

## 4 Metodologia Experimental

Neste capítulo são descritos os detalhes das modificações realizadas na instalação experimental do queimador desenvolvido no trabalho de Alvarez [4]. Este trabalho descreve detalhadamente às instalações elétricas e processos de controle e de segurança do queimador. Uma modificação importante realizada durante o presente estudo na instalação do queimador foi sua localização no novo Laboratório de combustão e Turbulência do Departamento de Mecânica da PUC-Rio. Neste capítulo também será incluído um breve resumo sobre os equipamentos e a técnica de medição da concentração de espécies químicas por fluorescência induzida por plano laser (PLIF) maiores detalhes desta técnica podem ser encontrados nos trabalhos de [51].

### 4.1. Projeto da instalação experimental

Partindo-se do trabalho de Alvarez [4] foram realizadas modificações destinadas a obter uma maior faixa de operação do queimador permitindo alcançar diferentes zonas de combustão. Além disto, pretendia-se obter maior estabilidade no posicionamento do corpo rombudo. Também pretendia-se realizar medições em escoamentos quimicamente inertes, isto é, com Nitrogênio e/ou ar, e em escoamentos reativos de gás natural (GNV) e de ar.

#### 4.1.1. Fixação do corpo rombudo

Inicialmente será descrita a modificação do corpo rombudo, a qual envolveu alterações em suas dimensões e na forma de fixação ao queimador.

No que diz respeito às dimensões do queimador, suas características geométricas foram alteradas com o objetivo de tornar o diâmetro do jato de combustível significativamente maior do que a do plano laser usado nas medições, que possui espessura típica da ordem de 0,1mm. Para isso, o diâmetro de saída do combustível do queimador foi aumentado de 2mm para 7,1mm. Simultaneamente, o corpo rombudo teve seu diâmetro aumentado de

36mm para 60mm, como mostra a **figura 4.1**. Assim, as principais dimensões do experimento são:

- i. Diâmetro do jato central do GNV:  $D_j=7,1$  mm,
- ii. Diâmetro do corpo rombudo do queimador tipo obstáculo:  $D_B=60$  mm,
- iii. Diâmetro de saída do túnel de vento para o ar anular:  $D_a=200$  mm.

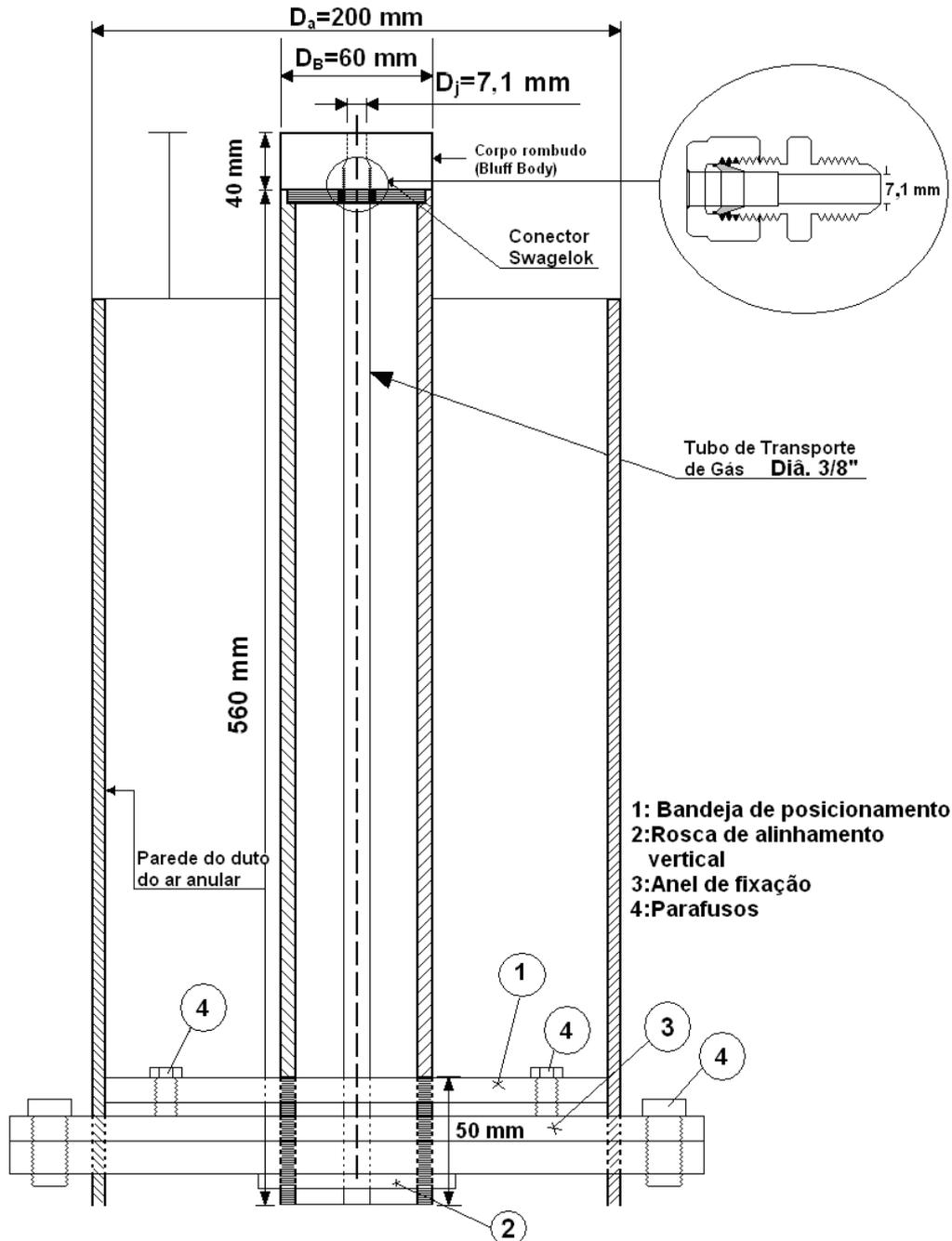


Figura 4.1 Diagrama da seção transversal do queimador mostrando as características geométricas de construção. 1: Bandeja de posicionamento, 2: Rosca de alinhamento vertical, 3: Anel de fixação, 4: Parafusos.

Na **figura 4.1** mostra-se o desenho do novo corpo rombudo, assim como a forma como ele é fixado no duto anular. Observe-se que, na base do corpo rombudo, encontram-se três peças de aço que foram projetadas para fixar e alinhar o corpo ao túnel de vento.

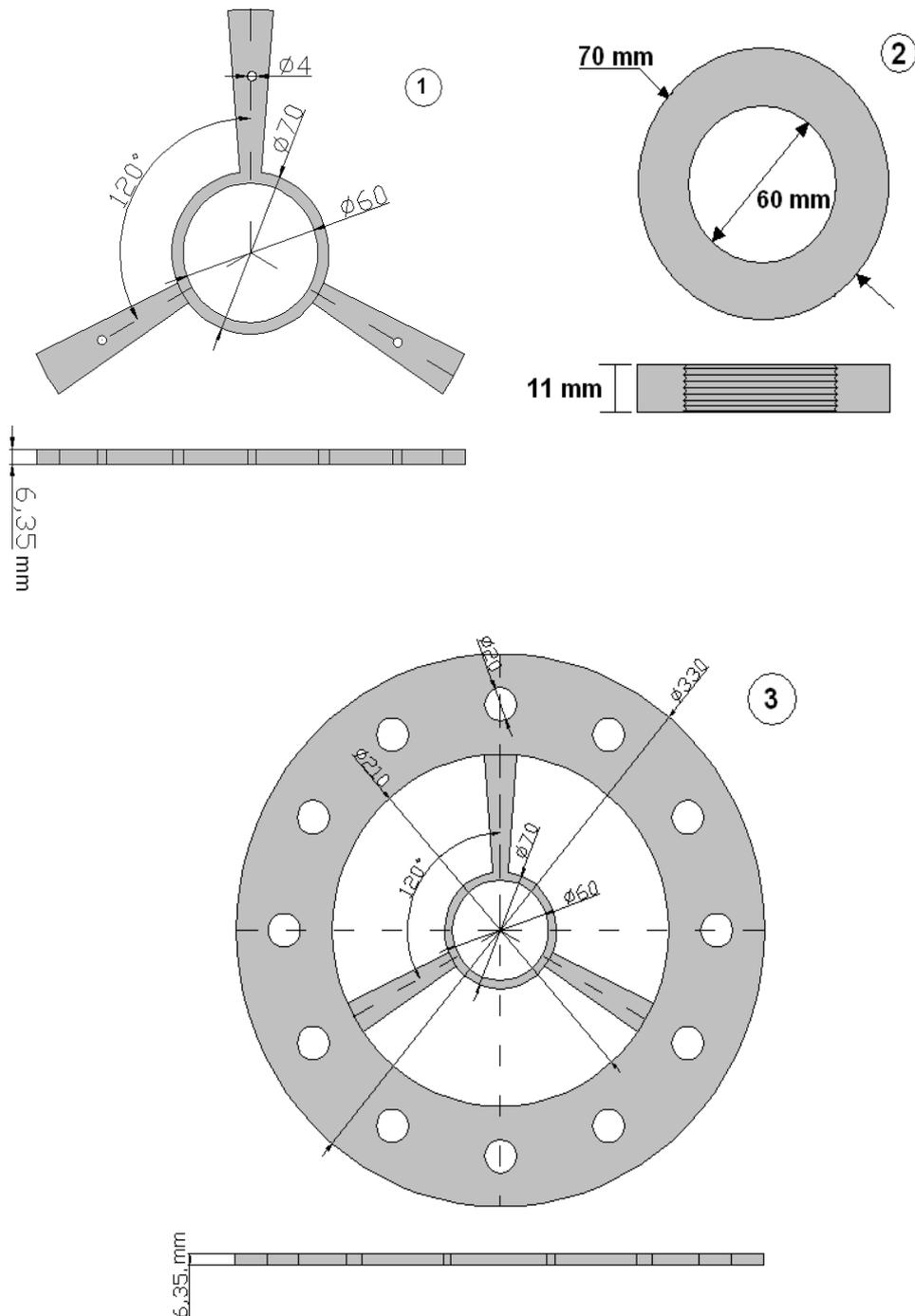
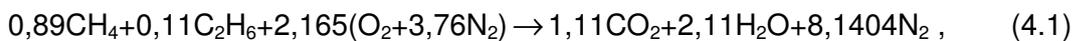


Figura 4.2 Características geométricas das peças 1, 2 e 3 que servem como fixação e nivelamento do corpo rombudo.

Na **figura 4.2** mostra-se a descrição das características geométricas das peças que servem de apoio do corpo rombudo para manter este fixado ao duto anular e que são mostradas na **figura 4.1** com os números 1, 2, 3 e 4. O alinhamento vertical é obtido pela rosca 2. A centragem do corpo rombudo e sua fixação rígida é obtida pela regulagem de três parafusos, os quais determinam a altura e o ângulo entre a bandeja de posicionamento e o anel de fixação.

#### 4.1.2. Fornecimento de GNV

A maioria dos processos industriais de combustão utiliza o ar ambiente como fonte de oxigênio para a reação química. O conhecimento das necessidades de ar para combustão, bem como da composição e volume dos produtos de combustão é fundamental para o projeto e controle de equipamentos de combustão. A estequiometria química nos fornece os principais dados necessários aos cálculos de combustão. Para se determinar a relação estequiométrica entre o GNV e ar utiliza-se a composição padrão do GNV do Rio de Janeiro [52], isto é, 89% de CH<sub>4</sub> e 11% de C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>:



ou seja, 1 mol de GNV necessita de 10,30 moles de ar para queimar completamente, relação volumétrica esta que implica em uma razão mássica de 1:16,95.

O cálculo da densidade do GNV foi realizado utilizando-se a equação de estado dos gases perfeitos:

$$\rho_{GNV} = \frac{P_{GNV}}{R_{GNV} T_{GNV}}, \quad (4.2)$$

onde  $\rho_{GNV}$  é a massa específica do gás, em [kg/m<sup>3</sup>],  $P_{GNV}$  a pressão do gás em [kPa],  $T_{GNV}$  a temperatura absoluta (K) e  $R_{GNV}$  a constante do gás natural (0,4713kJ/kg.K). Esta expressão será utilizada pois os valores de  $P_{GNV}$  e  $T_{GNV}$  são suficientemente próximos das condições normais. Note-se que, para pressões maiores, o comportamento dos gases pode desviar-se substancialmente da equação de estado dos gases perfeitos. Para corrigir este desvio introduz-se, então, um fator de correção variável chamado Fator de Compressibilidade ( $z$ ), e equação de estado dos gases reais.

Assim, a densidade do GNV e do ar a  $T_{GNV} = 21^\circ\text{C}$  e  $P_{GNV} = 15\text{ psi}$  são, respectivamente,  $\rho_{GNV} = 0,775\text{kg/m}^3$  e  $\rho_{AR} = 1,20\text{kg/m}^3$ . Uma vez que o gás utilizado é composto essencialmente por metano, será assumido que a variação da viscosidade do GNV é similar à variação do metano. Para a determinação do coeficiente de viscosidade será utilizada a correlação empírica de Sutherland [53]:

$$\mu_{GNV} = \frac{bT_{GNV}^{3/2}}{S + T_{GNV}}, \quad (4.3)$$

onde  $\mu_{GNV}$  é a viscosidade dinâmica do gás [ $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ],  $T_{GNV}$  é a temperatura do gás natural [K] e as constantes para o metano são  $b = 1,585 \times 10^{-6} \text{ kg}/\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{K}^{1/2}$  e  $S = 442,5 \text{ K}$ .

Para determinação da velocidade do jato de GNV a partir da leitura do rotâmetro, é necessário converter este valor de vazão volumétrica utilizando os valores de temperatura e de pressão reinantes durante o ensaio. Isto é feito utilizando-se a calibração fornecida pela OMEL para o rotâmetro tipo 3P, modelo: 3P5-0401V01

Gás : Ar

Pressão absoluta de calibração:  $2 \text{ bar} \approx 2,04 \text{ kgf}/\text{cm}^2$

Temperatura absoluta de calibração:  $293 \text{ K}$  ( $20^\circ\text{C}$ )

Fundo de escala:  $0,01 \text{ Nm}^3/\text{h}$

As condições de operação do experimento foram de:

Gás utilizado: Gás natural veicular (GNV)

Pressão absoluta de operação:  $2,0931 \text{ kgf}/\text{cm}^2$

Temperatura absoluta de operação:  $294 \text{ K}$  ( $21^\circ\text{C}$ )

A vazão corrigida é definida como:

$$Q_c = Q_o \times F1 \times F2 \times F3, \quad (4.4)$$

onde  $Q_o$  é a vazão indicada no rotâmetro.

Os fatores de correção utilizados são

$$F1 = \sqrt{\frac{P_I}{P_O}}, \quad (4.5)$$

onde  $P_I$  : Pressão absoluta do gás nas condições de serviço.

$P_O$  : Pressão absoluta do gás nas condições de calibração.

$$F2 = \sqrt{\frac{T_O}{T_I}}, \quad (4.6)$$

onde  $T_O$  : Temperatura absoluta do gás nas condições de calibração.

$T_I$  : Temperatura absoluta do gás nas condições de serviço.

$$F3 = \sqrt{\frac{\gamma_{OC}}{\gamma_{IC}}}, \quad (4.7)$$

onde  $\gamma_{OC}$  : Peso específico do gás (relativo ao ar) de calibração nas condições normais,

$\gamma_{IC}$  : Peso específico do gás (relativo ao ar) de medição nas condições normais.

Os valores encontrados para os fatores de calibração são:

$$F1=1,013 ; F2=0,998 ; F3=1,322.$$

Na **tabela 4.1** mostram-se as vazões volumétricas corrigidas, em diferentes regimes de operação do rotâmetro, inclusive as vazões que foram empregadas para a experiência, que correspondem nos regimes de operação de 18,2%, 30,3%, 40,4% e 95,6%.

Assim, velocidade máxima obtida com o rotâmetro de GNV sob condições de operação de 2 bar e 20°C é de 7,22 m/s, para um diâmetro de saída do queimador de 7,1 mm, correspondendo a um número de Reynolds de 3663. A **tabela 4.1** apresenta as diferentes velocidades obtidas para diferentes regimes de operação.

Tabela 4.1 Estimativa dos regimes de operação do jato de combustível do GNV para o caso de combustão estequiométrica,  $P_{GNV} = 15 \text{ psi}$  e  $T_{GNV} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$ .

GNV					Ar estequiométrico	
Regime de operação (%)	Vazão volumétrica ( $\text{dm}^3 / \text{s}$ )	Vazão mássica ( $\text{g} / \text{s}$ )	Velocidade média : Uj (m/s)	Número de Reynolds: Rej	Vazão volumétrica ( $\text{dm}^3 / \text{s}$ )	Vazão mássica ( $\text{g} / \text{s}$ )
100	0,294	0,21	7,22	3422	3,031	3,608
95,6	0,281	0,20	6,90	3271	2,897	3,448
90	0,265	0,19	6,50	3080	2,728	3,247
80	0,235	0,17	5,78	2738	2,425	2,886
70	0,206	0,15	5,05	2395	2,122	2,526
60	0,176	0,13	4,33	2053	1,819	2,165
50	0,147	0,11	3,61	1711	1,516	1,804
40,4	0,119	0,09	2,92	1382	1,225	1,458
40	0,118	0,09	2,89	1369	1,212	1,443
30,3	0,089	0,06	2,19	1037	0,918	1,093
30	0,088	0,06	2,17	1027	0,909	1,082
20	0,059	0,04	1,44	684	0,606	0,722
18,2	0,054	0,04	1,31	623	0,552	0,657
10	0,029	0,02	0,72	342	0,303	0,361
5	0,015	0,01	0,36	171	0,152	0,180

#### 4.1.3. Escoamento de ar

Visando aumentar a homogeneidade do escoamento de ar no queimador, uma câmara de tranqüilização foi introduzida entre o ventilador e o duto de ar. A **figura 4.3** mostra a situação antes e depois da modificação da instalação experimental.

O ventilador centrífugo utilizado, da marca Deltra, usado para alimentação de ar do experimento tem as seguintes características técnicas:

- Modelo VC-400, vazão máxima nominal de  $32,8 \text{ m}^3/\text{min}$ , pressão máxima de 439 mmca, carcaça de alumínio fundido, peso de 43 kg e nível de ruído de 82 Dba.
- Motor elétrico de potência 4 CV, tensão de 220/380 V, corrente de 10,8/6,3 A e rotação de 3470 RPM.

Um adaptador foi empregado para permitir acoplar a saída do ventilador à caixa tranqüilizadora. A saída do ventilador, que tem forma retangular e a entrada da caixa, circular, são conectadas por um duto de seção transversal variável, que permite diminuir a velocidade do ar a montante da caixa de tranqüilização, a caixa de tranqüilização do ar é feita de aço e suas dimensões são mostradas na **figura 4.4**.

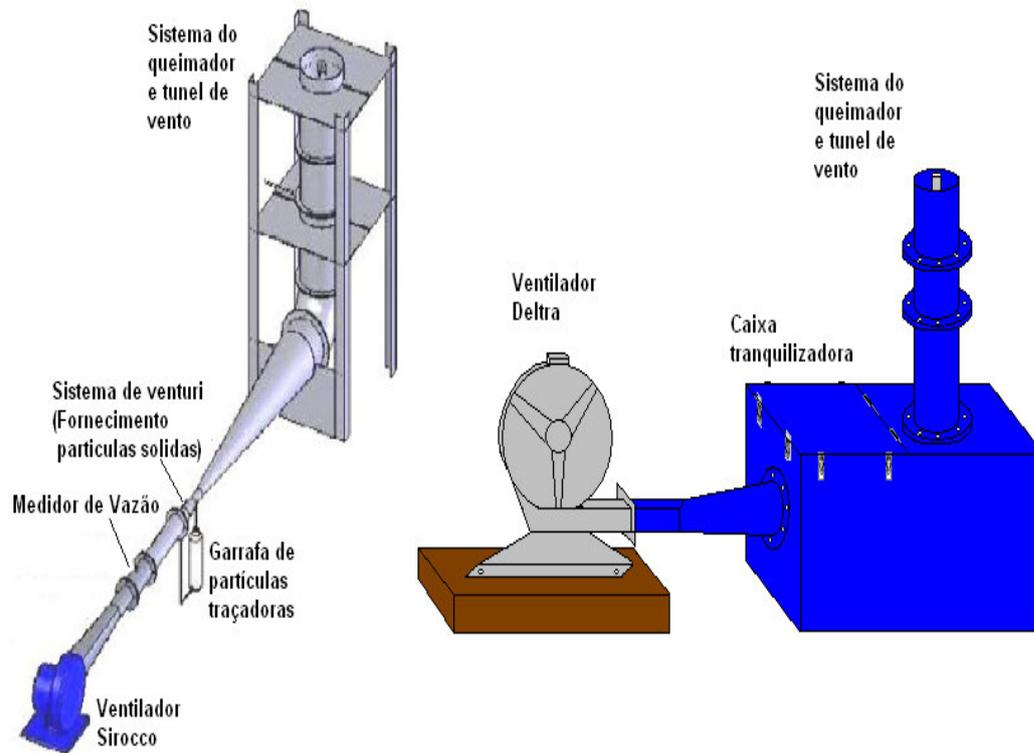


Figura 4.3 Configuração antiga do queimador (esquerda), nova configuração (direita).

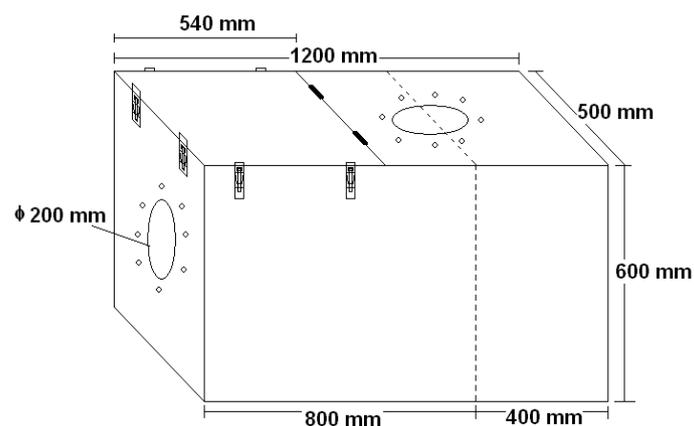


Figura 4.4 Dimensões geométricas da caixa tranqüilizadora do ar anular.

De modo a caracterizar as diferenças obtidas pela adição desta caixa, a velocidade de saída da zona anular no queimador foi medida com o auxílio de um tubo de Pitot e de um manômetro inclinado. Como mostrado na **figura 4.5** a

velocidade foi medida em cada ponto marcado na seção anular nas coordenadas X-Y, cuja origem é situada no centro do queimador, isto é, no centro do corpo rombudo. Para diferentes valores da frequência do ventilador foi medida a distribuição de velocidade neste plano. A configuração do queimador utilizada por Alvarez [4] incluía um cotovelo como e um ventilador de menor potência.

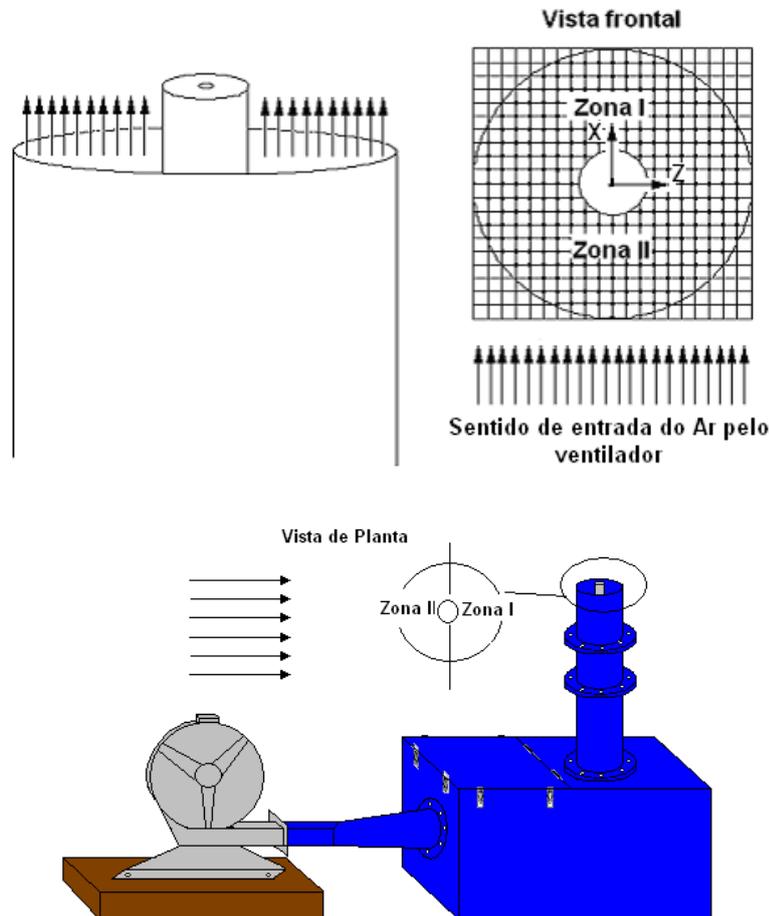


Figura 4.5 Esquema usado para obter a velocidade do ar na seção anular do queimador.

Com o aumento da potência do ventilador usado a não homogeneidade do escoamento de ar na saída do duto ficou clara. A **figura 4.6** traz uma comparação entre os valores de velocidade obtidos nas configurações original e atual, para um valor de frequência de rotação do ventilador de 40Hz. Cabe notar que a distribuição de velocidade na configuração inicial foi obtida na ausência do corpo rombudo. Nesta figura um aumento do valor da velocidade é observada na configuração com a caixa de tranquilização.

A **figura 4.6a** mostra a evolução da velocidade ao longo do eixo  $X=0$  para duas situações, isto é, o queimador na configuração inicial e aquela obtida após a inclusão da caixa de tranquilização. Observa-se, primeiramente, a diferença do

valor de velocidade, cerca de, em média, de 4m/s maior, na configuração atual do que na inicial.

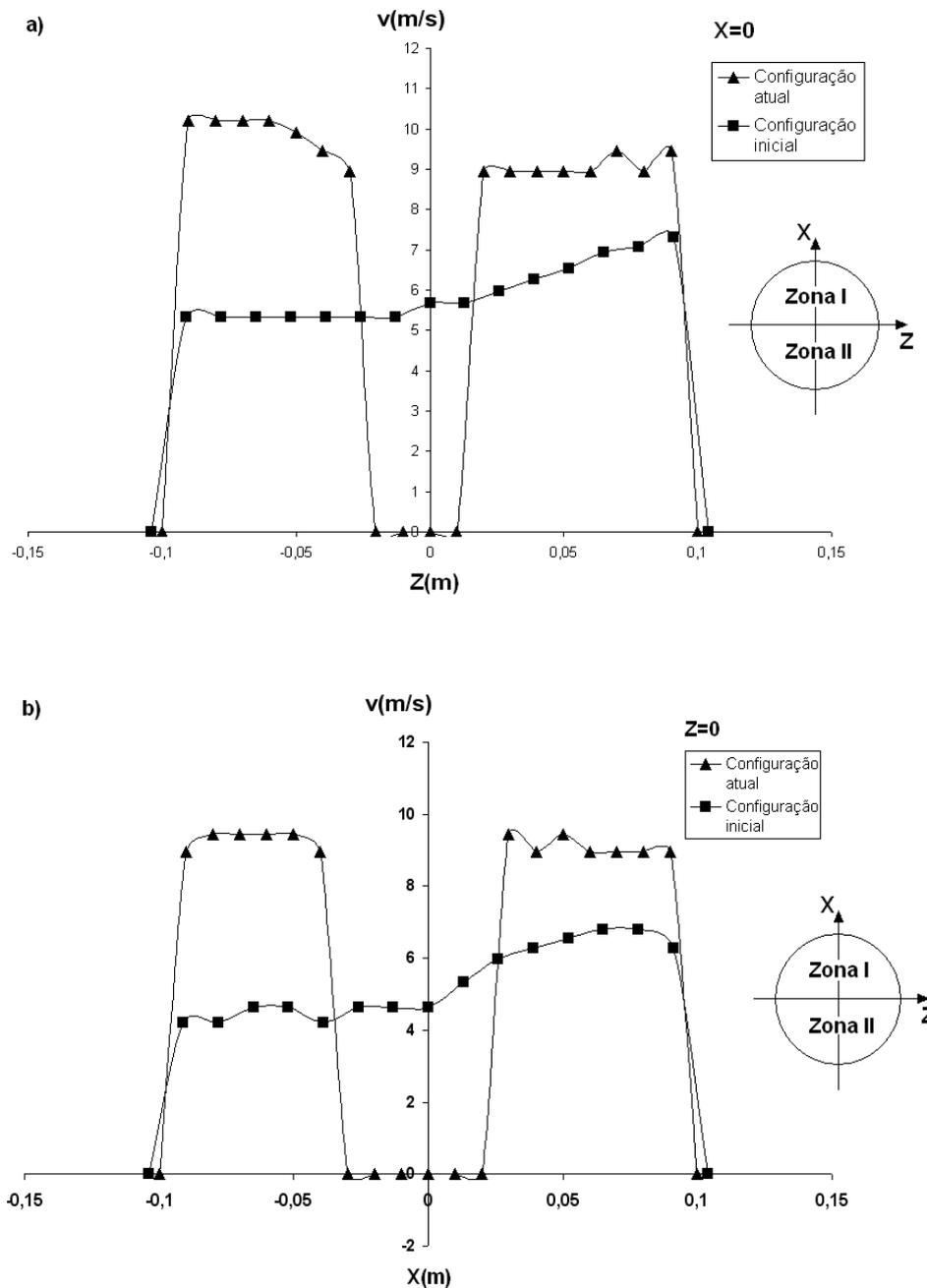


Figura 4.6 Evolução da velocidade nos eixos (a)  $X=0$ , (b)  $Z=0$  na saída do duto ar anular correspondente a uma frequência elétrica de 40 Hz..

A homogeneidade do campo de velocidade foi melhorada com a nova configuração, porém a maior velocidade é observada para valores negativos de  $Z$ , contrariamente ao que ocorria na configuração inicial do experimento.

Na configuração inicial a diferença entre os valores máximo e mínimo da velocidade obtida ao longo do eixo  $X=0$  era de 2m/s como mostrado na **figura 4.6a**, enquanto que, na configuração atual esta diferença é de apenas 1,2 m/s.

Na **figura 4.6b** é mostrada a evolução de velocidade ao longo do eixo  $Z=0$ . Nesta figura é claramente observada a diferença de velocidade de 2,5m/s entre a zona I e II que se atingia na configuração inicial. Na configuração atual esta diferença é de apenas 0,5 m/s, o que caracteriza uma melhor homogeneidade do escoamento na seção de saída.

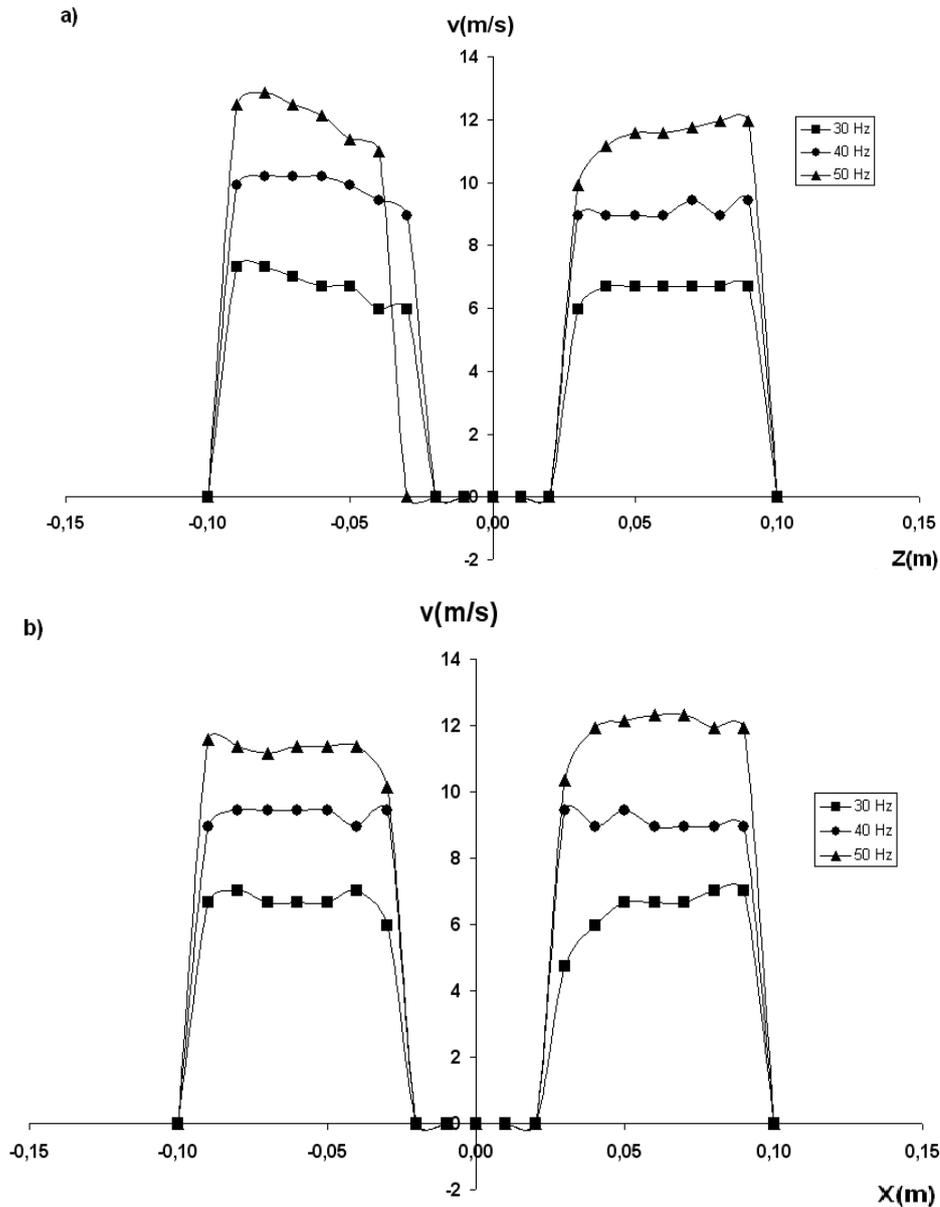


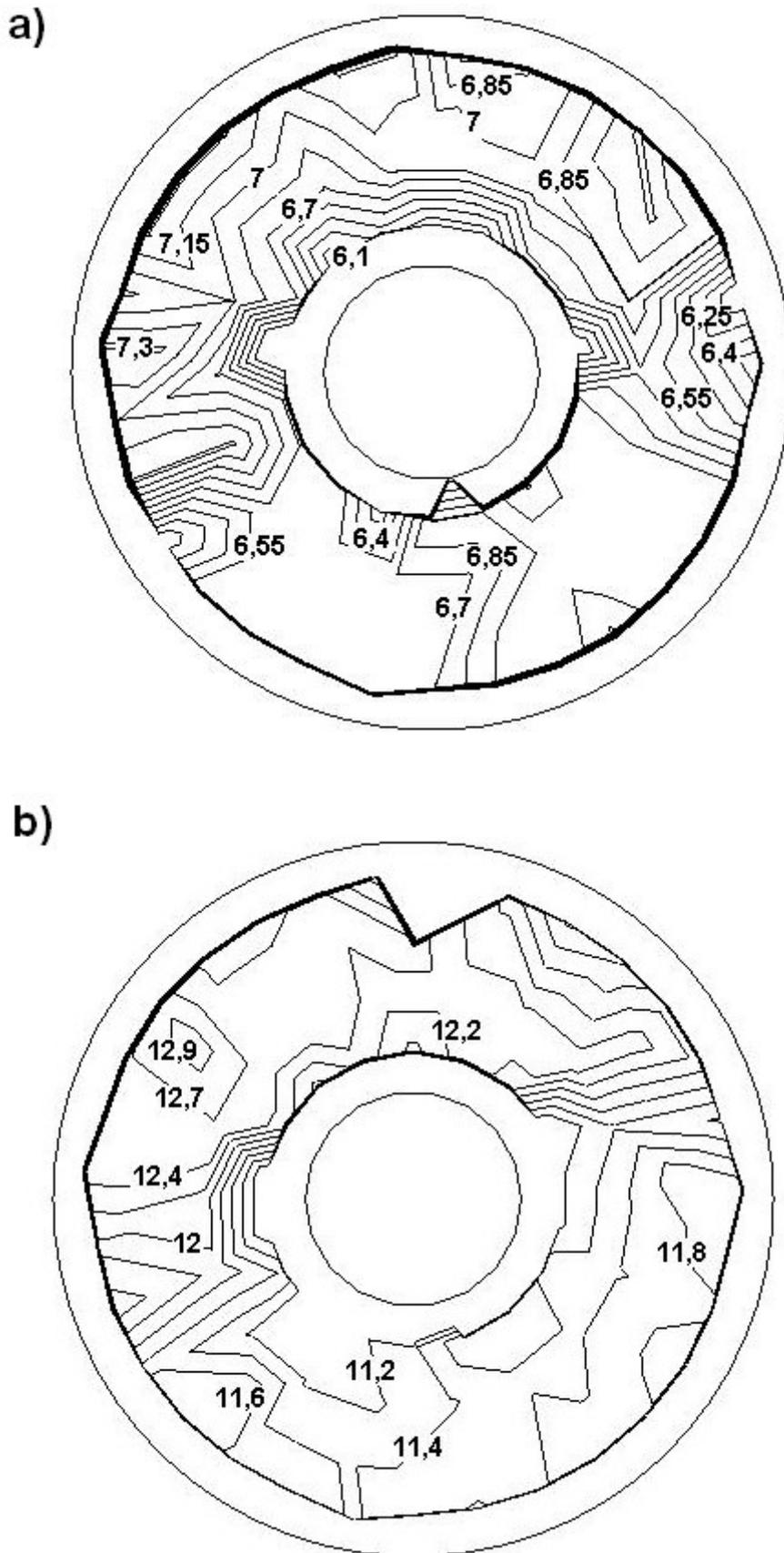
Figura 4.7 Velocidade no anular para diferentes valores da frequência de rotação do ventilador para a configuração atual. (a)  $X=0$ ; (b)  $Z=0$ .

Na **figura 4.7** é traçada a evolução da velocidade do ar ao longo eixos  $X=0$  e  $Z=0$  para diferentes valores da frequência de rotação e para a configuração atual do queimador. Nesta figura se observa que, com o aumento da frequência de rotação do ventilador, aumenta a não homogeneidade do escoamento.

Na **figura 4.7a**, que mostra a velocidade ao longo do  $X=0$ , se observa que maior velocidade é obtida sistematicamente para  $Z<0$ , região em que também é observada maior não homogeneidade do escoamento. Na **figura 4.7b** aonde é traçada a velocidade ao longo do eixo  $Z=0$  a velocidade obtida para valores de  $X>0$  é maior do que a medida para  $X<0$ .

Uma caracterização global do campo de velocidade na zona anular mediante ao uso de linhas iso-cinéticas para freqüências de rotação do ventilador de 30 Hz e 50 Hz é mostrada na **figura 4.8**. Note que estas foram as freqüências usadas na subsequente caracterização da chama turbulenta e que, no caso da chama quase laminar, correspondente a freqüência do ventilador de 5 Hz, não se conseguiu medidas com o tubo de Pitot. Neste caso a velocidade foi obtida com um anemômetro. Esta figura mostra que, apesar da caixa de tranquilização, o escoamento na saída do duto permanece não homogêneo. De fato, a diferença entre os valores máximo e mínimo da velocidade é de 0,92 e 1,6m/s, para as freqüências de rotação de 30 e 50 Hz, respectivamente. Estas diferenças, quando reportadas a um valor médio “representativo” da velocidade (6,6 e 11,7m/s), leva a diferenças relativas de 13,9 e 13,6% respectivamente. A redução desta não homogeneidade necessita de modificações na caixa de tranquilização e não será tentada neste trabalho. A escolha da velocidade representativa no anular foi arbitrária e não baseada em uma média ponderada.

Cabe notar que, em todos os casos que serão apresentados, a vazão de ar é muito superior ao valor estequiométrico. Isto foi feito de modo a garantir que o combustível reage apenas com o ar oriundo do duto, que não ocorre interação entre o jato de combustível e o ar da sala e que, ao adentrar o sistema de exaustão de gases queimados, a temperatura destes é suficientemente baixa devido a diluição pelo excesso de ar.



## 4.2. Análise de incertezas experimentais

Nesta seção será apresentada uma análise da incerteza envolvida na obtenção dos dados experimentais, em particular no que diz respeito à estimativa do valor do número de Reynolds do jato de combustível, principal parâmetro de similaridade do experimento.

### 4.2.1. A natureza das incertezas experimentais

A utilização de o método de descrição das incertezas das variáveis envolvidas no experimento, necessita da determinação da natureza das incertezas, as quais podem ser classificadas em duas categorias [54]:

- Incertezas aleatórias
- Incertezas sistemáticas

Incertezas aleatórias fazem com que a medida de uma mesma quantidade, quando repetida apresente valores diferentes.

Incertezas sistemáticas fazem com que medidas repetidas apresentem o mesmo desvio em relação ao valor exato, sem razão aparente.

Em termos de estimativa da confiabilidade as experiências são divididas em duas categorias:

- Experiências de várias amostragens,
- Experiências de uma única amostragem.

Experiências onde as incertezas não são obtidas via repetição são as chamadas experiências de uma única amostragem.

Uma notação satisfatória para uma medição de uma variável deve incluir:

- A melhor estimativa do valor real da variável medida.
- Uma indicação do valor do desvio esperado da estimativa, ou seja, a incerteza.

A melhor estimativa do valor real é normalmente dada pelo valor medido, ou pela média,  $m$ , caso existam vários valores medidos da variável. Uma medida de confiabilidade da medida é dada pela incerteza  $\delta m$ . Então uma maneira completa de se reportar uma medida é:

$$m \pm \delta m \quad \text{ou} \quad m \pm \frac{\delta m}{m}. \quad (4.8)$$

A determinação da faixa de incerteza,  $\delta m$ , pode ser realizada por:

- Pré-testes onde são feitas várias medidas e pode-se calcular o desvio padrão,
- Estimativa das incertezas dos instrumentos fornecida pelos fabricantes,
- Bom senso.

### 4.2.2. Propagação de incertezas

Considere medições independentes, das variáveis  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ , que serão utilizadas para calcular algum resultado ( $R$ ). A incerteza relativa a cada grandeza, medida independentemente, é estimada como  $u_i$ . Desejamos analisar como as incertezas nos  $x_i$ 's propagam-se no cálculo de  $R$  a partir dos valores medidos.

Em geral,  $R$  pode ser expresso como  $R = R(x_1, x_2, \dots, x_n)$  [53].

Pode ser demonstrado (Kline, S.J. e MecClintok, F.A., 1953 citado por Azevedo[54]), que a melhor representação para a incerteza relativa do resultado é dada pela soma quadrática das incertezas individuais:

$$u_R^2 = \left( \frac{x_1}{R} \frac{\partial R}{\partial x_1} u_{x_1} \right)^2 + \left( \frac{x_2}{R} \frac{\partial R}{\partial x_2} u_{x_2} \right)^2 + \dots + \left( \frac{x_n}{R} \frac{\partial R}{\partial x_n} u_{x_n} \right)^2. \quad (4.9)$$

### 4.2.3. Determinação da incerteza do número de Reynolds

O número de Reynolds do jato de combustível,  $Re_j$ , é definido como

$$Re_j = \frac{U_j D_j \rho_{GNV}}{\mu_{GNV}}, \quad (4.10)$$

onde  $U_j$  é a velocidade média no jato de combustível,  $D_j$  é o diâmetro do jato central, a densidade e a viscosidade dinâmica do GNV são  $\rho_{GNV}$  e  $\mu_{GNV}$  respectivamente. A contribuição para a incerteza em  $Re_j$  devido à incerteza em cada variável utilizada em seu cálculo é dada por:

$$\frac{\partial Re_j}{\partial U_j} = \frac{D_j \rho_{GNV}}{\mu_{GNV}}, \quad (4.11)$$

$$\frac{\partial Re_j}{\partial D_j} = \frac{U_j \rho_{GNV}}{\mu_{GNV}}, \quad (4.12)$$

$$\frac{\partial Re_j}{\partial \rho_{GNV}} = \frac{U_j D_j}{\mu_{GNV}}, \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial Re_j}{\partial \mu_{GNV}} = -\frac{U_j D_j \rho_{GNV}}{\mu_{GNV}^2}. \quad (4.14)$$

Com as equações (4.11) a (4.14) pode-se substituir na expressão (4.9) para estimar a incerteza relativa experimental propagada:

$$(u_{Re})^2 = \left( \frac{U_j}{Re_j} \frac{\partial Re_j}{\partial U_j} u_{U_j} \right)^2 + \left( \frac{D_j}{Re_j} \frac{\partial Re_j}{\partial D_j} u_{D_j} \right)^2 + \left( \frac{\rho_{Gás}}{Re_j} \frac{\partial Re_j}{\partial \rho_{Gás}} u_{\rho_{Gás}} \right)^2 + \left( \frac{\mu_{Gás}}{Re_j} \frac{\partial Re_j}{\partial \mu_{Gás}} u_{\mu_{Gás}} \right)^2. \quad (4.15)$$

obtendo as incertezas relativas:

$$u_{Re_j, U_j} = \frac{\delta Re_{j, U_j}}{Re_j} = \frac{U_j}{Re_j} \frac{\partial Re_j}{\partial U_j} u_{U_j} = u_{U_j},$$

$$u_{Re_j, D_j} = \frac{\delta Re_{j, D_j}}{Re_j} = \frac{D_j}{Re_j} \frac{\partial Re_j}{\partial D_j} u_{D_j} = u_{D_j},$$

$$u_{Re_j, \rho_{GNV}} = \frac{\delta Re_{j, \rho_{GNV}}}{Re_j} = \frac{\rho_{GNV}}{Re_j} \frac{\partial Re_j}{\partial \rho_{GNV}} u_{\rho_{GNV}} = u_{\rho_{GNV}},$$

$$u_{Re_j, \mu_{GNV}} = \frac{\delta Re_{j, \mu_{GNV}}}{Re_j} = \frac{\mu_{GNV}}{Re_j} \frac{\partial Re_j}{\partial \mu_{GNV}} u_{\mu_{GNV}} = u_{\mu_{GNV}},$$

Da equação (4.15), a incerteza relativa do numero de Reynolds é:

$$u_{Re_j} = \pm \left[ (u_{U_j})^2 + (u_{D_j})^2 + (u_{\rho_{GNV}})^2 + (u_{\mu_{GNV}})^2 \right]^{1/2} \quad (4.16)$$

O diâmetro foi medido com um instrumento de resolução de 0,1 mm, assim, a incerteza relativa do diâmetro  $D_j$  é estimada como:  $u_{D_j} = \pm \frac{0,05}{d}$ .

A incerteza do manômetro Wika, modelo 232.54.115L, segundo informação do fabricante, é de  $\pm 2,5\%$ .

A incerteza do medidor de temperatura digital ECIL/WATLOW serie 935 é de:  $\frac{\delta T}{T} = \pm 0,25\%$ ; onde T é a temperatura observada na tela do medidor de temperatura digital.

A Incerteza do Rotâmetro Omega Eng. Inc. tipo 3P é de  $\frac{\delta \dot{V}}{\dot{V}} = \pm 5\%$  onde

$\dot{V}$  é a vazão volumétrica corrigida.

No que se refere à velocidade média do jato, a incerteza relativa é obtida da seguinte expressão:

$$U_j = \frac{\dot{V}}{\left( \pi \times \frac{D_j^2}{4} \right)} \quad (4.17)$$

Diferenciando e, introduzindo a incerteza do rotâmetro, obtemos a equação para a incerteza relativa à velocidade:

$$u_{U_j} = \pm \left[ (u_{\dot{V}})^2 + (-2u_{D_j})^2 \right]^{1/2} = \pm \left[ (\pm 0,05)^2 + ((-2)(\pm 0,05/d))^2 \right]^{1/2} = 5,09\%.$$

Com respeito à densidade, a incerteza relativa é obtida a partir da equação de estado para gases perfeitos:

$$\rho = \rho(P, R, T) = \frac{P}{RT}$$

Diferenciando e, introduzindo a incerteza relativa do medidor de temperatura, ( $\pm 0,25\%$ ), de pressão ( $\pm 2,5\%$ ), e desprezando a incerteza relativa à  $R$ , obtem-se a equação para incerteza relativa à densidade:

$$u_{\rho_{GNV}} = \pm \left[ (u_P)^2 + (-u_T)^2 \right]^{1/2} = \pm 2,51\%.$$

No que se refere à viscosidade dinâmica  $\mu_{GNV}$ , a incerteza relativa é obtida da lei de Sutherland:

$$\mu_{GNV} = \frac{bT_{GNV}^{3/2}}{S + T_{GNV}}.$$

Diferenciando e introduzindo a incerteza relativa do medidor de temperatura ( $\pm 0,25\%$ ) e desprezando a incerteza relativa das constantes  $b$  e  $S$ , obtém-se a equação para a incerteza relativa à viscosidade dinâmica:

$$u_{\mu GNV} = \pm \left[ (1,1007 \times u_T)^2 \right]^{1/2} = \pm 5\% .$$

Substituindo na equação (4.16) obtém-se:

$$u_{Re_j} = \pm \left[ (u_{U_j})^2 + (u_{D_j})^2 + (u_{\rho GNV})^2 + (u_{\mu GNV})^2 \right]^{1/2} ,$$

$$u_{Re_j} = \pm 7,04\% .$$

A velocidade do ar anular foi obtida medindo a velocidade em diferentes pontos da zona anular com um tubo de Pitot, que tem uma incerteza de  $\pm 0,25$  mmca, e a temperatura de saída do ar anular foi obtida com um termopar tipo k cuja incerteza de medição do aparelho usado foi de  $\pm 0,1$  °C. Assim, se obtém uma incerteza na medida da velocidade do ar anular de 6,5%.

### 4.3. Sistema de Fluorescência Induzida por plano laser (PLIF)

Com a redução do custo de equipamentos lasers, ocorrida nas últimas décadas a espectroscopia laser se tornou uma alternativa viável para o diagnóstico de processos de combustão. Técnicas baseadas na utilização de laser têm a capacidade de medir propriedades do escoamento de modo não intrusivo, o que é particularmente interessante no caso de processos de combustão os quais são facilmente perturbados por sondas de amostragem. Por exemplo, a utilização do laser pode proporcionar alta resolução espacial (tipicamente de 0,1 mm), alta resolução temporal (tipicamente inferior a 100 ns) e alta sensibilidade (tipicamente concentrações na faixa de ppm). O PLIF é uma técnica derivada da Fluorescência induzida por Laser (LIF). Assim, inicialmente apresenta-se uma breve revisão dos fundamentos da técnica LIF.

#### 4.3.1. Fluorescência induzida por Laser (LIF)

Os sinais de interesse para o estudo da combustão detectados em um espectro LIF são, basicamente, decorridos de efeitos inelásticos, isto é,

interações onde há transferência de energia da radiação para a matéria ou, mais raramente, e com menor intensidade, da matéria para a radiação [55].

A luminescência molecular é a emissão de radiação eletromagnética proveniente de moléculas que foram excitadas, quando retornam ao seu estado fundamental. Este fenômeno, denominado de fotoluminescência, ocorre quando a absorção de fótons de luz é responsável pela excitação da molécula mediante a elevação de elétrons de valência de um orbital menos energético para um orbital de maior energia. Classicamente, a luminescência molecular é dividida em fluorescência e fosforescência, dependendo da natureza do estado excitado envolvido no processo. Se o estado excitado envolvido é singleto, onde o spin do elétron no orbital excitado mantém sua orientação original, tem-se a fluorescência, como mostrado na **figura 4.9**. Por outro lado, na fosforescência, a orientação do elétron que foi promovido ao estado excitado é invertida, dando origem ao estado excitado tripleto,  $T_n$ . Uma consequência da retenção da orientação original é o retorno de uma população que se encontra no estado excitado singleto para o estado fundamental, que tem caráter singleto, o qual é permitido e ocorre muito rapidamente. A título de ilustração o tempo de vida da fluorescência é de  $1,30 \pm 0,16 ns$  em uma chama não pré-misturada de  $CH_4/ar$  [56].

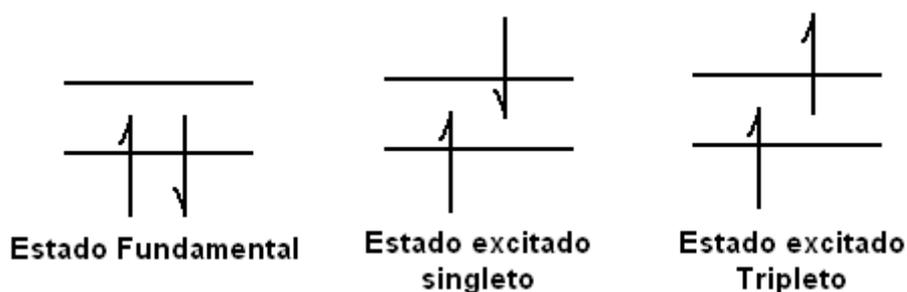


Figura 4.9 Representação dos estados energéticos de uma molécula.

Após a absorção da radiação, a população de moléculas é promovida para um estado excitado singleto,  $S_n$ , conforme o mostrado na **figura 4.10**. A molécula se desativa por relaxamento através dos níveis vibracionais de estados eletrônicos de mesma multiplicidade até atingir o primeiro nível vibracional do estado excitado singleto de menor energia ( $S_1$ ). Este processo de relaxamento recebe o nome de cruzamento interno (CI) e é um fenômeno que ocorre rapidamente e sem emissão de radiação.

A partir de  $S_1$ , a molécula pode seguir dois caminhos para retornar ao estado fundamental. Primeiro, se a diferença de energia entre  $S_1$  e  $S_0$  (estado fundamental) não for muito grande e existir possibilidade de sobreposição de

níveis vibracionais, a molécula pode ser levada ao mais baixo nível vibracional de  $S_1$  por relaxamento vibracional sem emissão de radiação eletromagnética, ou seja, ocorre um CI. Se, no entanto, a diferença energética entre  $S_1$  e  $S_0$  for relativamente grande, a desativação para o estado fundamental se dá com emissão de radiação na forma de fluorescência.

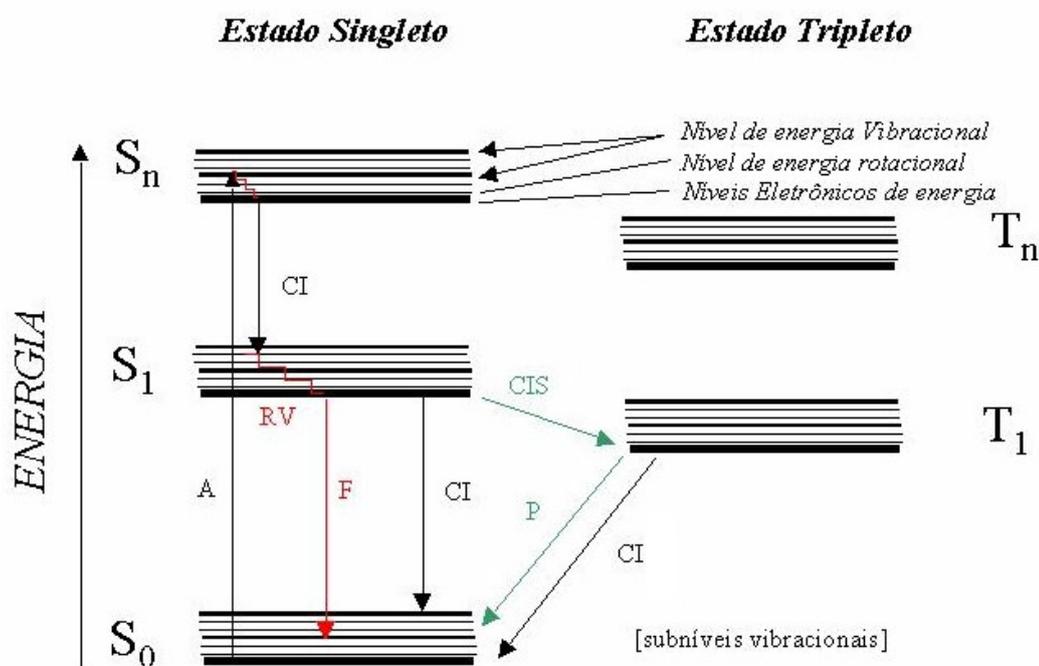


Figura 4.10 Diagrama de Jablonski modificado. (A) absorção de um fóton, ( $S_0$ ) estado fundamental, ( $S_n$ ) estado excitado singlete, ( $S_1$ ) primeiro estado excitado singlete, (RV) relaxamento vibracional, (CI) cruzamento interno, (CIS) cruzamento intersistemas, ( $T_n$ ) estado excitado tripleto. [57].

Para o estado excitado  $S_1$  sejam  $v''$ ,  $j''$  e  $v'$ ,  $j'$  os números quânticos vibracionais e rotacionais para os estados eletrônico fundamental e excitado, respectivamente o sinal de fluorescência relacionada a um estado energético com energia  $E(v'', j'')$  é determinado por:

$$S_F = c(\Omega/4\pi) \cdot \alpha_i \cdot n(T, p) \cdot f_{v'', j''}(T) \cdot E_i \cdot \{A/(A + Q(n_i, T) + P)\} \quad (4.18)$$

Onde  $S_F$  é a sinal de fluorescência,  $c$  é uma constante,  $\Omega$  é o ângulo sólido,  $\alpha_i$  é a fração molar das espécies  $n_i$ ,  $n(T, p) = p/k_B T$  é a densidade total à pressão  $p$  e a temperatura  $T$ ,  $k_B$  é a constante de Boltzmann's,  $f_{v'', j''}(T)$  é a fração de Boltzmann para o estado fundamental (rotacional-vibracional) com

os números quânticos  $v''$  e  $j''$ .  $E_i$  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 de colisões e  $P$  é a taxa de dissociação [58].

Se a pré-dissociação<sup>1</sup> domina todos os outros processos de relaxação ( $A \ll Q \ll P$ ), o fator de Stern-Volmer pode ser aproximado para  $A/P$  e assim a sinal de fluorescência é independente dos efeitos da extinção por colisão.

O sinal de fluorescência é função da fração molar  $\alpha_i$ , temperatura  $T$  e pressão  $p$ . Num de escoamento onde dois dos parâmetros são constantes, os dados podem ser reduzidos para obter imagens planares (2D) da distribuição das propriedades desconhecidas durante todo o campo de escoamento.

#### 4.3.2. Fluorescência induzida por plano laser (PLIF)

A Fluorescência Induzida por Plano Laser (PLIF) é uma técnica derivada da LIF que consiste em gerar uma folha laser, visando produzir uma imagem bidimensional da fluorescência. Desta forma, a PLIF envolve a iluminação do escoamento utilizando uma fina folha laser, a fim de excitar uma transição eletrônica de uma espécie química selecionada dentre as presentes no escoamento.

A imagem da fluorescência emitida na região estudada é obtida com o auxílio de uma câmera intensificadora. Um esquema básico do PLIF é mostrado na **figura 4.11**. O feixe atravessa um conjunto de lentes, uma cilíndrica e outra esférica, visando gerar a folha laser de espessura escolhida. A abertura e altura da folha laser são fixadas, principalmente, pela distância focal da lente cilíndrica e o ajuste da espessura é controlado pela separação entre as lentes. A folha laser produzida cruza a chama, onde é excitado o radical selecionado, no presente caso OH, produzindo assim a fluorescência.

---

<sup>1</sup> A pré-dissociação deve ser diferenciada da dissociação. Na dissociação, a radiação absorvida leva o elétron diretamente para um nível vibracional suficientemente energético para causar a ruptura da ligação. No caso da pré-dissociação, a radiação leva inicialmente o elétron a um nível eletrônico de mais alta energia. Posteriormente, por cruzamento intersistema, o elétron passa a um nível eletrônico baixo mas em um nível vibracional mais energético. A pré-dissociação ocorre quando este nível vibracional tem energia suficiente para causar a ruptura da ligação.

O sinal de fluorescência é captado por uma câmera intensificada (ICCD), onde é posicionado um filtro óptico passa banda a fim de restringir a transmissão apenas do comprimento de onda do sinal de fluorescência para formação das imagens, as quais são transmitidas ao computador e processadas pelo programa DAVIS 7.2.

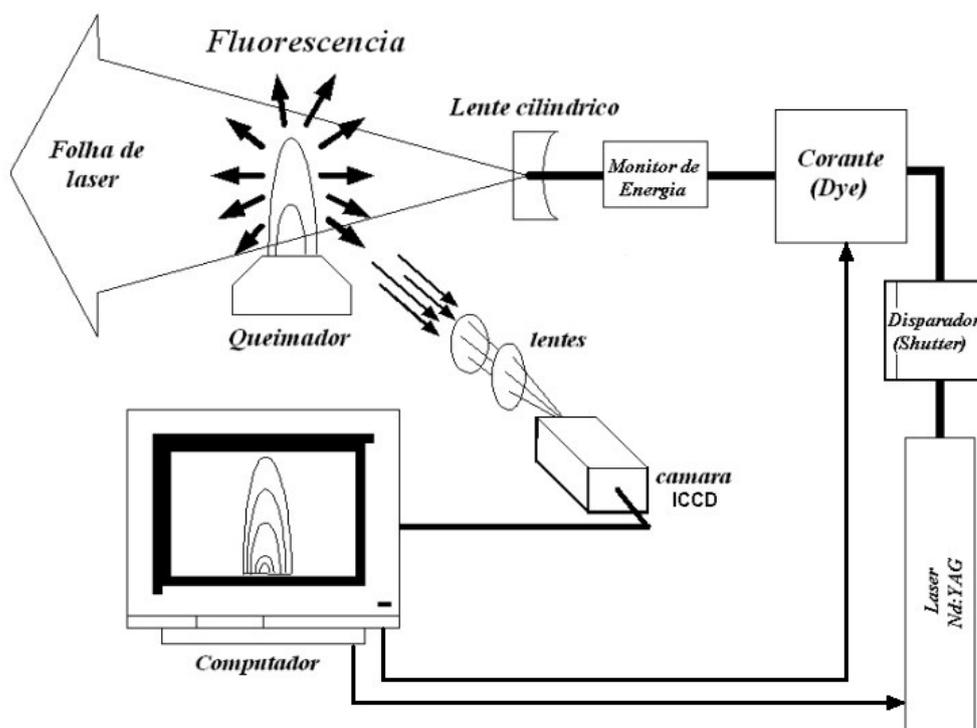


Figura 4.11 Esquema de identificação dos componentes do PLIF.

Uma das limitações da técnica PLIF é a sublimação, ou seja, a desativação da excitação sem a emissão de fótons, onde a energia se dissipa através de colisões eletrônicas. Entretanto, os fatores que influenciam a sublimação são principalmente o aumento da pressão e a interação entre o composto fluorescente e outra substância presente no sistema, como oxigênio e impurezas existentes [59].

### 4.3.3. Principais componentes do PLIF

O sistema adquirido junto à empresa LA VISION GmbH, implementa a técnica de diagnóstico de fluorescência induzida por plano laser (PLIF). Os principais componentes deste sistema mostrados, na **figura 4.12**, serão apresentados.

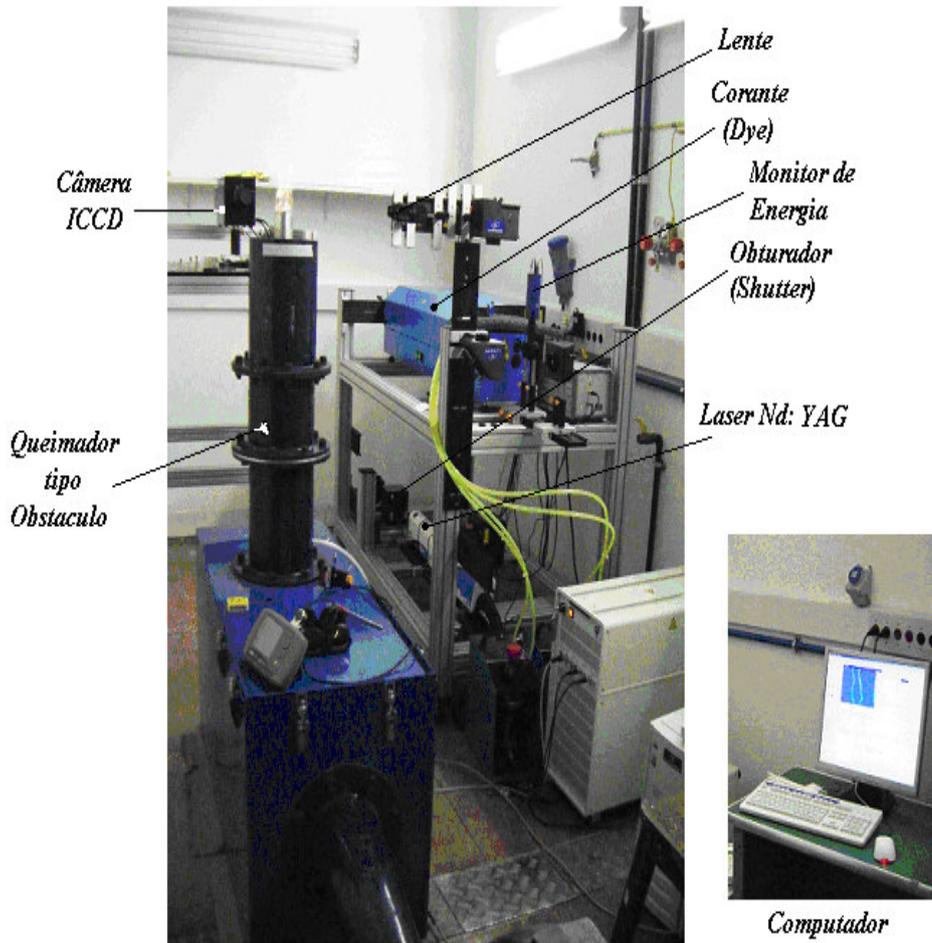


Figura 4.12 Configuração experimental para o PLIF.

#### 4.3.3.1. Laser de bombeamento Nd: YAG

O laser de bombeamento Nd:YAG é basicamente um feixe de alta energia de luz cujo comprimento de onda fundamental, 1064nm, ou um de seus harmônicos (532, 355, 266 e 213nm) será utilizado para excitar elétrons de um laser de corante.

Neste trabalho foi utilizado o equipamento da marca Quantel, modelo Brilliant b, o qual tem as seguintes características de emissão:

- Comprimento de onda: A emissão do laser pode ser obtida em Ultravioleta, visível, ou infravermelho. A família dos lasers Nd:YAG Brilliant b podem emitir 1064, 532, 355, 266 e 213nm.
- Duração do pulso de laser: Dependendo do modo de operação, a duração do pulso do laser pode ter uma faixa de emissão contínua ou um

pulso ultra-curto de aproximadamente  $10^{-13}$ s. Operando em modo com interruptor, o laser *Brilliant b* tem pulsos na faixa de 4 a 6ns. A duração do pulso do laser empregado neste trabalho é de 5,64ns no comprimento de onda 1064nm.

- Energia por pulso: Dependendo do tipo de laser, o pulso pode estar na faixa de  $10^{-13}$  a  $10^6$ Joules. O laser *Brilliant b* pode fornecer uma alta energia por pulso, de 850mJ no comprimento de onda de 1064nm. Neste trabalho foi utilizado o terceiro harmônico, 355nm, para o qual a energia média por pulso é de 260mJ.
- Potência média do laser: O valor da potência média do laser por pulso é obtida multiplicando a energia por pulso e a taxa de repetição (frequência). O laser *Brilliant b* tem uma frequência de 10 Hz com uma potência média de 8.5W para 1064nm. Para 355nm foi obtida uma potencia de 30mW.
- Divergência: Para lasers padrão a divergência do feixe é inferior a 0,5 ou 0,7mrad dependendo da taxa de repetição do laser. Esta divergência é medida para  $1/e^2$  do valor máximo, isto é, 85% da energia total.

Classificações dos lasers: Devido às extensas características das emissões laser (comprimento de onda, energia, etc.), os riscos causados pelo uso do laser são fortemente variáveis. O laser *Brilliant b* faz parte da chamada classe 4, os quais são capazes de produzir reflexos perigosos. Isto pode causar danos aos olhos, à pele e também riscos de queimaduras.

#### 4.3.3.2. Obturador (Shutter)

Após deixar o equipamento Quantel-Brilliant-b, o feixe laser passa pelo obturador (“*Shutter*”). O Obturador da LA VISION é controlado por computador via *trigger* e será aberto apenas durante a aquisição de dados. Desta forma, garante-se que o laser de corante funcionará apenas quando for necessário.

#### 4.3.3.3. Laser de Corante (Dye)

O laser de corante modelo CSTR-G-3000 da Sirah GmbH é bombeado pelo laser pulsado Nd:YAG. Sua frequência de repetição, energia do pulso de duração depende do laser de bombeio. Dado o laser de bombeio usado neste trabalho, o laser formado é de alta densidade de energia, portanto, pode causar

danos aos olhos e à pele, além de isso, ao colocar um objeto inflamável ou absorvente entre o caminho do laser pode se provocar um incêndio. O laser de corante possui um sistema de recirculação, a fim de se evitar danos no sistema. O corante utilizado neste trabalho chama-se o Coumarin 153, solúvel em etanol a uma concentração de 1,6g/l, com eficiência máxima de 15%, com faixa de comprimento de onda de emissão situada entre 517 e 574nm.

O laser de corante é composto por um sistema óptico chamado de “*Cobra Stretch*”, no qual o feixe de luz passa por múltiplas reflexões, durante o qual atravessa um sistema ressonante de uma célula de corante, de três placas de Brewster, de uma grade de refração e um elemento de seleção de comprimento de onda. Devido ao arranjo, o feixe retorna à célula de corante para ser pré-amplificado. Finalmente, uma célula com maior quantidade de corante é utilizada para amplificar a energia do laser. Em seguida, o feixe passa por um cristal não-linear e um compensador apropriado, onde é dobrada a frequência da luz laser.

As principais especificações técnicas do laser de corante da Sirah são:

- Grade de difração de 3000linhas/mm,
- Um espelho como elemento de seleção de comprimento de onda,
- Largura de linha 0,0010nm,
- Eficiência de 25%,
- Faixa de comprimentos de onda entre 350 e 580nm,
- Erro absoluto no comprimento de onda <0,03nm,
- Reprodutibilidade do comprimento de onda <0,005nm,
- Estabilidade Térmica <1,5Ghz/°C,
- Divergência de 0,5mrad,
- Grau de polarização >98%.

A finalidade do laser de corante é permitir fazer a varredura de determinadas faixas de comprimentos de onda, onde as espécies químicas são excitadas.

#### **4.3.3.4. Monitor de energia**

O monitor de energia LA VISION possui um conversor analógico-digital de 12bit capaz de medir a energia de cada pulso laser simultaneamente com aquisição das imagens pela câmera. Assim, correções para as variações da energia do laser podem ser realizadas via software seja on-line, seja com rotinas de pós-processamento.

Os valores de energia medidos pelo monitor são usados para compensar as variações de intensidade do laser, chamada correção de intensidade, a qual calcula a intensidade corrigida  $I_{corr}$  para cada pixel da imagem, segundo

$$I_{corr} = I_{img} \frac{I_{Referência}}{I_{Energia}}, \quad (4.22)$$

onde  $I_{img}$  é a intensidade de cada pixel da imagem adquirida,  $I_{Referência}$  é a intensidade de referência definida no software e  $I_{Energia}$  é a intensidade equivalente medida pelo monitor de energia a cada pulso.

#### 4.3.3.5. Sistema óptico de criação do plano laser

O sistema óptico de criação do plano laser da LA VISION consiste em um conjunto de lentes de quartzo de diâmetros de 12mm (transmitância de 75% na faixa de 230 a 800nm) protegidas por uma capa, cuja disposição permite ajustes de posição e foco. Este sistema é capaz de trabalhar nas altas potências do laser Nd:YAG ( $2\text{J}/\text{cm}^2$ ). A espessura da folha laser pode ser variada de entre 0,5 a 2,5mm e sua altura podem ser facilmente ajustadas pela focalização. A abertura pode ser determinada através da distância focal da lente divergente ( $f=20\text{mm}$  foi empregada). A separação entre as lentes, que pode variar de 300 a 2000mm, determina o comprimento da folha óptica. De acordo com a **figura 4.13** define-se a relação do ângulo de abertura em função do diâmetro do laser e o comprimento focal, com a seguinte equação:

$$\tan(\alpha/2) = d/(2f). \quad (4.23)$$

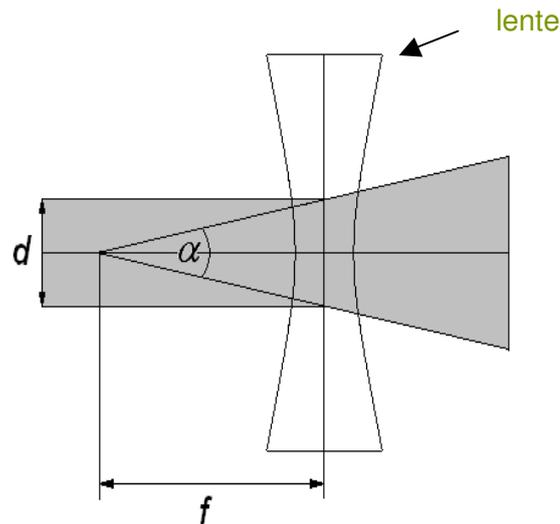


Figura 4.13 Relação entre o ângulo de abertura  $\alpha$ , o comprimento focal  $f$  e o diâmetro do feixe laser  $d$ .

#### 4.3.3.6. Câmara Intensificadora (ICCD)

A câmara Intensificadora ICCD é composta por uma câmara CCD (“*Charged capled device*”), um dispositivo eletro-óptico, um chip de fósforo padrão P43 e um foto-cátodo. Os fótons oriundos do processo de fluorescência são focalizados na janela de entrada do intensificador de imagem, onde a luz é convertida em eletrons através do foto-catodo, os quais são amplificados dentro da placa de micro canais e convertido novamente na forma de luz pela superfície de fósforo na janela de saída do intensificador de imagem. O intensificador é um dispositivo eletrônico com tempo de exposição extremamente variável, o qual permite que a câmara CCD, usualmente com faixa de tempo de exposição da ordem de ms, pode ser modulada através do intensificador, reduzindo o tempo de exposição para apenas alguns ns. A imagem que sai da janela do intensificador é focalizada no CCD, através da otimização de um conjunto de lentes. A exposição efetiva da câmara é produzida pela integração dos intervalos de tempo da emissão do fósforo.

O tempo de vida da câmara ICCD é aproximadamente 5000 horas para uma intensidade de luz de 10mmLux. O programa Davis 7.2 controla o HS-IRO (High Speed Intensifier Relais Optic) através do *trigger* durante a aquisição das imagens, visando limitar funcionamento do sistema ao tempo de aquisição de dados desejado.

A eletrônica do sistema intensificador permite alta repetição com freqüências acima de 2MHz, a largura dos pulsos eletrônicos é de 30ns. A

unidade lógica do sistema opera em uma frequência de 200MHz, isso assegura a possibilidade de selecionar intervalos de tempo de captura em porções de até 5 ns.

O chip de fósforo padrão, tipo P43, possui alta eficiência e um tempo de decaimento razoavelmente curto. Assim, a eficiência do P43 é de 90% com tempo de decaimento de 1ms, para 10%. A imagem intensificada possui uma resolução máxima de 10 $\mu$ m/linha, com um contraste de 5%. Na câmera CCD o tamanho de cada pixel é da ordem de 10 $\times$ 10 $\mu$ m.

#### **4.3.3.7. Sistema de análise, processamento e visualização de dados**

O sistema de análise de dados é composto pelos diferentes módulos que compõem o programa de software Davis 7.2, o qual oferece diversas ferramentas para aquisição de dados processamento e visualização de imagens. Neste trabalho, duas etapas foram realizadas para obtenção de imagens do radical OH. A primeira consistiu na gravação das imagens. Foram obtidas 1000 imagens em cada situação experimental, isto é, para um dado valor de razão de ar e de combustível. Porém, antes de realizar a aquisição destas, obteve-se a imagem de fundo (background), isto é, do ruído eletrônico existente no CCD na ausência de excitação. Além disto, foram obtidas 1000 imagens do plano laser utilizando-se a técnica de espalhamento Rayleigh. Isto é necessário, pois todos os lasers exibem uma distribuição de intensidade variável ao longo da seção transversal. Se não for levada em conta, esta não homogeneidade diminui a exatidão dos resultados.