

## 2 Revisão Bibliográfica

Na combustão de combustíveis líquidos em sistemas industriais é desejada uma adequada atomização visando à formação de uma mistura inflamável, a mais homogênea possível antes da zona de combustão. Nesta situação, o combustível é frequentemente injetado na câmara de combustão mediante um injetor que atomiza o líquido em pequenas gotas, as quais se evaporam e se misturam com o ar (ou outro oxidante), para, finalmente, participar da combustão. Portanto, a distribuição do tamanho de gota e a conseguinte formação da mistura inflamável são cruciais para garantir a eficiência da combustão, a estabilidade da chama e uma baixa emissão de poluentes.

Neste capítulo são discutidos os conteúdos de algumas referências bibliográficas mostrando técnicas laser que serviram como base no desenvolvimento do presente trabalho. O capítulo está dividido em duas partes. A primeira apresenta uma revisão bibliográfica das técnicas, Mie, PLIF, estéreo PIV e “Shadowgraphy” aplicadas a sprays com e sem chama. Na segunda parte são apresentados os resultados mais importantes da revisão bibliográfica que determinaram o caminho a seguir no desenvolvimento do presente trabalho.

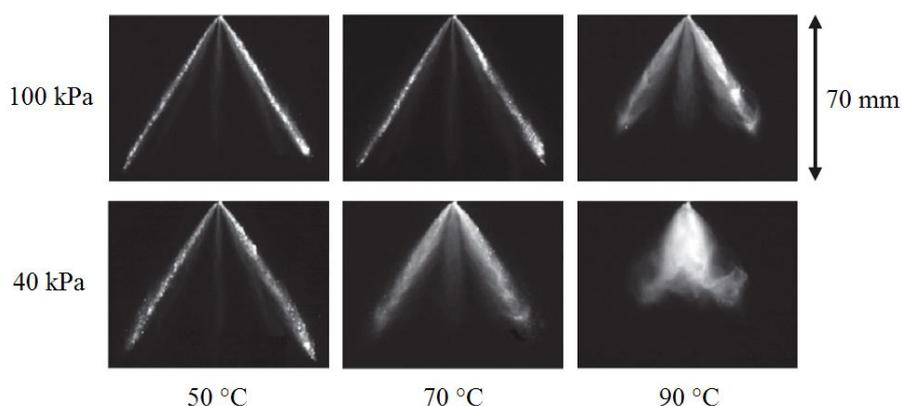
### 2.1 Aplicação do diagnóstico laser na combustão de sprays

#### 2.1.1 Técnicas laser Mie, LIF e PIV aplicadas a estudos de combustão em sprays.

Um melhor conhecimento dos fenômenos envolvidos nos processos de combustão por spray pode ser obtido pela aplicação de técnica de fluorescência induzida por plano laser de um traçador. Esta técnica está baseada na diluição (dopagem) de uma substância de propriedades fluorescentes (traçador) no combustível. Os traçadores podem ser utilizados para a medição de distribuições de propriedades físicas, tais como temperatura, velocidade, diâmetro de gota ou concentrações. A intensidade de fluorescência do traçador deve estar relacionada

com as propriedades e condições físicas do combustível em que foi diluído, para que a intensidade de fluorescência possa representar a propriedade física de interesse a ser medida [12]. Entre as principais dificuldades que se apresentam estão: (i) o traçador deve apresentar propriedades semelhantes às do combustível, para garantir que os fenômenos de atomização e combustão sejam pouco alterados, (ii) o sinal de fluorescência do traçador deve representar a propriedade física de interesse a ser medida.

Os efeitos da temperatura de injeção do combustível e da pressão ambiente sobre a estrutura de um spray de etanol foram estudados por Zeng et al. [13]. A caracterização de um injetor de múltiplos pontos (vários orifícios) foi realizada mediante espalhamento Mie das gotas com comprimento de onda de  $532\text{ nm}$  gerado por um laser Nd:YAG. O sinal foi capturado com ajuda de uma câmera CCD e um filtro centrado em  $532\text{ nm}$ . As imagens do spray com pressão de injeção de  $5\text{ MPa}$  para temperaturas de injeção de  $50$ ,  $70$  e  $90\text{ }^\circ\text{C}$ ; e pressões ambientes de  $100$  e  $40\text{ kPa}$  são mostradas na Figura 1. Para uma pressão ambiente de  $100\text{ kPa}$  não se apreciam variações significativas da forma do spray (nas duas primeiras imagens), só é possível observar que a estrutura começa a colapsar quando se atinge a temperatura de  $90\text{ }^\circ\text{C}$ . Quando a pressão ambiente é reduzida para  $40\text{ kPa}$ , se pode observar um maior colapso da estrutura do spray a  $70\text{ }^\circ\text{C}$ , mas ainda este conserva sua forma inicial. Para  $90\text{ }^\circ\text{C}$  o spray colapsa totalmente, formando um cone sólido de atomização e um vórtice de recirculação de gotas rodeando a borda do spray.



**Figura 1** Diferentes estruturas de atomização. Imagens Mie do spray multiponto de etanol sob várias condições de temperatura e pressão ambiente. Pressão de injeção do etanol  $P_{inj} = 5\text{ MPa}$  [13].

O etanol apresenta uma pressão de saturação baixa e mantém a estrutura formada até temperaturas elevadas, seu ponto de ebulição à pressão atmosférica é de 78,3 °C. A variação da estrutura do spray é atribuída à ocorrência da vaporização instantânea (*flash-boiling*) do combustível aquecido, quando se formam bolhas de vapor no interior do líquido devido à súbita queda de pressão. Quando estas bolhas passam pela expansão rápida ajudam a desintegração da massa do líquido.

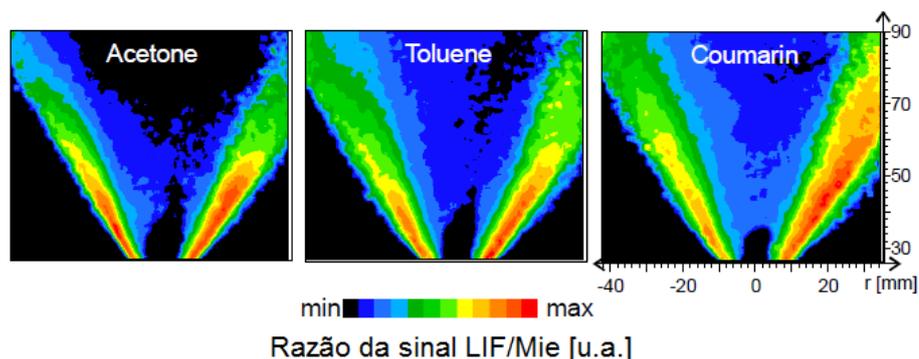
Para avaliar o processo de atomização, Düwel et al. [14] realizaram um estudo experimental da distribuição do diâmetro médio Sauter (SMD) usando técnicas de diagnóstico laser LIF e espalhamento Mie em chamas turbulentas de etanol. Como não é prático e possível medir todos os diâmetros das gotas em todos os pontos, medidas indiretas devem ser utilizadas. A superfície média das gotas é proporcional ao sinal do espalhamento Mie ( $S_{Mie}$ ), enquanto que o volume médio é proporcional ao sinal de LIF ( $S_{LIF}$ ) emitido por um traçador adicionado ao combustível. Finalmente o SMD é calculado por:

$$SMD = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i^3}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i^2} \quad ; \quad \frac{S_{LIF}}{S_{Mie}} = \frac{C_{LIF}}{C_{Mie}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N D_i^3}{\sum_{i=1}^N D_i^2} \propto SMD ;$$

onde  $N$  é o número de gotas;  $D_i$  o diâmetro; e  $C_{LIF}$ ;  $C_{Mie}$  são as constantes do sinal de fluorescência e do espalhamento Mie respectivamente.

Como a concentração do traçador muda devido à evaporação, é necessário dispor de um traçador com característica de evaporação semelhante ao combustível. Foram avaliados três traçadores, dois líquidos com diferentes volatilidades, a *acetona* e o *tolueno*; e o *coumarin 47* (*coumarin 460*), sólido, sendo as concentrações utilizadas de 0,68 mol/l, 0,018 mol/l e 1,73x10<sup>-6</sup> mol/l respectivamente. O ponto de ebulição do etanol é maior do que o da acetona e menor do que o do tolueno. Foi utilizado um injetor com spray de cone oco com vazão mássica de 0,47 g/s e escoamento de ar co-corrente de 0,64 m/s para os três casos. Um laser excímero *KrF* com um comprimento de onda de 248 nm, 70 kW/cm<sup>2</sup> de potência e 19 ns de duração do pulso foi empregado. O sinal de fluorescência foi capturado mediante duas câmeras ICCD (*Intensified charge coupled device*) e filtros passa banda centrados em torno de 400 nm, 282 nm e 447 nm para a acetona, o tolueno e o *coumarin 47* respectivamente. A Figura 2 mostra razões dos sinais LIF/Mie. A técnica requer que o sinal seja a média de

várias gotas. Por conseguinte, foram levados em conta apenas os pixels que detectaram um número mínimo de 64 sinas de gotas (dentro das 1000 imagens).

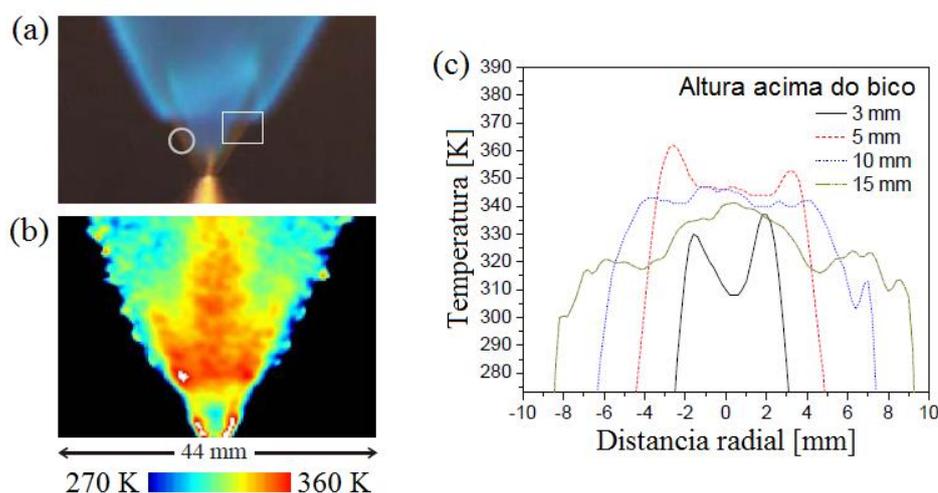


**Figura 2 Razão de LIF/Mie utilizando imagens de traçadores. (a) Acetona, (b) Coumarin 47, (c) Tolueno. As imagens representam a média de 1000 imagens [14].**

Os maiores valores do SMD encontram-se próximos ao injetor e diminuem significativamente à medida que o spray se desenvolve. A acetona apresenta diminuição mais acentuada por evaporação, devido ao seu menor ponto de ebulição quando comparado com o tolueno, mas as imagens correspondentes são semelhantes. O *coumarin 47* mostra a menor queda de sinal, pois não se evapora. Finalmente, a *acetona* e o *tolueno* mostram apenas pequenas variações com respeito ao SMD medido com um gerador de gotas monodisperso calibrado.

A medida da distribuição de temperatura é útil na descrição de processos de evaporação em gotas. Kronemayer et al. [15] apresentaram o campo bidimensional de temperatura das gotas numa chama tipo spray de etanol, mediante a técnica PLIF-traçador de duas cores. A técnica captura o sinal de fluorescência de um traçador em duas faixas espectrais diferentes. Sob certas condições, a razão das intensidades de fluorescência pode ser assumida como apenas dependente da temperatura. *Rodamina B*, na concentração de  $1,0 \text{ mg/l}$ , foi empregada como traçador, pois sua fluorescência tem forte dependência com a temperatura. Foi utilizado o segundo harmônico ( $\lambda = 532 \text{ nm}$ ) do laser Nd:YAG, duas câmeras ICCD e filtros passa banda de  $550 \pm 5 \text{ nm}$  e  $600 \pm 10 \text{ nm}$ . A Figura 3(a) mostra uma configuração de chama tipo dupla e o ponto de calibração (circulo) mediante termopar. A distribuição de temperatura correspondente é mostrada na Figura 3(b). Os perfis de temperatura são mostrados na Figura 3(c). As zonas mais quentes são mostradas em vermelho e correspondem a regiões próximas à chama interior ( $\sim 15 \text{ mm}$ ). A temperatura diminui à medida que se

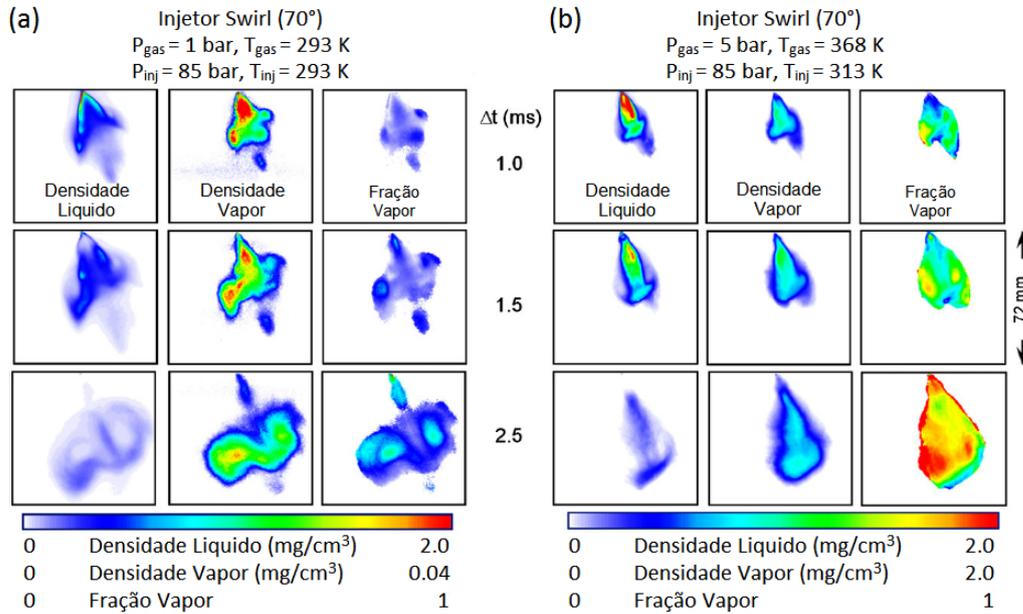
aproxima da chama exterior (quadrado na Figura 3(a)), o que pode ser atribuído ao resfriamento evaporativo, maior evaporação das gotas pequenas e, ainda, à permanência de gotas maiores e mais frias que levam mais tempo para se evaporar. A temperatura das gotas varia de 310 K até a temperatura de ebulição. As áreas brancas no campo de temperatura denotam valores acima do ponto de ebulição. Neste estudo a incerteza de medição foi estimada entre 10 % e 15%.



**Figura 3** Chama spray de etanol (a) Imagem da chama, (b) Campo de temperatura da fase líquida obtida da média de 600 imagens [15], (c) Perfis de temperatura [16], vazão de 0,035 l/min de etanol preaquecido a 45 °C e uma velocidade do ar anular de 0,32 m/s.

Fansler et al. [17] utilizaram a técnica de fluorescência exciplex induzida por plano laser (PLIEF) para medir concentrações de líquido e vapor em um spray em presença de *swirl*. Na técnica PLIEF um traçador, conhecido como *monômero* “M” é dopado no combustível com um aditivo “N”, conhecido como formador do composto *exciplex* “MN”. O composto “MN” é formado pela união de “N” com o estado excitado do “M”. A fluorescência do monômero domina na fase vapor, enquanto que a fluorescência do *exciplex* marca a fase líquida. Utiliza-se 2% vol. *Fluorobenzeno* (FB) como composto “M” e 9% vol. de *Dietilmetilamida* (DEMA) como composto N, diluídos em 89% vol. de *n-Hexano* como combustível. A câmara de experimentação foi preenchida com nitrogênio para reduzir o efeito da desativação colisional da fluorescência (*quenching*). O sistema FB/DEMA/*n-Hexano* foi excitado mediante o quarto harmônico (266 nm) do laser *Nd:YAG*. Os autores mencionam os tipos de filtros passa banda usados na captura do sinal de fluorescência, mas não as faixas de emissão. Para uma

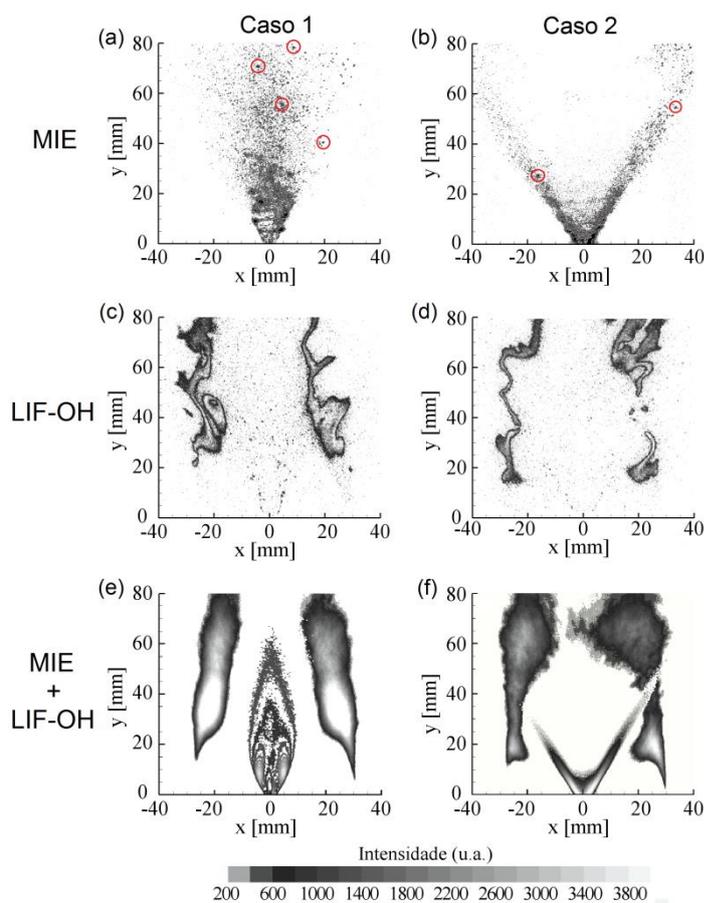
excitação com 266 nm, Duwel et al [18] recomendam utilizar filtros passa banda centrados em 300 nm para o vapor e 335 nm para o líquido.



**Figura 4** Distribuição quantitativa do *n-hexano* medido por LIEF para um injetor swirl de alta pressão. (a) Caso de injeção em condições de pressão e temperatura ambiente, (b) Caso de injeção do *n-hexano* a 313 K em condições de câmara pressurizada e aquecida [17].

O *n-hexano* é injetado a alta pressão e dois casos são estudados [17]. A injeção em condições de pressão e temperatura ambiente e a injeção do combustível a 313 K com a câmara pressurizada e aquecida; os resultados são mostrados nas Figura 4(a) e (b) respetivamente. O spray emerge com um ângulo de 20° com respeito ao eixo vertical do injetor e sua estrutura de cone oco é claramente visível a nas duas primeiras imagens ( $t = 1,0$  e  $1,5 \text{ ms}$ ) da Figura 4(a). Observa-se que a estrutura do spray colapsa mais cedo no segundo caso, devido à maior pressão e temperatura de injeção do *n-hexano*. Também é visível um vórtice toroidal formado na ponta do cone no primeiro caso. Devido ao movimento circular, as gotas são afastadas para a periferia do vórtice toroidal, enquanto que o vapor é transportado para a linha de centro do vórtice, como pode ser mais claramente observado na Figura 4(a). As imagens da fração de vapor mostram regiões em vermelho isto é, fração igual a 1, para o segundo caso. Isto indica zonas com vaporização completa em  $t = 2,5 \text{ ms}$ , as quais não são observadas no primeiro caso, onde o baixo valor da densidade do vapor (nota-se a escala de cor 50 vezes menor) evidencia pouca evaporação.

Egúsquiza [9] estudou a combustão turbulenta de chamas não pré-misturadas de etanol e ar num queimador tipo obstáculo, comparando a distribuição de gotas e visualizando a zona de reação mediante o uso de técnicas de espalhamento Mie e PLIF-OH, respetivamente. Dois casos foram estudados, escoamentos de etanol com  $Re = 3842$  ( $We = 2373$ ) e  $Re = 6340$  ( $We = 6459$ ), com velocidades do ar co-corrente de 8,75 e 8,5 m/s respectivamente.



**Figura 5** Imagens instantâneas do espalhamento Mie e fluorescência do radical OH numa chama spray de etanol. Media das imagens do espalhamento Mie e LIF-OH superposta [9].

As Figura 5(a) e (b) mostram imagens instantâneas do espalhamento Mie para cada caso estudado por Egusquiza [9]. Estas imagens permitem localizar o spray e identificar sua forma de cone oco, cujo ângulo aumenta com a vazão. Os círculos ilustram a existência de algumas gotas de grande diâmetro localizadas a grande distância do injetor. Estas gotas levam mais tempo para evaporar e podem vir a atravessar a zona de reação. As imagens instantâneas da fluorescência do radical OH, mostradas na Figura 5(c) e (d) ilustram como a turbulência deforma,

de maneira considerável, a frente de chama. O autor acredita que a situação do caso 1 corresponde ao regime de elementos de chama, A superfície de chama é descolada  $20\text{ mm}$  acima da superfície do queimador. Uma região de extinção maciça nas imediações de  $y = 40\text{ mm}$ , com incremento de irregularidades na zona de reação, é observada no caso 2. Isto verifica que o aumento na velocidade do ar ocasiona maiores irregularidades na zona de reação. Finalmente, as Figura 5(e) e (f) mostram a superposição das imagens médias do espalhamento Mie e PLIF-OH. Pode-se afirmar que a evaporação é completa antes do processo de combustão no caso 1, pois não se observa interação das gotas com a zona de reação. Ao contrario, no caso 2 é claramente observado como a zona de reação é atravessada pelo spray no lado direito da chama  $x = 20\text{ mm}$  e  $y = 40\text{ mm}$ . Este regime se afasta das situações clássicas de combustão de spray.

### 2.1.2

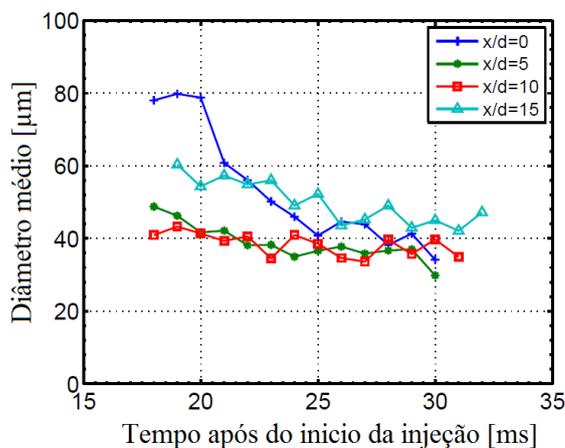
#### Analise do spray mediante a técnica Shadowgraphy

O objetivo desta seção é revisar alguns exemplos de aplicação onde a técnica de “Shadowgraphy” foi utilizada em conjunto com processos de processamento digital de imagens para estudos quantitativos de sprays.

Pfeifer et al. [19] caracterizaram um spray transiente de *Dimetil Eter* (DME) injetado a pressões elevadas numa câmara de combustão pressurizada. O estudo descreve a influência da pressão de injeção sobre a distribuição dos tamanhos e velocidades das gotas. Para isto utilizam a técnica “Shadowgraphy”. Esta técnica é capaz de medir gotas não esféricas, que sempre surgem em sprays polidispersos. Durante os experimentos a câmara é mantida à temperatura e pressão constante de  $300\text{ K}$  e  $2,0\text{ MPa}$ , respectivamente. A câmara é preenchida com nitrogênio, para evitar a geração de uma mistura inflamável durante a injeção de combustível.

A Figura 6 mostra a evolução temporal do diâmetro médio aritmético ( $D_{10}$ ) para as posições  $x/d = 0, 5, 10$  e  $15$  ao longo do eixo do injetor. Nesta figura,  $d$  representa o diâmetro do injetor ( $d = 2\text{ mm}$ ) e a pressão de injeção é  $6,0\text{ MPa}$ . Os resultados mostram que na posição  $x/d = 0$ , um diâmetro médio de  $80\text{ }\mu\text{m}$  é medido  $18\text{ ms}$  após do início da injeção, e o diâmetro cai rapidamente com o tempo. Uma diminuição do diâmetro médio é detectável nas posições

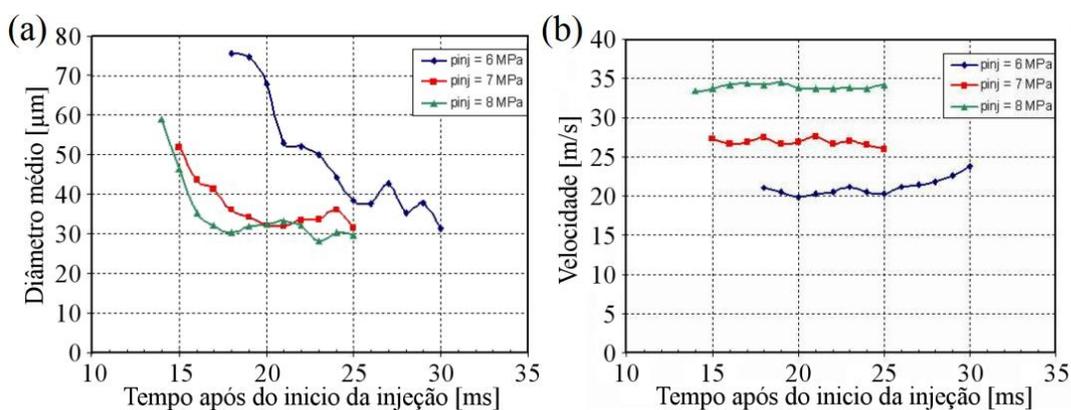
$x/d = 5$  e  $10$ , atribuído à difusão e evaporação das gotas, mas seu valor parece estabilizar-se em  $40 \mu\text{m}$ .



**Figura 6** Evolução do diâmetro médio no tempo após início da injeção, para quatro posições sobre o eixo de pulverização.  $P_{injeção} = 6 \text{ Mpa}$  e  $P_{camará} = 2 \text{ Mpa}$ , diâmetro do bico  $d = 2 \text{ mm}$  [19].

A Figura 6 mostra que na posição  $x/d = 15$  o diâmetro médio volta a crescer. As gotas pequenas evaporam completamente ou têm diâmetro muito pequeno, não detectável pelo sistema de medição. Por outro lado, as gotas de grande diâmetro e que levam mais tempo para evaporar e são mais propensas a serem detectadas. Logo, a sua contribuição para o diâmetro médio é maior quando  $x/d$  aumenta. Gotas menores, que tem menor quantidade de movimento não conseguem alcançar a posição  $x/d = 15$  nos ensaios em alta pressão.

Schneider et al. [20] complementam o trabalho de Pfeifer et al. [19] com medições instantâneas do diâmetro médio e velocidade em diferentes pressões de injeção ( $p_{inj} = 6, 7, 8 \text{ MPa}$ ). Os resultados são mostrados na Figura 7(a) e (b), mas a posição de medição não foi indicada. A diferença dos diâmetros médios entre  $p_{inj} = 6 \text{ MPa}$  e  $7 \text{ MPa}$  é maior do que entre  $p_{inj} = 7 \text{ MPa}$  e  $8 \text{ MPa}$ , muito embora o aumento correspondente da velocidade seja da mesma ordem de grandeza em todos os casos. Note-se que ao aumentar a velocidade cresce a força aerodinâmica, o que se reflete na maior desintegração de grandes gotas e, logo, em uma melhor atomização. Portanto há uma forte dependência do tamanho médio de gota com a pressão de injeção.

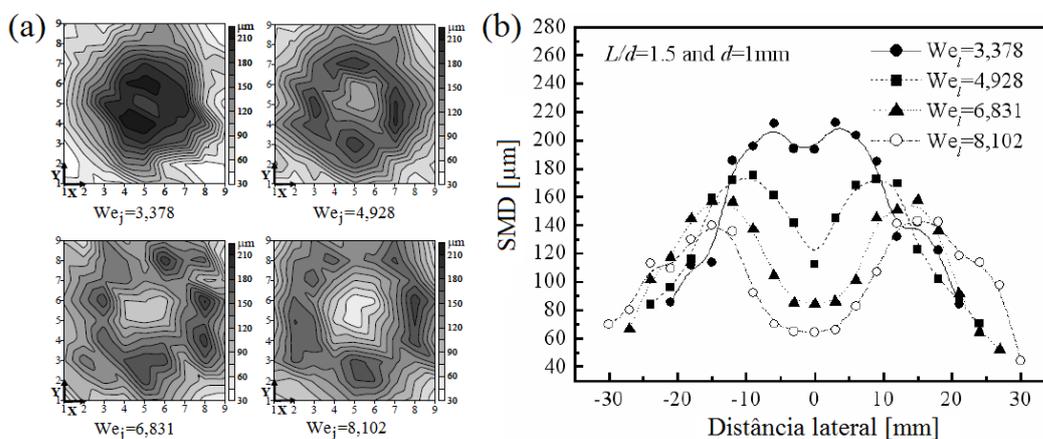


**Figura 7 Evolução temporal: (a) Diâmetro médio, (b) Velocidade das gotas. Três diferentes pressões de injeção  $p_{inj} = 6, 7, 8 \text{ MPa}$  [20].**

Lee et al. [21] estudam a formação de um spray tipo *swirl* na presença de escoamento cruzado. O grau de atomização é caracterizado pelo diâmetro médio SMD ( $D_{32}$ ) para diferentes velocidades de injeção,  $u$ , e sua evolução estudada em função do número de Weber do jato ( $We = \rho u_j^2 d / \sigma$ ). Inicialmente, as características de atomização do spray são medidas na ausência de escoamento cruzado. Água é injetada com números de Reynolds de 3.800 a 25.300 (velocidades de injeção de 15,7 m/s a 25,4 m/s) e a velocidade do ar ambiente é desprezível; o diâmetro de saída do bico é  $d = 1 \text{ mm}$ .

A Figura 8(a) apresenta os contornos do SMD num plano horizontal localizado 4 cm a jusante da saída do bico. A técnica de “Shadowgraphy” foi utilizada para capturar as imagens instantâneas do spray mediante uma câmera CCD com um tempo da exposição de 15 ns, sincronizada com uma iluminação traseira proveniente de um estroboscópio. Para visualizar as gotas com maior resolução, medir seu diâmetro e deslocamento neste curto lapso de tempo; um microscópio de longa distância foi instalado na frente da câmara. Gotas grandes aparecem aglomeradas na vizinhança da folha líquida (zona mais cinza) e seu tamanho diminui conforme se afasta desta região. No caso de  $We = 3.378$  ( $Re \approx 15.700$ ), o movimento centrífugo não é forte o suficiente para vencer a resistência da tensão superficial. As gotas grandes se desintegram em gotas menores devido à maior força centrífuga e pelo incremento do número de Weber. Assim, o cone do spray estende-se para fora, gerando uma distribuição anular do SMD característico de cone oco. Na Figura 8(b) mostra diferentes perfis de SMD na direção radial em função do número de Weber numa mesma posição

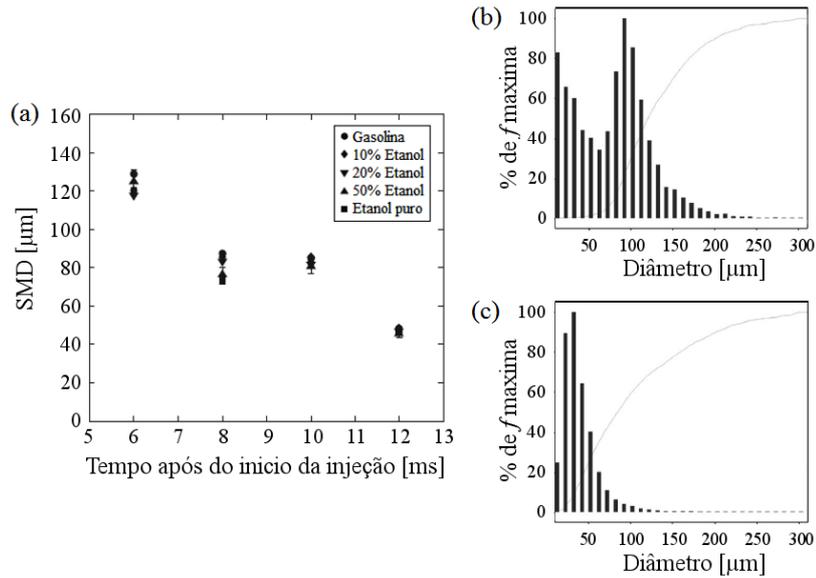
longitudinal. Esta figura mostra que o SMD diminui conforme o número de Weber aumenta, o que significa que os esforços aerodinâmicos vencem a tensão superficial. Durante os experimentos foram coletadas 5.000 amostras de gotas para garantir resultados do SMD com um nível de confiança de 95%.



**Figura 8** Distribuição do diâmetro SMD (a) num plano horizontal 4 cm a jusante do bico, (b) Perfis do diâmetro SMD medidos ao longo de uma linha horizontal central localizada 4 cm a jusante da saída do bico [21].

Anand et al. [22] estudam os efeitos da utilização de misturas de gasolina e etanol sobre as características da atomização de um injetor multi-ponto (PFI-Port Fuel Injector). Os sistemas PFI envolvem baixas pressões de injeção (0,2 MPa a 0,6 MPa) o que dificulta uma atomização satisfatória.

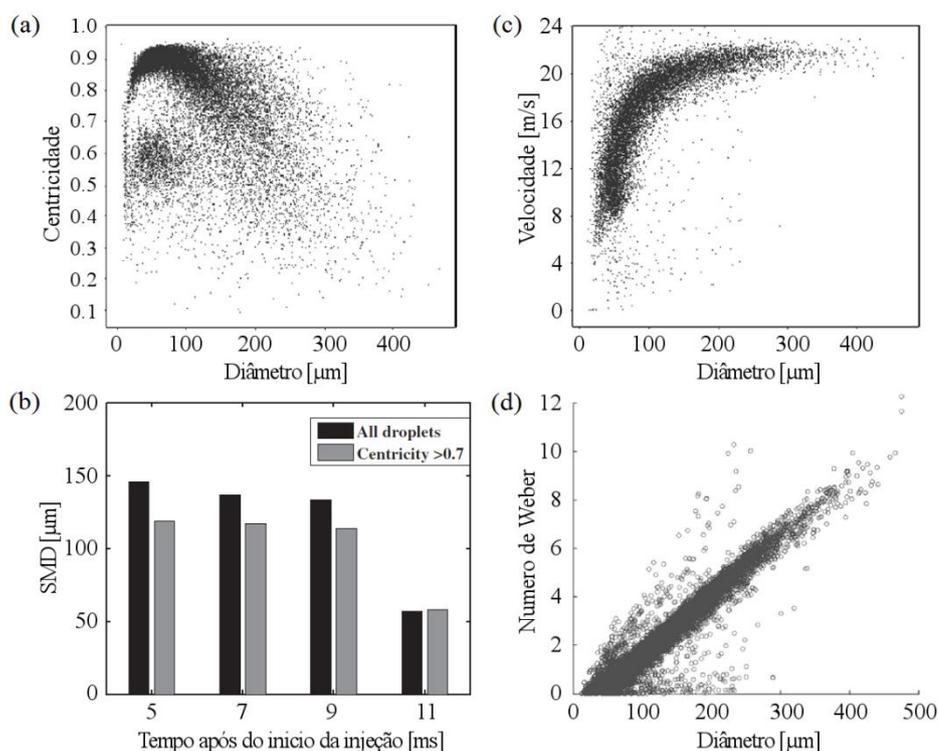
A variação do SMD é mostrada na Figura 9(a) para uma pressão de injeção de 0,6 MPa e um ponto de medição localizado a 100 mm a jusante do injetor. Observa-se um SMD inicialmente alto (120  $\mu\text{m}$ ), pois as grandes gotas entram no volume de medição antes das pequenas, pois conservam a maior parte da quantidade de movimento inicial. A distribuição das gotas para tempos intermediários de  $t = 6 \text{ ms}$  e  $8 \text{ ms}$  é mostrada nas Figura 9(b) e (c) respectivamente. Apesar do maior número de gotas pequenas, sua contribuição no volume total é pequena. O diâmetro médio aritmético ( $D_{10}$ ) cai de 75,4  $\mu\text{m}$  para 36,9  $\mu\text{m}$  entre os dois instantes e o SMD caem para 70  $\mu\text{m}$  em  $t = 8 \text{ ms}$ . Entretanto, o extremo de distribuição de gotas é de cerca de 50  $\mu\text{m}$ , o que mostra que o SMD é mais influenciado pelas gotas grandes do que pelas pequenas.



**Figura 9** Distribuição do tamanho de gota de etanol (a) variação temporal do diâmetro SMD, (b) 6 ms após o início da injeção e (c) 8 ms após o início da injeção. Pressão de injeção de 0,6 MPa e 100 mm acima do bico [22].

Finalmente, apenas etanol é injetado a 0,25 MPa e os resultados são apresentados na Figura 10, para uma posição 50 mm a jusante do injetor. A Figura 10(a) apresenta a dispersão da centricidade de gotas “c”,  $c = d'/d''$ , onde  $d'$  é o diâmetro menor e  $d''$  o diâmetro maior da gota. Esta figura revela a existência de um número muito elevado de gotas grandes não esféricas. Estas gotas poderiam ser incorretamente medidas no caso de utilizar técnicas laser convencionais, as quais assumem a existência de gotas perfeitamente esféricas somente. A influência da correta descrição da centricidade é evidente quando se consideram apenas as gotas com  $c \geq 0,7$  no cálculo do SMD. A Figura 10(b) mostra que o erro incorrido no SMD pode alcançar 20% quando se ignoram as gotas com centricidade menor que 0,7. A Figura 10(c) permite verificar que são as gotas maiores as que têm maior velocidade; uma velocidade máxima de 24 m/s é medida para as gotas grandes e velocidades de no mínimo 5 m/s foram obtidas para as pequenas. Com o valor de diâmetro e velocidade das gotas é possível calcular o número de Weber de cada gota ( $We_g = \rho \cdot u_g \cdot SMD^2 / \sigma$ ); o qual é mostrado na Figura 10(d). Observa-se que o valor de  $We_g$  está situado numa banda estreita para cada diâmetro, indicando que as gotas de um mesmo diâmetro têm velocidade semelhante. Um valor de  $We_g$  inferior a 10 é observado para a

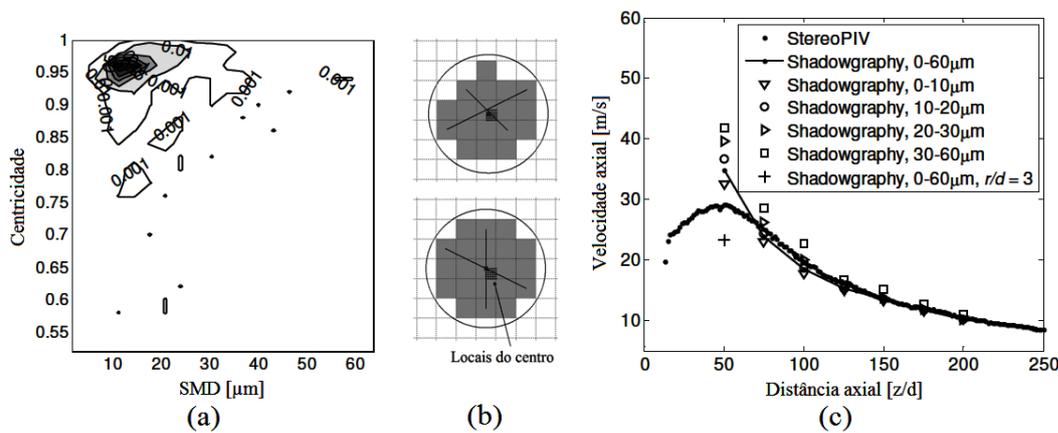
maioria das gotas. Segundo Guildenbecher et al. [23] quando  $We_g < 11$  o mecanismo de atomização secundária predominante é o rompimento vibracional, que produz apenas fragmentos da mesma ordem que o fragmento original. Os autores concluem que a identificação de gotas não esféricas num spray aumenta a exatidão na medição do diâmetro SMD.



**Figura 10** Estudo de um spray transiente PFI (a) Centricidade das gotas, (b) Diferença entre o valor do SMD quando todas as gotas e só as gotas com centricidade  $c > 0,7$ , (c) Velocidade das gotas, (d) Número de Weber das gotas.  $P_{inj} = 0,25 \text{ MPa}$ , a  $50 \text{ mm}$  acima do bico e  $5 \text{ ms}$  após do início da injeção [22].

Procedimentos de identificação e caracterização de gotas são necessários em técnicas baseadas na análise digital de imagens de gotas. Nestas técnicas as limitações e erros associados devem ser devidamente caracterizados. Ghaemi et al. [24] mostram que, para gotas pequenas, erros na identificação e valor da centricidade podem ser ocasionados pela discretização incorreta das imagens digitais. Foi estudado um spray efervescente de água e ar com vazões de  $70 \text{ l/min}$  e  $5 \text{ ml/min}$  respectivamente, e condições de temperatura e pressão padrão de  $25^\circ \text{C}$  e  $1 \text{ atm}$ . A Figura 11(a) mostra a função densidade de probabilidade (PDF) da centricidade para  $z = 40 \text{ mm}$  a jusante do bico, no eixo do spray. Para

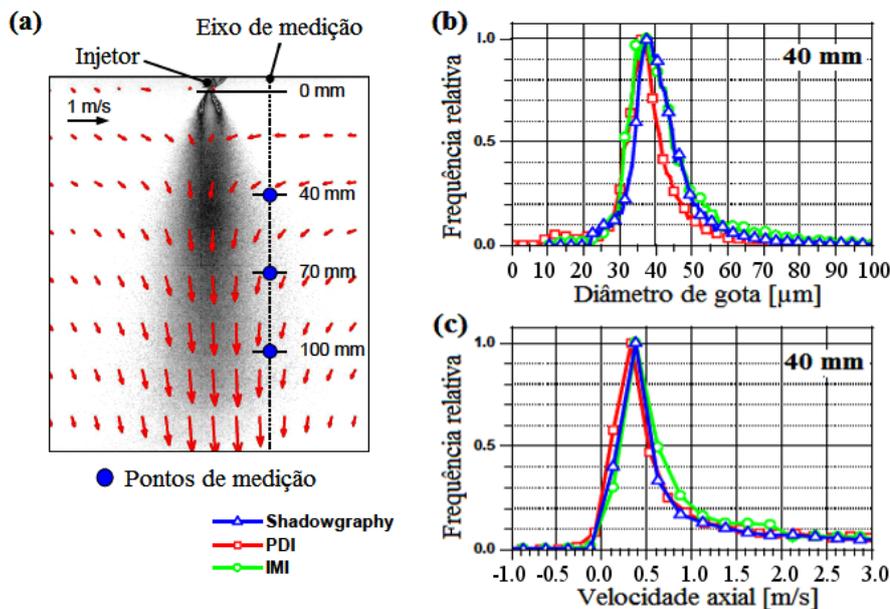
gotas menores do que  $20 \mu\text{m}$ , a máxima centricidade é menor do que no caso de gotas grandes. Este resultado é contrário ao esperado, pois gotas pequenas deveriam ser mais propensas a ter uma forma esférica, devido ao predomínio da força de tensão superficial sobre as forças de inércia. A Figura 11(b) ilustra duas imagens simuladas de gotas pequenas (em círculo) com diferente localização na matriz CCD da câmara, levando a diferentes formas de imagem devido a que apenas são considerados os pixels totalmente ocupados. A discretização da gota pode ocasionar a medição de eixos com diferentes comprimentos, levando a erros na medição de diâmetros e centricidades. O erro se incrementa com a diminuição do número de pixels que formam a imagem da gota, sendo necessário determinar a quantidade mínima de pixels para garantir uma exatidão adequada.



**Figura 11** Estudo de um spray efervescente de água. (a) PDF da centricidade de gota a  $z = 40 \text{ mm}$  (b) Discretização de imagens de gotas por um sensor CCD (c) Comparação da velocidade axial medida por Estéreo PIV e “Shadowgraphy” no eixo de simetria.  $d = 0,8 \text{ mm}$  [24].

A Figura 11(c) compara os resultados de velocidade axial obtida por “Shadowgraphy” e por estéreo PIV das gotas no eixo de simetria do spray. A técnica estéreo PIV subestima a velocidade média em todos os intervalos de diâmetro até  $z/d < 50$ . Nesta região o spray é mais denso e a velocidade cai rapidamente na direção radial. A espessura do plano laser no estéreo PIV ( $5 \text{ mm}$ ) faz com que (i) sejam registradas gotas fora do eixo de simetria e (ii) a velocidade axial seja subestimada, devido à contribuição dessas gotas no cálculo da velocidade média. Isto não ocorre para “Shadowgraphy”, pois a profundidade do campo é de apenas  $50 \mu\text{m}$ .

Berg et al. [25] apresentam um estudo comparativo das técnicas utilizadas na medição simultânea dos diâmetros de gota e suas velocidades num spray de água em regime permanente. Anemometria por Fase Doppler (PDA), Imagens por interferometria Mie (IMI) e Análise de imagens magnificadas de gotas por iluminação traseira (“Shadowgraphy”) foram empregadas. O campo de visão de IMI e “Shadowgraphy” foi  $6 \times 6 \text{ mm}^2$  e  $3 \times 2 \text{ mm}^2$  respectivamente. Na Figura 12(a) é mostrada a forma do jato obtida pela média de imagens de espalhamento Mie sobrepostas ao campo de velocidades obtido mediante PIV das gotas. Os resultados, para o ponto  $40 \text{ mm}$  são apresentados na Figura 12(b) e (c). Na Figura 12(b) pode ser vista a distribuição do diâmetro de gota, percebe-se que a máxima frequência foi independente da técnica utilizada. No entanto, discrepâncias são observadas para diâmetros pequenos e grandes, particularmente no intervalo de  $10 \text{ }\mu\text{m}$  a  $20 \text{ }\mu\text{m}$ .



**Figura 12** Estudo de um spray de água. (a) Espalhamento Mie do spray sobreposto ao campo de velocidade. Medidas realizadas no ponto  $40 \text{ mm}$  do injetor (b) Distribuição do diâmetro de gotas e (c) Distribuição de velocidade. Pressão de injeção de  $6 \text{ bar}$  [25].

Para PDA o spray exibe distribuição bimodal com um extremo local em  $11 \text{ }\mu\text{m}$ . IMI e Shadow não capturam este fenômeno devido a suas configurações ópticas, otimizadas para diâmetros maiores a  $20 \text{ }\mu\text{m}$ . O limite de resolução é  $10 \text{ }\mu\text{m}$  para estas técnicas, o qual é atribuído à ausência de modulação de frequências (IMI) e a influência do ruído de fundo (“Shadowgraphy”). A técnica

“Shadowgraphy” é menos sensível a gotas pequenas, mas tem a vantagem de não depender do índice de refração do líquido, necessário para PDA e IMI. A distribuição da velocidade axial, mostrada na Figura 12(c) é bem representada por todas as técnicas. Finalmente, os autores consideram que a “Shadowgraphy” é a mais adequada para estudos de gotas e medição de velocidade em sprays muito densos, seguido pela PDA e do método de IMI.

## 2.2 Considerações finais

A presente revisão bibliográfica permite identificar as principais técnicas de diagnóstico laser que podem ser implementadas no Laboratório de Combustão e Turbulência do Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

A fluorescência de um traçador vem sendo utilizada para a medição de propriedades físicas, tais como concentração e temperatura, embora grandes dificuldades sejam encontradas na sua aplicação. Idealmente a fluorescência do traçador deveria ser linearmente dependente da propriedade a ser medida e ter propriedades parecidas às do combustível. Em particular o traçador escolhido deve ter pressão de vapor semelhante à do combustível, para acompanhar o processo de evaporação e propiciar uma medida da real distribuição do diâmetro.

A técnica LIEF permite visualizar a distribuição das fases líquida e vapor, mas seu uso é limitado a poucos combustíveis dos quais o etanol não faz parte. Injetar etanol preaquecido aumenta a taxa de vaporização e diminui a presença da fase líquida, o que viabiliza o uso da técnica LIF-Traçador. Altos valores de temperaturas de injeção resultam no colapso da estrutura do spray de etanol.

O incremento da velocidade de injeção ocasiona ruptura das zonas de reação (LIF-OH) devido à penetração de gotas na chama. Este é um fenômeno pouco estudado.

As medições da distribuição de diâmetros de gotas em regiões densas e perto da saída do injetor são possíveis mediante a aplicação da técnica de “Shadowgraphy”. Nesta região ocorre a desintegração do filme líquido leva a formação de gotas não esféricas, que dificulta o uso de técnicas baseadas no espalhamento da luz, como PDA e IMI. Note-se que o erro incorrido em considerar apenas gotas esféricas pode ser da ordem de 20%. Diversos estudos confirmam a presença de grandes gotas nas regiões afastadas do atomizador, as

quais levam mais tempo para evaporar e podem atravessar o frente de chama. No que diz respeito ao cálculo de incertezas da técnica “Shadowgraphy”, um maior cuidado deve ser tomado na análise de gotas com diâmetros inferiores a 20  $\mu\text{m}$ , devido à discretização intrínseca das câmeras CCD.

Como será mostrado no capítulo seguinte, o presente trabalho utilizará algumas técnicas de diagnóstico laser discutidas neste capítulo.