanol. Uma característica marcante da técnica óptica empregada é a disponibilização simultânea de informações de imagens qualitativas, de alta qualidade, o que contribui para o entendimento dos fenômenos físicos estudados; como a distribuição de gotas no escoamento, com a técnica de espalhamento Mie e o mapeamento da zona de reação mediante a técnica de PLIF-OH.

Para finalizar esta revisão, cabe mencionar o trabalho de Masri e Gounder (2009) utilizando simultaneamente ambas técnicas espalhamento Mie e OH-PLIF, permite antecipar alguns dos resultados experimentais obtidos no presente trabalho em particular no que diz respeito à estrutura das chamas turbulentas estudadas.