

3 Metodologia Experimental

Nas últimas décadas, as técnicas de diagnóstico laser tornaram-se as mais importantes ferramentas de estudo dos processos de combustão. Devido à sua seletividade, aliada à alta resolução espacial ($\sim 10 - 50 \mu m$) e temporal ($< 10 ns$) [26], estas técnicas possibilitam obter distribuições locais de temperatura e espécies químicas. Elas possuem a vantagem de não precisar a introdução de sondas e sensores que podem interferir na dinâmica de fluidos ou na reação química.

Realizar medições em combustão apresenta grandes desafios, pois o interior da chama é uma zona de condições extremas: altas temperaturas, reações químicas rápidas, que envolvem centenas de espécies intermediárias, fortes gradientes em escoamentos altamente turbulentos e interação entre estes fenômenos.

Neste capítulo serão apresentadas, de forma sucinta, a instalação experimental, o embasamento teórico das técnicas laser aplicadas e a metodologia desenvolvida.

3.1 Queimador tipo Obstáculo (bluff-body)

Os experimentos foram realizados num queimador tipo obstáculo “bluff-body”, devido a suas vantagens e para dar continuidade ao estudo feito por Egusquiza [9] no laboratório de combustão e turbulência da PUC-Rio. As chamas obtidas neste tipo de queimador apresentam escoamentos complexos envolvendo zonas de recirculação, semelhantes às encontradas nos combustores práticos. Neste queimador, as chamas podem ser estabilizadas e estudadas sem as complicações de radiação térmica [27]. A configuração geométrica simples do queimador facilita a montagem experimental e permite isolar os fenômenos de interesse. Os resultados também podem ser facilmente utilizados para validar modelos computacionais. A configuração geométrica envolve um escoamento de

ar controlado, onde a interação entre o processo químico e a turbulência pode ser estudada [28] em diversos regimes de combustão.

As dimensões e características geométricas do queimador podem ser observadas na Figura 13. O tubo central de 60 mm de diâmetro é comumente conhecido como corpo rígido ou *obstáculo* e aloja o bico atomizador na parte superior. Um tubo exterior concêntrico de 200 mm de diâmetro gera uma secção anular que serve como duto para o escoamento do ar. Este tipo de configuração cria regiões de recirculação na face do obstáculo, região esta onde se forma o spray, ancora e estabiliza a chama.

Um resultado recorrente em trabalhos anteriores foi a assimetria do campo de velocidades do escoamento de ar na saída do queimador [8,9,10,11]. Para superar esta dificuldade os obstáculos no duto de ar foram aprimorados mediante a instalação de perfis aerodinâmicos sobre os raios do anel de fixação, que serve de sustento ao obstáculo. O efeito desta pequena modificação, e o uso de uma placa geradora de turbulência (grade circular com furos de 12 mm localizada 100 cm a montante da saída do bico) lograram uniformizar o escoamento de ar na saída do queimador, como será demonstrado mais adiante.

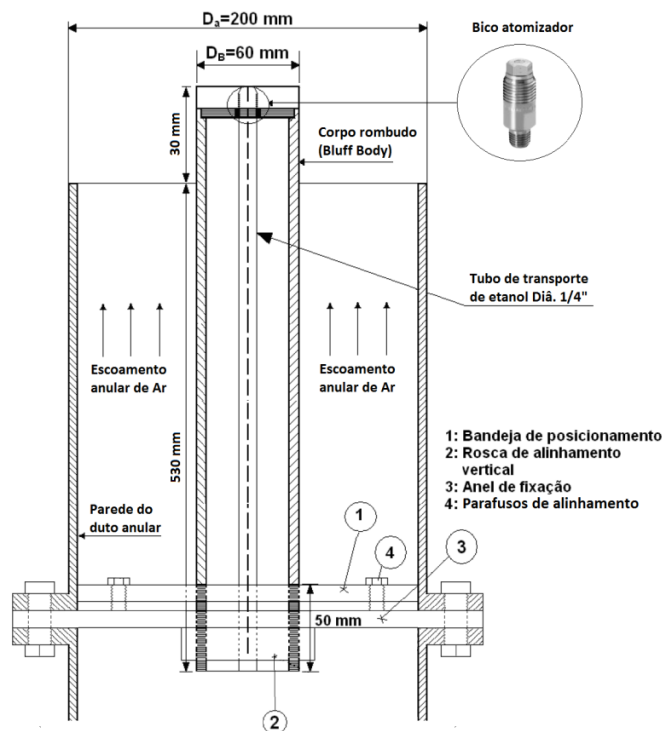


Figura 13 Corte transversal do queimador mostrando suas principais características.

3.2 Sistema de alimentação de ar e combustível

A Figura 14 mostra uma visão esquemática do sistema de alimentação de ar e combustível ao queimador. O escoamento de ar é fornecido com ajuda de um ventilador centrífugo de $32,8 \text{ m}^3/\text{min}$ de vazão nominal. A vazão é controlada mediante um inversor de frequência que faz variar a velocidade de rotação. Isto permite uma faixa de velocidades entre $1,0 - 14 \text{ m/s}$ na saída do duto anular queimador [11].

A alimentação de combustível começa no tanque de armazenamento de combustível de 10 l de capacidade e $5,0 \text{ bar}$ de pressão máxima de projeto. Nitrogênio engarrafado é injetado no tanque gerando sua pressurização. A saída de combustível é controlada com ajuda de uma válvula reguladora de pressão. O escoamento de combustível induzido pela pressurização do tanque é conduzido para o queimador por uma linha de aço inox de $1/4 \text{ ''}$. A válvula reguladora na saída do tanque permite fornecer uma pressão de injeção constante no atomizador. Cabe ressaltar que os valores máximos de pressão de injeção são limitados pelo tanque de armazenamento e pelas quedas de pressão. O sistema empregado permite utilizar vários tipos de combustíveis, controlando sua pressão de injeção e fornecendo uma alimentação contínua.

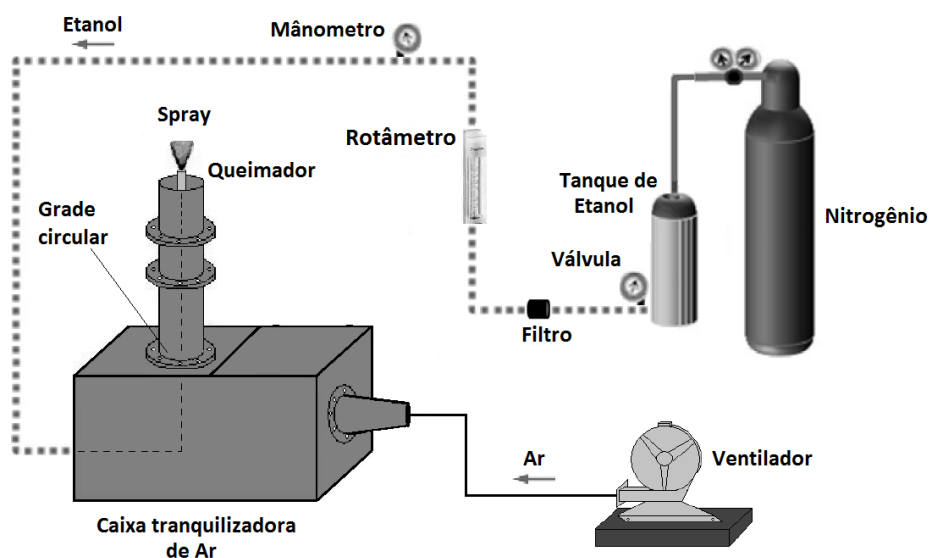


Figura 14 Sistema de alimentação de combustível e ar.

3.2.1 Bico atomizador de combustível

Na atomização de combustíveis sempre é buscada uma distribuição fina de gotas, com a finalidade de obter a maior área global por volume de líquido, favorecendo a rápida evaporação e a mistura eficiente com o oxidante. A atomização de etanol foi realizada com um bico atomizador de pulverização fina, com diâmetro de orifício de $d \approx 0,5 \text{ mm}$, e que trabalha só utilizando a pressão de injeção do líquido para gerar um spray permanente de geometria de cone oco, segundo mostra a Figura 15. O atomizador empregado é do tipo LNND-SS-1.5-1/4 da empresa Spray Systems Co [29], projetado para água e com as características de trabalho mostradas na Tabela 1. Todos os experimentos foram realizados a uma pressão de operação inferior a $4,0 \text{ bar}$. Isto limitou em grande medida o desempenho do bico injetor, em termos da distribuição de diâmetros de gota gerada.

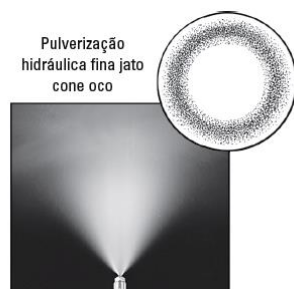


Figura 15 Morfologia de cone oco do spray utilizado [29].

Tabela 1 Características nominais do spray resultante utilizando água [29].

Capacidade	Diâmetro Equiv. (mm)	Vazão (litros por hora)*				Ângulo (°)*	
		2	3	4	7	3	6
1.5	.51	4.8	5.9	6.8	9.0	65	70

*Pressão expressa em bar.

3.2.2 Propriedades do combustível empregado

Os experimentos foram realizados utilizando como combustível o álcool etílico hidratado também conhecido como etanol hidratado de 92,8 INPN (96° GL). Esta escolha foi motivada pela facilidade de obtenção e por suas

propriedades semelhantes à do etanol hidratado combustível (EHC) utilizado no transporte veicular [30]. A Tabela 2 apresenta as principais propriedades físicas do combustível.

Tabela 2 Propriedades do etanol hidratado [31,32].

Etanol Hidratado 92,8 INPN	
Formula química	$C_2H_5OH - H_2O$
Peso molecular	46,07 u. m. a
Densidade	0,808 g/cm ³ a 293,15 °C
Relação estequiométrica A/C	8,3:1
Ponto de ebulição	351,45 K
Viscosidade dinâmica	1,22 mPa · s a 293,15 °C
Tensão superficial	22,3 mN/m a 293,15 °C
Poder calorífico inferior	26,72 MJ/kg

3.3 Fluorescência induzida por plano laser (PLIF)

3.3.1 Fundamentos da técnica

A fluorescência induzida por laser (LIF) é a emissão espontânea de radiação por átomos e moléculas excitadas por radiação laser. Trata-se de uma técnica altamente sensível, que pode ser utilizada para estudar a distribuição de espécies químicas intermediárias do processo de combustão (Tabela 3), inclusive em concentrações inferiores a ppm. Também pode ser empregada para medir campos de temperatura e frente de chama. A técnica de fluorescência induzida por plano laser (PLIF) consiste em aplicar o fenômeno de fluorescência induzida por laser (LIF) em um plano. O processo de fluorescência é governado por três eventos principais, que ocorrem em escalas de tempo distintas. A Figura 16 mostra os diagramas de níveis de energia e resume os principais processos que acontecem na fluorescência [34]. A excitação (10^{-15} s) ocorre quando um fóton com energia adequada (diferença de energia entre o orbital fundamental e o orbital excitado) é absorvido por um elétron e, subsequentemente passa para um orbital de maior energia e com o mesmo spin. Pode acontecer rapidamente o relaxamento vibracional dos elétrons do estado excitado para o menor nível de energia

($10^{-12}s$). O processo de fluorescência, ou emissão de fótons num comprimento de onda maior e com retorno da molécula para o estado fundamental, ocorre durante um período de tempo relativamente longo ($10^{-9}s$) chamado tempo de vida de fluorescência [33], o qual é tão curto quanto um pulso de laser.

Tabela 3 Espécies químicas frequentemente usadas em aplicações de LIF para avaliar características das chamas [35].

Espécies químicas	Aplicação
$CH, C_2, HCO, CN, OH, O, H$	Frente de Chama (Zona de reação)
$CO, C_2H_2, CH, CH_2O, O_2, NO_2$	Decomposição do combustível e zona de pré-reação
OH, CO	Zonas de pós-reação e gás queimado
NO, OH	Temperatura

Durante a interação que leva à fluorescência, também acontecem outros fenômenos como a transferência de energia vibracional (TEV), a transferência de energia rotacional (TER) e a supressão eletrônica colisional (*quenching*). Esta ultima é a desativação da excitação de elétrons sem a emissão de fótons. O efeito “quenching” é principalmente influenciado pelo aumento da pressão, temperatura e pela interação entre o composto fluorescente e outras espécies presente no sistema [36], tais como o oxigênio.

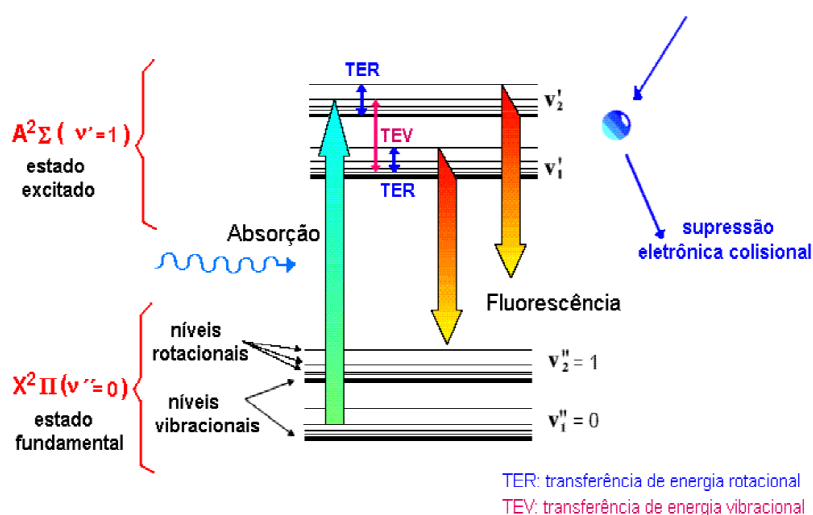


Figura 16 Diagrama de níveis de energia para um processo de fluorescência induzida [34].

Devido ao fato que cada molécula apresenta um espectro próprio de absorção e emissão, a LIF é uma técnica seletiva, com respeito à espécie química excitada. No entanto, um conhecimento detalhado dos espectros de absorção e de emissão em comprimentos de onda acessíveis por laser representa um pré-requisito para a excitação e detecção de uma determinada espécie química [37], ou radical.

O sinal de fluorescência relacionada a um estado energético com energia $E(v'', j'')$ e determinado por:

$$S_F = c(\Omega/4\pi) \cdot \alpha_i \cdot n(T, p) \cdot f_{v'', j''}(T) \cdot E_l \{A/(A + Q(n_i, T) + P)\}, \quad (3.1)$$

onde S_F é a sinal de fluorescência, c é uma constante, Ω é o ângulo sólido, α_i é a fração molar das espécies n_i , $n(T, p) = p/k_B T$ é a densidade total à pressão p e temperatura T , k_B é a constante de Boltzmann, $f_{v'', j''}(T)$ é a fração de Boltzmann para o estado fundamental (rotacional-vibracional) com os números quânticos v'' e j'' , E_l é a energia do laser por unidade da área e $\{A/(A + Q(n_i, T) + P)\}$ é o fator Stern-Volmer (campo de taxa de fluorescência). Nesta expressão A é o coeficiente de Einstein para a emissão espontânea, Q é a taxa de extinção por colisões e P é a taxa de dissociação [38].

Pelo exposto acima, a técnica LIF permite determinar de forma individual o comportamento de reagentes, ou espécies intermediárias envolvidos na combustão turbulenta. A Tabela 3 apresenta as principais espécies químicas que podem ser utilizadas para avaliar as diversas regiões em chamas. Também é possível estudar o processo de mistura dos reagentes que tem propriedades fluorescentes ou não, caso em que dopagem com substâncias fluorescentes, como acetona, é empregada.

Para elevadas temperaturas dentro da chama, H , O , OH , e H_2O encontram-se num estado de quase equilíbrio, então, a fluorescência de radicais como OH nem sempre diz muito sobre a cinética química, servindo apenas de traçador da frente de chama [39]. Isto é possível, pois OH é abundantemente formado na frente de chama e ainda encontra-se presente em chamas pré-misturadas na região pós chama [40]. No caso da validação de modelos numéricos, a comparação com a medição do OH pode ser empregada, pois qualquer desacordo com suas predições evidenciam problemas com o modelo, ou mesmo com o experimento [39].

Cabe lembrar que este trabalho tem por objetivo estudar as estruturas da frente de chama num spray de etanol utilizando a fluorescência do radical OH . Os resultados de luminescência obtidos não podem ser diretamente relacionados à concentração deste radical, devido ao processo de “quenching”. Para este fim seria necessário calibrar o sistema de detecção da intensidade de fluorescência com um tipo de chama conhecida e bem caracterizada.

3.3.2 Sistema de medição de PLIF

A Figura 17 mostra os principais componentes do sistema PLIF empregado. Um laser de bombeio $Nd:YAG$ modelo *Brilliant b* fornece um feixe laser de alta energia, com uma potência máxima de $2,5 W$ no comprimento fundamental de $1064 nm$. Este tipo de laser possui uma duração típica de pulso de $6 ns$ e uma taxa de repetição máxima de $10 Hz$. O comprimento de onda é reduzido para $355 nm$ mediante seu segundo e terceiro harmônico, com a consequente perda de energia. Um obturador eletrônico controlado pelo computador via *trigger* permite abrir ou fechar a saída do feixe, garantindo uma operação segura [41].

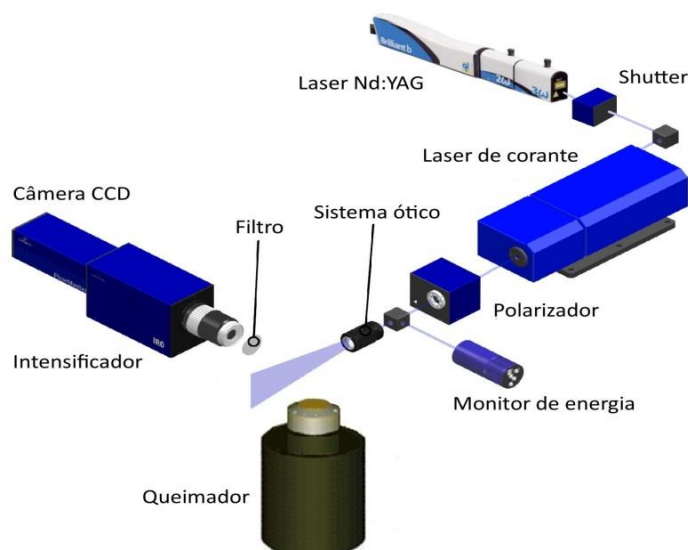


Figura 17 Componentes principais da montagem experimental de PLIF. Adaptado de [38].

Como a excitação do radical OH tem que ser feita em comprimentos de onda específicos e o laser $Nd:YAG$ fornece um feixe com comprimento de onda fixo, mas não controlável, é necessário empregar um laser de *corante* a fim de

sintonizar o comprimento de onda. O laser de corante utiliza a energia de excitação do laser de bombeio *Nd:YAG* para excitar a fluorescência de moléculas orgânicas complexas (*corante*) diluídas num solvente. A mistura assim obtida possui um grande número de transições vibracionais e rotacionais em comprimentos de onda vizinhos, com níveis de energia ampliados devido às colisões e interações entre moléculas adjacentes, o que forma uma série contínua de estados de energia. Isto permite que a emissão seja continuamente sintonizada ao longo de um amplo intervalo de comprimentos de onda [42]. Um problema relacionado ao laser de corante é o tempo de vida de seu estado superior, que é muito curto, assim, a potência de excitação tem de ser elevada a fim de que conseguir uma população suficientemente grande no estado superior de energia.

O corante orgânico *Coumarin 153*, diluído em etanol, foi empregado no laser de corante. A Figura 18 mostra seu espectro de emissão para um comprimento de excitação de 355 nm, o qual foi utilizado.

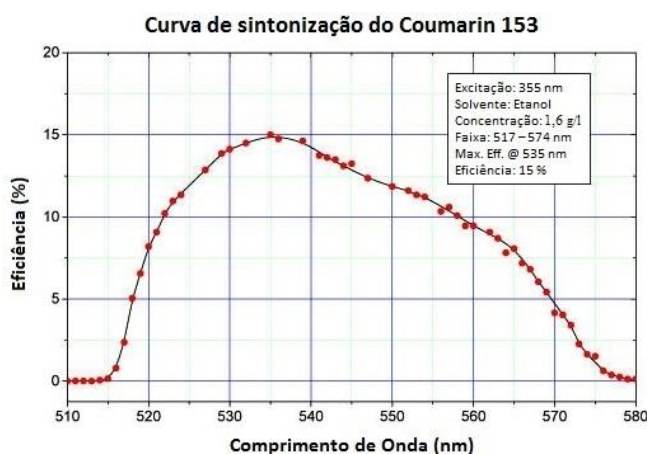


Figura 18 Espectro de emissão do corante *Coumarin 153* diluído em etanol, para uma excitação de 355 nm.

Assim, é possível escolher qualquer comprimento de entre 517 nm e 574 nm, sendo que a eficiência máxima, de 15 %, é alcançada para 535 nm. Como o laser de bombeio fornece 260 mJ (a 10 Hz e 355 nm), é de esperar que a máxima energia emitida na saída do laser de corante seja de 40 mJ. O comprimento selecionado para excitar o radical *OH* foi de 283,5 nm, portanto, utiliza-se um cristal ótico não linear *BBO* posicionado na saída do laser de corante a fim de dobrar a frequência da fluorescência do corante. Como pode ser visto na

Figura 18, a eficiência a 566 nm (dobro de 283,5 nm) é da ordem de 7 %, o que leva a uma energia máxima por pulso da ordem de 20 *mJ*.

3.4 Velocimetria por imagens de partículas (PIV)

A velocimetria por imagens de partículas é uma técnica óptica amplamente utilizada para medir campos instantâneos de velocidade em regiões extensas do escoamento. Esta técnica é baseada na medição do deslocamento de partículas traçadoras, dispersas no fluido, durante um curto intervalo de tempo [43]. Sua boa resolução espacial e temporal permite que seja empregada em escoamentos turbulentos. Uma ilustração do sistema PIV é mostrada na Figura 19.

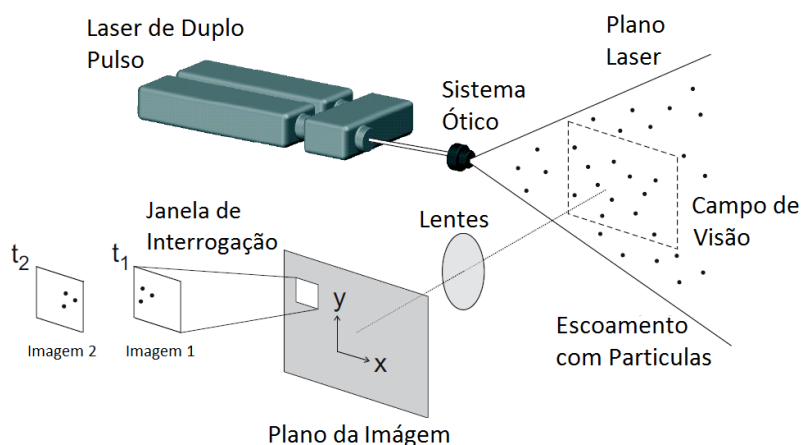


Figura 19 Esquema experimental do PIV [44].

Um laser *Nd:YAG* de duplo pulso modelo *CFR 200* com 200 *mJ* de energia a 15 *Hz* gera um plano de luz no comprimento de 532 *nm*. Este plano é utilizado para iluminar as partículas traçadoras do escoamento. A luz espalhada pelas partículas é gravada em duas imagens sucessivas por uma câmara CCD sincronizada com o laser. Os dois pulsos laser devem ter duração suficientemente curta, quando comparada com as menores escalas de tempo características do escoamento; de modo que as imagens das partículas possam ser assumidas como instantâneas. A análise da velocidade consiste em dividir cada imagem em uma malha de subáreas menores, chamadas janelas de interrogação, e calcular os vetores velocidades como a razão entre o deslocamento de conjunto de partículas e lapso de tempo entre os pulsos laser. Esta técnica foi empregada nos estudos de [10,11], onde maiores detalhes podem ser encontrados.

3.4.1

Velocímetria por imagens estereoscópicas de partículas (PIV estéreo)

A velocímetria clássica por imagem de partículas (PIV) emprega uma só câmara para capturar as imagens das partículas, então, só é capaz de fornecer a projeção do vetor velocidade no plano de medição, e logo apenas três componentes do tensor de Reynolds. Isto pode levar a erros de interpretação em escoamentos tridimensionais [45]. Para superar esta limitação, uma solução simples é a utilização de uma câmara de medição adicional, focada no plano de medição, mas com uma direção de observação diferente da primeira. Utilizando-se o mesmo princípio estereoscópico do olho humano, reconstrói-se a terceira componente de velocidade (PIV estéreo). Os principais componentes do sistema PIV estéreo são mostrados na Figura 20(a). Com este arranjo os três componentes do vetor deslocamento podem ser reconstruídos a partir dos deslocamentos observados pelas duas câmeras.

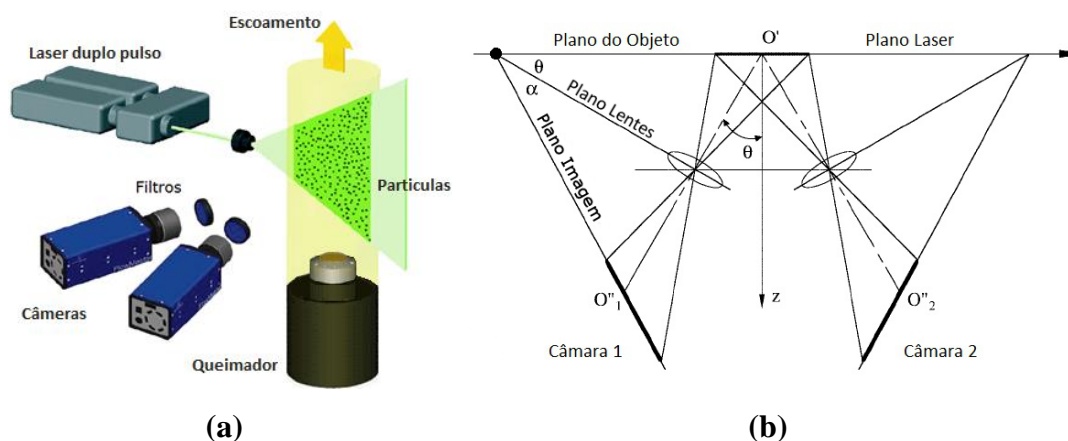


Figura 20 Arranjo PIV estereoscópico (a) Principais componentes do sistema, (b) Deslocamento angular das câmeras. Adaptado de [44,46].

A Figura 20(b) mostra a disposição de câmeras, conhecida como *deslocamento angular das lentes*, empregada neste estudo, a qual permite maiores ângulos de visão melhorando a exatidão no cálculo da terceira componente de velocidade [46]. O inconveniente desta solução é que o fator de magnificação da imagem não é mais constante, ocasionando uma deformação na perspectiva da imagem e variando a resolução sobre o domínio da imagem [47]. Para evitar isto, e tal como mostrado na Figura 20(b), o plano da lente deve ser inclinando com respeito à orientação da imagem da câmara, de modo a ambos os planos

intersectem a folha de luz numa mesma linha, assegurando que as imagens das partículas estejam focadas, e tal como mostrado no diagrama da Figura 20(b). Esta configuração é conhecida como *scheimpflug*. Entretanto, a não uniformidade do fator de magnificação é acrescida, o que torna ainda mais necessária uma calibração do campo de visão.

Para obter a componente de velocidade perpendicular ao plano de medição uma reconstrução dos deslocamentos das partículas nas duas imagens capturadas deve ser feita. A geometria de visualização de PIV estéreo para um arranjo não simétrico de câmaras é apresentada na figura 21(a) e por simplicidade são mostradas apenas as componentes x e z da velocidade \vec{V} . A componente u da velocidade \vec{V} no plano de medição é visto como os vetores u_1 e u_2 pelas câmaras 1 e 2, orientadas com ângulos α_1 e α_2 respectivamente. Os ângulos β_1 e β_2 correspondem as orientações no plano YZ . As componentes das velocidades podem ser calculadas como [45]:

$$u = \frac{u_1 \tan \alpha_2 + u_2 \tan \alpha_1}{\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2} ; \quad v = \frac{v_1 \tan \beta_2 + v_2 \tan \beta_1}{\tan \beta_1 + \tan \beta_2}$$

$$w = \frac{u_1 - u_2}{\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2} . \tag{3.2}$$

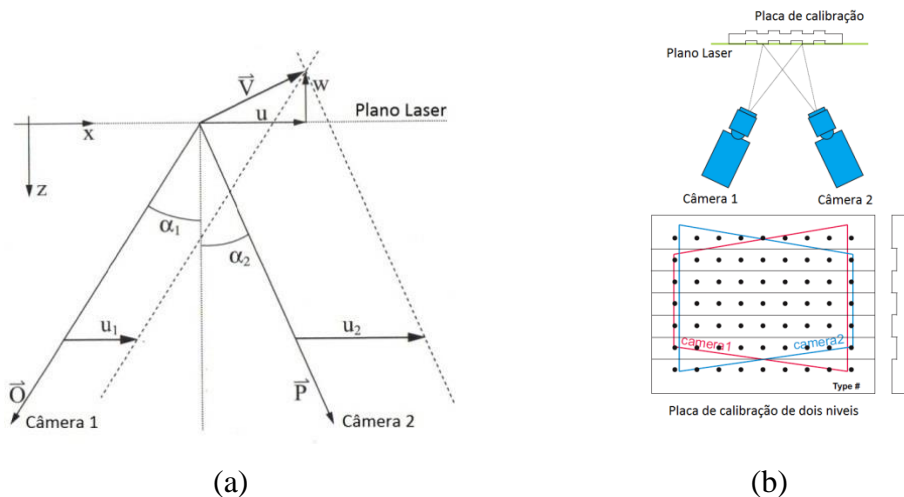


Figura 21 Arranjo PIV estereoscópico (a) Geometria de visualização no plano superior, (b) Calibração das câmaras. Adaptado de [45,44].

Apesar do estéreo PIV ser amplamente usado, a componente de velocidade perpendicular ao plano de medição é inerentemente menos exata que as

componentes no plano [48], pois ela depende do ângulo entre as câmeras e carregar as incertezas combinadas das duas outras componentes.

A calibração dimensional do campo de visão das câmeras é indispensável para obter bons resultados. O software *FlowMaster – DaVis* da *LaVision* emprega um método de calibração que não requer a medição direta dos ângulos das câmaras nem das distâncias das lentes até o plano de medição. A placa de calibração mostrada na figura 21(b) deve ser posicionada no campo de medição e alinhada com o plano laser, a fim de evitar erros dimensionais. Uma média de dez imagens desta placa de medição é obtida e tratada com um algoritmo que reconhece os pontos nela impressos, permitindo a correção da deformação angular da imagem e a calibração dimensional.

O mesmo procedimento de calibração é feito simultaneamente para a câmara ICCD nos experimentos de PLIF, pois as duas técnicas são utilizadas de modo combinado.

3.4.2 Análise das imagens de partículas

Os pares de imagens captados pelas câmaras representam a posição das partículas traçadoras no escoamento e a medição de seu deslocamento permite calcular sua velocidade entre o tempo t e $t + \Delta t$. As imagens das partículas não permitem, por inspeção visual determinar diretamente o deslocamento da mesma partícula nas duas imagens [45]. Para este fim, é necessário empregar uma técnica de processamento digital de imagens.

A imagem é subdividida em pequenas parcelas, que agrupam um determinado número de pixels, chamadas de janelas de interrogação. O tamanho da janela deve ser suficientemente grande para conter uma adequada quantidade de partículas, tipicamente 10 e 15 partículas [49], mas suficientemente pequena para permitir negligenciar os gradientes de velocidades nesta área. Este último aspecto é relacionado à capacidade da técnica PIV em determinar o deslocamento médio deste grupo de partículas, e não de partículas individuais [43]. Como mostrado na Figura 22, o deslocamento é calculado por um método de correlação cruzada que procura o maior valor do coeficiente de correlação de deslocamento de partículas entre janelas nas duas imagens. Uma regra empírica para se obter

uma boa correlação é ajustar o tempo entre as duas imagens (dos pulsos do laser) de maneira a restringir o deslocamento das partículas a, no máximo, 5 pixels.

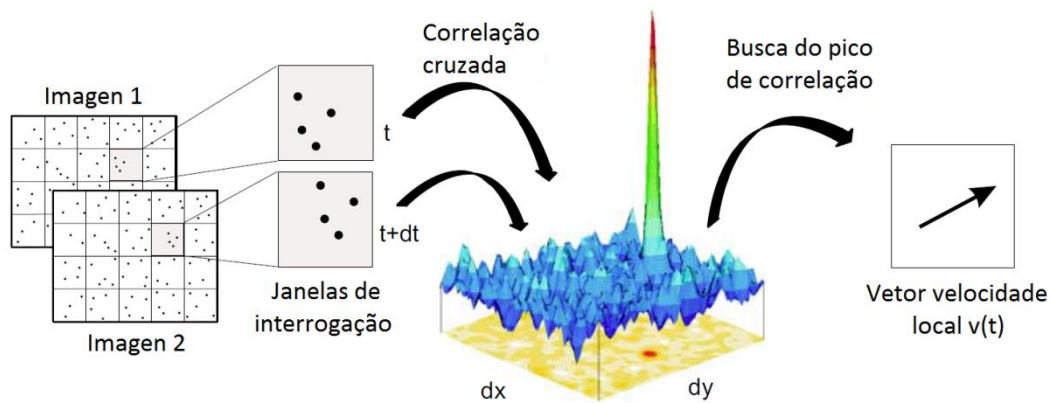


Figura 22 Método de correlação cruzada para determinar a velocidade numa janela de interrogação. Adaptado de [44].

O método busca quantificar o deslocamento do grupo de partículas nas direções x e y que produz o maior pico de correlação entre as duas janelas de interrogação. O software *DaVis*, fornecido pela empresa *LaVison* foi empregado nos cálculos de velocidade por PIV estéreo. O algoritmo do *DaVis* emprega a transformada rápida de Fourier (FFT), para determinar a correlação:

$$C(dx, dy) = \sum_{x=0, y=0}^{x < n, y < n} I_1(x, y) I_2(x + dx, y + dy), -\frac{n}{2} < dx, dy < \frac{n}{2}, \quad (3.3)$$

onde I_1 e I_2 representam as intensidades na 1ª e 2ª janela de interrogação, respectivamente, e a matriz 2D de valores de C é o grau de correlação para todos os deslocamentos inteiros (dx, dy) entre as duas janelas de interrogação, n é o tamanho da janela de interrogação e $\pm \frac{n}{2}$ é o máximo deslocamento [44]. A 2D-FFT complexa é calculada para as duas janelas de interrogação $n \times n$, os resultados são multiplicada por sua conjugada complexa. A inversa da FFT em seguida é calculada.

Um único vetor velocidade é obtido no centro de cada primeira janela de interrogação, cujo tamanho limita o número total de vetores no campo de medição. A quantidade de vetores pode ser aumentada utilizando-se menores janelas de interrogação, porém esta redução de tamanho pode levar a inexistência de partículas em janelas. A quantidade de vetores também pode ser aumentada

utilizando a superposição de janelas, o que permite criar mais janelas sucessivas. Por exemplo, uma superposição de 50% (critério de Nyquist) gera duas vezes mais vetores que no caso de não se aplicar superposição.

Os campos de velocidade podem apresentar vetores *espúrios* (demasiadamente diferente a seus vizinhos), e pode ser necessário fazer um pós-processamento destes campos. Por exemplo, o vetor espúrio pode ser substituído pela média dos vizinhos, limitando os valores máximos e mínimos das componentes, removendo os vetores onde não exista um pico de correlação dominante, aplicando filtros, etc.

Muitos outros tratamentos podem ser feitos para melhorar os resultados, seja numa fase de pré-processamento das imagens de partículas, processamento e pós-processamento. Resumi-los não é o objetivo deste trabalho e estes podem ser encontrados no manual do software [44] o no trabalho de Raffel [45].

3.4.3 Tipos de partículas traçadoras

Os experimentos realizados em escoamentos não reativos tiveram como objetivo caracterizar o campo de velocidades do ar formado acima do queimador e sem a presença do Spray, mediante a técnica de estéreo PIV.

Como o escoamento de ar não apresenta partículas traçadores, estas devem ser adicionadas levando em consideração que os traçadores utilizados em combustão devem suportar as temperaturas elevadas alcançadas na chama e não interferir com a cinética química da reação.

As partículas traçadoras devem ser suficientemente pequenas para acompanhar ao escoamento sem que ocorra deslizamento, e grandes o suficiente para espalhar luz suficiente para ser detectadas [45], estabelecendo um compromisso no tamanho das partículas. As dimensões típicas são da ordem de um micrômetro para gases, o que significa que a dispersão da luz ocorre no regime do espalhamento Mie, pois os diâmetros das partículas são maiores que o comprimento de onda da luz λ , porém menor que o limite de ótica geométrica [47]. Neste trabalho foram utilizadas partículas de dióxido de titânio (TiO_2) de $d_p \approx 1 \mu m$ de diâmetro médio como traçador nos experimentos inertes, devido principalmente aos bons resultados obtidos em nosso laboratório.

As partículas traçadoras também têm por objetivo evidenciar as estruturas internas do escoamento, isto faz com que seja necessária uma boa dispersão de partículas em todo o domínio de medição. A concentração não deve ser tão baixa como em *particle tracking velocimetry* (PTV), pois diminui a quantidade possível de vetores por ponto ou demasiado alta como em *high image density* (LSV) que impedem estabelecer uma correlação cruzada apropriada. Maiores detalhes sobre o cálculo da distribuição de diâmetros e o equipamento de dispersão de partículas podem ser encontrados nos trabalhos de Caetano [11] e Novgorodcev [10] respectivamente.

Nos experimentos com chamas determinou-se o campo de velocidade das gotas atomizadas empregando PIV.

Devido ao maior tamanho das gotas (em comparação às partículas de TiO_2) e sua ampla distribuição de diâmetros, a intensidade da luz espalhada pelas gotas atomizadas é maior e torna-se muito difícil diferenciá-las das partículas traçadoras disseminadas no ar, especialmente dentro da zona de atomização [50]. Assim, optou-se por medir apenas a velocidade das gotas.

3.5

Sistema de captura de imagens

PIV: A escolha de um adequado sistema de gravação das imagens é fundamental, pois suas resoluções espacial e temporal devem ser compatíveis com o lapso de tempo entre os dois pulsos, adequada taxa de captura, intensidade de espalhamento Mie, etc. Nas últimas décadas câmaras digitais com sensores CCD têm sido utilizadas com sucesso, principalmente devido à boa resolução espacial e por permitir gravar duas imagens PIV numa mesma câmara em lapsos de tempo de micro segundos [45]. Uma câmara CCD modelo *Image Intense* da *LaVision* com uma resolução de 1376×1040 pixels foi empregada. Sua taxa máxima de captura é de 10 Hz com 500 ns entre dois quadros. Um filtro passa banda centrada em $532 \pm 5 \text{ nm}$, serve para evitar parte da emissão de radiação devido à fuligem [51].

PLIF-OH: O sinal de fluorescência do radical *OH* formado na combustão é geralmente muito fraco; filtros espectrais estreitos e curtos tempos de exposição devem ser utilizados pelo sistema de captura. A sensibilidade dos detectores CCD

não é suficiente, assim é necessário usar um amplificador para captar os fótons de fluorescência. Em todas as medições de LIF-OH descritas neste trabalho um intensificador é acoplado à câmara CCD formando um conjunto chamado câmara ICCD (*intensified charge-coupled device*). O intensificador é um dispositivo eletrônico com tempo de exposição extremamente variável, o qual permite que a câmara CCD, que opera com uma faixa de tempo de exposição da ordem de *ms*, possa ser modulada através do intensificador, reduzindo o tempo de exposição para alguns *ns*. A Figura 23 mostra os principais componentes de um intensificador. Os fótons da fluorescência são coletados num determinado comprimento de onda antes das lentes e logo são recebidos por um foto-cátodo, que os converte em foto elétrons devido ao efeito fotoelétrico. Os elétrons são acelerados e multiplicados com uma diferença de potencial dentro de um MCD (*microchannel plate*) para depois atingir uma tela de fósforo, gerando um maior sinal de fluorescência. Finalmente, a fluorescência é captada mediante um jogo de lentes pelo sensor da câmara CCD. Um intensificador modelo IRO 25 (*intensified relay optics*) LaVision, com 5 *ns* de “gate” mínimo e 3 *kHz* de máxima taxa de repetição foi empregado.

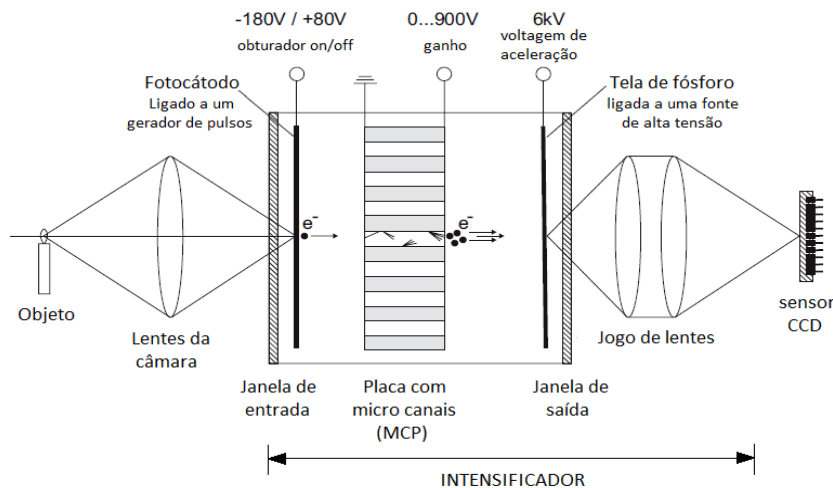


Figura 23 Seção transversal de uma câmara ICCD acoplada à lente. As tensões de operação são indicadas. Adaptado de [52].

3.6 “Shadowgraphy”

“Shadowgraphy” é uma técnica não intrusiva que captura as imagens das sombras de partículas ou gotas com alta resolução espacial empregando iluminação pulsada traseira. O método da captura direta de imagens tem muitas vantagens inerentes, tais como baixo custo, flexibilidade, insensibilidade relativa às propriedades ópticas das gotas, tamanhos acima de $5\ \mu\text{m}$ e detecção de gotas não esféricas [53]. À diferença dos métodos baseados no espalhamento frontal e lateral, o de iluminação traseira fornece um melhor contraste gerando imagens pretas da sombra da gota contra um fundo homogêneamente iluminado [54]. As velocidades individuais das gotas podem ser calculadas empregando um laser de duplo pulso, duas imagens são gravadas e é aplicado um algoritmo de rastreamento de partículas (PTV).

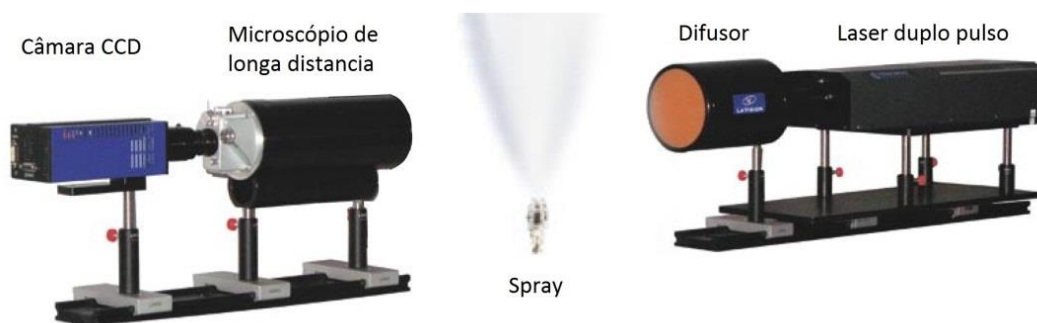


Figura 24 Arranjo experimental da técnica “Shadowgraphy”. Adaptado de [55].

A Figura 24 mostra a disposição colinear da técnica Shadow. O volume efetivo de medição é definido pelo campo de visão dentro do “*plano de foco*” e pela profundidade do campo do sistema, que são dependentes da imagem e do arranjo óptico das lentes [56]. O plano de foco é definido como aquela posição onde o objeto se mostra o mais nítido possível e, neste trabalho será coincidente com o plano de simetria do spray. O laser empregado é o mesmo que para PIV, mas com um difusor acoplado. Este difusor expande e guia o feixe para uma placa de vidro dopado com um corante fluorescente, mostrado em amarelo, fornecendo uma iluminação homogênea. As gotas localizadas entre o difusor e o plano de foco atenuam a iluminação e as gotas entre o plano e as lentes obstruem a visualização das gotas situadas no volume de medição [57]. Esses efeitos

umentam com o incremento da densidade de gotas e limitam a hipótese de iluminação uniforme no campo de visão. A montagem experimental empregada é mostrada na Figura 25. As imagens são capturadas com uma câmara CCD acoplada a um microscópio de longa distancia *Navitar* capaz de proporcionar um zoom óptico de até 12x. O feixe laser deve ser perfeitamente alinhado com o eixo óptico da câmara, desta forma diminui-se a incerteza. O posicionamento dos sistemas foi feito com mesas de elevação por coordenadas.



Figura 25 Montagem experimental empregada para medição da distribuição de tamanho de gotas e velocidades com Shadowgraphy.

A atomização é estudada transversalmente na direção radial do queimador, para diferentes alturas a jusante do atomizador. Para isso, a câmara foi montada sobre uma plataforma que permite a translação vertical. O deslocamento horizontal é realizado por meio de parafusos micrométricos *Velmex* modelo *A4012P40-S4* (mínimo deslocamento de $10\ \mu\text{m}$ e uma exatidão de $33\ \mu\text{m}/20\ \text{mm}$). O orifício de saída do spray é tomado como ponto de referência absoluto e o eixo (y) tem a direção do eixo de simetria do queimador.

Neste trabalho, a distância entre o microscópio e o plano de foco, que passa pelo eixo de simetria do atomizador, é de $86\ \text{mm}$. Menores distâncias melhoram a profundidade do campo, mas interferem com o escoamento anular de ar, como pode ser visto na Figura 25. A calibração dimensional do campo de visão foi feita com uma placa de calibração micrométrica *TED PELLA* n° 2280-13 montada no plano de medição e com a câmara focada na placa. A placa empregada tem uma escala de $1,0\ \text{mm}$ dividida em 100 linhas, dando $10\ \mu\text{m}$ de distância entre linhas com exatidão de $1,0\ \mu\text{m}$.

3.6.1 Aquisição e processamento das imagens

A discretização da gota é uma etapa indispensável para determinar a resolução mínima aceitável no Shadowgraphy e, é uma fonte de erros de medição. As sombras geradas pelas gotas na matriz CCD formam uma imagem digital com grupos de pixels retangulares dispostos em linhas e colunas. No processo de discretização são levados em conta todos os pixels situados totalmente dentro da gota. Cuidado especial deve ser tomado quando é medida a distribuição de gotas em spray, devido à forma não esférica das gotas e à ampla variação de tamanho. Gotas de menor diâmetro não são suficientemente resolvidas devido ao pequeno número de pixel que formam sua imagem e à irregularidade em seu contorno. Aumentar a quantidade de pixel que forma a gota de menor diâmetro melhora sua resolução, mas também implica aumentar a magnificação, diminuindo assim o campo de visão. Isto requer um maior número de imagens para lograr uma boa correlação estatística.

Para uma adequada avaliação dos parâmetros geométricos das gotas, um mínimo de 40 pixels por partícula é sugerido por Podczek et al. [58] e 50 a 60 pixels por Almedia-Prieto et al. [59], que realizaram estudos de grânulos farmacêuticos; Ghaemi et al [60] propõem um mínimo de 60 pixels em seu estudo em atomização efervescente [60]. A partir destes resultados da literatura escolhe-se utilizar 40 pixels como a área mínima da menor gota detectada.

Testes preliminares permitiram determinar que a distribuição de diâmetros do bico injetor situa-se entre $10 \mu m$ e $150 \mu m^2$, motivo pelo qual se escolheu um diâmetro mínimo de $10 \mu m$. Isto requer, para uma matriz CCD de 1376×1040 pixels, que o zoom óptico seja ajustado para um campo de visão menor ou igual a $\leq 1,8 \times 1,4 mm^2$, obtendo-se uma resolução linear de $1,33 \mu m/pixel$, satisfazendo o critério do diâmetro mínimo.

3.6.2 Aquisição e processamento das imagens

Para determinar o tamanho e forma das gotas se utilizou o software *DaVis – ParticleMaster Shadow* da *LaVision*. O algoritmo processa as imagens mediante quatro etapas: pré-processamento da imagem, separação do

fundo e detecção das gotas, cálculo dos parâmetros geométricos das gotas e pós-processamento [55,61].

Na etapa de pré-processamento, são corrigidas as não uniformidades na iluminação de fundo causadas pela distribuição aleatória das gotas e as deficiências na fonte de iluminação laser. Uma imagem de referência que representa a iluminação de fundo sem gotas é calculada para cada imagem bruta, tal como mostrado na Figura 26(a). Subtraindo-se a imagem de referência da imagem bruta obtém-se uma imagem chamada *invertida*, onde as áreas com maior intensidade mostradas em branco na Figura 26(b), representam as possíveis gotas e, as zonas de baixa intensidade representam o fundo.

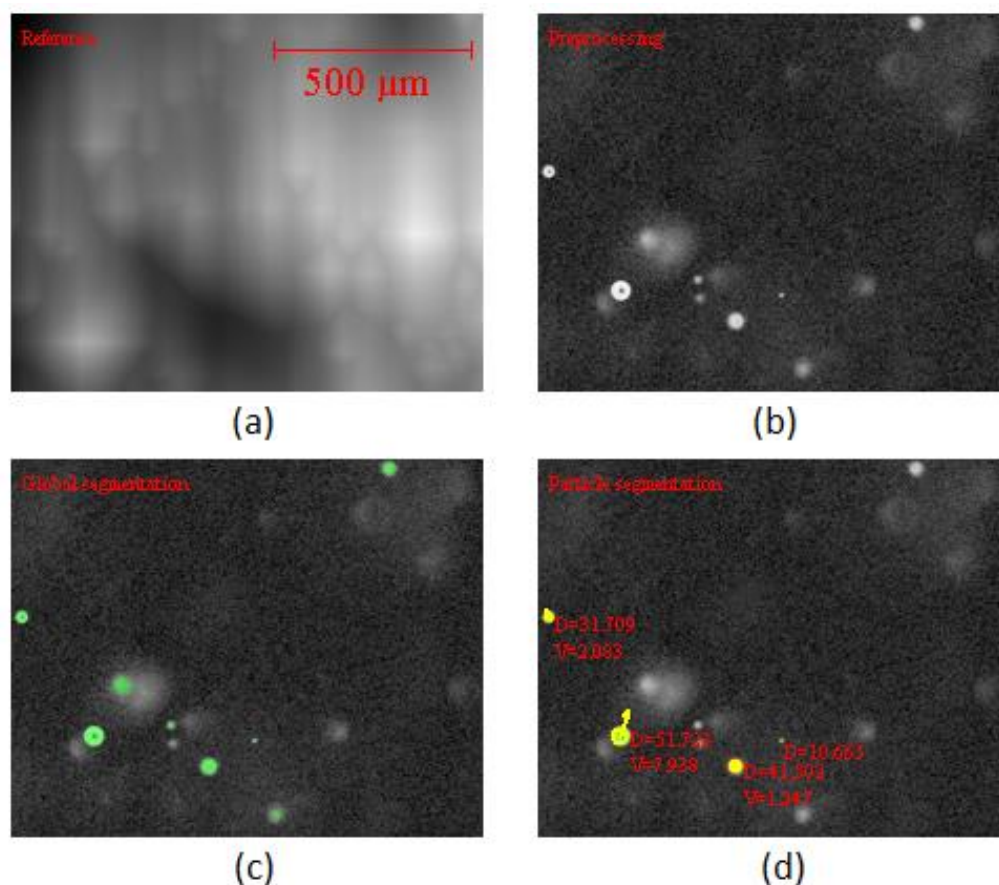


Figura 26 Sequencia de processamento: (a) Imagem de referencia, (b) Imagem invertida, (c) Segmentação global, (d) resultado final.

Na detecção das gotas se emprega um procedimento de segmentação global, que consiste em escolher uma intensidade relativa como *limiar global* para toda a imagem. O algoritmo identifica como possíveis gotas, mostradas em verde na Figura 26(c), a todas as regiões com intensidade maior que este limiar.

Finalmente a Figura 26(d) mostra as gotas detectadas, resultado de aplicar os últimos passos do algoritmo descrito no paragrafo seguinte.

A Figura 27 mostra um gráfico de intensidade de cinza de um perfil longitudinal que atravessa uma imagem “Shadow” com 4 gotas (#1, #2, #3 e #4). O limiar global, mostrado em vermelho, representa uma percentagem da diferença entre a maior e menor intensidade encontrada na imagem, mostradas como 100% e 0% respectivamente, e seu valor é escolhido adequadamente. Aplicando o limiar global, como mostrado na Figura 27, apenas 3 gotas (#1, #3 e #4) serão detectadas pela primeira segmentação. O algoritmo também pode identificar um sinal de ruído como gota, por isso é definido uma segunda intensidade limiar absoluta (em counts), não mostrada aqui, abaixo da qual nenhuma área é considerada.

Tomando-se como exemplo a gota #3, esta é individualizada pelo algoritmo, por uma área retangular chamada de AOI (*area of interest*), mostrada em vermelho, e que a sua vez, pode ser expandida definindo uma determinada percentagem “% de expansão AOI” com o fim de considerar também pixels abaixo do limiar global.

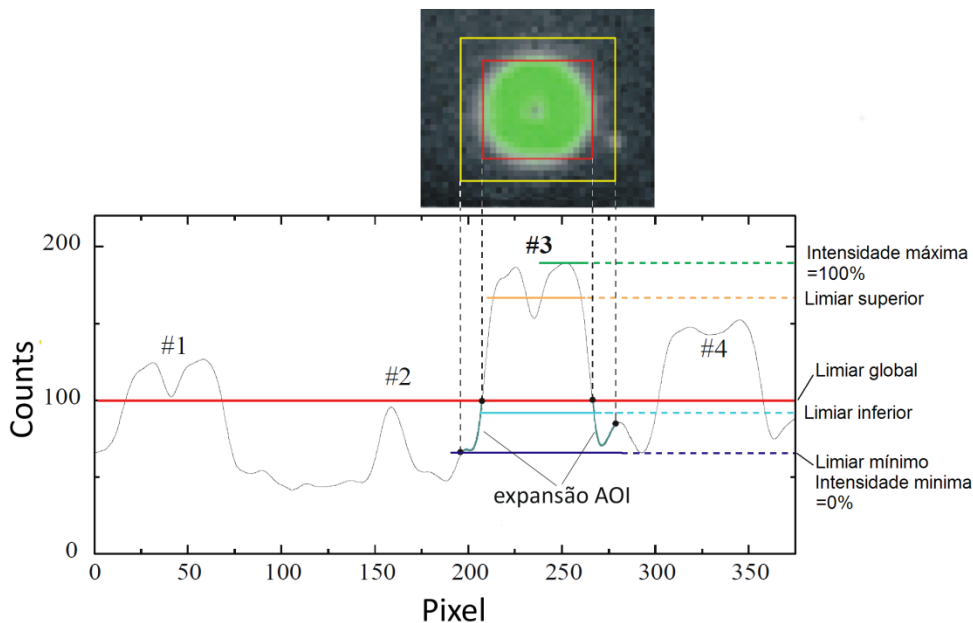


Figura 27 Perfil de intensidade da imagem mostrando os níveis umbrais empregados na primeira e segunda segmentação. Adaptado de [61].

Para calcular o tamanho das gotas, uma segunda segmentação é realizada dentro da área “expansão de AOI”. São estabelecidos dois níveis limiares chamados *inferior* e *superior*, definidos em porcentagens relativas à diferença

ente a máxima e mínima intensidade dentro da área AOI. A interseção destes níveis com o perfil de intensidade da gota determina uma área inferior e outra superior com seus respectivos diâmetros. O diâmetro da gota é resultado da média destes diâmetros. Com este método: (i) a informação abaixo do limiar global também é utilizada para determinar o diâmetro das gotas (expansão AOI) e (ii) a posição relativa média em relação ao contraste numa só gota é sempre a mesma [61]. Os valores dos parâmetros e critérios mencionados acima tem que ser cuidadosamente escolhidos, e são mantidos na análise de todas as imagens. Sua escolha é feita processando-se imagens de uma placa de calibração de profundidade do campo, “DOF target”, que possui círculos de diâmetro conhecido. Na calibração busca-se reconhecer e medir os círculos com a maior exatidão possível. A placa é desenhada para calibrar a profundidade do campo e será mostrada na seção seguinte.

O último passo é o pós-processamento dos resultados. Gotas desfocadas são mais difusas e com perfis de contorno inclinados, quando comparadas com os de uma gota focada. O diâmetro do nível inferior é bem maior que o diâmetro do nível superior para gotas desfocadas [55], portanto, a razão entre estas áreas (%) pode ser utilizada para excluir gotas desfocadas. Se uma menor razão é escolhida, gotas mais focadas são aceitas e a incerteza no cálculo do diâmetro é menor, no entanto, são necessárias mais imagens para-se obter um maior número de gotas e logo, resultados estatísticos válidos. Também podem ser empregadas restrições nos parâmetros de forma, tamanho, localização das gotas, etc. Neste trabalho foi utilizado 150 % como máximo percentagem entre áreas para limitar gotas desfocadas e, apenas gotas com centricidade de $c > 0,5$ foram consideradas.

3.6.3

Análise dos resultados

3.6.3.1

Correção da profundidade de campo (DOF)

A profundidade de campo é definida como a região em torno do plano de foco onde a perda de nitidez é desprezível ou imperceptível [62]. É um parâmetro importante na especificação de um sistema fotográfico, porque define a profundidade de observação. A profundidade de campo é relativa ao objeto

medido e possui uma dependência linear com seu tamanho [63], ou seja, a profundidade do campo cresce com o tamanho do objeto observado.

A profundidade do campo é sempre relativa ao estado da iluminação e das lentes, sendo sempre necessária uma calibração adequada. Esta foi realizada deslocando-se gradualmente uma placa transparente “DOF Target” impressa com círculos de diâmetro de 10, 20, 40, 60, 100, e 200 μm , ao longo do eixo óptico da câmara, em torno ao plano de foco. A Figura 28 mostra como para deslocamentos de 450 μm desaparecem, primeiro, os círculos menores da placa enquanto os maiores ainda são observados.

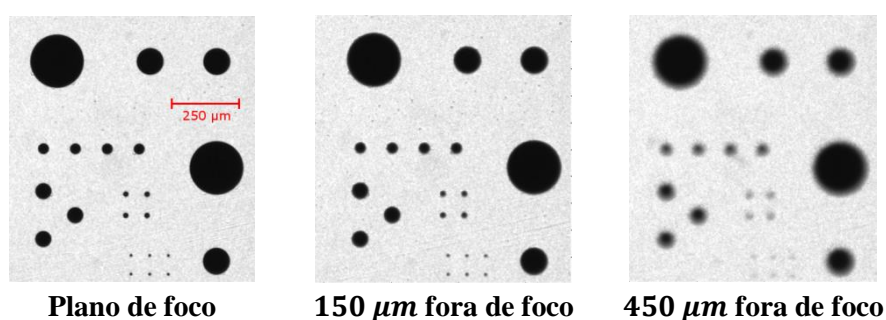


Figura 28 Detalhe da placa de calibração DOF, os círculos menores (10 μm) ficam fora de foco mais rapidamente que os maiores (200 μm).

Por exemplo, as curvas mostradas na figura 29 foram o resultado de processar 150 imagens da placa “DOF Target”, capturadas numa profundidade de 3,0 mm e, sendo adquirida 1 imagem a cada 20 μm de deslocamento.

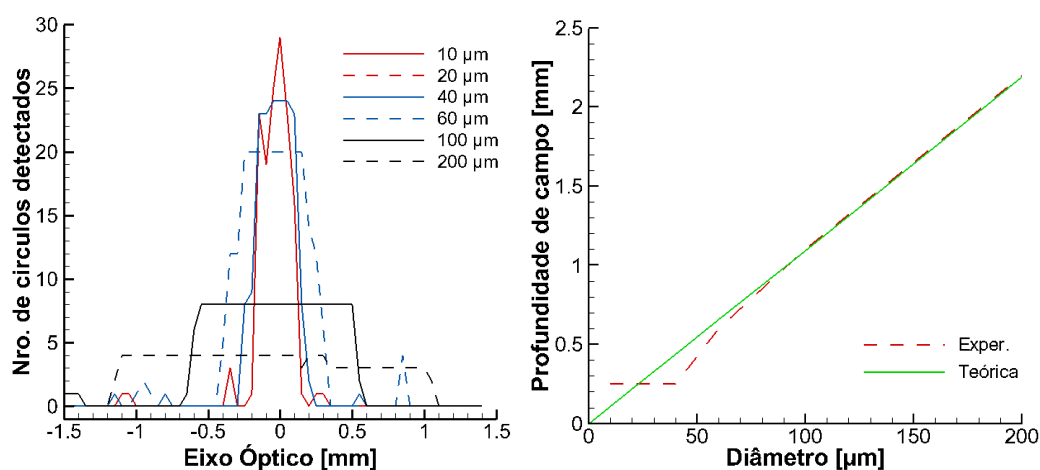


Figura 29 Profundidade máxima do campo por classe de tamanho e relação linear da profundidade do campo como função do diâmetro.

Assim, é necessário então fazer correções que levem em conta a menor probabilidade que tem uma gota de menor diâmetro em ser detectada no volume de medição. O algoritmo de correção da profundidade do campo processa as imagens da placa e os resultados [55], mostrados na Figura 29, mostram como decai o número de círculos detectados conforme nos afastamos do plano de foco (eixo óptico = 0), evidenciando uma relação linear entre a profundidade máxima do campo e o diâmetro da gota.

A probabilidade de detecção de uma gota pequena é menor do que a de uma gota maior; esta probabilidade exhibe relação linear com o diâmetro [63]. É necessário corrigir o menor peso estatístico das gotas pequenas. Define-se a probabilidade de detecção p_{DOF} de uma gota d como:

$$p_{DOF} = \frac{d}{d_{Ref}} , \quad (3.4)$$

onde d_{Ref} é o diâmetro de referencia, usualmente escolhido como o maior diâmetro medido com a finalidade de manter a probabilidade $p_{DOF} < 1$. O valor do d_{Ref} não afeta os histogramas de frequência e diâmetros médios devido à dependência linear do diâmetro da gota.

3.6.3.2 Correção de borda

O campo de visão da câmara estabelece a área de captura das imagens, mas o algoritmo só reconhece gotas cujo contorno está completamente dentro do campo de visão, como pode ser visto na Figura 30. Gotas de maior diâmetro serão mais propensas a tocar o contorno do campo de visão e terão menor probabilidade de serem detectadas.

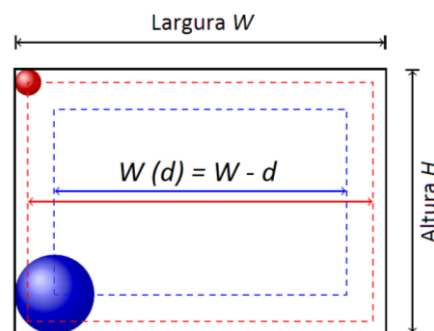


Figura 30 Dependência do campo de visão efetivo com o diâmetro de partículas [55].

O fator de correção de contorno para um determinado diâmetro de gota pode ser calculado como:

$$p_{FOV} = \frac{(W - d) \cdot (H - d)}{W \cdot H}, \quad (3.5)$$

onde p_{FOV} é a probabilidade que tem uma gota de diâmetro d de ser detectada no campo de visão $W \times H$.

3.6.3.3

Correção da quantidade de gotas e resultados estatísticos

As correções previamente discutidas afetam a quantidade de gotas de diâmetro d detectadas. A probabilidade individual global pode ser definida como:

$$p_i = p_{DOF} \times p_{borda}, \quad (3.6)$$

fazendo com que a quantidade total de partículas corrigidas estatisticamente N' seja igual a:

$$N' = \sum_{i=1}^N \frac{1}{p_i} \cdot N_i, \quad (3.7)$$

onde N é o número total de gotas detectadas.

Classicamente, a caracterização de spray passa pela determinação dos diferentes momentos estatísticos da distribuição de diâmetros de gotas. Em particular é muito útil introduzir um diâmetro médio estatístico de gotas que caracteriza quão fino é o processo de atomização. Vários diâmetros característicos podem ser encontrados na literatura, cada qual mais adequado a um tipo de fenômeno estudado. Neste trabalho serão discutidos os seguintes:

D_{10} : é o diâmetro médio aritmético. É o mais adequado quando se comparam diferentes atomizadores.

$$D_{10} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{d_i^1}{p_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{d_i^0}{p_i}} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{d_i^1}{p_i}}{N'}. \quad (3.8)$$

D_{32} : é o diâmetro médio Sauter (SMD), indica a finura de um spray, com respeito à superfície produzida. O SMD representa o diâmetro de uma gota com uma razão volume – área, igual que a razão volume total das gotas – área total das gotas. É o mais indicado quando se analisa a transferência de massa entre fases.

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{d_i^3}{p_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{d_i^2}{p_i}}. \quad (3.9)$$

3.6.3.4 Velocidade das gotas

A velocidade de cada gota pode ser determinada aplicando PTV ao par de imagens obtidas com um laser pulsado. Duas condições são impostas para identificar a mesma gota nas duas imagens: um desvio máximo do diâmetro e um deslocamento máximo permitido. A primeira refere-se a diferença entre os diâmetros das gotas entre a primeira e segunda imagem, sendo adotado um desvio de $\pm 15\%$. A segunda refere-se ao máximo deslocamento esperado, e seu valor é determinado pela sua localização no spray e a densidade deste, portanto, foi ajustado para cada posição. Mostra-se na Figura 31, que o deslocamento inicial define a posição do centro de uma janela na qual a gota será procurada, sempre e quando o desvio máximo do diâmetro não é superado. Este processo pode ser conduzido usando vários passos até alcançar o deslocamento desejado. Na maioria dos casos se empregaram dois passos e um decréscimo de janela de 1,5. É importante que o tempo entre pulsos seja escolhido de modo que a gota realize um deslocamento adequado entre as duas imagens. O tempo entre pulsos também depende da densidade do spray, de tal forma que seja possível reconhecer a mesma gota nas duas imagens. Regiões dispersas permitem maiores deslocamento e vice-versa.

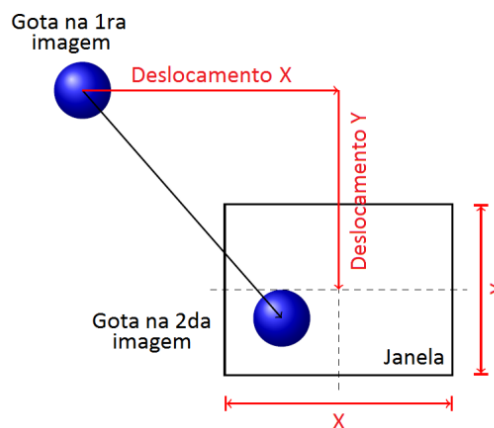


Figura 31 Janela de interrogação para determinar as velocidades das gotas [55].