

## 4

### **Materiais e métodos experimentais**

Neste capítulo são apresentadas as bancadas experimentais utilizadas e as abordagens empregadas para a realização de medidas. São descritos os equipamentos de medição de vazão, os queimadores que estabilizam as chamas estudadas e os componentes dos sistemas de excitação laser e de detecção espectral.

#### 4.1

##### **Queimador empregado para o estudo da formação da fuligem**

A ignição e a estabilidade das chamas em condições controladas é indispensável para o estudo fundamental dos processos envolvidos. A escolha do tipo de queimador utilizado determina as condições de contorno e os regimes de queima que podem ser estudados. Em particular, experimentos feitos em chamas com campos de velocidade simples e bem definidos facilitam a interpretação dos resultados medidos.

As condições de vazão, pressão e temperatura do escoamento, juntamente com o comprimento do tubo de injeção do combustível no queimador determinam se a chama se comporta como laminar ou turbulenta. No caso de chamas laminares, a literatura mostra que três tipos de chamas fuliginosas ou “target flames” são usualmente consideradas para comparar as medições feitas em diferentes laboratórios sob condições experimentais similares [15,119]. Estas chamas são estabilizadas em diferentes queimadores: o de McKenna, o de Santoro e o de Gülder. Neste trabalho, os experimentos são realizados num queimador de chama laminar não pré-misturada tipo Gülder.

As chamas estabilizadas no queimador McKenna [120] tem sido empregadas como fonte de estudos em combustão e sua calibração [121]. Este queimador permite estabilizar uma frente de chama plana, na qual a distribuição de temperatura e da concentração de espécies é considerada uniforme na direção da coordenada radial. Neste caso as propriedades do escoamento variam apenas na direção longitudinal, ou da altura, sobre o queimador [79,121,122]. No entanto, esta hipótese poderia ser questionável em chamas ricas, pois distribuições radiais não

uniformes de temperatura e concentração de fuligem podem ser encontradas [79,122]. Como foi mostrado na revisão bibliográfica, as chamas pré-misturadas apresentam uma evolução da fuligem menos complicada de interpretar, pois esta apenas varia na coordenada vertical [23]. Por este motivo, experimentos preliminares foram desenvolvidos no queimador McKenna, primeira aproximação ao entendimento dos fenômenos envolvidos na aplicação das técnicas laser de LII e LIF, assim como para otimização da configuração experimental. Estes resultados são apresentados no apêndice B.

O queimador Gülder é comumente utilizado para gerar chamas não pré-misturadas estáveis e axisimétricas empregadas para estudos de formação de fuligem [24,68]. Este queimador, mostrado na Figura 15, possui um tubo central para a injeção de combustível, de  $10,65\text{ mm}$  de diâmetro interno e  $30\text{ cm}$  de comprimento, feito em aço inoxidável. Um tubo concêntrico ao de combustível, com  $99,9\text{ mm}$  de diâmetro interno, é utilizado para formar um escoamento anular de ar que estabiliza a chama. A Figura 15 também mostra a disposição dos tubos de ar e combustível, onde o ingresso do ar é feito através de quatro entradas situadas ao redor da base, com conexões do tipo DIM  $\frac{1}{4}$ " NPT. O escoamento anular de ar passa através de várias camadas de esferas de cerâmica ( $6\text{ mm}$  de diâmetro) situadas entre dois discos de material poroso, não mostradas no corte da Figura 15(c), responsáveis por remover a vorticidade presente no escoamento de ar, permitindo a estabilização de uma chama laminar [123].



**Figura 15 - Chama não pré-misturadas de etileno e de ar, queimador Gülder e corte transversal do queimador**

Neste estudo, etileno foi utilizado como combustível, com uma pureza mínima de  $99,50\% \text{ mol/mol}$ , e fornecido pela White Martins. Para este tipo de queimador, o estudo em chamas fuliginosas tem sido feito na condição padrão de calibração e comparação de resultados, de  $0,194\text{ slpm}$  de etileno e  $284\text{ slpm}$  de ar

(a 21°C e 1 bar) [15]. Desta forma uma chama laminar estável de  $h_f = 65 \text{ mm}$  de altura é obtida, a qual se encontra próxima do ponto de fumaça (*smoke point*), i.e., ponto na qual a fuligem começa a escapar pela ponta da chama [124]. Note-se que a altura da chama pode variar de alguns milímetros, dependendo das condições exatas do ambiente no qual o queimador se encontra [125]. A região localizada  $z/h_f = 0,65$  acima do bocal do combustível é o ponto de medição usualmente empregado para efeitos de comparação entre os resultados obtidos por diferentes grupos de pesquisa. Nesta região uma dispersão de valores da fração volumétrica da fuligem é reportada de  $f_v = 3,9 - 6 \text{ ppm}$  [15,126], dependendo do grupo de pesquisa, e com espessuras de chama de  $\sim 5 \text{ mm}$  e temperatura na linha central em torno de  $1700 \text{ K}$  [124], muito abaixo da temperatura de chama adiabática do etileno, igual a  $T_{ad} = 2369 \text{ K}$ .

## 4.2

### Medidores de vazão mássica

Foram utilizados medidores de vazão mássica com válvula de controle incorporada do tipo *MC* da *Alicat Scientific*. O seu princípio de operação é baseado na queda pressão do gás medida ao atravessar micro canais. Simultaneamente são medidas a temperatura e a pressão do escoamento através de sensores. Os modelos destes medidores são mostrados na Tabela 3 e, para todos os casos, apresentam uma incerteza máxima igual a 0,8 % da leitura mais 0,2 % do fundo de escala [127].

**Tabela 3 - Modelos de medidores de vazão ALICAT empregados neste estudo**

	<b>Controladores de vazão</b>
<b>Etileno</b>	MC-500SCCM-D/5M
<b>Ar</b>	MCH-100SLPM-D/5M

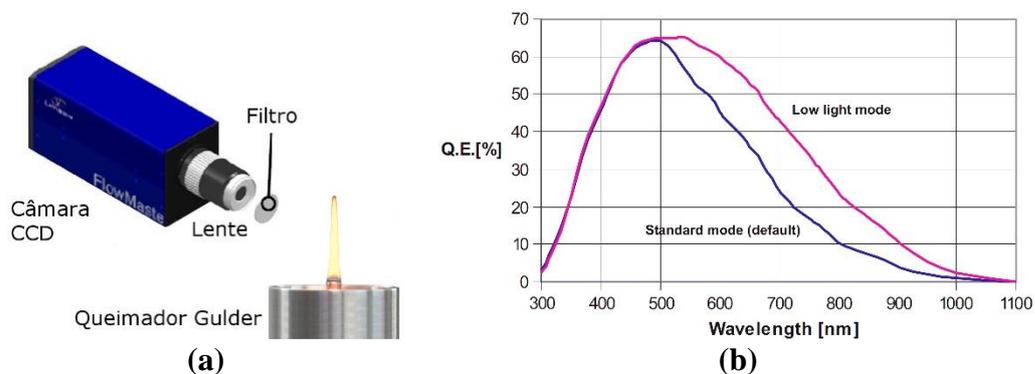
## 4.3

### Montagem experimental para as técnicas de espectroscopias por emissão

Como nas técnicas de espectroscopia de emissão nenhuma excitação externa é exercida sobre a chama, apenas é necessário utilizar um sistema de captura capaz de detectar o sinal desejado com boa razão sinal/ruído. Seguindo a ordem de menor para maior complexidade, são apresentados aqui o sistema de detecção utilizado na termometria de duas cores e na quimiluminescência.

### 4.3.1 Termometria de duas cores

Para detecção da termometria duas cores, cujo sistema é mostrado na Figura 16(a), é suficiente utilizar um filtro passa banda, uma lente e uma câmara CCD. Isto ocorre pois a radiação emitida pela fuligem é intensa em toda a faixa espectral observada. Filtros passa-banda centrados em  $530\text{ nm}$  e  $900\text{ nm}$ , e com  $10\text{ nm}$  de largura espectral fabricados pela THORLABS foram empregados. A câmara utilizada, modelo *Image Intense* da *LAVISION*, tem sua sensibilidade espectral, também chamada de curva de eficiência quântica espectral,  $QE_{CCD}$  (standard mode), mostrada na Figura 16(b).



**Figura 16 - (a) Sistema de captura empregado na técnica de termometria por duas cores e (b) curva de eficiência quântica espectral do sensor CCD, adaptado de [128]**

**Tabela 4 - Parâmetros utilizados na técnica de pirometria duas cores**

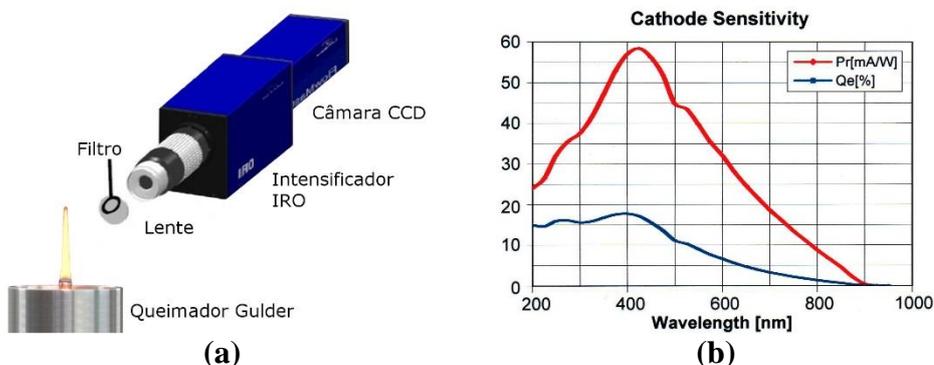
Câmara:	<i>CCD – Interline Progressive Scan with “lens – on – chip”</i>	
Modelo:	<i>Imager intense</i>	
Número de pixel:	<i>1376x1040 pixels</i>	
Dinâmica:	<i>16 bit @ 16 MHz</i>	
Tempo de abertura:	<i>800 <math>\mu</math>s</i>	
Taxa de aquisição:	<i>10 Hz</i>	
Objetiva:	<i>Nikon AF NIKKOR</i>	
Abertura/focal	<i>f/2.8 – 50mm</i>	
Filtros:	<i>passa banda</i>	<i>passa banda</i>
Comprimento:	<i>530 nm</i>	<i>900 nm</i>
Largura:	<i>10 nm</i>	<i>10 nm</i>
Transmitância máxima:	<i>51 %</i>	<i>53 %</i>

A Tabela 4 traz as principais características dos equipamentos e materiais, assim como os parâmetros utilizados nos experimentos de termometria duas cores.

Para todos os filtros empregados, uma razão sinal sobre ruído superior a 40 foi obtida. O incremento exponencial da radiação da fuligem, ver Figura 4, compensa o decaimento da eficiência quântica da câmara na região do infravermelho, ver Figura 16(b). Como será visto na seção 4.4.4, a curva de eficiência quântica  $QE_{CCD}$ , e a transmitância dos filtros,  $\tau_{\lambda_{det}}$ , são usadas para corrigir as imagens obtidas pela câmara CCD segundo a eq. (49).

### 4.3.2 Quimiluminescência

Na Figura 17(a) se mostra o sistema utilizado para a medida da quimiluminescência de radicais. A luz emitida pelos radicais é relativamente fraca e não é capaz de sensibilizar a câmara CCD. Por isto, é necessário amplificar a luz mediante um intensificador eletrônico, num processo que será explicado na seção 4.4.4. O intensificador permite ajustar a intensificação, em termos de porcentagem de ganho, controlar o momento da abertura e regular o tempo de exposição até valores de dezenas de nano segundos ( $\sim 10$  ns). A curva de eficiência quântica,  $QE_{IRO}$ , espectral do intensificador empregado aqui é mostrada em azul na Figura 17(b).



**Figura 17 - (a) Sistema de captura da quimiluminescência de radicais e (b) curva de eficiência quântica espectral  $QE_{IRO}$  e sensibilidade radiante do fotocátodo [ $mA/W$ ] da ICCD, adaptado de [129]**

Na Tabela 5 se mostram as características dos equipamentos e materiais, assim como os parâmetros utilizados nos experimentos de quimiluminescência. A câmara CCD acoplada ao intensificador é a mesma utilizada na técnica de termometria. De modo análogo ao que é feito para termometria, a curva de eficiência quântica  $QE_{IRO}$ , e transmitância dos filtros,  $\tau_{\lambda_{det}}$ , são usados para

corrigir as imagens medidas pelo intensificador *IRO* segundo a eq. (49) da seção 4.4.4. Devido à baixa transmitância do filtro de  $OH^*$  é necessário aumentar a porcentagem de ganho no intensificador, incrementando assim a razão sinal/ruído medida.

**Tabela 5 - Parâmetros utilizados na medição da quimiluminescência**

Intensificador:	<i>Intensified Relay Optics – IRO</i>	
	<i>single stage MCP</i>	
Modelo:	<i>IRO – 10ns</i>	
Foto cátodo:	<i>S20</i>	
Tela de fósforo:	<i>P43</i>	
Taxa de aquisição:	<i>10 Hz</i>	
Tempo de abertura:	<i>350 <math>\mu</math>s</i>	
Intensificação:	<i>70 %</i>	
Objetiva:	<i>Nikon Rayfact PF10545MF – UV</i>	
Abertura/focal	<i>f/5.6 – 50mm</i>	
	<i>OH*</i>	<i>CH*</i>
Filtros:	<i>passa banda</i>	<i>passa banda</i>
Comprimento:	<i>307 nm</i>	<i>433 nm</i>
Largura:	<i>10 nm</i>	<i>10 nm</i>
Transmissão máxima:	<i>20 %</i>	<i>40 %</i>

#### 4.4

#### Montagem experimental das técnicas excitadas por laser

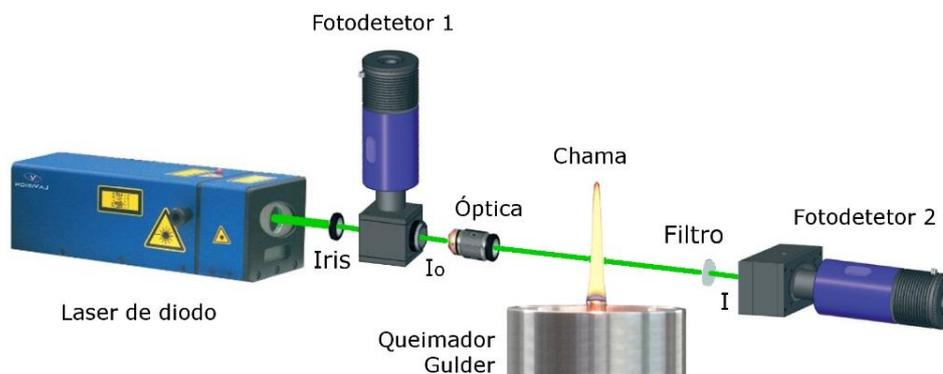
Como já foi discutido nas seções 3.3e 3.4, a excitação simultânea da fluorescência dos PAHs ( $S_{PAH}$ ) e a incandescência da fuligem ( $S_{LII}$ ) em chamas é possível mediante excitação laser nas faixas do UV ou visível [16,25,116,117]. A seguir é apresentado o arranjo experimental para a medição destes sinais e para a calibração dos campos de fração volumétrica de fuligem.

##### 4.4.1

#### Extinção de luz

A técnica de extinção de luz permite medir o valor médio da fração volumétrica de fuligem,  $\overline{f_v}$ , ao longo do caminho óptico,  $L$ , percorrido na chama. Na Figura 18 se mostram os componentes do sistema de extinção de luz utilizado neste estudo. Esta montagem é composta por um laser de diodo *LaVision*, modelo *DPSS-0,5W-CW* (DPSS: diode pumped solid state), com 0,5 *W* de potência nominal, que fornece um feixe de  $\approx 9$  *mm* de diâmetro no comprimento de onda visível de 532 *nm* [130]. Uma íris permite reduzir a energia utilizada para

35,5 mW ao selecionar uma região central circular ( $\approx 4 \text{ mm}$ ) do feixe. A intensidade luminosa do feixe é registrada simultaneamente por dois fotodetectores (*LaVision* modelo V9), antes ( $I_0$ ) e depois ( $I$ ) da chama, respectivamente. Um “beam splitter” no fotodetector 1 desvia  $\approx 9\%$  da energia do feixe para sua medição, e um filtro de linha de  $532 \pm 10 \text{ nm}$  na frente do fotodetector 2 reduz a possibilidade de detecção da maior parte da luz emitida pela chama.



**Figura 18 - Montagem experimental da técnica de extinção da luz**

A melhoria da resolução espacial da extinção é obtida pela convergência do feixe laser para um diâmetro de  $330 \mu\text{m}$  no ponto central da chama. Isto é alcançado com uma óptica formada por uma lente plano côncava esférica ( $f = -80 \text{ mm}$ ) e uma lente esférica (menisco positivo) de ( $f = 100 \text{ mm}$ ).

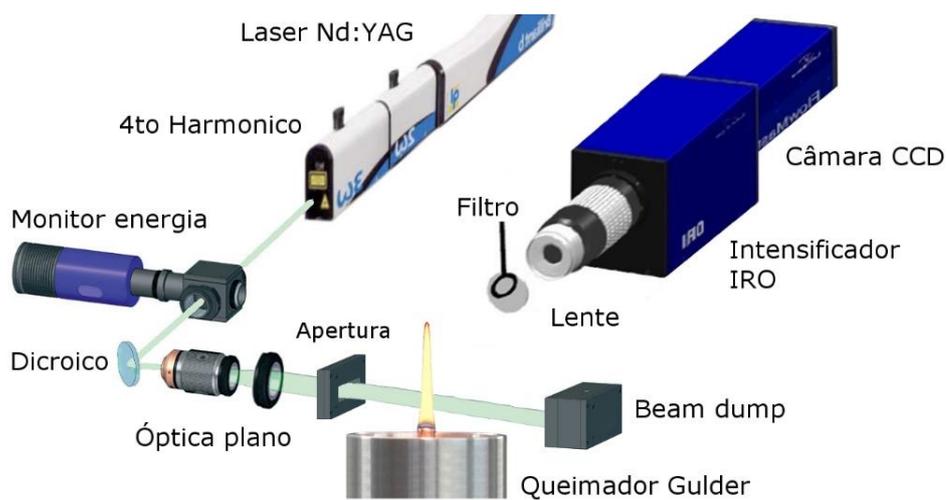
As leituras dos fotodetectores são expressas em unidades arbitrárias e, mesmo na ausência de atenuação, não são iguais, devido ao ruído eletrônico e a suas diferentes sensibilidades e, por isto, é necessário calibrá-los. Na primeira etapa da calibração, “offset correction”, o laser é desligado, e as leituras dos fotodetectores, resultado do ruído eletrônico, são corrigidas para zero na medição. Na segunda etapa de calibração, as diferentes sensibilidades dos fotodetectores são corrigidas, medindo-se a energia do feixe laser sem chama, o que representa uma transmitância total,  $\tau = 1$ . Um conjunto de 200 amostras é assim obtido, e um fator de correção é calculado e usado para igualar as duas leituras. A fração volumétrica média de fuligem  $\bar{f}_v$  é diretamente obtida pela aplicação da eq. (21).

#### 4.4.2

#### Excitação da incandescência e da fluorescência induzidas por laser

Na Figura 19 são mostrados os principais componentes do sistema de excitação e detecção simultânea da fluorescência dos PAHs e incandescência da

fuligem. Um laser de bombeio *Nd:YAG* modelo *Brilliant B* da *LAVISION* fornece um feixe pulsado (10Hz) de alta energia (900 mJ) no comprimento de onda do fundamental, 1064 nm, que é reduzido para 266 nm (90 mJ), utilizando o acoplador de quarto ( $4\omega$ ) e segundo ( $2\omega$ ) harmônico. Um monitor de energia registra a intensidade de cada disparo do laser durante o experimento, e sua medida é utilizada para rejeitar imagens obtidas com valores fora de um desvio padrão. O espelho tem por finalidade filtrar a componente residual de 532 nm gerada no segundo harmônico ( $2\omega$ ).



**Figura 19 - Sistema para a excitação e detecção simultânea da fluorescência e incandescência induzida por laser**

O plano laser que atravessa a chama é formado pela contração do feixe na direção horizontal e sua expansão na direção vertical, seguida de uma abertura mecânica para controlar a altura do plano. O sistema óptico empregado na extinção é utilizado aqui para fazer convergir o feixe até a espessura desejada no plano de excitação. Duas lentes cilíndricas ( $f = -50\text{ mm}$  e  $f = 150\text{ mm}$ ) expandem verticalmente o feixe para uma altura constante. O plano laser assim formado ( $\approx 0,45\text{ mm} \times 13\text{ mm}$ ) mantém sua espessura quase constante no caminho óptico da chama com uma fluência média resultante de  $0,1\text{ J/cm}^2$  no regime de *plateau*, tal como será mostrado na seção 4.4.2.2.

A irradiação laser utilizada induz os processos de fluorescência e de incandescência dos PAHs e fuligem. O seu processo de detecção requer que filtros espectrais passa banda sejam utilizados, que o sinal seja intensificado e que tempos de exposição curtos sejam adotados, como será detalhado na seção 4.4.4. O mesmo

conjunto câmara e intensificador utilizado na captura da quimiluminescência é empregado nesta parte do estudo.

Nas duas secções seguintes são mostradas medições preliminares da distribuição do plano laser e obtenção da curva de fluência do sinal de incandescência,  $S_{LII}$ , necessárias para a correta aplicação da técnicas.

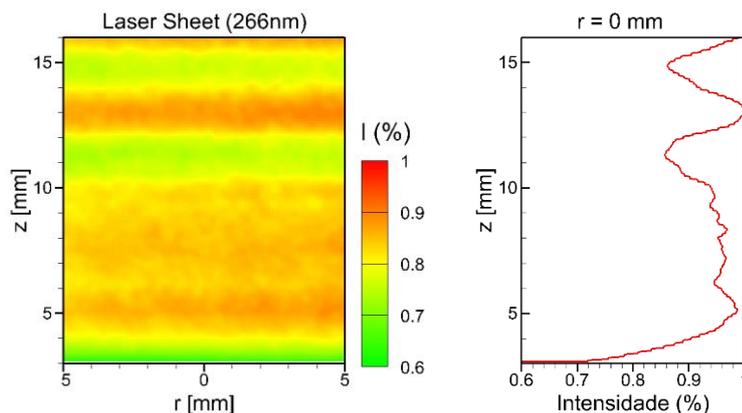
#### 4.4.2.1

#### **Caracterização da distribuição da energia do plano laser por espalhamento Rayleigh**

Como foi visto na seção 3.3.3, a intensidade dos campos bidimensionais de fluorescência e de incandescência são proporcionais à densidade de energia, ou fluência, de excitação do plano laser.

O plano laser formado pela expansão do feixe através de um conjunto de espelhos e de lentes é um processo delicado, com limitações físicas dos espelhos e lentes, da distribuição de energia no feixe, e de sua instalação. Este arranjo tem como objetivo gerar um feixe de espessura e altura constante na região de medição. Com isto se deseja obter uma distribuição de energia uniforme no plano, que garanta uma fluência de excitação constante. No entanto, estes objetivos nem sempre são atingíveis, pois o feixe laser inicial tem distribuição transversal de energia irregular e a qualidade e a forma dos espelhos e lentes utilizadas pode alterar esta distribuição. Por isto, a distribuição de energia no plano laser precisa ser conhecida, permitindo assim que os campos de sinais de fluorescência e incandescência sejam corrigidos pela variação espacial da intensidade de excitação.

É possível medir a distribuição de energia do plano laser mediante o uso da técnica de espalhamento elástico das moléculas de ar,  $I_{ray}$ , também chamado de espalhamento Rayleigh [131]. Para isto, o espalhamento da energia do plano laser pelas moléculas de ar é observado pela câmara intensificadora sem ajuda de filtro, empregando os mesmos tempos de abertura e atraso utilizados na detecção das técnicas LII e LIF. Como esta técnica veem sendo empregada há vários anos [40,132,133] no laboratório de combustão e turbulência da PUC-Rio, seus detalhes foram omitidos aqui.



**Figura 20 - Distribuição da energia normalizada do plano laser,  $I_{norm}(r, z)$ , e seu perfil longitudinal em  $r = 0 \text{ mm}$ , obtida por espalhamento Rayleigh**

A Figura 20 mostra a distribuição normalizada,  $I_{norm}(r, z) = I_{ray}(r, z)/\max[I_{ray}(r, z)]$ , do plano laser medido por espalhamento Rayleigh. Nos experimentos o plano laser sempre apresenta uma altura constante e distribuição de energia uniforme na direção radial, ou seja a sua atenuação é insignificante. Entretanto, ao longo da direção vertical ( $z$ ), a energia do plano varia significativamente, cerca de 15 % entre  $4 < z < 16 \text{ mm}$  acima do queimador. É importante ressaltar que apenas esta faixa central do plano laser é empregada nas medições, descartando-se os resultados obtidos nas bordas. Note-se que esta altura útil do plano laser,  $12 \text{ mm}$ , requer um deslocamento vertical do queimador a fim de permitir a varredura da chama, cujo sistema, clássico, não foi descrito no capítulo 4. Esta varredura tem como consequência a não simultaneidade das medições nas diferentes secções da chama ao longo do eixo  $z$ . No entanto, este procedimento é indispensável, pois quando se incrementa a potência de utilização do laser, a variação de intensidade nas bordas do plano é muito maior que no centro. Uma sobreposição de 20% entre as diferentes janelas de medição da chama é empregada para reconstruir adequadamente a totalidade dos campos da chama. A correção das imagens de LIF e LII é realizada mediante a ponderação com a energia de espalhamento normalizado, segundo:

$$S_{dt}^{\lambda_{det}}(r, z) = S_{detec}^{\lambda_{det}}(r, z) \cdot I_{norm}(r, z). \quad (44)$$

Resultados similares, não mostrados aqui, são obtidos ao se utilizar a técnica de fluorescência induzida por laser da acetona. Entretanto, como a técnica de espalhamento Rayleigh não requer a dispersão de substâncias fluorescente, foi a empregada neste estudo.

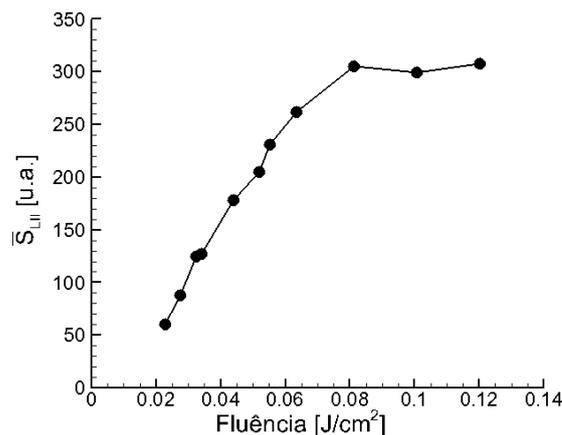
#### 4.4.2.2

#### Caracterização da energia de excitação da técnica LII – fluência

Como foi visto na seção 3.3.3, o sinal de incandescência induzida por laser da fuligem é fortemente dependente da fluência do laser [103]. Tipicamente, a intensidade da incandescência se incrementa com o aumento da energia do feixe até um patamar, também chamado de região de *plateau*, onde a fuligem começa a sublimar, o que ocasiona uma mudança de comportamento da curva de fluência. A literatura indica que a região de *plateau* define uma faixa de fluências onde se minimiza a variação do sinal medido devido as flutuações de intensidade do feixe laser [103]. Além da região de *plateau*, o sinal LII diminui ou se mantém constante, dependendo do perfil de intensidade do feixe, tal como discutido na seção 3.3.3.

A curva de fluência para a chama de 100 *sccm* de etileno, 60 *slpm* de ar, caso B da Tabela 7, é levantada na região superior,  $z > 22 \text{ mm}$ , onde o aporte da fluorescência dos PAHs no sinal total é negligenciável,  $S_{detec}^{\lambda_{det}} \approx S_{LII}^{\lambda_{det}}$ , e que será corroborado pelos resultados da seção 5.4.1. O incremento progressivo de energia do feixe é obtido pela diminuição da energia refletida por um *beam splitter* situado no caminho do feixe. Este elemento óptico tem sua superfície girada em relação ao feixe, o que muda seu ângulo de incidência e, logo, a intensidade do feixe transmitido. A energia do feixe é medida por um detector GENTEC Solo UP19K – 15S. Um papel foto sensível é empregado para determinar a espessura do plano laser com ajuda de um microscópio ZEISS Axiovert 40 MAT. Note-se que a medição da espessura do feixe por esta técnica simples não permite garantir que os valores reportados de fluência sejam exatos, embora se acredite na tendência do sinal de incandescência medido. O sinal de incandescência é detectado se empregando detecção imediata (*0ns*) [103], na banda de 400 *nm*,  $S_{LII}^{400nm}(r, z)$ . A média temporal do sinal de incandescência numa determinada região de medição,  $\overline{S_{LII}^{400nm}(r, z)}$ , é calculado a partir da média de 100 imagens.

Na Figura 21 se mostra a curva fluência obtida, na qual é possível constatar que a região de *plateau* começa a partir de  $0,08 \text{ J/cm}^2$ . A partir deste valor de fluência o sinal  $S_{LII}$  se mantém quase constante. Por esta razão, a energia do feixe laser foi selecionada para gerar uma fluência de  $0,1 \text{ J/cm}^2$ , para todos os experimentos.

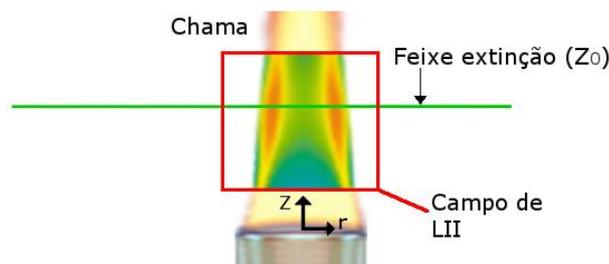


**Figura 21 - Curva de fluência da fuligem medida para o caso B**

#### 4.4.3

##### Calibração dos resultados de incandescência induzida por laser

No arranjo experimental adotado, o plano laser usado para excitar *LII* atravessa a chama no seu plano de simetria e o feixe de extinção atravessa horizontalmente a chama numa altura  $z_0$  da superfície de saída do tubo de injeção do combustível do queimador, tal como mostrado na Figura 22.



**Figura 22 - Esquema da calibração dos resultados de incandescência induzida por laser ( $\lambda_{exc} = 266 \text{ nm}$ ) pela extinção de luz ( $\lambda_{det} = 532 \text{ nm}$ )**

A técnica de extinção (*LE*) de luz permite determinar, indiretamente, o valor integrado da fração volumétrica de fuligem ao longo de um caminho óptico  $l$ , numa determinada altura  $z$ ,  $F_v(z) = L(z) \cdot \overline{f_v(z)}$ . A técnica de incandescência (*LII*) mede a distribuição bidimensional, em unidades arbitrárias, do  $S_{LII}(r, z)$ , o qual é proporcional à fração volumétrica da fuligem,  $f_v(r, z)$  segundo o discutido na seção 3.3. Se o feixe de extinção passa pelo mesmo plano que o laser de incandescência, estas duas medidas podem ser relacionadas. É possível obter o campo bidimensional de  $f_v(r, z)$ , determinando o fator de calibração para as imagens de *LII*,  $C_{cal}$ , definido como [100]:

$$f_v(r, z) = C_{cal} \cdot S_{LII}(r, z). \quad (45)$$

Na eq. (42), seção 3.3.2, foi mostrado que o sinal de incandescência local é proporcional ao valor da fração volumétrica de fuligem:  $f_v = C'_{cal} \cdot S_{LII}$ . Da mesma forma, a fração volumétrica integral de fuligem medida por extinção,  $F_v(z_0) = \overline{f_v(r, z_0)} \cdot L(z_0)$ , pode ser relacionada com a intensidade integral do sinal de incandescência na mesma altura,  $\int_0^L S_{LII}(r, z_0) dr = \overline{S_{LII}}(z_0) \cdot L(z_0)$ , como:

$$\int_0^L f_v(r, z_0) dr = \int_0^L C'_{cal}(r, z_0) \cdot S_{LII}(r, z_0) dr, \quad (46)$$

e considerando que o fator de calibração é constante ao longo do caminho óptico,  $C'_{cal}(z_0) \approx C'_{cal}(r, z_0)$ , se obtém:

$$\frac{\overline{f_v(r, z_0)}}{\overline{S_{LII}}(z_0)} \approx C'_{cal}(z_0) = \frac{f_v(r, z)}{S_{LII}(z)}. \quad (47)$$

Esta equação também expressa a hipótese de que  $C_{cal}$  é proporcional às medidas locais. Substituindo  $\overline{f_v}$ , eq. (21) na eq. (46), é possível expressar  $f_v(r, z)$  como [30]:

$$f_v(r, z) = -\frac{\lambda}{K_e(z)} \ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \cdot \frac{S_{LII}(r, z)}{\int_0^L S_{LII}(r, z_0) dr}. \quad (48)$$

Neste estudo, o plano laser de LII atravessa o eixo de simetria da chama e o caminho óptico  $L$  é igual ao diâmetro da chama,  $L = 2R_f$ , na altura  $z$ . Os valores de  $F_v(z_0)$  e  $\int_0^L S_{LII}(r, z_0) dr$  são expressos como função de  $z$ , indicando que a expressão de calibração pode ser utilizada a diferentes alturas. Isto permitiria levar em conta a variação das propriedades da fuligem ao longo da chama, i.e., sua maturidade, o que não é feito neste estudo.

Cabe ressaltar que a calibração dos resultados de LII empregando LE podem superestimar a concentração de fuligem quando o comprimento de onda do laser de extinção se encontra no UV ou no visível [81]. Isto ocorre devido à absorção da luz pelos PAH nestas faixas do espectro [83]. Por este motivo, o feixe de extinção em  $532 \text{ nm}$  é utilizado para efeitos de calibração e desta forma evitar a possível atenuação do feixe pelos PAH. Também, a calibração foi feita numa altura intermediária da chama, onde não se espera presença de PAH, o que será corroborado na seção 5.4.3.

#### 4.4.4

#### Detecção dos sinais espontâneos ou induzidos por laser

Devido a sua natureza, os sinais de quimiluminescência, fluorescência e incandescência são de vida curta, geralmente pouco intensos e emitidos em bandas espectrais. Por isso, tal como mostrado no esquema da Figura 19, é necessário utilizar câmaras intensificadoras da luz que (1) permitam o controle do tempo de exposição, (2) tenham boa eficiência quântica do sensor e (3) empreguem filtros espectrais passa banda nas lentes.

A luz oriunda da chama,  $S_{dt}$ , é capturada num lapso de tempo,  $dt$ . Para este fim, passa por um filtro passa-banda no comprimento de onda de detecção,  $\lambda_{det}$ , e por lentes Nikon UV-Visível. Como a sensibilidade do fotodetector CCD das câmaras é insuficiente, um amplificador “IRO” (*Intensified Relay Optics*) LaVision é empregado para incrementar a razão sinal sob ruído. O conjunto câmara-intensificador, chamado aqui de “câmara ICCD” (*intensified charge-coupled device*), permite que o tempo de captura da imagem seja modulado através do intensificador, reduzindo o tempo de exposição até valores da ordem de 10 ns.

Os fótons do sinal filtrado são recebidos por um foto-cátodo no IRO, convertidos em elétrons que são amplificados por uma diferença de potencial dentro de um MCD (*microchannel plate*) para depois atingir uma tela de fósforo “P43”. Esta tela fluoresce na região da luz verde, sinal este captado mediante um jogo de lentes, pelo sensor CCD da câmara.

Neste trabalho foram utilizado janelas temporais da captura de  $\overline{t_0 t_1} = 20$  ns, ver Figura 14, e atrasos de  $t_0 = 0$  ns ou de  $t_0 = 50$  ns para a detecção de LIF-PAHs e fuligem, respectivamente. Segundo experimentos preliminares, não mostrados aqui, estes valores são os que melhor permitem individualizar a fluorescência e a incandescência e também, obter a melhor resolução temporal na detecção.

Para a análise do sinal detectado,  $S_{dt}^{\lambda_{det}}$ , pelo sistema de captura é necessário corrigir o sinal medido pois, tal como pode ser visto nas Figura 16(b) e Figura 17(b), os fotodetectores do intensificador e da câmara apresentam diferentes sensibilidades à diferentes comprimentos de onda da luz. A compensação deste efeito se dá pela utilização da seguinte correção:

$$S_{dt}^{\lambda_{det}} = \frac{S_{detec}^{\lambda_{det}}}{\tau_{\lambda_{det}} \cdot QE_{IRO}}, \quad (49)$$

onde  $S_{detec}^{\lambda_{det}}$  é o sinal detectado pelo sistema de captura,  $\tau_{\lambda_{det}}$  é a transmitância do filtro passa banda,  $QE_{IRO}$  é o rendimento quântico do foto-cátodo do intensificador mostrado na Figura 17(b) e  $S_{dt}^{\lambda_{det}}$  é o sinal de fluorescência (ou incandescência) no comprimento de onda de detecção do filtro,  $\lambda_{det}$ . Note-se que o rendimento quântico do sensor da câmara CCD,  $QE_{CCD}$ , não precisa ser considerado, pois a tela de fósforo do intensificador emite seus fótons na região do verde para o sensor da câmara CCD. Estes equipamentos foram usados em estudos precedentes e para maiores detalhes se pode consultar [40,132,133].

No caso da emissão espontânea da fuligem, utilizada na técnica de termometria por duas cores, a radiação é suficientemente intensa para não requerer uso do intensificador. Neste caso, a luz proveniente da chama é diretamente capturada pela câmara *image intense* e, logo, a eficiência quântica do sensor CCD,  $QE_{CCD}$ , mostrada na Figura 16(b) é empregada no lugar de  $QE_{IRO}$  na eq. (49).

#### 4.4.5 Detecção espectral dos PAHs e fuligem

Da revisão bibliográfica apresentada no capítulo 2, pode ser depreendido que em chamas não pré-misturadas fuliginosas a zona de produção de PAH se encontra próxima à região inicial de pirólise do combustível. A fuligem é formada numa região anular envolvendo a região de PAH. A literatura indica que estas são separadas por uma fina região, de baixa intensidade de emissão, correspondente à zona de formação das primeiras partículas de fuligem [16,25,117]. No entanto, os precursores podem coexistir junto com a fuligem, mas a intensidade de seu sinal de fluorescência seria menor do que o da fuligem. Caso exista uma separação apreciável entre as regiões de formação de PAH e fuligem, a discriminação entre elas pode ser realizada.

A Tabela 6 mostra os filtros aqui empregados para o estudo da formação e crescimento dos diferentes tipos de PAH [36]. É importante ressaltar que os filtros escolhidos são aqueles que apresentam a maior transmitância e adequada largura espectral. Com isto se espera que as medidas não sejam influenciadas pelas emissão induzida de compostos de baixa massa molar. Como foi discutido na seção 3.4.2, a

excitação UV dos PAHs leva à emissão em bandas de fluorescência distintas para cada tipo de PAH, as quais são características de seus tamanhos e estruturas. Como certo grau de seletividade poderia ser alcançado utilizando o fenômeno do deslocamento do máximo de fluorescência para o infravermelho com o incremento no tamanho dos PAHs, são aqui utilizados diferentes filtros passa-banda para estudar a distribuição do PAHs nas chamas.

**Tabela 6 - Filtros passa-banda (Edmund Optics) utilizados na medição simultânea de LIF-PAHs e LII**

		<i>LIF – PAH</i>	<i>LII</i>
$\lambda$ [nm]	$\tau$ [%]	# aneis	especies
$340 \pm 13$	85	1 – 3	
$400 \pm 12.5$	90	3 – 4	<i>Fuligem</i>
$450 \pm 12.5$	90	< 5	
$500 \pm 12.5$	90	< 5	
$550 \pm 12.5$	90	< 5	

Para a detecção da incandescência da fuligem, são utilizados os mesmos filtros de detecção empregados para *LIF-PAH*. Note-se algumas das bandas de detecção desses filtros são próximas às bandas de emissão de  $C_2$ . Os campos médios de incandescência para estas faixas de detecção são comparados no próximo capítulo e a pertinência das escolhas será avaliada.

#### 4.4.5.1

##### Possíveis limitações da detecção espectral

A intensa irradiação laser utilizada na técnica de LII pode ocasionar a fluorescência de  $C_2$ , e sua detecção junto com a incandescência deveria ser evitada. Se espera que a detecção nos menores comprimentos de onda (340 nm e 400 nm) seja atribuível à contribuição da fuligem e PAH. Ao contrário, a faixa de detecção no filtro de 500 nm se encontra próxima à banda de máxima emissão do sinal de fluorescência de  $C_2$  (516 nm) e existe a possibilidade desta ser detectada junto com o sinal de incandescência da fuligem e PAH. As faixas espectrais dos filtros de 450 nm e 550 nm se encontram em regiões próximas a duas bandas de

fluorescência de  $C_2$  (473 e 563  $nm$ ), de menor intensidade em comparação a anterior (516  $nm$ ), e sua possível detecção não deveria ser considerável.