

DESENVOLVIMENTO DE UM INJETOR TIPO *BLURRY* PARA BIOCOMBUSTÍVEIS E PROJETO DE UMA BANCADA EXPERIMENTAL PARA CARACTERIZAÇÃO DE INJETORES

Claudia Gonçalves de Azevedo¹
Heraldo da Silva Couto²
Fernando de Souza Costa¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/LCP)

Cachoeira Paulista – SP, Brasil

² Vale Soluções em Energia (VSE)

São José dos Campos – SP, Brasil

claudia@lcp.inpe.br

Resumo: *A transformação de líquidos em sprays ou nuvens de gotas em atmosferas gasosas possui aplicações que vão desde a indústria até a medicina. Vários dispositivos têm sido desenvolvidos, os quais são denominados de atomizadores, nebulizadores, injetores ou bocais. Em geral, antes de serem queimados, os combustíveis líquidos são atomizados através de injetores para formar gotas, visando aumentar a área superficial do combustível e assim atingir altas taxas de mistura e evaporação. A redução do tamanho das gotas formadas conduz a uma maior taxa de liberação de calor por unidade de volume, facilita a ignição da mistura, amplia a região de queima e produz menores emissões de poluentes. Devido a grande importância dos injetores nos sistemas de combustão tem-se a necessidade de realizar estudos que contribuam significativamente no aperfeiçoamento de tais sistemas. Sendo assim, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de um injetor do tipo *Blurry* para biocombustíveis líquidos bem como o projeto de uma bancada experimental para testes e caracterização de injetores.*

Palavras-chave: *Injetor Tipo *Blurry*, Biocombustíveis Líquidos*

1 INTRODUÇÃO

Devido ao aumento continuado dos preços do petróleo e as crescentes preocupações ambientais verifica-se que o interesse pela utilização de biocombustíveis, em especial o etanol e o biodiesel, têm se elevado durante as últimas décadas. Biocombustíveis puros e misturas destes com a gasolina e o diesel têm sido empregados, principalmente, em motores de combustão interna para veículos. Com relação às questões ambientais, a legislação ambiental tem se tornado cada vez mais rigorosa, estabelecendo limites rígidos para as emissões de poluentes em motores, turbinas, fornos, caldeiras e processos de combustão industriais. Conseqüentemente, é de interesse do país e das empresas investigar a utilização dos biocombustíveis em aplicações industriais, objetivando reduzir custos, aumentar a eficiência de operação e reduzir a emissão de poluentes.

Antes de serem queimados, os combustíveis líquidos são atomizados através de injetores para formar gotas, objetivando aumentar a área de contato entre o combustível e o oxidante e, conseqüentemente, aumentar as taxas de mistura e de evaporação do combustível. A redução do tamanho das gotas formadas possibilita uma maior taxa de liberação de calor por unidade de volume, facilita a ignição da mistura, amplia a região de queima e produz menores emissões de poluentes.

Muitos processos economicamente vitais na indústria, tecnologia e medicina dependem da produção de *sprays* líquidos ou nuvens de gotas em atmosferas gasosas. Vários dispositivos têm sido desenvolvidos, os quais são denominados de atomizadores, nebulizadores, injetores ou bocais.

O processo de atomização ocorre quando um jato líquido, folha de líquido ou um filme líquido é desintegrado pela energia cinética do próprio líquido, pela exposição a uma corrente de ar ou de gás

de alta velocidade, ou ainda como resultado de energia mecânica externa aplicada através de dispositivos rotativos ou vibratórios. Devido à natureza aleatória do processo de atomização, o *spray* resultante é usualmente caracterizado por um largo espectro de tamanhos de gotas. Ou seja, a atomização é um processo muito eficiente para promover o aumento da superfície de queima ou outro processo que se deseja acelerar.

O injetor ideal deve atender os seguintes requisitos: baixo custo de fabricação, peso reduzido, possuir boa repetibilidade, baixa susceptibilidade de variação durante a instalação e bloqueio por contaminantes, fornecer respostas rápidas para variações na vazão mássica e principalmente promover boa atomização em uma larga escala de vazões.

Dada a grande importância dos injetores nos sistemas de combustão tem-se a necessidade de realizar estudos que contribuam significativamente no aperfeiçoamento de tais sistemas. Portanto, o objetivo deste trabalho é descrever injetores do tipo *blurry* para injeção de biocombustíveis líquidos em sistemas compactos de combustão, bem como apresentar o desenvolvimento de uma bancada experimental para testes de injetores.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

O processo de atomização consiste no rompimento de um filme líquido em gotas, aumentando sua área superficial e reduzindo as taxas de vaporização e combustão. Uma boa vaporização e pré-mistura com ar são os principais requisitos em sistemas de combustão empregando combustíveis líquidos. O combustível líquido deve ser atomizado em pequenas gotas que vaporizam e se misturam rapidamente com o ar.

O injetor é peça fundamental em um sistema de combustão. Idealmente, para promover a combustão com a máxima eficiência e a mínima emissão de poluentes, um injetor deve fornecer um *spray* de combustível que evapora e se dispersa rapidamente para produzir uma mistura homogênea de combustível vaporizado e ar. As características de um injetor ideal incluem a uma boa atomização para uma ampla gama de vazões de combustível, baixo consumo de energia, a escalabilidade, resistência a bloqueios e formação de um *spray* fino.

O desempenho de um atomizador depende principalmente do seu tamanho e geometria, das propriedades físicas da fase dispersada (o líquido que está sendo atomizado) e da fase contínua (o gás no qual o *spray* está sendo lançado).

As características de um *spray* são bastante influenciadas pelas propriedades do líquido, tais como, densidade, viscosidade e tensão superficial. Devido ao fato de que os líquidos utilizados em *sprays* têm densidades bem semelhantes, considera-se que o efeito da densidade é pequeno. A tensão superficial tem papel relevante, pois, representa a força de resistência à formação de uma nova área superficial. O número de Weber (relaciona a força inercial com a força de tensão superficial) é um parâmetro comumente empregado para correção em tamanhos de gotas. A viscosidade é o fator mais importante das propriedades do líquido, pois, a mesma está diretamente relacionada com o número de Reynolds e, portanto, com a instabilidade do jato ou filme. Assim a viscosidade influencia diretamente no intervalo para desintegração em gotas e no tamanho das gotas de um *spray*. Condições ambientes tais como temperatura e pressão também influenciam de forma significativa nas características do *spray* e, conseqüentemente, no desempenho do atomizador. Tal fato pode ser observado principalmente em situações onde existe queima de combustível.

Baseado no esquema proposto por Ganã-Calvo e Barrero, 1997, o chamado injetor *flow blurring*, ilustrado na Fig. 1, consiste de um tubo para passagem do líquido e uma placa de orifício situada à jusante do tubo.

O processo de atomização compreende forçar um líquido através de um tubo de alimentação (D) localizado dentro de uma câmara de pressão a qual é continuamente preenchida por outro fluido que pode ser um segundo líquido, imiscível com o primeiro líquido, ou por um gás. A saída do tubo de alimentação é posicionada de tal forma que o líquido que sai do tubo passa pelo orifício de descarga (D) da câmara do segundo fluido. O diâmetro do tubo de alimentação é igual ao diâmetro inicial do orifício da câmara.

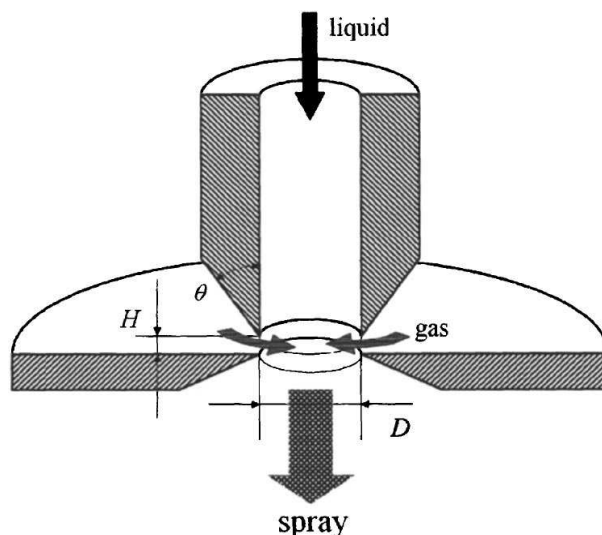


Figura 1. Esquema da geometria de um injetor tipo *blurry*.

Fonte: Gañán-Calvo, 2005.

As seções do tubo de alimentação e da placa de orifício se encontram a uma distância (H), conforme observa-se na Fig. 1. Dessa forma, a distância entre a extremidade do tubo e o orifício de saída dá origem a uma passagem lateral cilíndrica (PLC).

O líquido que sai do tubo é “focado” para um diâmetro substancialmente reduzido ao ser submetido a uma ação violenta criada pelo segundo líquido ou gás na câmara pressurizada, quebrando o escoamento líquido em partículas bem menores do que se o líquido escoasse através do diâmetro reduzido sofrendo apenas uma ruptura capilar espontânea.

O microjato formado pelo líquido é acelerado e estabilizado pela tensão exercida pelo gás sobre a superfície do líquido. Tanto a formação do microjato quanto a sua aceleração são baseados na queda de pressão abrupta associada com a forte aceleração sofrida pelo gás na passagem através do orifício. As forças exercidas pelo fluxo de gás na superfície do líquido devem ser estáveis o suficiente para evitar oscilações na superfície. Portanto, qualquer turbulência no movimento de gás deve ser evitada: mesmo se a velocidade do gás for alta, o tamanho característico do orifício deve garantir que o movimento do gás seja laminar (semelhante às camadas limite formadas no jato e na superfície interna do bocal ou orifício). As forças dinâmicas exercidas pelo gás nunca devem exceder a tensão superficial da gota e do microjato durante o processo de atomização.

O tamanho das partículas do líquido é determinado pelo equilíbrio entre as forças da tensão superficial da partícula formada e da amplitude das flutuações turbulentas da pressão, fora do orifício de saída da câmara pressurizada. Quando as partículas são suficientemente pequenas e sua força de tensão superficial corresponde substancialmente a amplitude da variação de pressão, as partículas são estabilizadas e não se dividem em partículas ainda menores.

Conforme observado por Gañán-Calvo, 2005, em um injetor tipo *Blurry* ocorre o retorno do escoamento de ar dentro do tubo de alimentação do combustível (primeiro líquido), criando uma recirculação do fluxo dentro do tubo, resultando em uma intensa mistura entre as fases

O retorno do escoamento acontece se a passagem lateral cilíndrica (PLC), entre a extremidade do tubo de alimentação de combustível e o orifício de saída do injetor, for maior que a área de saída do orifício, ou seja, $H/D < 0,25$ (Fig. 1).

3 PROJETO DE UM INJETOR TIPO *BLURRY*

A configuração proposta no presente trabalho é caracterizada por um tubo de alimentação de líquido, cujo diâmetro interno é igual ao orifício de saída D . Ambas as seções, do tubo de alimentação e da placa de orifício, se encontram a uma distância (H), dando origem a uma

passagem lateral cilíndrica (PLC). Cabe ressaltar, que a passagem lateral cilíndrica (PLC) é igual à área do orifício de saída quando $H/D=0,25$.

Quando o fluxo mássico de líquido, \dot{m}_l , é forçado através do tubo de alimentação e o fluxo mássico de gás, \dot{m}_g , é forçado através do PLC, um *spray* é formado a partir da combinação das duas fases e deixa o dispositivo através do orifício de saída.

Considerando que no orifício de saída da câmara o escoamento é sônico, tem-se que o fluxo mássico de ar é dado por:

$$\dot{m}_g = \frac{P_0 \cdot A}{\sqrt{R \cdot T_0}} \cdot \left[\gamma \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right]^{1/2} \quad (1)$$

sendo A a área do orifício de saída, γ a razão de calores específicos, R a constante do gás (ar), P_0 e T_0 a pressão e temperatura do reservatório, respectivamente.

Por conveniência de fabricação e para utilização de baixas vazões adotou-se um o diâmetro do tubo de alimentação e do orifício de saída, $D = 1$ mm, resultando em $A = 0,785 \cdot 10^{-6} m^2$.

Considerando $P_0 = 2 \cdot 10^5$ Pa, $T_0 = 298,15$ K, $R = 287$ J/kg · K e $\gamma = 1,4$ tem-se que o fluxo mássico de ar é:

$$\dot{m}_g = 0,368 \text{ g/s}$$

O número de Weber (We) é uma medida da importância relativa entre a inércia do gás e a tensão superficial líquido-gás, sendo dado por:

$$We = \rho_g \cdot v_g^2 \cdot D \cdot (2\sigma)^{-1} \quad (2)$$

na qual ρ_g é a densidade do gás, v_g é a velocidade do gás, ambas no orifício de saída, D é o diâmetro do microjato e σ é a tensão superficial líquido-gás.

A importância da viscosidade sobre a quebra do jato pode ser estimada a partir do número Ohnesorge, definido como:

$$Oh = \mu_l \cdot (\rho_l \cdot \sigma \cdot D)^{-1/2} \quad (3)$$

Se esta relação for muito menor que 1 a viscosidade não tem papel relevante no fenômeno da quebra do jato.

Os valores de ρ_g e v_g , bem como a queda de pressão através do orifício são univocamente determinados pelo fluxo mássico de gás \dot{m}_g . São consideradas condições sônicas do gás no orifício de saída. Assim sendo, pode-se calcular a pressão, temperatura e densidade do gás, respectivamente, por:

$$\frac{P_g}{P_0} = \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (4)$$

$$\frac{T_g}{T_0} = \frac{2}{\gamma+1} \quad (5)$$

$$\frac{\rho_g}{\rho_0} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}} \quad (6)$$

Considerando $P_0 = 2 \cdot 10^5$ Pa, e $T_0 = 298,15$ K, obtém-se $\rho_0 = P_0 / RT_0 = 2 \cdot 10^5 / 287 \cdot 298,15 = 2,34$ kg/m³, e:

$$\rho_g = 1,48 \text{ kg/m}^3$$

$$P_g = 1,056 \text{ Pa}$$

$$T_g = 248,46 \text{ K}$$

Sabe-se que:

$$\dot{m}_g = \rho_g \cdot v_g \cdot A \quad (7)$$

Considerando $A = 0,785 \cdot 10^{-6}$ m² resulta:

$$v_g = 316,36 \text{ m/s}$$

Ganãn-Calvo, 2005, obteve a seguinte expressão adimensional para a distribuição de diâmetro de gotas em um injetor *Blurry*:

$$d = d(H/D, We, Oh, RGL) \quad (8)$$

em que:

$$RLG = \frac{\dot{m}_g}{\dot{m}_l} \quad (9)$$

O diâmetro médio mássico (*MMD*) adimensional das gotas, $d = MMD/D$, pode ser estimado a partir da fórmula apresentada por Ganãn-Calvo, 2005:

$$d = C_1 \cdot We^{-0,6} \cdot (1 + C_2 \cdot Oh) \cdot (1 + C_3 \cdot RLG^{-1})^{1,2} \quad (10)$$

sendo $C_1 = 0,42$, $C_2 = 18$, $C_3 = 1$.

Usando o etanol, com propriedades $\rho_l = 997$ kg/m³, $\mu = 1$ cP e $\sigma = 73$ mN/m, e dados $D = 1$ mm, $\rho_g = 1,48$ kg/m³ e $v_g = 316,36$ m/s, tem-se que:

$$We = 1015,78$$

$$Oh = 3,71 \cdot 10^{-3}$$

Considerando que as energias cinéticas por unidade de volume de líquido e de gás sejam da mesma ordem, a velocidade do líquido pode ser calculada a partir de:

$$v_l \approx \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right)^{\frac{1}{2}} v_g \quad (11)$$

Portanto tem-se:

$$v_l = 12,40 \text{ m/s}$$

Sabe-se que:

$$\dot{m}_l = \rho_l \cdot v_l \cdot A \quad (12)$$

Tem-se que:

$$\dot{m}_l = 9,70 \text{ g/s}$$

Sendo assim:

$$RLG = 0,0386$$

Desse modo o tamanho de gotas obtido é:

$$d = 0,0365$$

O mesmo procedimento de cálculo é repetido para uma faixa de pressão do reservatório (P_0) variando de $3 \cdot 10^5$ a $14 \cdot 10^5$ Pa, considerando $T_0 = \text{constante} = 298,15$ K, e portanto, $T_g = \text{constante} = 248,46$ K. Os resultados obtidos são mostrados na Tab. 1.

Tabela 1. Resultados obtidos para determinação do tamanho de gotas.

P_0 [10^5 Pa]	P_g [10^5 Pa]	m_g [g/s]	ρ_0 [kg/m^3]	ρ_g [kg/m^3]	v_g [m/s]	v_l [m/s]	m_l [g/s]	RLG	We	d
2	1,056	0,368	2,337	1,482	316,356	12,196	9,545	0,0386	1015,783	0,0365
3	1,584	0,552	3,506	2,223	315,176	14,882	11,647	0,0474	1512,335	0,0260
4	2,112	0,736	4,675	2,964	318,042	17,340	13,571	0,0542	2053,276	0,0203
5	2,64	0,92	5,843	3,705	316,322	19,282	15,091	0,0610	2538,923	0,0169
6	3,168	1,104	7,012	4,446	315,176	21,046	16,471	0,0670	3024,671	0,0146
7	3,696	1,288	8,181	5,186	316,875	22,855	17,887	0,0720	3566,915	0,0128
8	4,224	1,472	9,349	5,927	315,946	24,361	19,066	0,0772	4052,613	0,0115
9	4,752	1,656	10,518	6,668	317,134	25,936	20,299	0,0816	4593,544	0,0104
10	5,28	1,84	11,686	7,409	316,365	27,273	21,345	0,0862	5079,218	0,0095
11	5,808	2,024	12,855	8,150	315,736	28,547	22,342	0,0906	5564,941	0,0088
12	6,336	2,208	14,024	8,891	316,645	29,902	23,403	0,0943	6105,833	0,0082
13	6,864	2,392	15,192	9,632	316,091	31,069	24,316	0,0984	6591,535	0,0077
14	7,392	2,576	16,361	10,373	316,844	32,318	25,294	0,1018	7132,455	0,0072

Conforme esperado, um aumento na pressão do gás causa uma diminuição no diâmetro das gotas e um aumento da vazão e da velocidade tanto do gás quanto do líquido.

A Fig. 2 mostra um esquema e fotos de um injetor *Blurry* e seus componentes, construído para realização de testes preliminares.

A configuração proposta apresenta uma distância de deslocamento, H , regulável pela ação de uma porca, formando uma passagem cilíndrica lateral de área variável, por onde passa ar comprimido para atomização do combustível, neste caso etanol ou biodiesel.

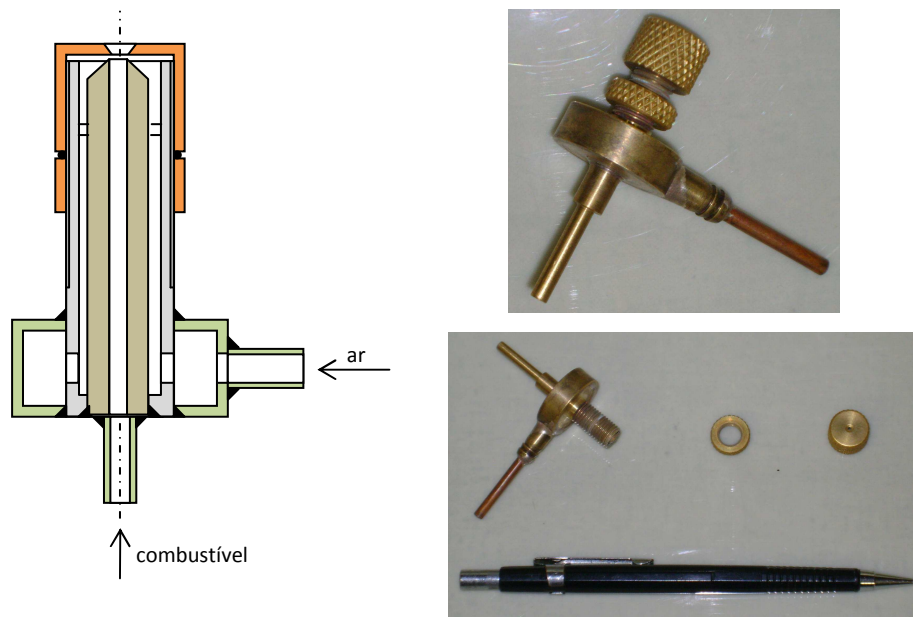


Figura 2. Representação esquemática e fotos do injetor tipo *Blurry*.

Quando líquido é forçado através do tubo e gás é forçado através da passagem lateral, um *spray* combinando resultante da interação dos dois fluidos é formado e deixa o dispositivo através do orifício de saída.

A fim de minimizar as perdas por atrito do gás entre as paredes do tubo e as paredes do orifício de saída quando a relação H/D for pequena, a extremidade do tubo é chanfrada com um ângulo de 60° .

A Fig. 3 mostra o *spray* obtido em um teste preliminar feito para verificar possíveis vazamentos no injetor.



Figura 3. Fotos do teste preliminar com injetor *Blurry*.

O diâmetro do jato e os consequentes tamanhos de gota podem ser ajustados e controlados a qualquer momento através da variação da queda de pressão e da vazão de líquido.

4 PROJETO DA BANCADA EXPERIMENTAL

Os testes a frio serão realizados a partir da bancada experimental desenvolvida no Laboratório Associado de Combustão e Propulsão. Tais ensaios serão executados utilizando o injetor tipo *Blurry*, operando em uma ampla faixa de operação, 0 a 14 bar, e têm por objetivo a medição da variação da vazão mássica com a queda de pressão, ângulo do cone de pulverização, tamanho médio das gotas e distribuição da vazão mássica dos biocombustível.

Os fluidos de trabalho a serem utilizados nos testes são o etanol e o biodiesel.

A bancada de testes desenvolvida consiste basicamente dos seguintes itens, apresentados no esquema da Fig. 4.

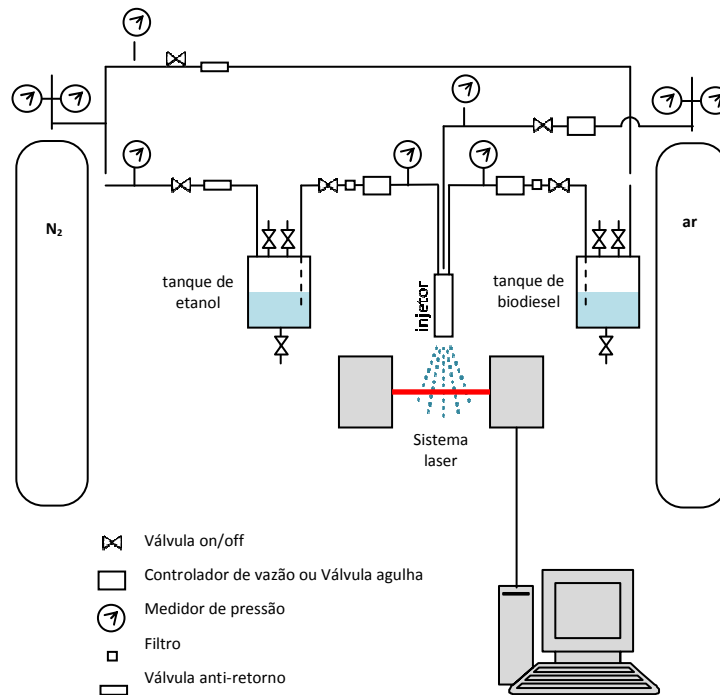


Figura 4. Representação esquemática da bancada de testes.

As principais características da bancada de testes são:

- Dois tanques, com capacidade de 1,5 L. Têm por objetivo armazenar etanol e biodiesel para os testes.
- Um cilindro de gás inerte, nitrogênio N_2 . Este serve para manter os reservatórios pressurizados. O reservatório pode ter sua pressão regulada, alterando a abertura da válvula.
- Um cilindro de ar comprimido, utilizado na atomização do bicombustível.
- Três válvulas tipo agulha cuja função é controlar a vazão de bicombustível.
- Dois filtros de linha.
- Onze válvulas ON/OFF cujas funções são: alívio de pressão nos tanques, segurança, preenchimento e drenagem dos tanques biodiesel e controle de pressão na linha.
- Duas válvulas reguladoras de pressão do tipo posto.
- Três reguladores de pressão.
- Tubulação de 1/8".
- Um suporte para fixação do dispositivo que contém o injetor, com capacidade de ajuste da distância entre o injetor e a parede da bancada.
- Laser que opera por difração de raio *laser* fabricado pela Malvern (modelo Malvern *Spraytec*[®]), mostrado na Fig. 5.



Figura 5. Foto do sistema *Spraytec*[®].

Os componentes principais do sistema são:

1. Laser He-Ne.
2. Colimadores ópticos.
3. Zona de medida.
4. Lente de Fourier.
5. Detector Diodo de Silício.
6. Sistema de aquisição de dados.

O sistema *Spraytec*[®] realiza medidas de distribuições de tamanho de gotas, sendo assim, o mesmo pode ser empregado na caracterização de *sprays* utilizando a técnica difração de laser, sem interferir nas características do material analisado. Para a análise da distribuição do tamanho de gotas, as formulações utilizadas pelo sistema são a teoria de Mie e de Fraunhofer, as quais afirmam que um feixe de luz paralelo e monocromático atravessa uma nuvem de gotas e o padrão obtido é o de uma série de discos concêntricos claros e escuros cujo espaçamento entre eles dependerá da distribuição dos diâmetros das gotas.

O sistema laser está ligado a um computador que serve como um sistema de aquisição de dados. O computador possui um software (*Malvern*[®]) na qual é feita a análise estatística com os dados medidos. Diversos são os dados fornecidos pelo programa, inclusive o SMD (D_{32}).

A Fig. 6 apresenta fotos da bancada experimental parcialmente montada.



Figura 6. Fotos da montagem parcial da bancada de testes.

5 CONCLUSÕES

De posse dos dados desejados foi possível construir um injetor do tipo *Blurry* que será utilizado para realizar testes a frio na bancada apresentada no presente trabalho.

Tais injetores apresentam diversas vantagens em relação aos injetores convencionais, tais como, a aplicação em sistemas de combustão compactos, melhor atomização, alta eficiência, menor emissão

de NO_x e CO, formação de *spray* quase uniforme, robustez, excelente vaporização de combustível e pré-mistura com ar.

6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Vale Soluções em Energia pela Bolsa de Estudos.

7 REFERÊNCIAS

- Couto, H.S., 2007, “Atomização e *Sprays*”, Apostila I Escola de Combustão, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.
- Gañán-Calvo, A. M., Barrero, A., Spanish Patente N° P9601101 (1996); PCT Patent N° PCT/ES97/00034 (1997).
- Gañán-Calvo, 1998, “Generation of Steady Liquid Microthreads and Micro-Sized Monodisperse *Sprays* in Gas Streams”, *Physical Review Letters*, Vol.80, N°2, p. 285-288.
- Gañán-Calvo, A. M., Barrero, A. 1999, “A Novel Pneumatic Technique to Generate Steady Capillary Microjets”, *J. Aerosol Sci.*, Vol.30, p. 117-125.
- Gañán-Calvo, A. M., 2005, “Enhanced Liquid Atomization: From Flow-Focusing to Flow-Blurring”, *Applied Physics Letters* 86.
- Lacava, P. T., Alves, A., 2009, “Capítulo 3: Injeção de Combustível”, Apostila II Escola de Combustão, p.68-111. São José dos Campos, São Paulo, Brasil.
- Lefebvre, A.H., 1989, “Atomization and *Sprays*”, Taylor and Francis, New York.
- Panchasara, H. V., Sequera, D. E., Schreiber, W. C., Agrawal, A. K., 2009, “Emissions Reductions in Diesel and Kerosene Flames Using a Novel Fuel Injector”, *Journal of Propulsion and Power*. Vol. 25, No. 4.
- Sadasivuni, V., Agrawal, A. K., 2009, “A novel meso-scale Combustion System for Operation with Liquid Fuels”, *Proceedings of the Combustion Institute*, 32, p. 3155–3162.