

### 3 Metodologia experimental

Neste capítulo são descritos os detalhes do projeto de construção da instalação experimental do queimador, incluindo um breve resumo sobre os equipamentos e técnicas de medição laser não intrusivas como LDV e PIV.

#### 3.1 Projeto da instalação experimental

O enfoque principal do experimento é a determinação do campo de velocidade na região de recirculação situada a jusante da face do queimador. Como foi visto no capítulo 2, nos casos em que a velocidade do escoamento de ar é suficientemente elevada, esta região é responsável pelo ancoramento da chama turbulenta. Para este fim foi projetada e construída uma instalação experimental que permite realizar medições em escoamentos quimicamente inertes, isto é, com Nitrogênio e/ou ar, e em escoamentos reativos de gás natural (GNV) e de ar.

O principal parâmetro do projeto do queimador tipo obstáculo é a potência máxima de operação, estimada em 10 kW. A partir desse valor é possível determinar a vazão de combustível (GNV) no queimador, utilizando-se a definição de poder calorífico superior do combustível queimado na combustão [28]:

$$\dot{m}_{GNV} = P_c / PC_s, \quad (3.1)$$

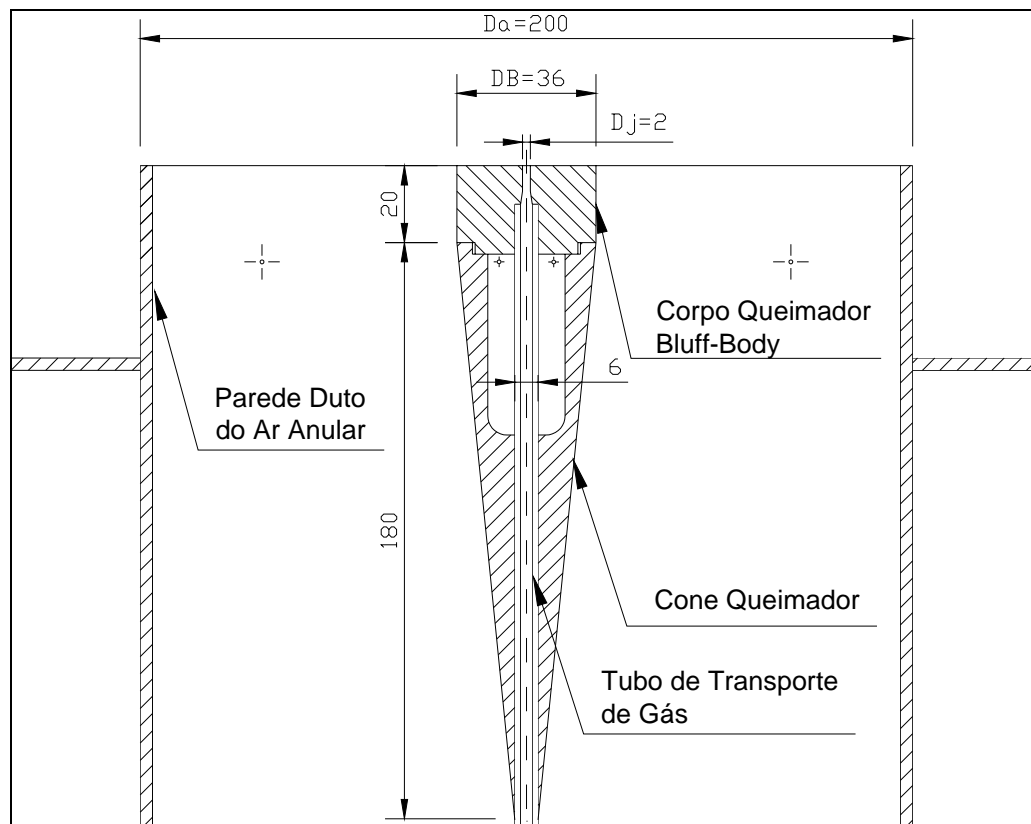
onde  $P_c$  é a potência máxima em kW ou a máxima liberação de calor por unidade de tempo do queimador na combustão, estimado em 10kW, e  $PC_s$  é o poder calorífico superior do combustível GNV cujo valor é 55528 kJ/kg ou 9190 kCal/m<sup>3</sup>.

Assim, segundo a **equação (3.1)**, a vazão máxima de GNV no queimador é de  $2,6 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s, o que permite determinar a faixa de operação do rotâmetro necessário para medição da vazão de GNV. Na realidade, a máxima vazão efetivamente utilizada nos experimentos foi limitada em  $2,2 \times 10^{-4}$  m<sup>3</sup>/s pelo rotâmetro disponível comercialmente no mercado o qual possuía um fundo de

escala de  $0,8 \text{ Nm}^3/\text{h}$ , sendo este valor finalmente refletido na potência nominal do queimador em  $9,53 \text{ kW}$  para o uso na experiência.

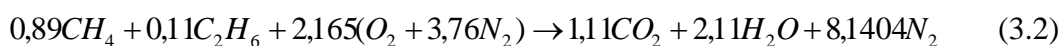
No que diz respeito às dimensões do queimador, foram assumidas características geométricas em conformidade com estudos anteriores [17,26] de queimadores do tipo obstáculo, como é mostrado na **Figura 3.1**, de modo a garantir o regime de funcionamento do escoamento turbulento estabilizado:

- (i) Diâmetro do jato central do GNV:  $D_j=2 \text{ mm}$ ,
- (ii) Diâmetro do corpo rombudo do queimador tipo obstáculo:  $D_B=36 \text{ mm}$ ,
- (iii) Diâmetro de saída do túnel de vento para o ar anular:  $D_a=200 \text{ mm}$ .



**Figura 3.1** – Diagrama da seção transversal do queimador mostrando as características geométricas de construção.

Note-se que a máxima velocidade média atingida na saída do jato central do escoamento de GNV sob condições de operação do rotâmetro para GNV de 2 bar e  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  é de  $70 \text{ m/s}$ , para um diâmetro de saída do queimador de  $2 \text{ mm}$ , correspondendo a um número de Reynolds máximo de 9870 (ver **Tabela 3.1**). Para determinar uma relação entre GNV e ar que participam do processo de combustão realizou-se uma análise da combustão completa (estequiométrica) assumindo-se que a composição do GNV é 89% de  $\text{CH}_4$  e 11% de  $\text{C}_2\text{H}_6$ :



Considerando-se que a densidade do gás GNV é  $\rho_{\text{GNV}} = 0,78 \text{ kg/m}^3$  e a do ar,  $\rho_{\text{ar}} = 1,24 \text{ kg/m}^3$ ; e fazendo um balanço de massa da **equação (3.2)**, calculou-se a relação entre a quantidade de GNV e ar que intervêm no processo de combustão teórica, sendo esta:

- (i) 1 kg de GNV reage com 17,03 kg de ar ou,
- (ii)  $1 \text{ Nm}^3/\text{s}$  de GNV reage com  $10,32 \text{ Nm}^3/\text{s}$  de ar.

Destas relações estequiométricas pode-se estimar os regimes de operação do jato central do GNV segundo leitura do rotâmetro de GNV. Para isto foi calculado o número de Reynolds baseado na velocidade ( $U_j$ ) e o diâmetro de saída do jato central ( $D_j$ ), sendo a viscosidade dinâmica do GNV de  $1,1 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$  para, finalmente, relacioná-las com as vazões de ar necessárias para a combustão estequiométrica, segundo o mostrado na **Tabela 3.1**.

**Tabela 3.1** – Estimativa dos regimes de operação do jato central de GNV.

Regime de Operação (%)	Leituras do jato central no rotâmetro				Ar estequiométrico	
	Vazão Volumétrica: $\dot{V}_j \text{ (m}^3/\text{s)}$	Vazão Mássica: $\dot{m}_j \text{ (Kg/s)}$	Velocidade Média: $U_j \text{ (m/s)}$	Número de Reynolds: $Re_j$	Vazão Volumétrica ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Vazão Mássica (Kg/s)
100	2,20E-04	1,71E-04	70,03	9870	2,27E-03	2,92E-03
90	1,98E-04	1,53E-04	63,03	8883	2,04E-03	2,63E-03
80	1,76E-04	1,36E-04	56,02	7896	1,81E-03	2,34E-03
70	1,54E-04	1,19E-04	49,02	6909	1,59E-03	2,05E-03
60	1,32E-04	1,02E-04	42,02	5922	1,36E-03	1,75E-03
50	1,10E-04	8,53E-05	35,01	4935	1,13E-03	1,46E-03
40	8,80E-05	6,82E-05	28,01	3948	9,07E-04	1,17E-03
30	6,60E-05	5,12E-05	21,01	2961	6,80E-04	8,77E-04
20	4,40E-05	3,41E-05	14,01	1974	4,53E-04	5,85E-04
10	2,20E-05	1,71E-05	7,00	987	2,27E-04	2,92E-04
5	1,10E-05	8,53E-06	3,50	493	1,13E-04	1,46E-04

Durante a operação do queimador para fins de diluição dos produtos de combustão, deseja-se operar com excesso de ar “a”, sendo a representação básica desta combustão a seguinte:



onde “a” é o inverso da riqueza da mistura. É necessário fornecer ar suficiente para garantir um escoamento turbulento, assim foi se assumido um valor de excesso de ar “a” igual a 70, como indicado na **Tabela 3.1**, sendo a vazão máxima de ar estequiométrico igual a  $2,27 \times 10^{-3} \text{ Nm}^3/\text{s}$ .

Utilizando-se a **equação (3.3)**, também é possível determinar que a riqueza global (1/a) da mistura entre o GNV e o ar total fornecido, sendo este valor de 0,014 (para  $a=70$ ). Nestas condições, o acréscimo de temperatura devido à combustão é de cerca de 130 K, acréscimo este que não impõe aos materiais habituais carga térmica apreciável. A estimativa leva em conta a temperatura atingida pela mistura dos produtos da combustão e as quantidades de ar fornecido por um ventilador e pelo meio ambiente circundante, respectivamente. Este cálculo foi realizado no intuito de avaliar a segurança operacional, considerando-se que os produtos de combustão como gases perfeitos e que o processo de mistura entre estes e o ar ambiente ocorre em regime permanente, envolvendo mudanças desprezíveis de energia cinética e potencial.

Com as estimativas da quantidade máxima de ar estequiométrico e o valor de excesso de ar ( $a$ ), foi calculada a vazão nominal de um ventilador, de capacidade de  $0,1589 \text{ Nm}^3/\text{s}$  (isto é,  $70 \times 2,27 \times 10^{-3} \text{ Nm}^3/\text{s}$ ). Segundo recomendação dos fabricantes de ventiladores, a operação mínima de trabalho deve ser de 10 % da vazão nominal estimada acima; sendo escolhida do catálogo uma de vazão nominal  $0,165 \text{ Nm}^3/\text{s}$ . Segundo a geometria do túnel de vento e do queimador, mostrada na **Figura 3.1**, foi construída a **Tabela 3.2**, onde os regimes de operação do ventilador são representados pelos valores do número de Reynolds baseados na dimensão de saída do ar anular ( $(D_{ar}/2 - D_j/2)$  igual a 0,082 m, e na viscosidade dinâmica do ar igual a  $1,7 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

**Tabela 3.2** – Regimes de operação de o ar anular fornecido pelo ventilador.

Estimativa das vazões de ar anular por regimes de operação do ventilador				
Regime Operação (%)	Vazão volumétrica: $\dot{V}_{ar}$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	Vazão Mássica: $\dot{m}_{ar}$ (Kg/s)	Velocidade: $U_{ar}$ (m/s)	Numero de Reynolds: $Re_{ar}$
100%	0,165	0,213	5,42	32466
90%	0,149	0,192	4,88	28188
80%	0,132	0,171	4,34	25958
70%	0,116	0,149	3,79	22669
60%	0,0990	0,128	3,25	19439
50%	0,0825	0,106	2,71	16209
40%	0,0660	0,085	2,17	12979
30%	0,495	0,064	1,63	9749
20%	0,0330	0,0425	1,08	6459
10%	0,0165	0,0213	0,54	3230
5%	0,00825	0,0106	0,27	1615

Define-se assim o ventilador como um dos equipamentos principais para a operação do conjunto.

Foi realizada uma classificação dos componentes da instalação experimental em sistemas, segundo o princípio de funcionamento e a segurança que deve ser garantida por eles. A configuração da bancada experimental é mostrada esquematicamente na **Figura 3.2**, com uma representação numérica dos sistemas que a compõem:

- (1) Sistema de alimentação de gás natural (GNV) e de nitrogênio.
- (2) Sistema de alimentação de ar.
- (3) Sistema de controle do processo: equipamentos e medidores.
- (4) Sistema de geração das partículas traçadoras.
- (5) Sistema de exaustão dos gases poluentes.
- (6) Sistema do queimador e túnel de vento.
- (7) Sistemas de medição laser não intrusiva LDV e PIV.

Outro equipamento que necessitou de estimativa da sua capacidade foi o extrator de gases do sistema de exaustão dos gases poluentes, projetado para aspirar, no máximo, 3,4 vezes a vazão total do experimento, isto é, os gases gerados da combustão mais o excesso de ar fornecido pelo ventilador e o ar do meio ambiente, sendo este valor de 0,56 Nm<sup>3</sup>/s ou 2000 Nm<sup>3</sup>/h (isto é, 3,4 x 0,165 Nm<sup>3</sup>/s). No intuito de se manter um nível de ruído aceitável gerado no duto do extrator, a velocidade média do ar nele ( $V_{ar}$ ) deve ser inferior a 5 m/s. Assim, foi possível obter um diâmetro no duto circular ( $D_C$ ):

$$D_C = \sqrt{\frac{4 \times \dot{m}_{COIFA}}{\pi \times V_{ar}}} = 37,6 \text{ cm} \approx 0,4 \text{ m}, \quad (3.4)$$

sendo que  $\dot{m}_{COIFA}$  é a vazão mássica dos produtos de combustão, cujas propriedades se assumem próximas às do ar e  $V_{ar}$ , e a velocidade média do ar no duto, que é de 5 m/s.

As estimativas foram realizadas em função das condições de operação dos equipamentos envolvidos diretamente no processo de combustão. Este processo requer uma operação conjunta entre os sistemas mencionados acima, que permita oferecer segurança ao pessoal e à instalação. Assim, cada um dos sistemas que compõem a instalação experimental serão detalhados a seguir.

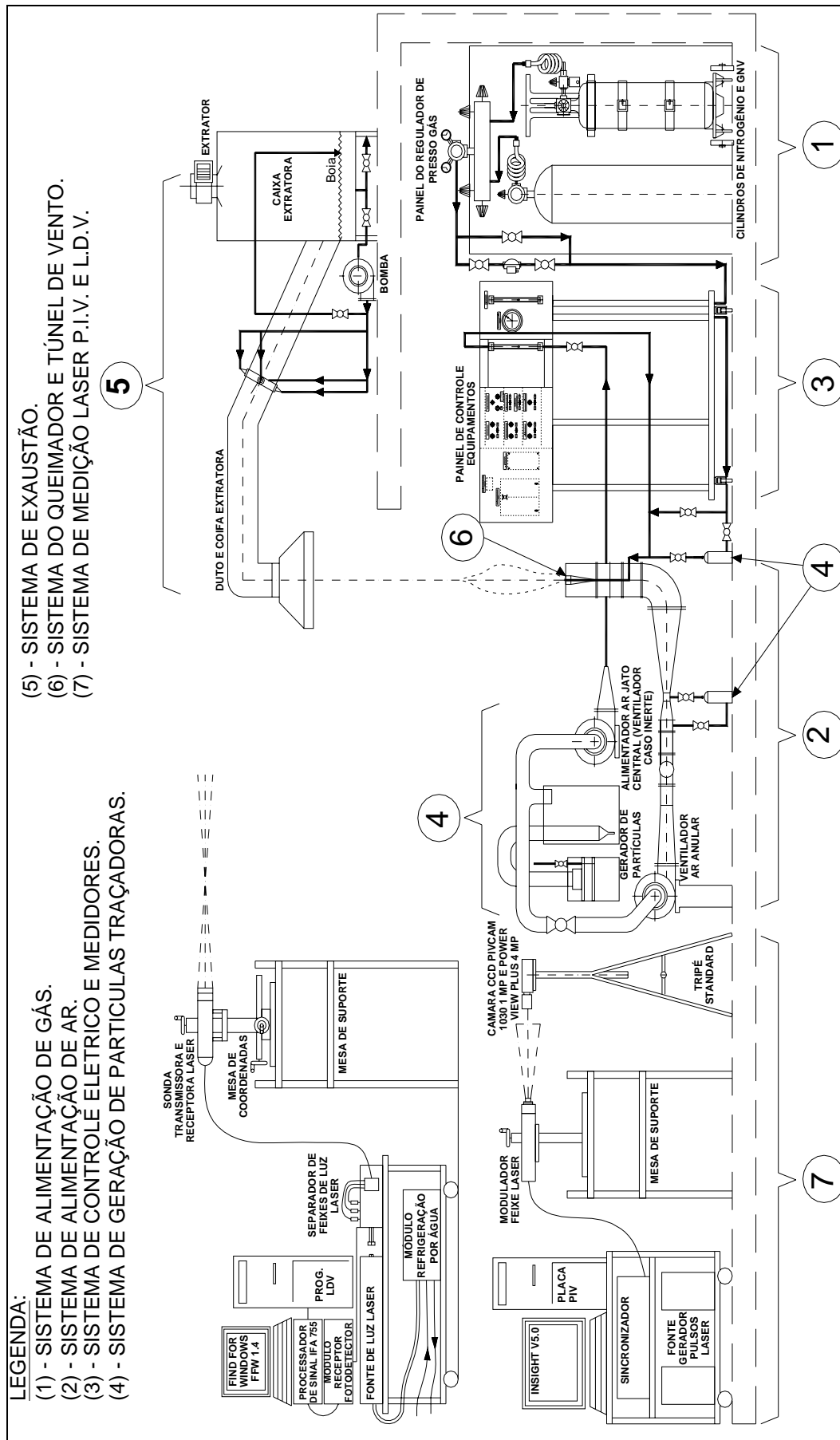


Figura 3.2 – Principais componentes da instalação experimental.

### 3.1.1

#### Sistema de alimentação de gás natural (GNV) e Nitrogênio

O sistema de suprimento de gás, responsável pela geração do escoamento do jato central, é composto de dois cilindros, um para o armazenamento do gás natural (GNV) e outro para Nitrogênio, um regulador de pressão, e de linhas de tubos de alimentação de gás. Na **Figura 3.3** é mostrado um esquema da instalação completa montada para a alimentação de gás ao processo.

O cilindro de armazenamento de gás natural (GNV) é composto de um sistema de segurança de linhas e válvulas de alta pressão montadas num carrinho móvel. Estas válvulas de gás possibilitam o enchimento seguro do cilindro nos postos de abastecimento autorizados. As características do cilindro de GNV são:

- Cilindro Cilbrás de alta pressão N° 2440534, modelo 30:244:200 CrMo com norma de fabricação ISSO 4705-D certificado pela White Martins Gases Industriais Ltda, com data de fabricação 03/2003 e validade de 5 anos.
- Pressão de serviço do gás G.N.V. de 200 bar e peso total do cilindro de 47,5 kg. Com dimensões de 244 mm de diâmetro, 850 mm de comprimento, boca de rosca cônica de diâmetro de ¾" 14 NGT e uma capacidade de 30 litros.

O cilindro de Nitrogênio pode operar em paralelo com o de GNV, mas foi projetado para ser usado na purga e limpeza dos gases e substâncias remanescentes no interior da linha depois do uso em combustão. Este cilindro possui as seguintes características:

- Cilindro Cilbrás de alta pressão modelo T,K,A é certificado pela White Martins Gases Industriais Ltda, possui um diâmetro de 244 mm e comprimento de 1500 mm e boca com rosca cônica de diâmetro de ¾" 14 NGT .
- Pressão de serviço do gás de Nitrogênio de 20 MPa e peso total do cilindro de 71 Kg.

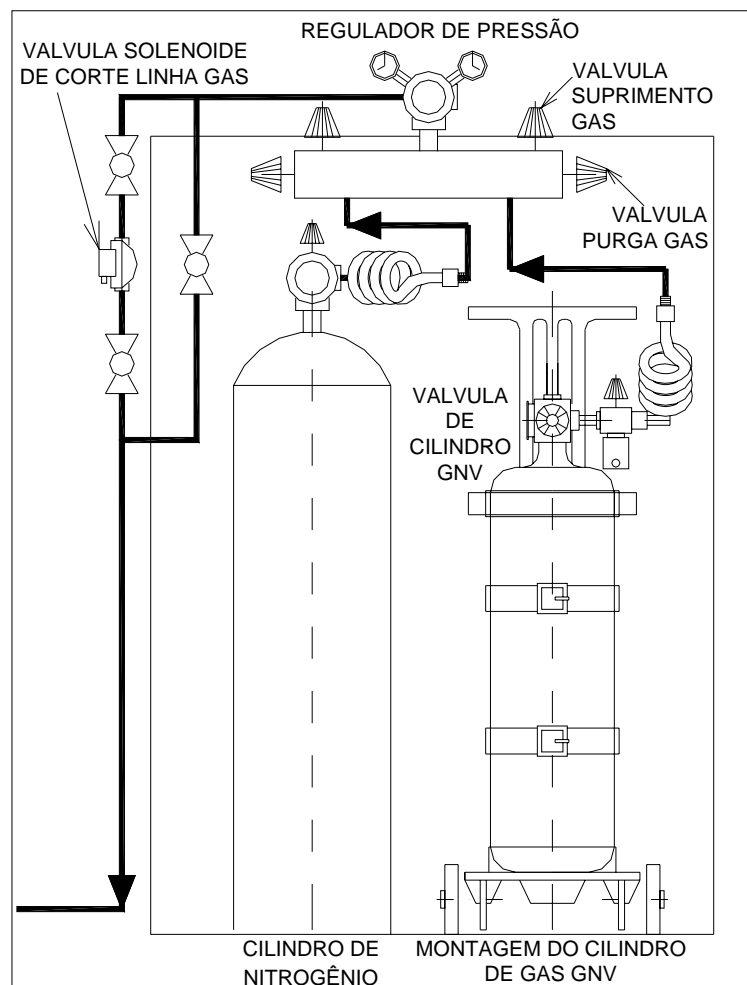
O regulador de pressão, de marca White Martins, é montado em um painel para suporte rígido dos cilindros. Este regulador é responsável por fornecer os gases e possui as seguintes características:

- A escala em baixa pressão é de 420 kPa (60 Psig) e a escala em alta pressão de 28000 kPa (4000 Psig). Existe uma válvula de segurança para aliviar

súbitos picos de pressão e uma conexão de saída para o suprimento de gás ao processo.

- Duas conexões simultâneas para cilindros de gases diferentes com linhas em espiral de alta pressão e válvulas de alimentação de gás e de purga para cada conexão.

A linha de suprimento de gás foi montada com tubos e acessórios de aço inoxidável da marca Swagelok com diâmetro de ¼”, com espessura de parede de 0,049” e pressão de trabalho de 7500 Psig.



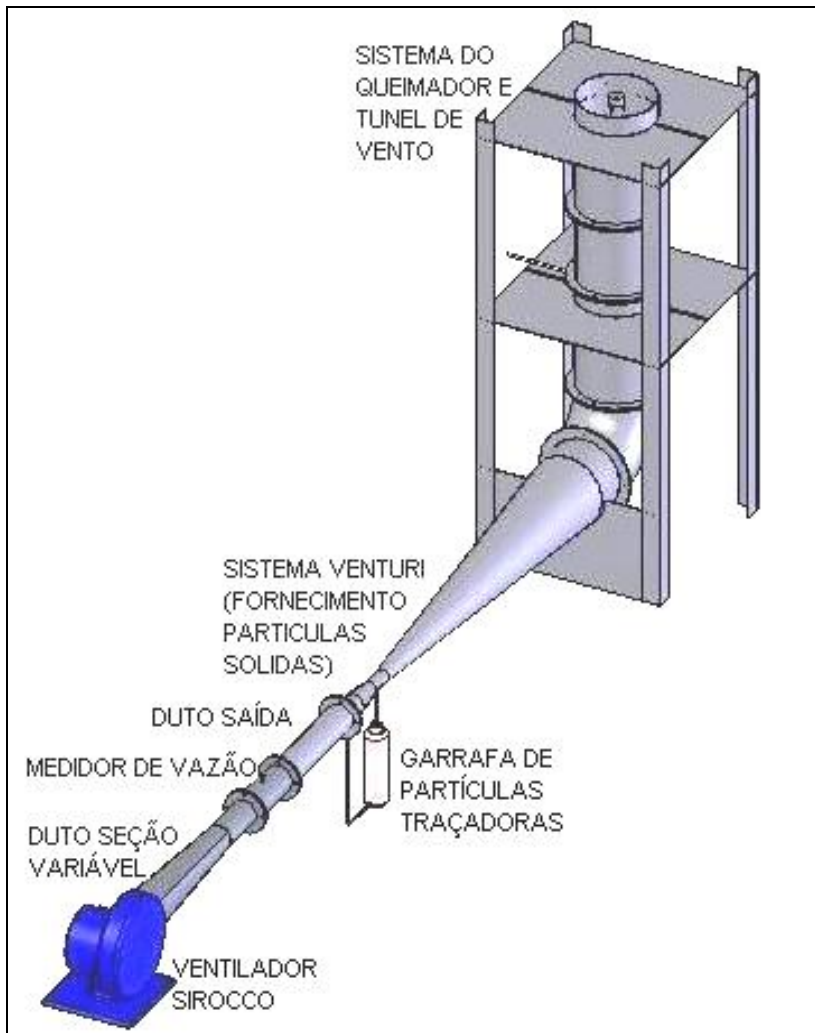
**Figura 3.3** – Vista frontal da montagem do painel do sistema de suprimento e controle de gás (GNV e Nitrogênio).

### 3.1.2 Sistema de alimentação de ar

O sistema de suprimento de ar anular é utilizado para produzir a combustão e a estabilização da chama no queimador. Foi usado o ventilador modelo sirocco e um duto de saída de seção variável de quadrada a circular.



A alimentação de ar foi projetada para fornecer como máximo na saída do queimador uma velocidade média de 25 m/s (vazão de 47,12 m<sup>3</sup>/min). A partir desta condição, foram calculadas as quedas de pressão por atrito devido à presença de acessórios como o duto de saída de seção variável, o medidor de vazão, o Venturi, o duto de saída do medidor, e a seção de saída do túnel de vento no queimador. O material usado nestes componentes é aço comercial estrutural e Ferro fundido. Tais componentes são apresentados no esquema da **Figura 3.4**.



**Figura 3.4** – Sistema de suprimento de ar anular usando ventilador modelo Sirocco.

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

- Modelo CV-13, vazão máxima de 9,9 m<sup>3</sup>/min, pressão máxima de 80 mm CA, carcaça em alumínio, peso de 7,5 Kg e nível de ruído de 81 Dba.
- Motor elétrico de potência 0,5 CV, tensão de 110/220 ou 220/380 V, corrente de 5,5/2,75 ou 1,62/0,93 A e rotação de 3420/3370 RPM.

O duto de saída, construído de latão forjado, permite acoplar a saída do ventilador ao medidor de vazão. Isto é necessário, pois a saída do ventilador tem forma retangular e a do medidor tem forma circular. A este trecho foi dado um comprimento de 10 vezes o diâmetro do duto do medidor de vazão por requerimentos de operação recomendadas das especificações técnicas do medidor de turbina de vazão de ar.

### 3.1.3

#### Sistema de controle do processo: equipamentos e medidores

Este sistema foi projetado para o controle do correto funcionamento seqüencial dos equipamentos. Seu objetivo é permitir a operação segura, tanto em funcionamento normal quanto anormal, especialmente quando a seção de testes é operada com combustão. Por exemplo, é desejável que ocorra o fechamento automático do suprimento de gás no caso da extinção da chama em caso de vazamento. Para cumprir este fim, este sistema possui componentes de proteção elétrica e de automação, além de medidores digitais e analógicos das propriedades do escoamento.

Na **Figura 3.5** apresenta-se o esquema da montagem do painel de controle dos equipamentos. Este painel foi construído com um arranjo móvel para permitir sua localização a uma distância apropriada para visualização e controle do escoamento.

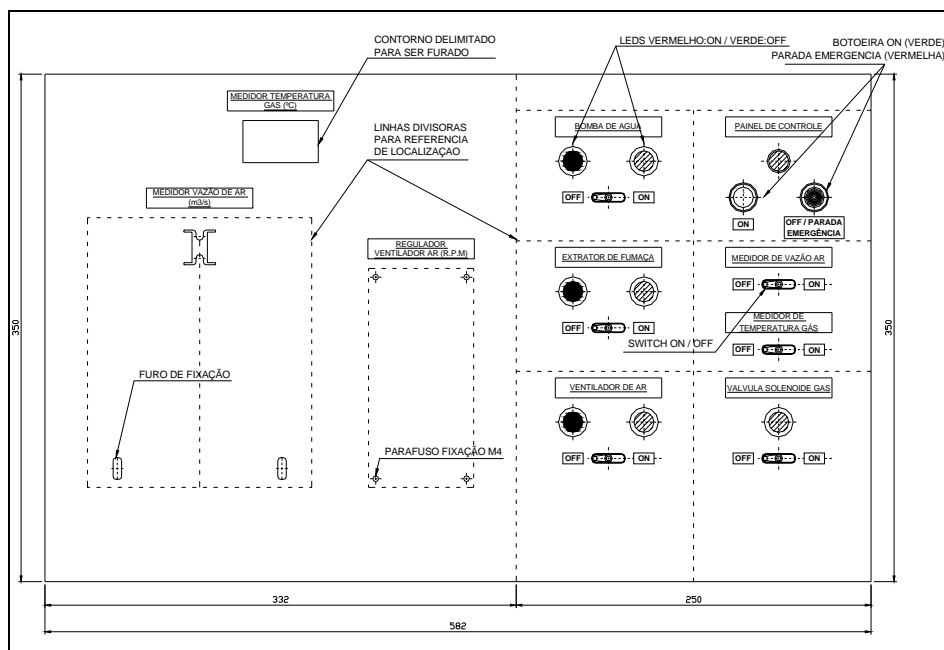
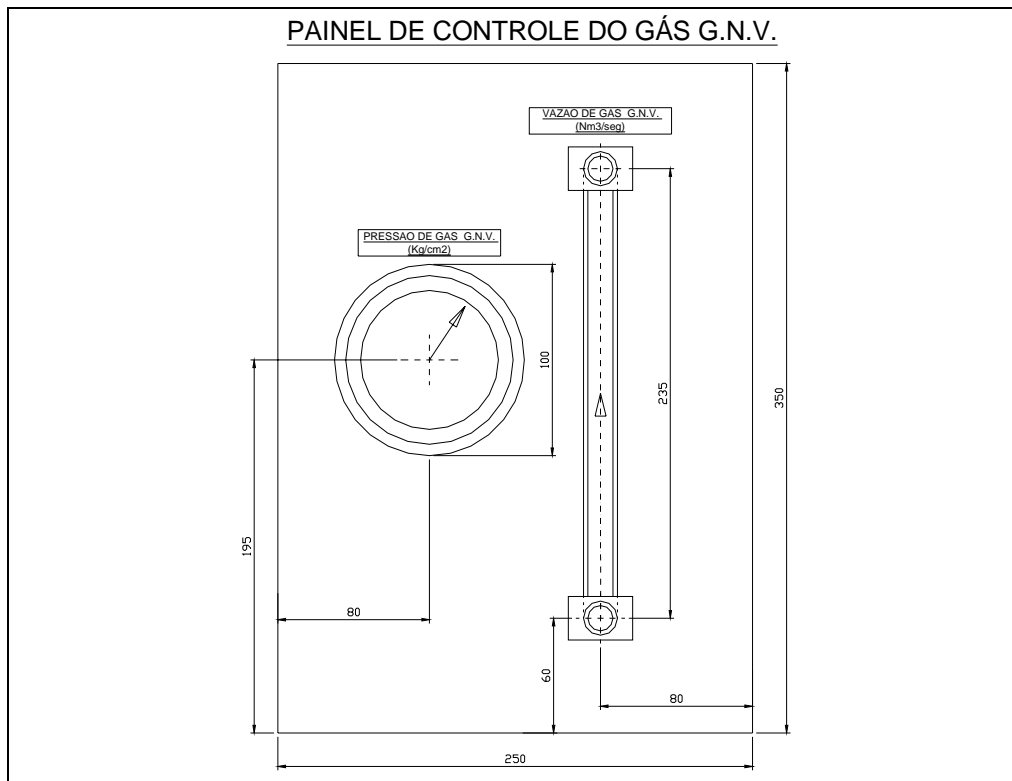


Figura 3.5 – Painel de controle dos equipamentos.

Na **Figura 3.6** é mostrado o esquema do painel de controle do gás. A separação entre os dois painéis permite uma melhor ergonomia no controle funcionamento da instalação experimental.



**Figura 3.6** – Painel de controle do escoamento: medidores analógicos.

O painel de controle é constituído dos seguintes equipamentos de proteção, controle e medição:

- Medidor digital de temperatura de gás, Controlador Microprocessador Série 935 da ECIL/Watlow de 24x48 mm com display de 4 dígitos, alimentação de 100 a 240 Vac ou 24 a 48 Vac/Vdc, temperatura de trabalho de 0 a 65 °C.
- Termopar de isolamento mineral, tipo “J”, simples, diâmetro de 1,5 mm e comprimento de 100 mm, com conexão ao processo com rosca de ¼” NPT.
- Medidor digital de vazão de ar, composto de um Indicador, Totalizador e Transmissor de Vazão MEV-1000 da Incontrol, com LED de 4 dígitos para vazão instantânea e LED de 6 dígitos para Totalizador, entrada/saída tipo pulso/4 – 20mA , com alimentação de 90 a 260 Vac a 60 Hz ou 24 Vcc.
- Medidor vazão tipo Turbina para gás da Incontrol S.A, conexão ao processo com diâmetro de 2½” e faixa de medição de 25,5 a 849,6 m<sup>3</sup>/h, alimentação de 24 Vcc, 50 mA, com pré-amplificador.

- Inversor de frequência para o controle da rotação do ventilador, modelo CFW-08 / 0,5 CV / 1 KVA / 220 V / 2,6 A / 3  $\phi$  da WEG Brazil.
- Fonte de energia elétrica, da LR Informática Industrial, Fonte de alimentação variável p/laboratório, de 0 a 30 Vcc, de 0 a 5 A, modelo M10-SP-305C, digital, tamanho tipo S, peso 6,3 Kg.
- Válvula Solenóide, da AICAS modelo N106BV40/C/201, de 24 Vdc, NF tipo ação direta, corpo latão, pressão de trabalho 0 a 6 bar, DN ¼” NPT.
- Manômetro de Pressão de gás, da WIKA do Brazil, para montagem local, modelo 232.54.115L, visor de diâmetro de 115 mm (4-1/2” ), escala de 0 a 6 bar x psi, conexão inferior tipo ¼” NPT.
- Rotâmetro de medição de vazão de gás, da OMEL bombas e compressores Ltda, serie P, com conexão ao processo de diâmetro ¼”, escala de 150 mm, pressão máxima de 15 Kg/cm<sup>2</sup>, temperatura máxima de 120 °C, para montagem em painel, calibrado para medir gás GNV à pressão de 2 bar e temperatura de 20 °C.
- Adicionalmente foi instalado outro rotâmetro para medição de ar no jato central. Este ar foi fornecido por outro ventilador tipo centrífugo com o intuito levar partículas traçadoras geradas no sistema de geração realizado nos testes com escoamento inerte. Este rotâmetro, da marca Omega Engineering Inc. foi calibrado para medir vazões de ar nas condições de 1 atm e 70 °F sendo sua escala de medição correspondente ao 100% um máximo de 27,2 l/min.
- Diversos acessórios elétricos, tais como interruptores de corte e de painel tipo chave, botoeiras e sinaleiros de cores verde e vermelho, base de lâmpada, reles térmicos, contadores, soquetes, automáticos de nível reversível e fios para as ligações necessárias entre o circuito elétrico de controle com tensão de 24 VDC, os equipamentos e ponto de suprimento de energia elétrica a 220 VAC. Todos foram comprados da Petrocam Comercial Elétrica Ltda.

Na **Figura 3.7** se apresenta o diagrama do circuito elétrico de controle para a operação sincronizada dos equipamentos e o processo. Esta figura mostra que usamos 2 níveis de tensão, uma de 24 Vdc para o painel de controle, e outra de 220 Vac para a ligação dos motores e alguns medidores digitais.

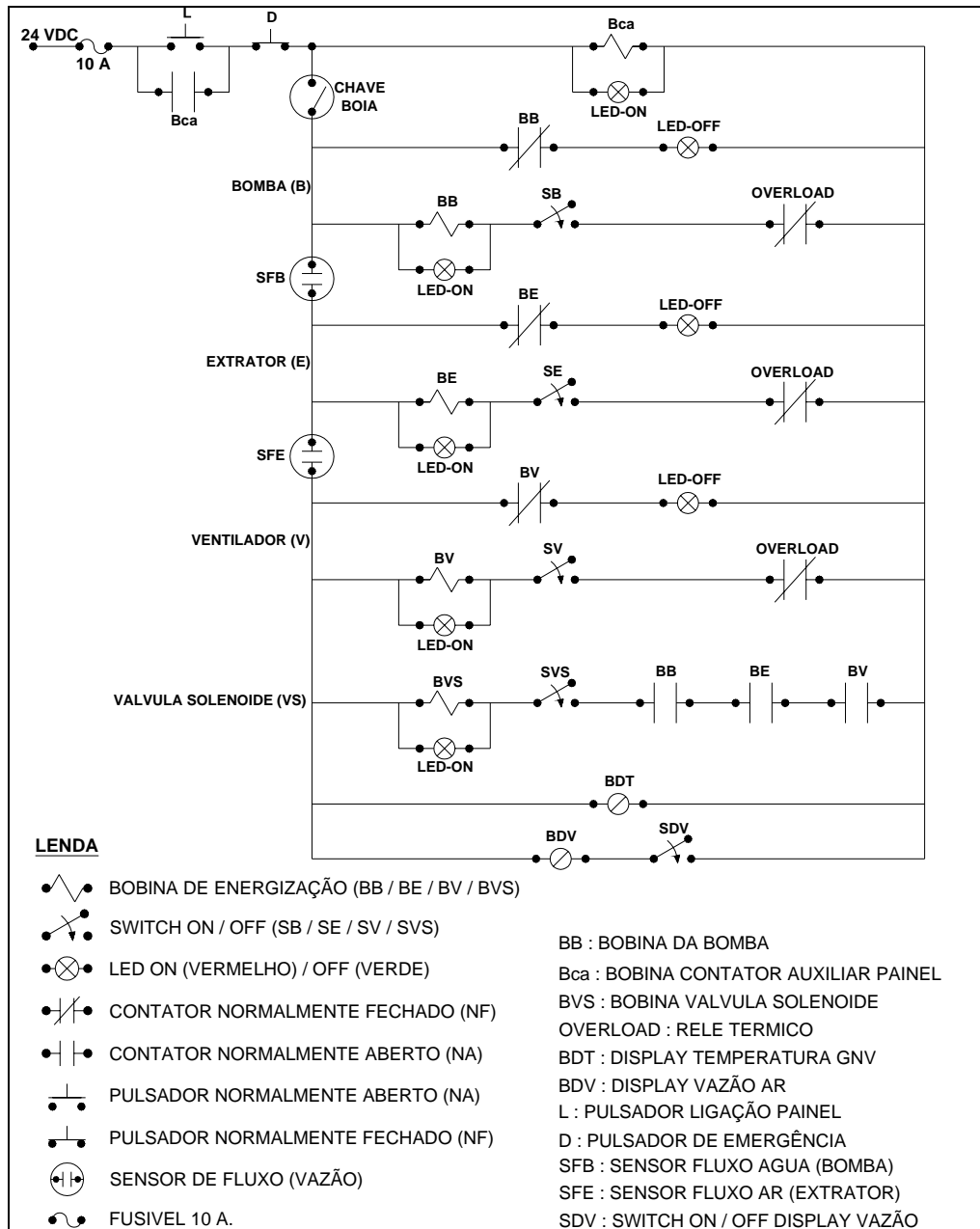


Figura 3.7 – Diagrama elétrico do painel de controle.

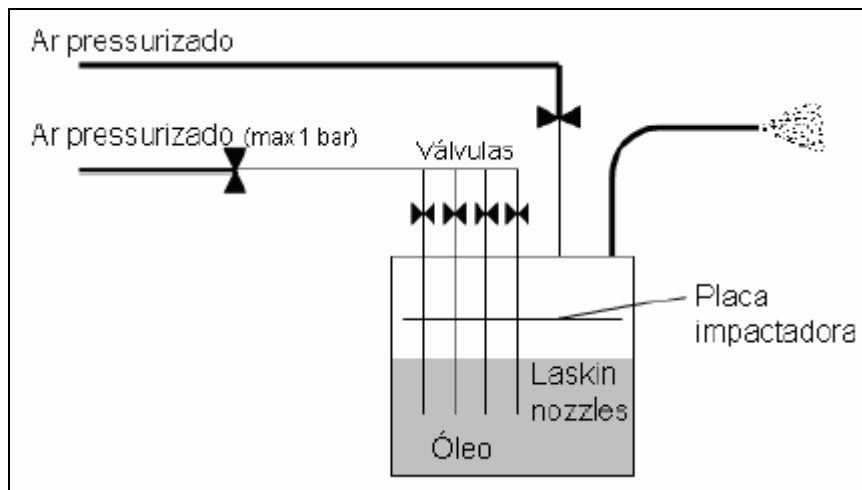
### 3.1.4 Sistema de geração das partículas traçadoras

Este sistema fornece as partículas traçadoras necessárias para a aquisição de sinais com as técnicas utilizadas de medição a laser da velocidade do escoamento. A escolha da densidade e do diâmetro destas partículas é crítica por que da distribuição das partículas, assim como sua capacidade de seguir fielmente o escoamento, depende a qualidade da medição. Nos casos em que ocorre a combustão, estas partículas também devem suportar as altas temperaturas. É também um requisito comum aos casos de escoamentos inerte e reativo que as

partículas devam ser capazes de refletir a luz do laser emitida pelo sistema LDV e PIV.

Inicialmente, foram feitos testes para os escoamentos inertes com incenso, com o único intuito de visualizar a estrutura das grandes escalas do escoamento. Em seguida foi usado um gerador de fumaça a base de glicerina. A utilização deste gerador de fumaça permitiu obter dados pontuais da velocidade através da técnica LDV. Porém, o controle da concentração de partículas não era possível com este dispositivo.

Também foram feitos testes usando um gerador de partículas de bolhas de óleo tipo “Laskin Nozle” [22], dispositivo construído por Abrantes et al. [1]. Na **Figura 3.8** se mostra um esquema deste dispositivo, o qual é constituído de um compartimento cilíndrico, onde, através de pequenos jatos sônicos de ar, são geradas pequenas bolhas de ar no líquido. Uma placa impactadora interna impede que grandes partículas passem para o processo. Isto garante uma distribuição razoavelmente uniforme do tamanho das partículas, cujo diâmetro está em torno de 1  $\mu\text{m}$ , segundo resultados do medidor aerodinâmico de partículas “Aerodynamic Particle Sizer” (TSI Inc.), modelo 3320, Abrantes et al. [1].

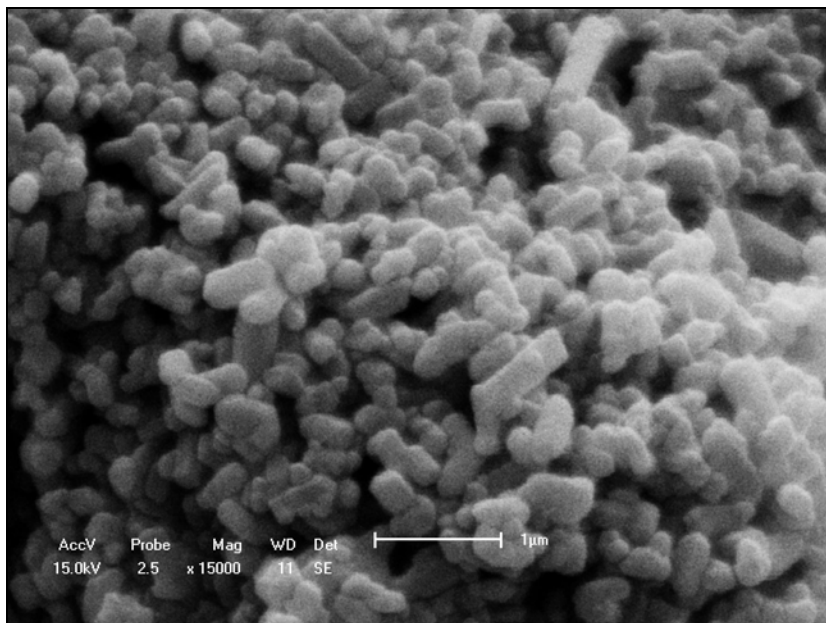


**Figura 3.8** – Gerador de partículas de óleo tipo “Laskin Nozzle” [22].

Uma vez que os testes mostraram que no trajeto entre o gerador de partículas e a saída do jato central ou do ar anular, sempre havia óleo acumulando-se, em particular no duto de saída do ventilador e no medidor de vazão, foi necessário acoplar uma segunda caixa impactadora de partículas ao circuito. Esta foi colocado a jusante do gerador de partículas, com o intuito de impedir que as partículas maiores fossem admitidas no escoamento. Este impactador, que corresponde ao componente número 4 mostrado na **Figura 3.2**, consiste

simplesmente de uma caixa construída de acrílico, no qual o ar com partículas, oriundo do gerador, ingressa por um tubo com extremidade afunilada na vizinhança do fundo da caixa, adquirindo assim a aceleração. Com isto as partículas de maiores diâmetros permanecem no fundo da caixa e as menores continuavam suas trajetórias normais.

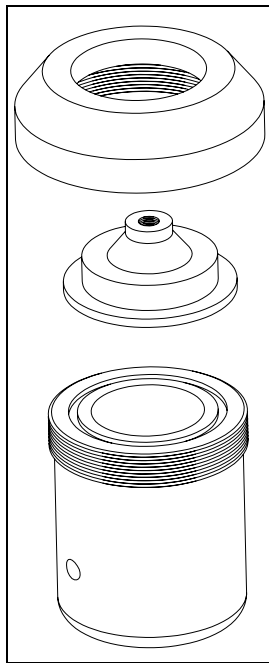
Nos escoamentos reativos as partículas de óleo evaporam-se na vizinhança da superfície de chama sendo assim inadequadas. Para contornar este problema, optou-se pela utilização de partículas de pó de Dióxido de Titânio,  $\text{TiO}_2$ , que foram adquiridas com granulometria comercial média de  $40 \mu\text{m}$  dos Laboratórios da B. Herzog. Sendo esta granulometria grande demais para fins das medidas de velocidade, foram utilizados processos físicos de moagem para a obtenção de partículas em torno de  $1 \mu\text{m}$  de diâmetro. Este trabalho de moagem foi realizado no laboratório do DCMM da PUC - Rio. A verificação do tamanho das partículas foi feita pelo Laboratório de Ensaio de Materiais da UNPA-CTGás, usando microscópio MEV, sendo o resultado o mostrado através da imagem de fotografia na **Figura 3.9**. Nesta figura pode ser constatado que a dimensão característica das partículas traçadoras é inferior a  $1 \mu\text{m}$ .



**Figura 3.9** – Fotografia do resultado da granulometria MEV das partículas de  $\text{TiO}_2$  feita pelo Laboratório de Ensaio de Materiais da UNPA – CTGás.

Para a dispersão das partículas de  $\text{TiO}_2$  no GNV ou no ar, foram construídos dois recipientes cilíndricos de polipropileno. Nestes, o ingresso do fluido foi projetado para se dar de forma tangencial na parte inferior do recipiente e a saída pelo centro da tampa superior com o intuito de criar um escoamento de tipo

ciclone capaz de arrastar as partículas de pó contidas no seu interior. Na **Figura 3.10** mostra-se o diagrama de fabricação dos recipientes que foram concebidos para fornecer as partículas traçadoras de  $\text{TiO}_2$  nas duas linhas de fluido (ar e GNV) no escoamento reativo. As principais dimensões deste recipiente são 60 mm de diâmetro interior e 170 mm de comprimento interior.



**Figura 3.10** – Cilindro de Polipropileno tipo ciclone para suprimento das partículas traçadoras ao processo.

Entre as principais características do Dióxido de Titânio  $\text{TiO}_2$  comercial usados como partículas traçadoras no experimento são:

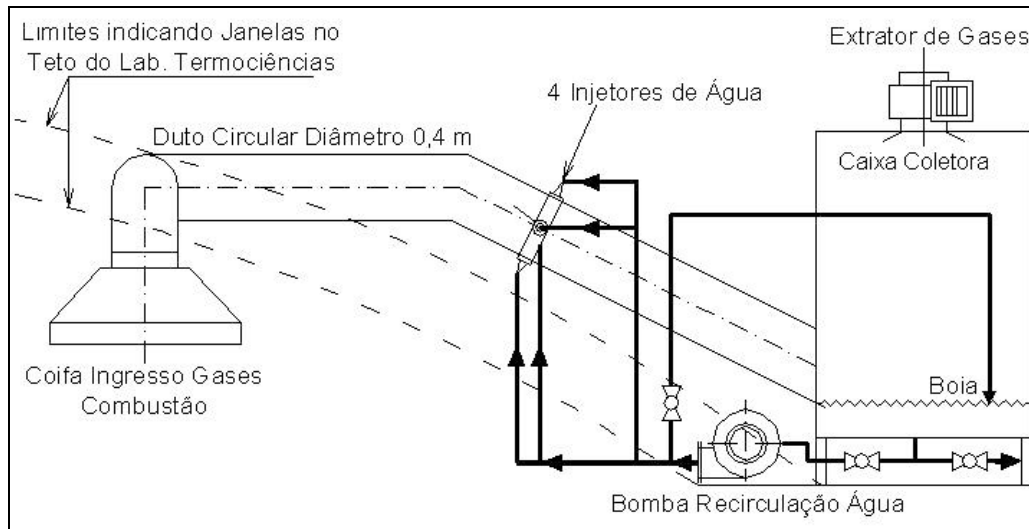
- Dióxido de Titânio, Rutilo RK-B-2, dos laboratórios da H. Berzog.
- Aparência de pó de cor branca.
- Resíduo em malha 45 microns, 0,01% (max. 0,02%).
- Dosagem de  $\text{TiO}_2$ , de 93,5% (min. 90%).
- Absorção ao óleo (g/100 g), de 22,5% (17% - 25%).
- Umidade menor de 1% e resistividade de 14 kohm-cm (min. 6).

### 3.1.5 Sistema de exaustão de gases poluentes

Este sistema tem por finalidade extrair os gases produzidos no processo de combustão no queimador para o exterior e resultar no menor impacto ambiental possível. Seu objetivo também é fornecer condições de trabalho seguras e sem gases poluentes no Laboratório de Termociências. Na **Figura 3.11** se mostra um



esquema de disposição da montagem completa deste sistema no teto do Laboratório de Termociências.



**Figura 3.11** – Montagem do sistema de exaustão de gases poluentes.

O duto de exaustão possui 4 injetores de gotículas de água pressurizada no trajeto dos gases para diminuir o efeito poluente no exterior. Note-se que, sendo o gás combustível utilizado o GNV, o qual não possui alto índice de formação de fuligem, a poluição gerada é desprezível.

A água utilizada é fornecida por uma bomba centrífuga que retira o líquido depositado no fundo da caixa coletora. Um extrator de ar, montado no teto da mesma, é responsável por extrair os gases queimados produzidos no laboratório.

O sistema de exaustão é composto dos seguintes equipamentos e acessórios:

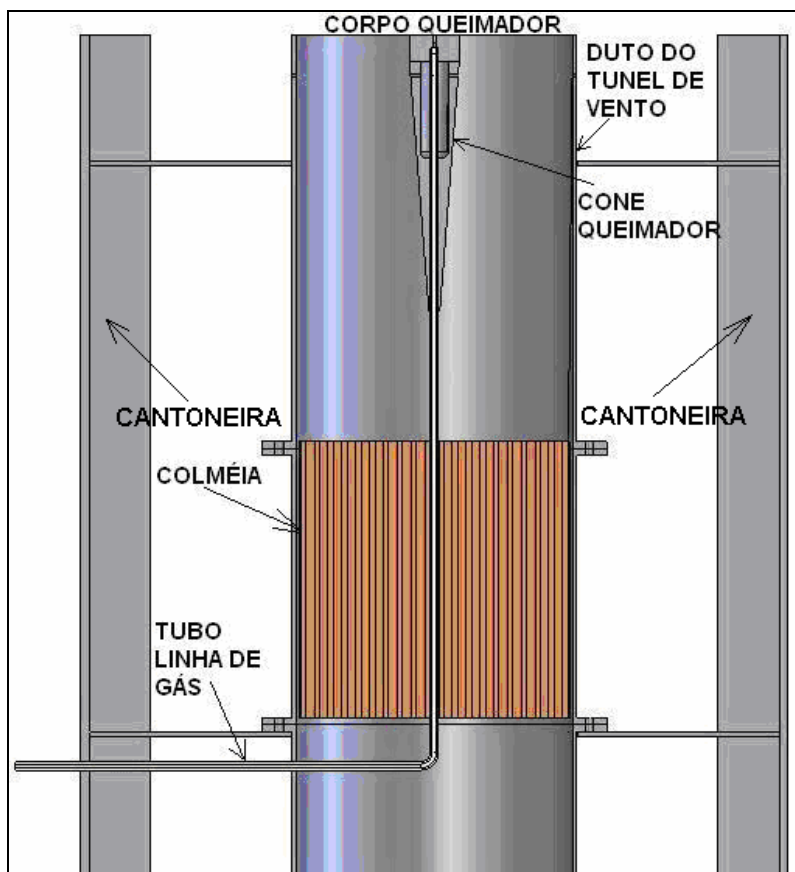
- Coifa de seção quadrada de 150x150 cm, duto de latão de diâmetro de 40 cm e caixa coletora de pó de latão reforçado. Além disso, válvulas, tubos e acessórios de PVC são utilizados para as conexões com a bomba, a recirculação para controle de vazão e a caixa.
- Arranjo de 4 injetores de água tipo venturi conectados por mangueiras de diâmetro de  $\frac{3}{4}$ ". Estes injetores encontram-se acoplados no duto a montante da caixa coletora.
- Extrator de ar ventilador Siroco Modelo CV-20 da Deltra (2 CV), com vazão máxima de 42 m<sup>3</sup>/min, pressão máxima de 150 mm CA, com tensão de 220/380 V, corrente 5,43/3,14 A e rotação de 3425 rpm.
- Bomba de água centrífuga Dancor, modelo CP-4R com proteção térmica, potência de  $\frac{1}{4}$  CV (0,18 kW), corrente de 3,9 A, tensão de 110 V, e rotação de 3370 rpm.

- Chave Bóia sinalizadora, automática de nível reversível, para proteção do motor da bomba por baixo nível de água. Esta chave encontra-se no recipiente da caixa coletora.

### 3.1.6 Sistema do queimador e túnel de vento

Este sistema é responsável pelo fornecimento das condições de saída do jato central no queimador obstáculo e do ar anular no duto. O material usado para a fabricação do queimador foi aço inoxidável, de acordo com outros trabalhos anteriores [17,26]. O material usado na construção do túnel de vento que fornece o ar de combustão é de ferro fundido, não é esperada corrosão no seu interior.

Segundo se mostra na vista de seção transversal da **Figura 3.12**, os principais componentes deste sistema são o corpo do queimador, o túnel de vento, a linha de gás e o uniformizador de ar tipo colméia.



**Figura 3.12** – Vista da seção transversal da montagem do queimador e túnel de vento.

O queimador tipo obstáculo é situado na parte central do túnel de vento, suas partes são desmontáveis, e o corpo do queimador possui forma cilíndrica com um orifício de saída central para o jato, precedida de um cone oco. O tubo da linha

de gás atravessa seu interior. A união do corpo do queimador com o cone é rosqueada, para ser adaptável a outros tipos de queimadores com o mesmo diâmetro. Para fins de alinhamento, o cone possui 4 furos diametralmente opostos.

A colméia, que tem por função uniformizar o escoamento de ar anular que ingressa ao redor do queimador, encontra-se distribuída no duto do túnel de vento ao longo de um comprimento de 20 cm. Esta colméia foi cedida gentilmente pela Divisão de Engenharia Aeronáutica do Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

### 3.1.7 Sistemas laser de medição não intrusiva.

A caracterização detalhada do escoamento no queimador foi feita utilizando-se técnicas de medição não intrusivas, como a Velocimetria Laser Doppler (LDV) e a Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV). Estes métodos de medição quantitativos fornecem sinais dos campos de valores instantâneos das componentes de velocidade radial e longitudinal, que descrevem a estrutura coerente dos escoamentos turbulentos. Entre as características comuns as duas técnicas podemos mencionar as seguintes:

- (i) Medem a velocidade da partícula, que é assumida para seguir o escoamento, sendo a luz dispersada pela partícula, o sinal.
- (ii) A luz dispersada é coletada e convertida em um sinal elétrico.
- (iii) O sinal elétrico é processado para obter as propriedades do escoamento.

Nas seguintes seções deste capítulo são explicadas em detalhe o princípio de operação, mas as principais diferenças entre estas duas técnicas podem ser resumidas na **Tabela 3.3**.

Após o desenvolvimento do projeto de construção da instalação experimental para medições de escoamentos reativos e inertes, a seção de testes final é apresentada na **Figura 3.13**. Cabe repetir que, para a operação de medição de escoamentos inertes se usa um sistema de geração de gotículas de óleo; enquanto que para escoamentos reativos se utilizam partículas sólidas de  $\text{TiO}_2$  dispersadas por diferença de pressão através de um sistema de venturi.

**Tabela 3.3** – Diferenças entre as duas técnicas de medição laser.

LDV	PIV
-----	-----

Mede em um ponto sobre um período de tempo.	Mede em muitos pontos em um instante de tempo.
Fornece a história do escoamento e a partir desta, as grandezas estatísticas em um ponto. O campo do escoamento é mapeado atravessando a região de medição.	Fornece campos de vetor instantâneos. As grandezas estatísticas são obtidas por muitas medidas de imagem de campos.
Velocidade obtida por medição do tempo para viajar uma distância conhecida.	Velocidade obtida por medição do deslocamento da imagem em um tempo conhecido.

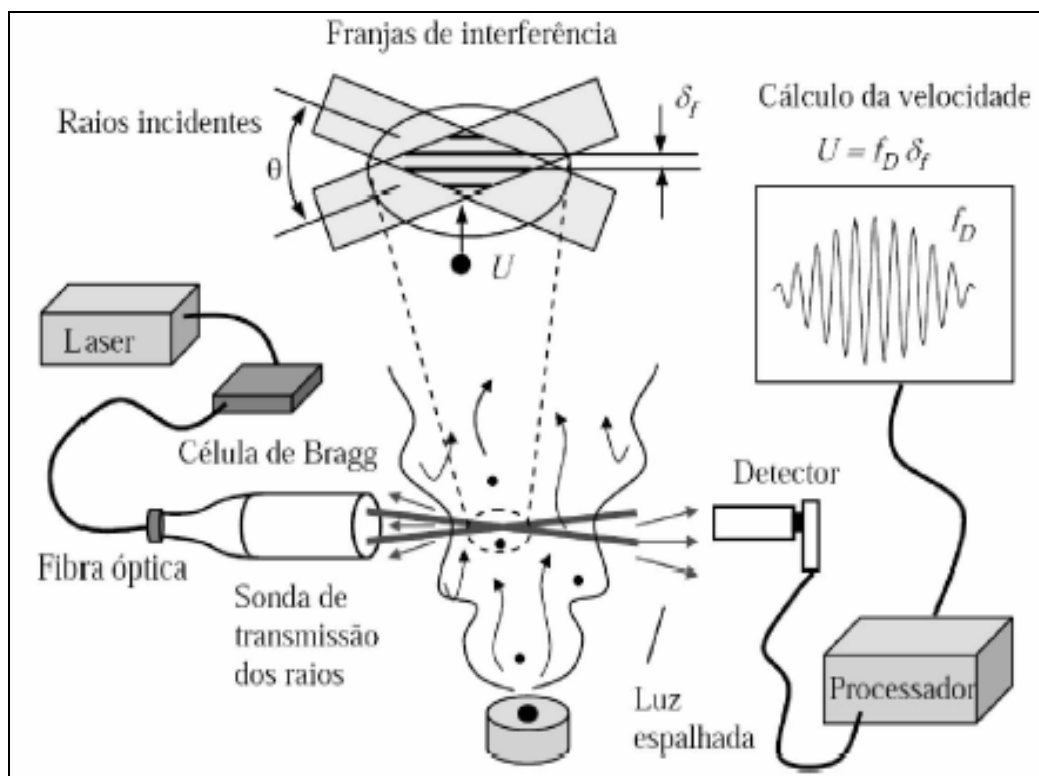


**Figura 3.13** – Vista geral da instalação experimental para medição LDV.

### 3.2 Velocimetria Laser Doppler – LDV

A velocimetria por laser Doppler é uma técnica de medição não intrusiva pontual das componentes da velocidade do fluido. O princípio de funcionamento, ilustrado na **Figura 3.14**, é descrito a seguir, Adrian et al. [2]:

Uma fonte de luz é utilizada para gerar dois raios laser que se cruzam dando origem a franjas de interferência. A configuração de franjas é resultante da superposição e da anulação de ondas eletromagnéticas. A região de interseção dos dois raios é denominada volume de medição, onde o escoamento é avaliado. A distância entre duas franjas subsequentes é função somente do ângulo de cruzamento dos raios e do comprimento de onda do laser, como será mostrado posteriormente. Quando pequenas partículas presentes no fluido passam pelo volume de medição, provocam um espalhamento de luz que é detectado por um sistema ótico, sendo posteriormente enviado para um processador de sinal. A frequência dessa luz espalhada é diretamente proporcional à velocidade do fluido na direção perpendicular às franjas de interferência. Então, usando este princípio, a componente da velocidade pode ser avaliada, sendo que esta técnica é recomendada para a medição de escoamentos complexos e em ambientes hostis.



**Figura 3.14** – Representação esquemática do princípio básico de funcionamento do sistema LDV.

Entre as principais vantagens que o LDV nos oferece temos:

- Fornece uma medição não intrusiva, por que o escoamento é investigado no ponto de cruzamento dos raios.
- Não requer calibração.
- Resolução do sentido da velocidade, a partir da introdução da técnica de desvio de frequência em um dos raios.
- Possui alta resolução espacial e temporal, por que o LDV é capaz de gerar um volume de controle de dimensões micrométricas, fornecendo assim uma boa resolução espacial. Além disso, os processadores de baixo tempo de resposta permitem uma resolução temporal da ordem de dezenas de kHz, ao longo de uma ampla faixa de frequências.

### 3.2.1 Componentes principais do sistema LDV

O sistema LDV típico, segundo o mostrado na **Figura 3.15**, é normalmente constituído pelos seguintes elementos:

- (1)**Fonte de luz laser**, é baseada no princípio do raio laser (light amplification by simulated emission of radiation), sendo utilizado pelas propriedades particulares de coerência temporal e espacial. O laser utilizado é de íon de Argônio, fabricado pela Coherent Inc, emitindo luz em uma faixa de comprimentos de onda limitada pelas cores verde e azul, isto é, de 514,5 nm e 488 nm respectivamente. O laser de íon de Argônio utilizado apresenta uma potência em torno a 5 W, requerendo refrigeração por água.
- (2)**Sistema óptico de separação de feixes laser** (Model 9201 ColorBurst Multicolor Beam Separator, fabricado pela TSI Inc.), o qual recebe a luz da fonte do laser e gera os feixes necessários para a medição de uma ou duas componentes da velocidade. Na **Figura 3.15** mostra-se a montagem deste sistema no LDV, denominado de ColorBurst junto com os 4 acopladores de Fibra Ótica.
- (3)**Sistema óptico transmissor e receptor da luz** é a sonda de onde são emitidos os feixes de luz laser. Nela também se recebem a luz refletida pelas partículas seguindo o escoamento. Este sistema é apresentado na **Figura 3.15**, onde se pode observar sua conexão para a comunicação dos dados com

o ColorBurst e o sistema do Fotodetector (ColorLink), fabricados pela TSI Inc.

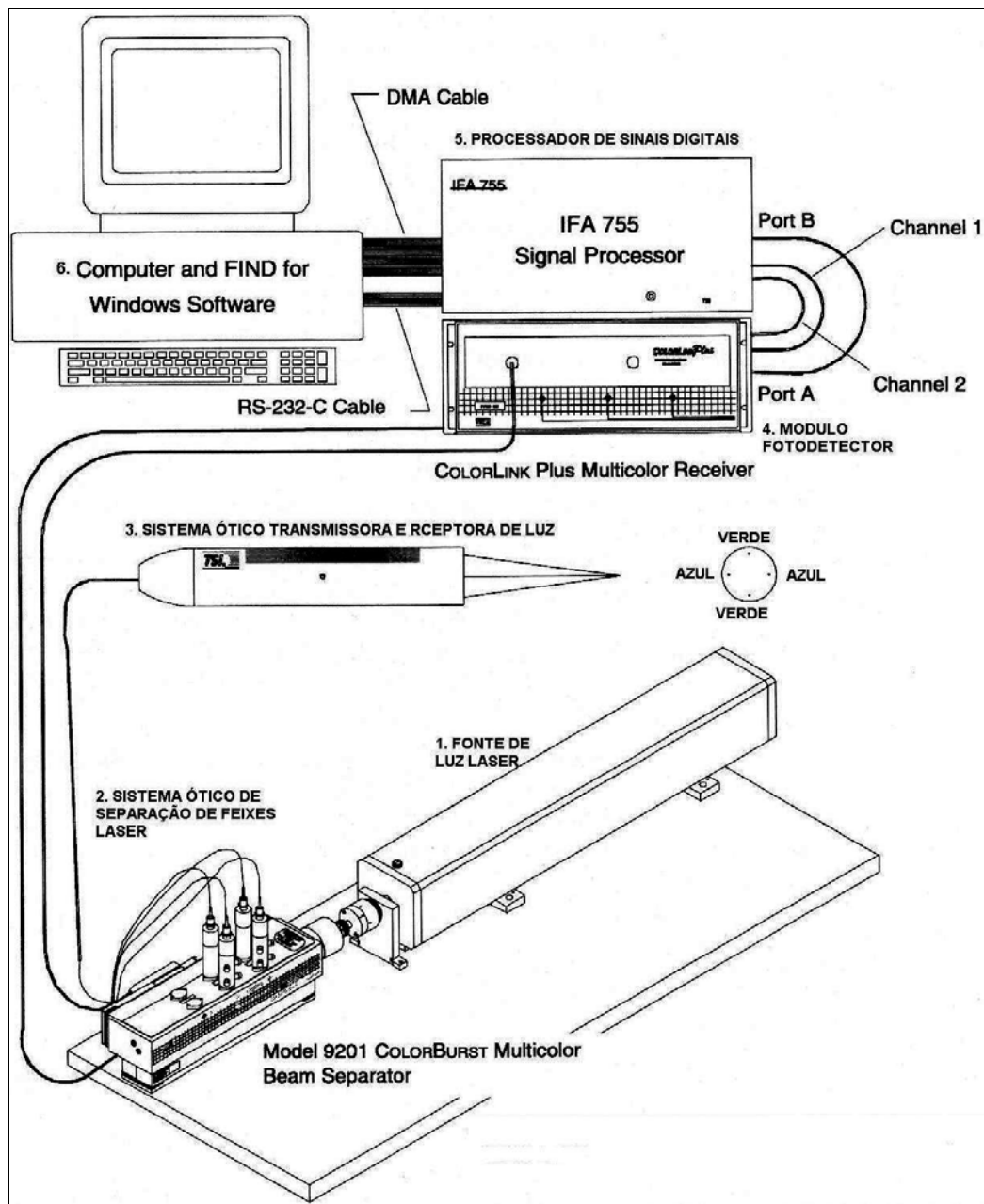


Figura 3.15 – Esquema de identificação dos componentes do sistema LDV [13].

(4) **Módulo fotodetector** (ColorLink Plus Multicolor Receiver), fabricado pela TSI Inc., tem como função separar a luz refletida utilizando fotodetectores, que a convertem em sinais elétricos, posteriormente enviadas ao processador de sinais. A luz refletida proveniente da fibra ótica é separada de acordo com o seu comprimento de onda, mediante filtros que eliminam uma potencial contaminação de cor antes de alcançar os fotodetectores. Na **Figura 3.15** é mostrada sua disposição no sistema LDV.

(5) **Processador de sinais digitais** (IFA 755-2), fabricado pela TSI Inc., é, juntamente com o software de aquisição e análise, o elemento diferenciador entre os sistemas LDV cujo funcionamento básico é a de processamento digital do sinal Doppler (burst) proveniente do modulo fotomultiplicador. As técnicas de detecção, amostragem, estimativa da frequência e processamento de sinal são essenciais para a obtenção de resultados. Na **Figura 3.15** é mostrado este equipamento juntamente com o modulo do fotodetector.

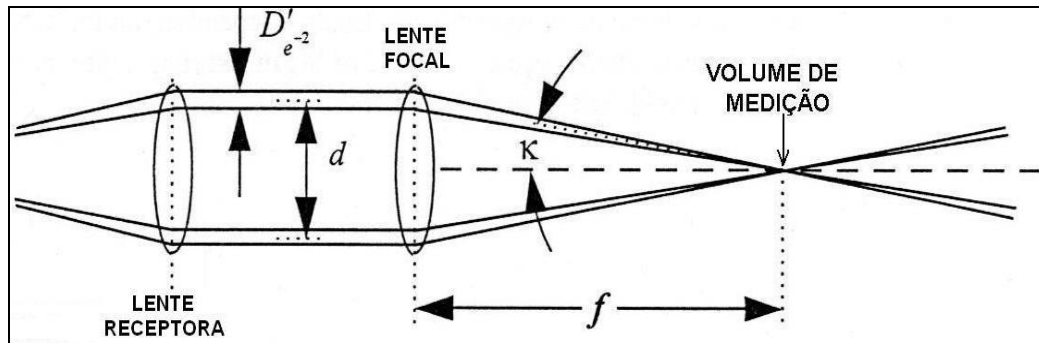
(6) **Software de aquisição e análise** (FIND for Windows, FFW1.4), desenvolvido pela TSI Inc, é o programa onde se configuram os parâmetros para controle, aquisição de dados e pós-processamento (análise) dos resultados. Os resultados finais são reportados na forma das componentes da velocidade e outras quantidades turbulentas.

### 3.2.2 Características ópticas do volume de medição

O sistema LDV é equipado com uma célula ótica, denominada de célula de Bragg, que introduz um desvio de frequência num dos feixes, produzindo assim deslocamento de franjas no volume de medição. Este modo de operação, que será detalhado posteriormente, é necessário para a determinação da velocidade das partículas no escoamento reverso [13].

Na **Figura 3.16** apresentam-se as principais características geométricas dos feixes, necessárias para a determinação do tamanho do volume de medição na operação do sistema LDV. A região formada pelo cruzamento dos feixes laser no sistema LDV, onde é feita a medição da velocidade das partículas, é denominada volume de medição. Em todas as seções transversais do feixe, supõe-se que a luz apresenta uma distribuição de intensidade Gaussiana. O calculo do volume de medição é baseado no diâmetro onde a intensidade de luz decai a  $1/e^2$ , isto é 13 % da intensidade máxima no centro do feixe.





**Figura 3.16** – Definição dos principais características óticas de feixes laser LDV [14].

Uma vez que as características do volume de medição estão relacionadas às características geométricas dos feixes nas lentes, é necessário para fins de medição, definir as seguintes relações óticas [14]:

$$d_m = \frac{4f \times \lambda}{\pi \times D'_{e^{-2}}}, \quad (3.5)$$

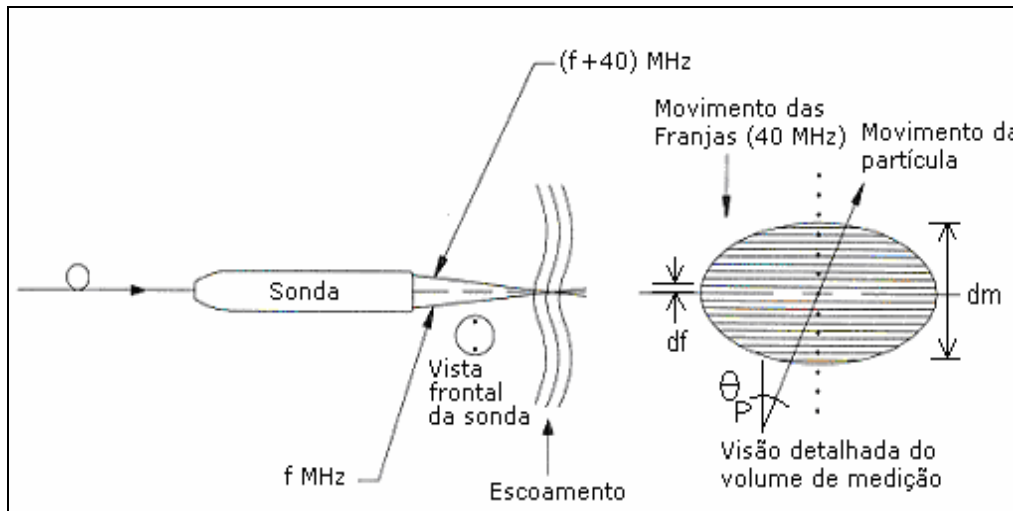
$$l_m = d_m / \tan k, \quad (3.6)$$

$$d_f = \frac{\lambda}{2\text{Sen}k}, \quad (3.7)$$

$$N_{FR} = \frac{4d}{\pi \times D'_{e^{-2}}} \approx d, \quad (3.8)$$

onde,  $d_m$  e  $l_m$  são o diâmetro e o comprimento médio do volume de medição respectivamente,  $d_f$  é o espaçamento das franjas,  $N_{FR}$  é o número máximo de franjas,  $d$  é a distância de espaçamento em mm entre os feixes;  $D'_{e^{-2}}$  é o diâmetro do pulso ou feixe, aproximadamente de 1 mm,  $\lambda$  é o comprimento da onda de luz laser.

A frequência dessa luz espalhada no volume de medição é diretamente proporcional à velocidade da partícula na direção perpendicular às franjas de interferência. Na **Figura 3.17** é mostrado o esquema do volume de medição, onde são descritos os parâmetros que têm influência na medição da velocidade.



**Figura 3.17** – Esquema de deslocamento de franjas no volume de medição da técnica de frequência de desvio (Frequency shift) no sistema LDV [13].

A célula de Bragg é encarregada de introduzir o desvio de frequência em um dos feixes, de modo que as franjas óticas no volume de medição se movem no sentido do feixe de frequência modificada (shifted beam), que possui uma frequência mais alta do que o outro. Uma partícula que passa por este volume de medição se movendo no sentido oposto ao das franjas gera um sinal com uma frequência que é igual à frequência de desvio (shift) mais a sua própria frequência Doppler. Por outro lado, o sinal de uma partícula passando pelo volume de medição, mas se movendo no mesmo sentido que as franjas serão igual à diferença entre a frequência de desvio (shift) e própria frequência Doppler. Caso o escoamento estudado apresente reversões ou componentes de velocidade pequenos a serem medidos, é necessário fazer uso do “Frequency Shift”.

Da **Figura 3.17** também podemos definir algumas relações úteis. O número de franjas no volume de medição sem frequência de desvio ( $N_F$ ) é:

$$N_F = \frac{d_m}{d_f}, \quad (3.9)$$

onde  $d_m$  e  $d_f$  são o diâmetro médio do volume de medição e o espaçamento da franja respectivamente, que está ligado ao tempo de transito ( $T_t$ ), que é o tempo que uma partícula leva para atravessar o volume de medição:

$$T_t \cong \frac{d_m}{|V_o|}, \quad (3.10)$$

onde  $V_o$  é a velocidade da partícula com respeito a cada direção. Sem a frequência de desvio, o número de franjas ( $N_i$ ) que cruza uma partícula depende do ângulo  $\theta_p$  entre sua trajetória e as franjas:

$$N_1 = N_F \times \text{Cos} \theta_p. \quad (3.11)$$

Se  $\theta_p = 0$  então  $N_1 = N_F$ , neste caso as partículas deslocam-se em direção às franjas. Porém, caso  $\theta_p = 90^\circ$ , então  $N_1 = 0$ , significando que as partículas se movem paralelamente às franjas.

No caso com frequência de desvio (shift), o número de franjas ( $N_S$ ) cruzando uma partícula estacionária é dado por:

$$N_S = T \times F_S \quad \text{ou} \quad N_S = \frac{d_m}{|V_o|} \times F_S, \quad (3.12)$$

onde  $F_S$  é o valor da frequência de desvio (Frequency Shift).

A frequência Doppler da partícula ( $F_o$ ) é dada por:

$$F_o = \frac{|V_o|}{d_f} \quad \text{ou} \quad |V_o| = F_o \times d_f. \quad (3.13)$$

Assim, o número total de ciclos ( $N$ ) que uma partícula atravessa quando é introduzida uma frequência de desvio é:

$$N = N_1 + N_S. \quad (3.14)$$

Substituindo-se as equações (3.9), (3.10), (3.11) e (3.13) na equação (3.14) obtêm-se:

$$N = N_F \left( \text{Cos} \theta_p + \frac{F_S}{F_o} \right). \quad (3.15)$$

No caso particular de um escoamento reverso,  $\theta_p = 180^\circ$ :

$$N = N_F \left( -1 + \frac{F_S}{F_o} \right). \quad (3.16)$$

Para o caso em que  $N/N_F = 1$ , temos:

$$F_S = 2 \times F_o, \quad (3.17)$$

ou seja, para assegurar a medição de reversões no escoamento, a frequência de desvio deve ser pelo menos 2 vezes a frequência Doppler correspondente à máxima velocidade negativa esperada. Este artifício é indispensável para o sucesso das medições que serão apresentadas neste trabalho.

### 3.2.3

#### Procedimento experimental para medição LDV

Uma vez que a técnica de medição laser LDV é baseada na medida estatística das componentes de velocidade das partículas que atravessam o volume de medição elipsoidal de dimensões reduzidas, 100 x 250  $\mu\text{m}$ . É indispensável bastante cuidado quanto à estimativa da incerteza na localização deste volume. Isto é particularmente crucial no presente caso, pois as dimensões da saída do jato central do queimador também são reduzidas, e a exatidão dos deslocamentos da sonda em distâncias aparentemente pequenas pode não ser desprezível. Considera-se que o deslocamento máximo é de 40 mm, na direção longitudinal e 60 mm, na direção transversal. Estes valores são limitados pela baixa concentração de partículas traçadoras nas zonas afastadas, para a medição no caso inerte. A dimensão reduzida do jato central de saída do queimador dificulta também o nivelamento e o alinhamento para localizar o plano de simetria do escoamento.

Entre os equipamentos usados para posicionamento da sonda, destacam-se uma mesa de coordenadas da marca Velmex para deslocamento da sonda nas três direções ortogonais “x”, “y” e “z”, de 45, 26 e 28 cm, respectivamente, a qual possui uma incerteza de 0,1 mm, e um medidor digital da marca Diadur Ind. e Com. Ltda., com alcance máximo de 4 mm e uma incerteza de 0,005 mm. As atividades realizadas previamente a cada aquisição de dados são:

1. Nivelamento e alinhamento centralizado da face do queimador com relação ao duto de ar. Também deve ser feito o nivelamento horizontal da mesa de coordenadas para que o deslocamento da sonda transportando o volume de medição seja exato nas direções longitudinal e radial, usando para isto um nível de bolha.
2. Nivelamento e fixação da base da sonda no suporte da mesa de coordenadas. Isto foi realizado com o intuito de obter a face da sonda ortogonal ao plano da mesa de coordenadas, por tanto os eixos do volume de medição nas direções axial e radial a uma distância focal da lente de 350 mm do centro geométrico do queimador.
3. Como segunda aproximação para o alinhamento dos feixes com a face do queimador, foi realizada a projeção dos feixes laser sobre a face do

queimador, até determinar visualmente que a interseção dos feixes coincida com o centro do queimador.

4. Determinação do sentido deslocamento na frequência de desvio das franjas no volume de medição. Isto foi realizado desligando-se o módulo de fotodetector, ficando iluminados um ponto azul e verde de cada feixe laser. Este procedimento foi necessário para determinar a direção de deslocamento das partículas no volume de controle.
5. Uma vez feita a localização aproximada do cruzamento dos feixes laser (volume de medição) no centro do queimador, foi preciso fazer um alinhamento mais exato usando o sistema de medição LDV para medir a velocidade nas direções ortogonais no plano horizontal, a uma distância de 2 mm da face do queimador, em torno ao jato central de saída. Determina-se assim, com a análise dos perfis de velocidade obtidos versus deslocamentos radiais, o plano axi-simétrico do escoamento e os eixos longitudinal (axial) e transversal (radial).
6. O mapeamento do campo de escoamento foi realizado primeiramente com o medidor digital de deslocamento para obter menor incerteza até atingir um deslocamento máximo de 4 mm. Em seguida, foi usada a mesa de coordenadas, que também foi usada para deslocar verticalmente a sonda de medição.

A definição dos valores dos parâmetros de operação do equipamento LDV para um funcionamento ótimo foi a seguinte:

- A potência laser fornecida ao sistema de medição esteve em uma faixa entre 1 e 2 watt, dependendo da densidade de partículas traçadoras para a obtenção de sinal confiável no processador.
- A pressão de ar comprimido para o gerador de partículas de óleo foi de 10 a 15 psig, conseguindo uma taxa de aquisição de sinais de até 3500 partículas por segundo.
- No caso de medição da velocidade no jato central de saída, a vazão do rotâmetro Omega que mede a vazão de ar do jato central ficou em torno de 23,5 % da escala total de medição, ou 5,17 l/min, levando a uma velocidade média na saída do jato central de 27,4 m/s, o que corresponde a um número de Reynolds de 3870.

A configuração dos parâmetros de operação do programa para obtenção de dados LDV, Find for Windows FFW 1.4, foi a seguinte:

1. Determinou-se o tipo de escoamento a medir segundo [13]. No presente caso o jato livre é um escoamento com componente de velocidade longitudinal muito maior que a componente radial, e o jato com obstáculo é um escoamento com reversões.
2. Determinou-se a faixa de valores aproximada das componentes longitudinal e radial da velocidade, o qual foi obtido de uma simulação numérica prévia.
3. Uma vez obtidas as velocidades máxima e mínima para ambas componentes de velocidade para cada escoamento, determinou-se o valor apropriado da frequência de desvio para cada deslocamento longitudinal. Levando-se em conta o valor da frequência Doppler da partícula e a **equação 3.17**, a variação desta frequência de desvio deve ser mínima na medição no sentido radial para cada deslocamento axial constante.
4. Determinou-se o sentido do escoamento relativo ao eixo de simetria axial para definir a direção segundo a frequência de desvio (shift) e a fixa (undershift).
5. Os parâmetros fixos de operação no programa Find FFW 1.4 que foram usados na presente experiência com LDV são mostrados na **Tabela 3.4**.

**Tabela 3.4** – Características óticas das lentes e do volume de medição do laser LDV.

Parâmetros óticos laser	Canal 1 (horizontal)	Canal 2 (vertical)
Espaçamento entre franjas:df ( $\mu\text{m}$ )	3,72	3,52
Semi-ângulo:k ( $^\circ$ )	4	4
Espaçamento de saída entre feixes:d' (mm)	50	
Comprimento focal:f (mm)	350	
Comprimento de onda laser (nm)	514,5	488
Cor do feixe laser	Verde	Azul

6. Para este regime de operação do escoamento do jato central (27,4 m/s) se realizou a **Tabela 3.5** para a obtenção da frequência de desvio segundo equações (3.9) a (3.17) para o escoamento de jato livre.

**Tabela 3.5** – Valores de configuração das frequências de desvio radial ( $F_{s-r}$ ) dos feixes laser de cor Verde no caso de jato livre.

Posição Axial (mm)	X/D <sub>j</sub>	Velocidade Axial:U (m/s)	Tempo trânsito:T <sub>u</sub> (us)	Freq. Doppler:F <sub>o-r</sub> (MHz)	Freq. desvio:F <sub>s-r</sub> (MHz)
2	1	29,12	3,43	4,66	8,26
5	2	28,57	3,5	4,57	8,11
10	5	28,09	3,56	4,49	7,97
20	10	21,18	4,72	3,39	6,01
30	15	12,58	7,95	2,01	3,57
40	20	7,25	13,79	1,16	2,00
50	25	6,36	15,72	1,01	1,80
60	30	5,61	17,83	0,89	1,59
70	35	4,93	20,28	0,79	1,40
80	40	4,64	21,53	0,74	1,32

### 3.2.4 Análise das incertezas experimentais

Geralmente todo dado experimental deve ser analisado através de algum tipo de procedimento. Todo processo experimental esta associado a erros de medição, assim é de extrema importância para qualquer trabalho experimental a investigação do grau de confiança dos resultados obtidos, pelo que se deve fazer todo o esforço possível para eliminar todos os erros do experimento. Este objetivo, no entanto, nunca será plenamente alcançado, cabendo então assumir uma responsabilidade de apresentar uma medida de confiabilidade dos dados.

Na presente seção vão ser definidos os métodos de estimativa das incertezas e as principais fontes de geração de erros que afetam nos sistemas de medição LDV.

#### 3.2.4.1 Definição e classificação das incertezas experimentais

A análise de incertezas pode ser definida como o procedimento de estimativa do erro cometido na medição, e do erro associado aos resultados subsequentes. Assim, vamos definir dois conceitos importantes tais como:

- (i). Erro, vêm a ser a diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro, normalmente não se conhece o valor verdadeiro o que torna esta definição difícil de ser aplicada, e,

- (ii). Incerteza experimental, que é um valor possível que o erro pode assumir. Define uma faixa onde se estima estar localizado o valor da grandeza medida (dentro de um determinado nível de probabilidades).

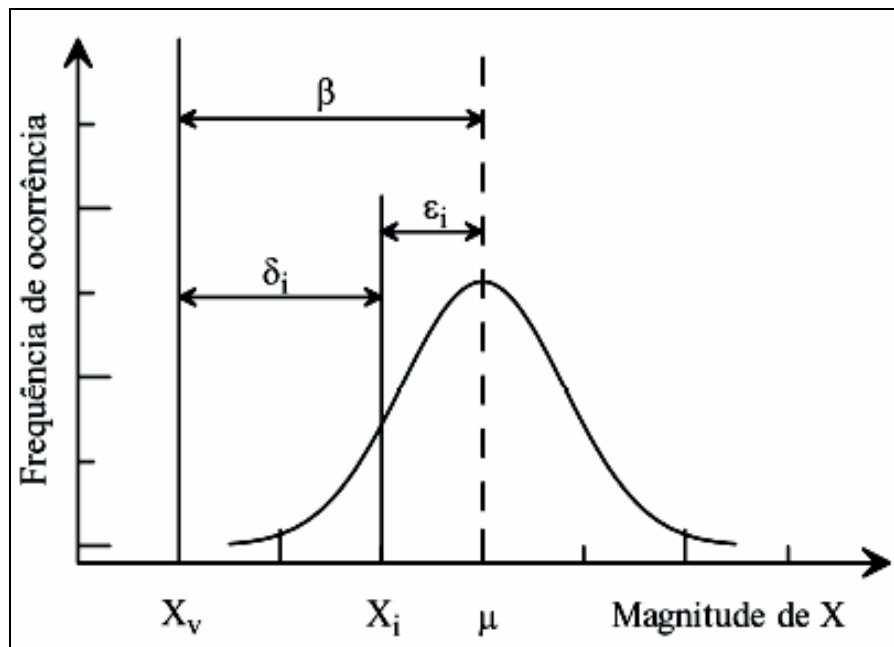
Para chegar a um método de descrição das incertezas nas variáveis, é preciso conhecer a natureza das incertezas. Assim, considerando um determinado número de medidas seqüenciais de uma variável  $X$ , aproximadamente constante, pode ser observado que a incerteza total de medição possui dois componentes [14] segundo a equação (3.18):

- (i) Uma incerteza viciada fixa ou sistemática,  $\beta$ , que vem a ser a parcela fixa da incerteza total, sendo constante para todas as medidas  $X_i$ , e,  
(ii) Uma incerteza aleatória ou de precisão,  $\varepsilon_i$ , que varia em cada nova medida.

Então a incerteza total de medição ( $\delta_i$ ) pode escrita como:

$$\delta_i = \beta + \varepsilon_i \quad (3.18)$$

A incerteza total associada a uma grandeza medida é a diferença entre o valor medido e o valor verdadeiro, geralmente desconhecido. Assumindo que o número de amostras consecutivas  $N$ , tende ao infinito, o comportamento dos dados pode seguir uma distribuição Gaussiana, segundo mostrado na **Figura 3.18**.



**Figura 3.18** – Definição esquemática da incerteza total de medição  $\delta_i$ , associada a uma grandeza  $X$  e composta por uma parcela aleatória  $\varepsilon_i$  e outra sistemática  $\beta$ .

Nesta **Figura 3.18** a incerteza sistemática é dada pela diferença entre a média das “ $N$ ” leituras,  $\mu$ , e o valor verdadeiro da grandeza,  $X_v$ , enquanto a



incerteza aleatória representa a distribuição em torno do valor médio da frequência de ocorrência das leituras  $X_i$ .

Na maioria dos casos o erro sistemático  $\beta$  inclui aqueles erros que podem ser calibrados ou que são desprezíveis, sendo um parâmetro difícil de ser estimado. Os procedimentos normalmente estimados são:

- (i) Comparar as medidas com resultados de instrumentos-padrão, ou,
- (ii) Comparar medidas independentes realizadas com instrumentos que utilizam princípios diferentes para avaliar a grandeza medida.

No caso dos erros aleatórios, estes são observadas em medições repetidas e geralmente denotadas por um erro de precisão. Então, assumindo uma medida da distribuição Gaussiana, o erro de precisão pode ser dado pelo desvio padrão  $\sigma$ .

De fato, é conveniente apresentar um único valor de incerteza  $\delta_i$ , para expressar o limite aceitável de erro associado ao valor medido. Esse número deve ter uma interpretação simples, ser útil e informativo. Normalmente o valor medido é expresso na forma de intervalo:

$$X_i \pm \delta_i \quad \text{ou} \quad X_i \pm \delta_i / X_i \quad (3.19)$$

### 3.2.4.2 Incerteza dos resultados e sua propagação

Para estimar a incerteza de resultados que dificilmente são grandezas medidas diretamente, é necessário propagar os erros das grandezas primarias através da fórmula funcional que relaciona o resultado e os parâmetros medidos [14]; sendo que para o caso geral de uma grandeza medida “R”, que depende de outras medidas primarias,  $X_i$ , temos que:

$$R = R(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.20)$$

Assim, foi proposta uma forma de calcular a propagação das incertezas experimentais, chamada de expressão de Kline e Mc Clintok [14]:

$$\delta R^2 = \left( \frac{\partial R}{\partial x_1} \delta x_1 \right)^2 + \left( \frac{\partial R}{\partial x_2} \delta x_2 \right)^2 + \dots + \left( \frac{\partial R}{\partial x_n} \delta x_n \right)^2, \quad (3.21)$$

onde  $\delta R$  é a incerteza no resultado  $R$  e  $\delta x_i$  é a incerteza em cada variável  $x_i$ . As derivadas parciais  $\partial R / \partial x_i$  são os chamados coeficientes de sensibilidade, e medem quão sensível o resultado  $R$  é a cada variável medida  $x_i$ . Nesta expressão os níveis de probabilidade das medidas individuais são preservados na grandeza  $R$ . Isto é,

se  $\delta x_i$  é conhecido dentro de  $\pm 2\sigma$ ,  $\delta R$  será obtido dentro de  $\pm 2\sigma$ . Esta expressão apresenta resultados satisfatórios e é amplamente utilizada.

### 3.2.4.3

#### **Incertezas da instalação experimental usando o sistema LDV**

Nesta seção destina-se a detalhar o procedimento de estimativa da incerteza sistemática e aleatória das medidas de velocidade, das flutuações de velocidade e a do experimento, as duas primeiras realizadas através do sistema de medição LDV, e a última realizada tendo em conta as fontes externas, tais como os equipamentos de medição e partículas que constituem a instalação experimental.

Na técnica LDV, a grandeza medida diretamente é a frequência Doppler da luz espalhada por partículas imersas no fluido ao atravessarem o volume de controle. A equação que relaciona a frequência Doppler ( $F_o$ ) com a velocidade do fluido perpendicular à direção das franjas de interferência, como mostrada na **equação 3.13**, é:

$$|V_o| = F_o \times d_f, \quad (3.22)$$

onde  $d_f$  denota a distância entre as franjas, dada pela **equação (3.7)**.

#### **3.2.4.3.1.**

#### **Fontes de incerteza sistemática da instalação experimental**

O cálculo da incerteza sistemática da velocidade média está relacionado à medição da velocidade da partícula  $|V_o|$ . Assim, o cálculo desta incerteza envolve fatores inerentes à fabricação dos componentes do sistema LDV, sendo esta incerteza padrão dada e aceita pelos fabricantes dos sistemas de medição laser, que no caso da TSI Inc. está em torno do 1% para medição de velocidade. Dentre os principais fatores que governam esta incerteza, podem ser citados:

- Ângulo de interseção ( $k$ ) dos feixes laser, que é um fator de calibração geométrica depende da posição da lente focal no interior da sonda, e vai incidir no tamanho do volume de medição e no espaçamento das franjas; segundo as **Equações (3.6) e (3.7)**.
- Lentes do sistema ótico, que afetam a escolha da frequência Doppler ( $F_o$ ). Devido às imperfeições e ao desalinhamento das componentes da lente, estas também podem influir no tamanho do volume de medição.

- Dispositivos eletrônicos, cujo erro associado é geralmente desprezível. Um fator influente é o ruído eletrônico no módulo fotodetector e no processador de sinal, que geralmente é muito pequeno.

Outra fonte de geração de incerteza sistemática são as características das partículas, neste caso as partículas dispersas de óleo que se distribuem sem uniformidade através do escoamento. Estas afetam as medições por variações de seu tamanho, densidade, concentração e comportamento refrativo. Este fator pode ser desprezível se for usada uma concentração de partículas de óleo em torno de  $5 \times 10^5$  partículas/m<sup>3</sup>, permitindo assim excluir a presença de sinais de partículas múltiplas, Blum [4].

### 3.2.4.3.2.

#### Fontes de incerteza aleatória da instalação experimental

O procedimento de estimativa da incerteza aleatória para a medição da velocidade média pode ser quantificado através de uma distribuição estatística, segundo a seguinte equação:

$$\sigma_U = \frac{t_s \times u_{rms}}{|V_o| \times \sqrt{N_T}}, \quad (3.23)$$

onde  $N_T$  é o tamanho da amostra,  $u_{rms} = \sqrt{u'^2}$  ou  $u_{rms}/|V_o|$  que é denominada intensidade turbulenta, obtida durante a medição;  $t_s$  é o parâmetro para uma distribuição Student igual a 1,96 assumindo distribuição normal com uma probabilidade de ocorrência de 95,4 % da média num intervalo de confiabilidade de padrão de desvio de  $\pm \sigma_U$  [14].

O cálculo da incerteza aleatória de  $u_{rms}$  também é realizado mediante a distribuição estatística presumida, sendo esta grandeza independente do próprio valor de  $u_{rms}$  e dependendo apenas do tamanho da amostra [14], isto é:

$$\sigma'_{u_{rms}} = \frac{t_s}{\sqrt{2N_T}}, \quad (3.24)$$

o qual é independente da incerteza sistemática associada aos fatores de calibração de fábrica do LDV e propriedades das partículas usadas, e também da incerteza aleatória observada por medições repetidas. Devem ser consideradas como fontes de erro marginal na medição LDV:

(i). Incerteza no posicionamento da sonda, que é decorrente do posicionador, e logo dependente da exatidão a do posicionamento do volume de medição no escoamento especificamente no plano de simetria. Definido o conjunto de pontos a medir, foram usados os seguintes instrumentos de posicionamento com suas respectivas incertezas calculadas para a localização das medidas ( $\Delta x_i$ ):

- Mesa de coordenadas em 3 dimensões Velmex, com uma incerteza de 0,1 mm por cada milímetro, levando a uma incerteza relativa de 10%:

$$\left( \frac{\delta \Delta x_i}{\Delta x_i} \right)_{MesaCoord.} = \pm 10\%$$

- Medidor digital de posição Diadur, com uma incerteza de 0,005 mm por cada milímetro, o que implica em uma incerteza relativa de 0,5%:

$$\left( \frac{\delta \Delta x_i}{\Delta x_i} \right)_{Med.Dig.} = \pm 0,5\%$$

Este último só foi usado até um deslocamento radial máximo de 4 mm, devido a limitações de curso; daí para frente foi usada a mesa de coordenadas.

(ii). Incerteza do número de Reynolds, baseada na exatidão do rotâmetro, do paquímetro usado para medir o diâmetro de saída do jato e das propriedades do fluido. Onde foram levadas em conta as incertezas das propriedades do fluido como é apresentado na seguinte seção.

#### 3.2.4.4

#### Procedimento de cálculo das incertezas experimentais

Uma vez definidas as principais fontes de erro que influem na incerteza total de medição do campo de velocidade, pode ser determinada a propagação da incerteza total como função do número de Reynolds de operação do experimento e as incertezas das medidas LDV da velocidade média e flutuante.

**3.2.4.4.1.****Determinação da incerteza do número de Reynolds experimental**

Para determinar o grau de propagação do erro do número de Reynolds no jato central,  $Re_j$ :

$$Re_j = \frac{U_j \times D_j \times \rho_{ar}}{\mu_{ar}}, \quad (3.25)$$

como função da velocidade média no jato central,  $U_j$ , o diâmetro do jato central,  $D_j$ , e das propriedades do ar, tais como a densidade  $\rho_{ar}$ , e a viscosidade dinâmica  $\mu_{ar}$ , determina-se a incerteza de cada variável em função de seus parâmetros de medição independente, com seus respectivos erros associados:

$$\frac{\partial Re_j}{\partial U_j} = \frac{D_j \times \rho_{ar}}{\mu_{ar}}, \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial Re_j}{\partial D_j} = \frac{U_j \times \rho_{ar}}{\mu_{ar}}, \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial Re_j}{\partial \rho_{ar}} = \frac{U_j \times D_j}{\mu_{ar}}, \quad (3.28)$$

$$\frac{\partial Re_j}{\partial \mu_{ar}} = -\frac{U_j \times D_j \times \rho_{ar}}{\mu_{ar}^2}. \quad (3.29)$$

Destas expressões algébricas (3.26) a (3.29) pode-se estimar a incerteza experimental propagada:

$$(\delta Re_j)^2 = \left( \frac{\partial Re_j}{\partial U_j} \delta U_j \right)^2 + \left( \frac{\partial Re_j}{\partial D_j} \delta D_j \right)^2 + \left( \frac{\partial Re_j}{\partial \rho_{ar}} \delta \rho_{ar} \right)^2 + \left( \frac{\partial Re_j}{\partial \mu_{ar}} \delta \mu_{ar} \right)^2 \quad (3.30)$$

Esta expressão mostra que é necessário ainda calcular as incertezas da velocidade  $U_j$ , e das propriedades do fluido,  $\rho_{ar}$  e  $\mu_{ar}$  em função das variáveis e das incertezas conhecidas dos instrumentos de medição usados e que são fornecidas pelos fabricantes como:

- Incerteza do Rotâmetro Omega Eng. Inc:  $\frac{\delta \dot{V}}{\dot{V}} = \pm 2\%$ ; onde  $\dot{V}$  é a vazão volumétrica lida no rotâmetro.
- Incerteza do paquímetro Starrett:  $\frac{\delta D_j}{D_j} = \frac{0,05}{2} = \pm 2,5\%$

- Incerteza do medidor de temperatura digital ECIL:  $\frac{\delta T}{T} = \pm 0,25\%$  ; onde T é a temperatura lida na tela do medidor digital.
- Incerteza do manômetro Wika:  $\frac{\delta P}{P} = \pm 2,5\%$  ; onde P é a leitura da pressão manométrica.

Para o cálculo da incerteza da velocidade  $U_j$ , tem-se:

$$U_j = \frac{\dot{V}}{\left( \frac{\pi \times D_j^2}{4} \right)}, \quad (3.31)$$

$$\frac{\partial U_j}{\partial \dot{V}} = \frac{4}{\pi \times D_j^2}, \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial U_j}{\partial D} = -\frac{8\dot{V}}{\pi \times D_j^3}. \quad (3.33)$$

A incerteza experimental propagada para a medição da velocidade  $U_j$  é:

$$(\delta U_j)^2 = \left( \frac{\partial U_j}{\partial \dot{V}} \delta \dot{V} \right)^2 + \left( \frac{\partial U_j}{\partial D_j} \delta D_j \right)^2. \quad (3.34)$$

Substituindo os valores das incertezas e re-arranjando termos da equação (3.34), tem-se:  $\frac{\delta U_j}{U_j} = \pm 11,37\%$  .

Para o cálculo da incerteza da densidade do fluido  $\rho_{ar}$  deve-se assumir que o ar comporta-se como um gás perfeito, assim tem-se as seguintes expressões:

$$\rho_{ar} = \frac{P}{R \times T}, \quad (3.35)$$

$$\frac{\partial \rho_{ar}}{\partial P} = \frac{1}{R \times T}, \quad (3.36)$$

$$\frac{\partial \rho_{ar}}{\partial T} = -\frac{P}{R \times T^2}. \quad (3.37)$$

Assim, a incerteza experimental propagada para a medição da densidade  $\rho_{ar}$  é:

$$(\delta \rho_{ar})^2 = \left( \frac{\partial \rho_{ar}}{\partial P} \delta P \right)^2 + \left( \frac{\partial \rho_{ar}}{\partial T} \delta T \right)^2. \quad (3.38)$$

Substituindo valores das incertezas na equação (3.38), tem-se:

$$\frac{\delta \rho_{ar}}{\rho_{ar}} = \pm 2,51\% .$$

Similarmente foi realizada uma análise aproximada permitindo determinar a incerteza da viscosidade dinâmica do ar,  $\mu_{ar}$ , como função da temperatura dada pela relação empírica para gases de Sutherland, obtendo uma

$$\text{incerteza de } \frac{\delta \mu_{ar}}{\mu_{ar}} = \pm 0,31\% .$$

Substituindo os valores nas equações (3.26) a (3.30) e re-ordenando a equação (3.31), a expressão e o valor da incerteza experimental propagada para o número de Reynolds,  $Re_j$  são:

$$\left( \frac{\delta Re_j}{Re_j} \right)^2 = \left( \frac{\delta U_j}{U_j} \right)^2 + \left( \frac{\delta D_j}{D_j} \right)^2 + \left( \frac{\delta \rho_{ar}}{\rho_{ar}} \right)^2 + \left( \frac{\delta \mu_{ar}}{\mu_{ar}} \right)^2, \quad (3.39)$$

$$\frac{\delta Re_j}{Re_j} = \pm 11,91\% .$$

#### 3.2.4.4.2.

#### Determinação da incerteza da velocidade média e intensidade turbulenta

Finalmente, para a determinação da incerteza aleatória da velocidade média e intensidade turbulenta segundo as **equações (3.23) e (3.24)**, se observa a dependência inversa do número de partículas da amostragem no volume de medição. A experiência foi realizada, em geral, com altas taxas de aquisição de sinal e uma duração de 1 minuto. Para o cálculo das incertezas que dominam o escoamento foram escolhidas as maiores intensidades turbulentas. Estas incertezas aleatórias esperadas são:

- No caso do escoamento jato livre, as menores amostragens foram de cerca de 7000 partículas. A máxima intensidade turbulenta ( $u_{rms}/U_j$ ) encontrada no jato central foi de 18,5%. Assim, a incerteza aleatória máxima para a velocidade média,  $\sigma_U$ , é de 0,43% e para a intensidade turbulenta,  $\sigma_{u-rms}$ , de 1,66%.
- No caso do escoamento com obstáculo, a amostragem de partículas utilizadas é próxima de 10000, melhor que a precedente devido à existência de partículas também no escoamento de ar anular. A máxima intensidade turbulenta ( $u_{rms}/U_j$ ) encontrada foi de 17%. Logo a incerteza aleatória

máxima para a velocidade média,  $\sigma_U$ , é de 0,33% e para a intensidade turbulenta,  $\sigma_{u-rms}$ , é de 1,39%.

Destas incertezas calculadas pode-se observar que as aleatórias geralmente são baixas, no caso da velocidade média menores do que 1%. Isto ocorre devido à grande quantidade de partículas processadas e o maior tempo de aquisição (acima de 1 minuto). Similarmente, a incerteza das intensidades turbulentas é menor do que 2%, sendo que os valores máximos são encontradas na região central do jato. Assim, a incerteza experimental associada à medição da velocidade média, que é a combinação da sistemática e da aleatória, segundo a **equação (3.18)**, é de 1,43% e 1,33% para os escoamentos de jato livre e com obstáculo, respectivamente, enquanto que a incerteza da intensidade turbulenta é 1,66% e 1,39%.

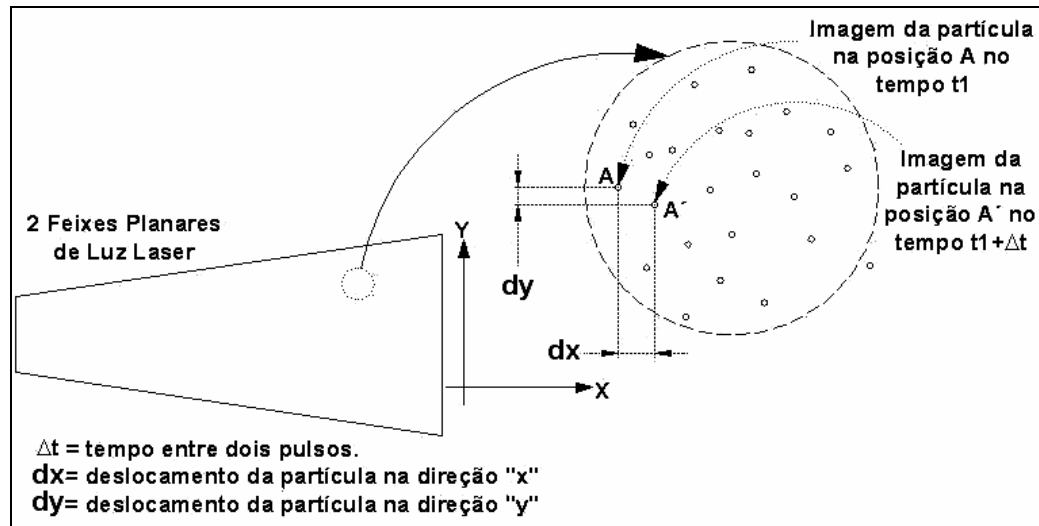
Devem ser notados que as incertezas do número de Reynolds e posicionadores foram calculadas separadamente. Estas não devem ser combinadas com as incertezas calculadas das medições LDV, uma vez que os erros que as produzem não afetam diretamente no processo das medições do LDV. Assim, a incerteza para o número de Reynolds do regime de operação é de 11,91%, oriunda principalmente da velocidade do jato central,  $U_j$ , cuja incerteza depende fortemente da incerteza do rotâmetro. A posição do ponto de medição da sonda, feita com a mesa de coordenadas e com o medidor digital, não influenciou no resultado dos valores processados no LDV. Estas incertezas são consideradas marginais, mas não desprezíveis, pois a incerteza calculada da mesa de coordenadas é de 10%, enquanto que a do medidor digital é de 0,5%.

### 3.3 Velocimetria por Imagem de Partículas (PIV)

#### 3.3.1 Definição do princípio de operação

PIV (Particle Image Velocimetry) é uma técnica de medição de velocidade, pela obtenção de imagens óticas usando um plano laser para iluminar as partículas que acompanham o fluido. A aquisição do campo de vetores da velocidade em muitos pontos é simultânea e instantânea. Na **Figura 3.19** se mostra o princípio do PIV em sua forma bidimensional.





**Figura 3.19** – Princípio de medição do campo de velocidade usando a técnica laser PIV.

Na **Figura 3.19**,  $dx$  e  $dy$  são os deslocamentos de uma partícula no campo do escoamento durante o intervalo de tempo  $\Delta t$ . Deste modo, a velocidade em nas direções “x” e “y” em A podem ser calculadas segundo:

$$u_x = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{dx}{\Delta t}, \quad (3.40)$$

$$u_y = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{dy}{\Delta t}. \quad (3.41)$$

O princípio fundamental do uso do PIV, segundo Adrian et al. [2], é medir os deslocamentos  $dx$ ,  $dy$  das imagens, sendo o intervalo de tempo entre as imagens conhecido. Os deslocamentos devem ser suficientemente pequenos tais que, por exemplo,  $dx/\Delta t$  seja uma boa aproximação da velocidade na direção “x”. Isto é, a trajetória de cada partícula deve estar quase em linha reta e a velocidade ao longo da trajetória deve ser quase constante. Estas condições podem ser atingidas pela busca de  $\Delta t$  pequenos quando comparados com as escalas de escoamento relevantes para o experimento. Uma vez que  $dx$  e  $dy$  são valores medidos dos deslocamentos na imagem, precisam ser convertidos para deslocamentos de partícula no escoamento usando a relação de amplificação, a qual depende dos parâmetros da imagem.

Os principais elementos que compõem a técnica do PIV são o fluido, as partículas traçadoras, o sistema de iluminação, o sistema de aquisição das imagens e o sistema de processamento das imagens para a extração do campo de velocidade desejado, como mostrado na **Figura 3.20**. O procedimento de operação do sistema inicia-se quando o feixe proveniente de uma fonte laser

pulsada produz pulsos de luz de duração e intervalos controlados por sinais eletrônicos. Em seguida, o feixe passa por uma lente cilíndrica responsável pela formação do plano de luz que ilumina as partículas traçadoras dispersas no fluido. A câmara fotográfica digital posicionada ortogonalmente ao plano de luz, registra as imagens de dupla exposição. Estas imagens são comparadas, através de algoritmos matemáticos como o de correlação cruzada, que realiza o processamento e a análise das imagens. Obtêm-se assim os deslocamentos da partícula na região captada pela câmara, fornecendo o valor da velocidade em centenas ou milhares de localizações simultaneamente.

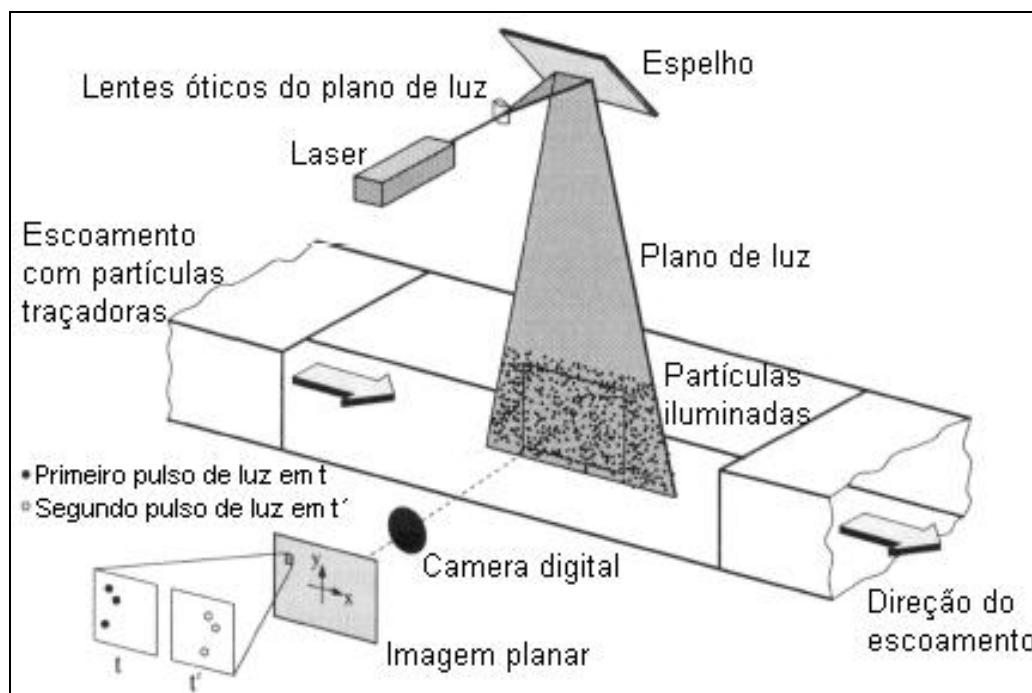


Figura 3.20 – Esquema de funcionamento do sistema de medição PIV [2].

### 3.3.2 Principais componentes do PIV

Para a implementação de um sistema baseado na técnica de diagnóstico PIV, foi utilizado um equipamento fabricado pela TSI Inc. que utiliza laser Nd:YAG de dupla cavidade que proporciona um plano de luz pulsado com 120 mJ de energia. Na **Figura 3.21** se mostra uma fotografia do sistema PIV montado na experiência realizada no presente estudo experimental. O sistema é composto, basicamente de três componentes que trabalham de forma sincronizada: o sistema de iluminação, o sistema de aquisição ou captação das imagens, e o sistema de processamento das imagens para a extração do campo de velocidade desejado.



**Figura 3.21** – Principais componentes do sistema PIV montado na instalação experimental.

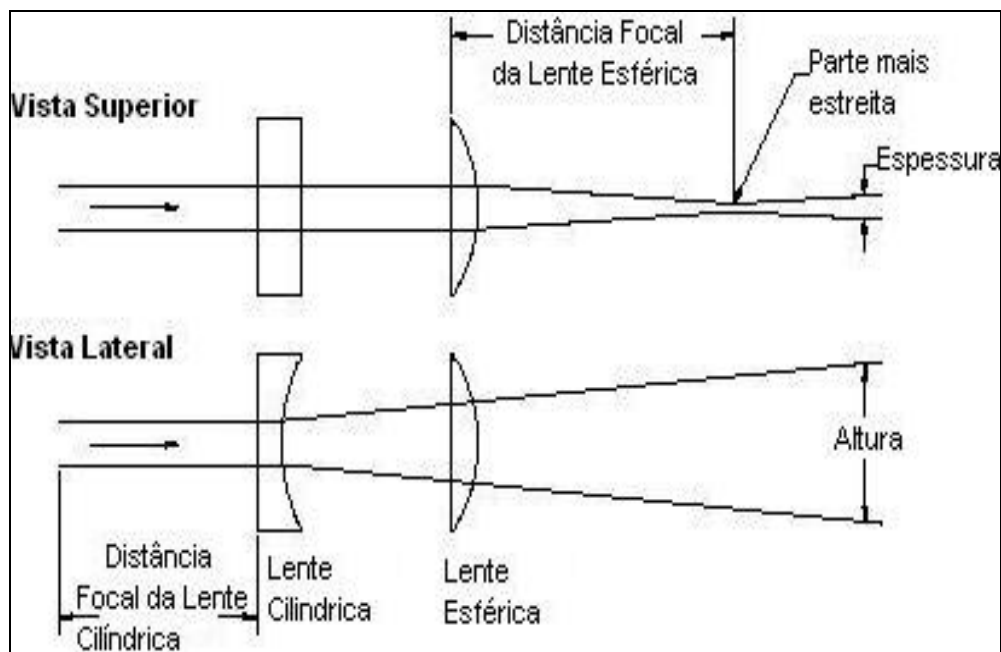
### 3.3.2.1 Sistema de iluminação

A finalidade deste sistema é fornecer luz ao sistema de medição de velocidades, e restringir a região do escoamento estudada, impedindo assim que regiões fora da profundidade de foco da câmera sejam iluminadas. Os principais parâmetros no sistema de iluminação são as dimensões da região iluminada e a intensidade luminosa. Este sistema é composto pelos seguintes módulos:

- (i) **Fonte de luz laser**, é o módulo onde se encontra o Q-Switch, ou gerador da luz laser, e o Flashlamp ou excitador, os quais tem a capacidade de emissão de luz monocromática com alta densidade de energia, que pode ser pulsada e configurada na forma de planos de luz de dimensões variadas. O laser Nd-YAG de estado sólido foi usado para esta aplicação PIV. Este laser produz feixes de alta energia no comprimento de onda de 1064 nm, que é dobrado

em frequência com cristais especiais produzindo um feixe visível com comprimento de onda de 532 nm. A frequência de pulsação deste equipamento (modelo Gemini Laser TSI) é de 15 Hz.

- (ii) **A ótica geradora do plano de luz** é composta de um arranjo de espelhos e de lentes esféricas e cilíndricas com os quais se controlam as dimensões da área iluminada. As lentes cilíndricas controlam a divergência (altura) do plano de luz e não têm efeito sobre a espessura. O feixe laser diverge na direção vertical quando atravessa uma lente cilíndrica de distância focal negativa, sendo o valor usado nos experimentos igual a -12,7 mm, obtendo-se uma altura de 60 mm, no centro do queimador. As lentes esféricas empregam-se para controlar a espessura convergente até o comprimento focal, divergente a partir daí, sendo o valor usado desta lente de 500 mm, coincidindo com o centro do queimador. A lente esférica de distância focal positiva reduz minimamente esta divergência no plano vertical; uma vez que o comprimento focal da lente cilíndrica é muito menor que da lente esférica, a espessura obtida com este conjunto de lentes é de 0,212 mm, e divergência de 0,3 mm / 100 mm, segundo dados da TSI. Na **Figura 3.22** se mostra esquematicamente os arranjos do conjunto de lentes. A posição do plano de luz formado pode ser utilizada para apontar a câmara, sendo que uma visão normal da zona no ponto focal da lente é preferida, pois a espessura do plano de luz é mínima, e logo a intensidade é maior.

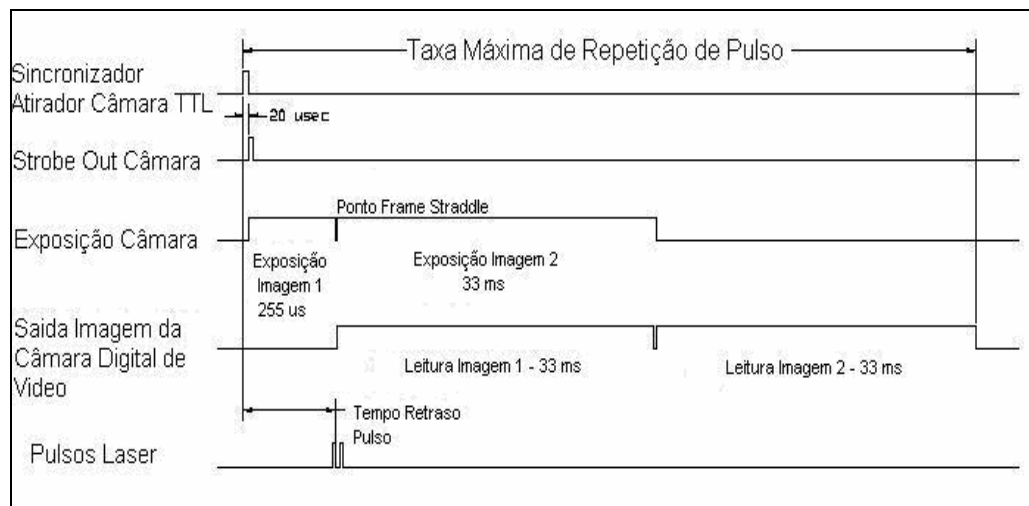


**Figura 3.22** – Geometria do plano de luz formado pelas lentes [2].

### 3.3.2.2 Sistema de captação de imagens

Este sistema tem a missão de obter e gravar as imagens das partículas que atravessam o plano de luz gerado no escoamento. É composto pelos seguintes módulos:

- (i) **Câmeras digitais CCD** (Charge Coupled Device), cuja tecnologia é a mais utilizada na atualidade, por combinar uma notável resolução e sensibilidade com a possibilidade de análise de dados em tempo real. As câmeras digitais que foram usadas na experiência, que têm um diagrama de tempo sincronizado como o mostrado na **Figura 3.23**, foram a PIVCAM 10-30 com resolução espacial de até 1 Megapixel e Power Plus View com resolução espacial de até 4 Megapixel.



**Figura 3.23** – Diagrama de sincronização das câmeras PIVCAM 10-30 e Power View Plus 4 MP.

- (ii) **O sincronizador** fornece o controle e ativação dos sinais, garantindo a precisão e sincronização dos componentes do sistema. Este módulo é programável através do software do sistema, o que permite configurar a duração do pulso de laser, a distância entre os pulsos, a energia fornecida por pulso com lasers tipo Nd:YAG, o controle da abertura das câmeras CCD, o controle de dispositivos externos.
- (iii) **A interface entre câmera e o computador**, comumente denominado de “Frame Grabber”, é responsável pela transmissão das imagens capturadas pela câmera CCD diretamente para a PC, de modo que estas sejam processadas e analisadas através de um software apropriado. Se a imagem tomada é analógica, então esta é digitalizada, se é digital, então é

comprimida para envio direto para à RAM do PC. Quanto maior for a interface, a capacidade de processamento e a velocidade de transferência das imagens, tanto mais se pode aproveitar a capacidade técnica das mais recentes e mais desenvolvidas câmaras CCD. Assim sendo, o parâmetro básico e fundamental para estas placas “Frame Grabber” é a velocidade de processamento e a velocidade de transmissão das imagens provenientes da câmara.

### 3.3.2.3

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

Este sistema é composto pelos diferentes módulos que compõem o programa de software Insight 5 PIV ou Insight 3G. Estes softwares são responsáveis pelo controle e a configuração do sistema, aquisição, processamento, análise e visualização do campo de velocidade a partir das imagens capturadas pelas câmeras.

Este programa processa as imagens usando algoritmos matemáticos convencionais baseados em métodos de correlação cruzada e autocorrelação. A velocidade de processamento, análise e visualização de dados permite trabalhar em tempo real sem o uso de hardware adicional ou processadores especiais. Além disto, este software permite utilizar o programa de pós-processamento Tecplot versão 9.0 com macros TSI PIV-2D para a visualização de dados. Sua arquitetura é flexível, permitindo a personalização de tarefas complexas e repetitivas.

### 3.3.3

#### **Procedimento experimental para medição PIV**

Ao utilizar a técnica de medição PIV, deve se ter em conta muitos fatores que influem na obtenção de imagens de boa qualidade e, conseqüentemente, em resultados confiáveis que reflitam o comportamento mais próximo da estrutura do escoamento que desejamos caracterizar. Entre estes fatores, descritos em ordem de realização, temos:

- Nivelamento da face do queimador.
- Nivelamento do equipamento laser PIV com respeito à face do queimador.
- Posicionamento do plano de iluminação laser do PIV na face do queimador.

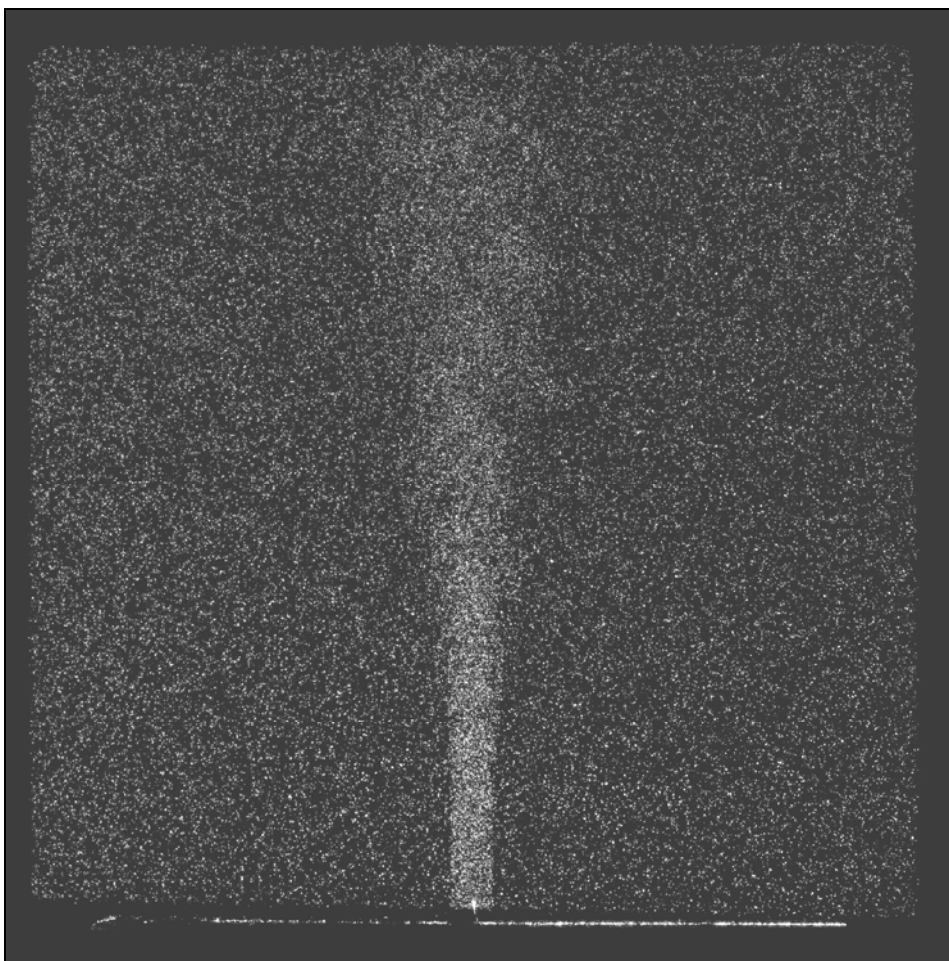
- Localização do plano axi-simétrico do escoamento na face do queimador.
- Nivelamento e posicionamento ortogonal da câmera digital com respeito ao plano de luz laser.
- Regulação da concentração das partículas traçadoras no escoamento, feito através do controle da pressão de ar no gerador de partículas de óleo.
- Ajuste do foco e abertura da lente da câmera através do software de aquisição de imagens.
- Calibração das dimensões da imagem em função da resolução da câmera.
- Ajuste dos parâmetros de controle no algoritmo de processamento de imagens.

Como foi explicado na **seção 3.2.3**, o nivelamento e alinhamento do queimador e do equipamento laser é tarefa cotidiana que deve ser feita cada vez que se deseje realizar medições laser. Desníveis ou desalinhamentos são o principal fator de erro associados às medidas experimentais. Isto é geralmente realizado usando o nível de bolha, devido às pequenas dimensões do queimador e a precisão necessária para obter planos horizontais. A posição final da fonte laser depende da distancia focal da lente esférica que é aproximadamente de 500 mm. Seu posicionamento a esta distância do centro de queimador garante que, na região a ser estudada, a espessura do feixe é mínima, o que leva a máxima concentração de energia. Posto que o diâmetro do jato de saída é de 2 mm, o plano de luz foi alinhado visualmente com a projeção do plano laser sobre o centro da face do queimador, sendo assim definido o plano axi-simétrico do escoamento.

O passo seguinte foi posicionar a câmera digital para captar as imagens a 90° da direção de emissão do plano de luz laser. Isto foi realizado usando um tripé da marca Midas, com capacidade para nivelamento horizontal e alinhamento ortogonal ao plano de luz. Utilizou-se, finalmente, a câmera Power View Plus de 4 Megapixels, com lente Nikon de 105 mm e relação de expansão das lentes de 1:2,8. A distância de aproximação da câmera ao plano de luz laser foi de 400 mm e, com ajuda do software e a configuração para aquisição de imagens do PIV em modo livre, foi realizada a calibração 2D da imagem desejada. Foi utilizado como referência o diâmetro do queimador para determinar a resolução em termos do numero de pixels. O campo de visão obtido é de 45,18 mm nas duas direções, horizontal e vertical da imagem. Lembrando que o diâmetro do queimador é de 36

mm, o que foi coberto por 1632 pixels, levando o tamanho do objeto a uma relação de 22,08  $\mu\text{m}/\text{pixel}$  nas duas direções.

Uma vez feito o nivelamento e alinhamento do plano de luz do atirador e da câmera, estabelece-se os escoamentos de ar e inserem-se as partículas traçadoras. Estas são produzidas através do gerador de partículas de óleo. Se realizou uma ampliação máxima da imagem captada pela câmera no software de aquisição. Em seguida, foi fechado o diafragma da lente e focalizadas as partículas até obter uma imagem bem delineada das partículas na janela da imagem ampliada, evitando-se superexposição. A **Figura 3.24** mostra uma imagem típica do escoamento obtida para uma pressão de ar de 20 psi no gerador de partículas de óleo.



**Figura 3.24** – Imagem das partículas traçadoras seguindo ao escoamento com obstáculo obtida na medida PIV.

Uma vez finalizado o processo de calibração das imagens, com o software de aquisição de imagens foram capturadas as imagens com ajuda do software Insight 5.

O escoamento resultante é caracterizado pela formação de duas regiões, a de um jato central e uma zona de recirculação, produto da diferença de velocidade



média entre, jato central de (27 a 28 m/s) e ar anular, de 1,5 m/s. Esta diferença de velocidade dificulta a representação do escoamento completo utilizando-se apenas um valor de intervalos de tempo entre dois pulsos laser ( $\Delta T$ ). Sendo a estrutura da região de recirculação, o escoamento lento e a de região de desenvolvimento do jato central, o escoamento rápido. Assim, o campo de vetores foi obtido para um valor de  $\Delta T$  igual a 80  $\mu s$  no caso do jato, enquanto que no caso do ar anular este intervalo foi de 5  $\mu s$ .

Para o processamento dos dados foi utilizado o seguinte ajuste dos algoritmos matemáticos de correlação cruzada de imagens:

- Algoritmo de geração da malha: Recursive Nyquist Grid, baseado em diferenças centrais [20,22].
- Algoritmo de correlação de imagens: Hart Correlator, baseado na compressão das informações da janela de interrogação, usando uma pequena porcentagem dos pixels, os quais possuem maior intensidade. Isto faz com que o processamento para um número tão elevado de imagens seja feito com de forma mais rápido. A relação de compressão usada foi de 0,9.
- Algoritmo de localização do pico de correlação: uso do método de localização do pico pela interpolação da função bi linear (Bilinear Peak).
- Os tamanhos das janelas de correlação para processamento das imagens que foram usadas são mostrados na **Tabela 3.6**.

**Tabela 3.6** – Tamanhos das janelas de correlação cruzada usadas para o processamento das imagens, com deslocamento máximo de 8 pixels.

Tamanho das janelas de correlação de imagens dos pulsos laser inicio e final		Largura (pixel)		Altura (pixel)	
		$\Delta T=5 \mu s$	$\Delta T=80 \mu s$	$\Delta T=5 \mu s$	$\Delta T=80 \mu s$
Dimensões Janela Inicio	Janela A	32	64	32	64
	Janela B	32	64	32	64
Dimensões Janela Final	Janela A	16		16	
	Janela B	16		16	

Após o processamento das imagens se preparou uma macro de validação de vetores. As imagens processadas são caracterizadas por possuir duas zonas de interesse dependentes entre si, porém espera-se obter imagens com partículas descorrelacionadas o que resulta na presença de vetores espúrios. Para diminuir a

ocorrência de vetores espúrios se aplicou um filtro que elimina vetores correspondentes a velocidade muito elevadas, fora de limites pré-definidos. Também é preciso escolher uma tolerância aceitável no desvio em relação aos valores vizinhos, pois, com este processo, vetores corretos correm o risco a serem removidos. Caso ocorram a aparição de “buracos” no campo de velocidade, estes são preenchidos utilizando-se a média da velocidade dos pontos vizinhos.

Foi gerado um campo instantâneo de aproximadamente de 65000 vetores, para o caso do escoamento do jato central com  $\Delta T=5 \mu s$ , e de 63000 vetores, para o caso do escoamento da zona de recirculação com  $\Delta T=80 \mu s$ . A frequência de aquisição de pares de imagens com o equipamento usado é de 15 Hz. Optou-se por fazer 80 aquisições de cada vez, repetindo-as 10 vezes, gerando assim, 800 pares de imagens de 4 Megapixels para cada caso do escoamento. Finalmente, usando o programa de pós-processamento Tecplot V9, foram obtidos 1600 campos instantâneos de velocidade em total, combinando-se os dois casos focados às escalas de velocidade que vão representar a estrutura aproximada do escoamento em estudo.

### 3.3.4 Pós-processamento do campo de velocidade

Uma vez obtidas as componentes de velocidade longitudinal e transversal para no plano “axi-simétrico” do escoamento usando as técnicas medição laser LDV e PIV, é necessário definir as principais propriedades relacionadas à natureza turbulenta do escoamento. Assim, os dados tratados aqui correspondem à avaliação destas propriedades em cada ponto, segundo o número de amostras obtidas estatisticamente no tempo para o caso de LDV, e para número de amostras de imagens instantâneas obtidas representando um conjunto de pontos, para o caso de PIV. O campo das componentes de velocidade longitudinal e transversal em cada ponto do escoamento pode ser definido como:

$$U(t) = \bar{U} + u(t), \quad (3.42)$$

$$V(t) = \bar{V} + v(t), \quad (3.43)$$

onde  $\bar{U}$  e  $\bar{V}$  são as componentes de velocidade média nas direções longitudinal e transversal, respectivamente, e  $u(t)$  e  $v(t)$  são as flutuações de velocidade nestas direções longitudinal e transversal, respectivamente.

Em função do número de amostras em “N” instantes do tempo, as propriedades estatísticas que podem ser calculadas no campo de escoamento são as componentes médias de velocidade longitudinal e transversal ( $\bar{U}, \bar{V}$ ) e as componentes de velocidade turbulenta r.m.s. ( $u', v'$ ):

$$\bar{U} = \sum_{i=1}^N \frac{U_i}{N}, \quad \bar{V} = \sum_{i=1}^N \frac{V_i}{N}, \quad (3.44)$$

$$u' = \sqrt{u'^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^2}, \quad v' = \sqrt{v'^2} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (V_i - \bar{V})^2}, \quad (3.45)$$

sendo as últimas tratadas como intensidade turbulenta longitudinal e transversal ( $u'/U_j, v'/U_j$ ), onde “i” representa a i-ésima amostra instantânea da variável calculada.