



Medidas dos Ângulos de Spray de um Injetor Centrífugo por Triangulação em Imagens Schlieren

Danilo Almeida Machado¹, Gustavo Alexandre Achilles Fischer², José Carlos de Andrade², Gabriel Silva Dias², Fernando de Souza Costa²

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil
Aluno de Doutorado do curso de Combustão e Propulsão - PCP

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil
danilo.machado@inpe.br

Resumo. O ângulo de spray é um parâmetro geométrico importante para diversas aplicações industriais, farmacêuticas, agrícolas e em motores e câmaras de combustão. No presente trabalho foram obtidas imagens schlieren de sprays de água formados por um injetor centrífugo com pressões de injeção de 0,04 a 7,34 bar. Foram aplicados três métodos de medição dos ângulos de sprays: usando um triângulo contendo a folha de fluido contínua, usando um triângulo com base a 50 mm e um triângulo com base a 100 mm da saída do injetor. Foram utilizadas imagens schlieren sem processamento, com filtros de diferenças Gaussianas e Laplaciano para detecção dos contornos das imagens schlieren. Verificou-se que as imagens com filtro Gaussiano apresentaram os menores desvios padrão das medidas do ângulo de spray, todavia as imagens com filtro Laplaciano com uma triangulação realizada a 50 mm do orifício de descarga apresentaram os menores erros quadráticos em relação às equações semi-empíricas.

Palavras-chave: atomização; spray; imageamento; schlieren.

1. Introdução

Questões desafiadoras como a redução do consumo de combustíveis e otimização do uso dos recursos energéticos estão ganhando cada vez mais espaço na academia e na indústria. O transporte consome mais de 30 % dos hidrocarbonetos produzidos e os custos com combustível correspondem, em média, a cerca de 20 % do custo de um produto. Contudo, a questão mais importante de nosso século refere-se à diminuição dos poluentes atmosféricos, sendo que a maior parte das emissões dos poluentes podem ser atribuídas aos processos de combustão. Em particular, os motores de combustão interna respondem por cerca da metade das emissões (GALIULLIN et al., 2017). Para contornar esse problema, as regulamentações relacionadas às emissões de poluentes atmosféricos ficam cada vez mais rigorosas e, a fim de serem atendidas essas novas regulamentações, torna-se necessário o desenvolvimento de sistemas de combustão cada vez mais eficientes e menos poluentes.



A injeção do combustível desempenha um papel importante em um sistema de combustão, e as emissões produzidas dependem do combustível utilizado, do tipo de injetor e das condições de mistura (PETREA et al., 2018). Existem diversos modelos de injetores, que podem ser classificados de acordo com a fonte de energia para sua atomização: i) energia do fluido, exemplos: injetores a jato contínuo ou intermitente, injetores centrífugos e injetores jatos centrífugos; ii) energia do gás, exemplo: injetores pneumáticos; iii) energia mecânica, exemplo: injetores rotativos, iv) energia de vibração, exemplo: injetores acústicos e ultrassônicos; v) energia elétrica, exemplo: injetores eletrostáticos (LEFEBVRE, MCDONELL, 2017).

O desenvolvimento de um sistema de combustão passa por três etapas fundamentais: a elaboração do projeto; a fabricação e avaliação dos componentes; e a montagem dos componentes e testes do conjunto. A avaliação de um sistema de injeção compreende a determinação do coeficiente de descarga do injetor e a caracterização do spray para diferentes condições de operação. As principais características do spray são o tamanho médio das gotas, a distribuição dos tamanhos de gotas, o comprimento de quebra, a penetração, a distribuição de massa, as velocidades das gotas e o ângulo do cone (YANG et al., 2020). Estas características podem ser determinadas por técnicas ópticas, como fotografias, imageamento schlieren e shadowgraphy, e por difração laser.

O ângulo de spray é um parâmetro geométrico importante para diversas aplicações industriais, farmacêuticas, agrícolas, pintura, secagem de sprays e em motores e câmaras de combustão. Ruiz-Rodrigues et al. (2019) descreveram diferentes métodos para medidas dos ângulos dos sprays formados por injetores de motores a diesel e verificaram que são obtidos valores diferentes de ângulo em função do método empregado. Segundo os autores o método de medidas de ângulo por triangulação produzia os melhores resultados para as condições testadas.

Os injetores podem formar sprays de ângulos fixos ou formar sprays de ângulos variáveis em função da condição de operação. Normalmente, injetores de motores a diesel produzem ângulos fixos de atomização, já os injetores do tipo centrífugo empregados em foguetes podem apresentar variações do ângulo do cone de spray em função da pressão de injeção do fluido.

No presente trabalho serão empregados e comparados métodos de triangulação para medição dos ângulos de sprays produzidos por um injetor centrífugo. O imageamento dos sprays será feito com ajuda de um arranjo óptico schlieren do tipo Toepler Z. As imagens schlieren do spray serão pré-processadas empregando-se filtros digitais do tipo gaussiano e laplaciano. Os ângulos serão medidos por três triangulações distintas - em três distâncias da saída do injetor - e para várias pressões de trabalho. Por fim, serão realizadas comparações entre os valores dos ângulos obtidos nas diferentes distâncias das bases dos triângulos considerados e empregando-se os diferentes filtros de detecção de bordas, a fim de se determinar a melhor condição de triangulação e o melhor processamento das imagens schlieren.



2. Metodologia

Injetores do tipo centrífugo são amplamente usados em motores de combustão interna (HUANG et al., 2020), motores foguetes (KANG et al., 2018) e motores de turbinas a gás (AESET et al., 2019). O injetor centrífugo é utilizado para atomizar propelentes líquidos ou gases por meio da formação de um filme de fluido, onde ocorre a ruptura primária e posteriormente a atomização secundária. A atomização é um processo durante o qual a área de interface do líquido aumenta gradualmente devido à quebra das gotas maiores em pequenas gotículas. Esse tipo de injetor contém portas de entrada tangenciais, uma câmara de vórtice, um canal convergente e um canal cilíndrico com um orifício de descarga. O fluido é injetado através das portas tangenciais, formando um núcleo de ar ao longo de uma linha central devido à alta velocidade tangencial do fluido. O escoamento na saída do injetor forma um filme cônico oco e rotativo, em seguida, o filme rotativo torna-se instável e se quebra em gotas. Na Figura 1 são mostradas as dimensões do injetor centrífugo empregado no presente trabalho. Como se verifica na Figura 1, o orifício de descarga tem diâmetro de 1,2 mm. O injetor foi projetado pela equipe do Laboratório de Atomização e Sprays, pertencente ao Laboratório de Combustão e Propulsão do INPE (FISCHER, 2014).

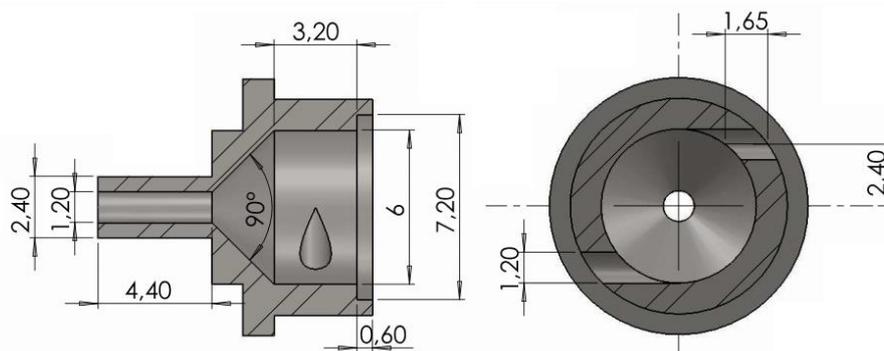


Figura 1: Dimensões do injetor centrífugo usado nos testes.

A Figura 2 mostra o sistema experimental de atomização e diagnóstico de sprays. Uma bancada de atomização contendo tanques de fluidos, cilindro de pressurização, válvulas agulha para controle de vazão, válvulas de abertura e fechamento, medidores de vazão, transdutores de pressão e termopares foi usada para a produção dos sprays. Água foi utilizada como fluido de teste neste trabalho.

O sistema óptico para imageamento dos sprays consistiu em um arranjo schlieren Toepler formado por um par de espelhos de 300 mm de diâmetro com qualidade óptica $\lambda/4$ ($\lambda = 630$ nm) e distância focal de 1500 mm. Utilizou-se um LED na faixa de 450 a 750 nm como fonte de luz e um filtro óptico consistindo em uma “faca” com orientação vertical. Para registro das imagens foi utilizada uma câmera de alta velocidade da marca Fastec, modelo TX3. Em um arranjo schlieren, o alinhamento correto dos componentes ópticos e posicionamento da faca são cruciais para a obtenção das imagens com boa resolução e contraste (MACHADO et al., 2020).

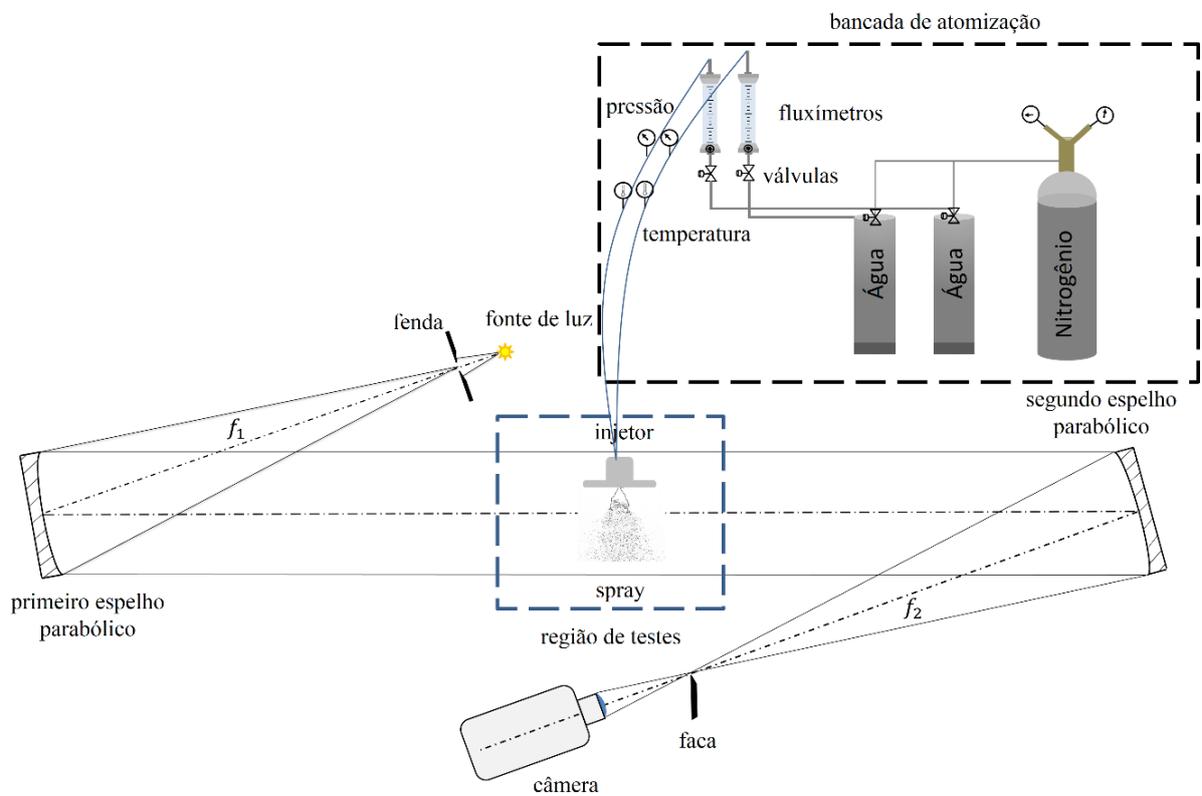


Figura 2. Arranjo experimental.

A Figura 3 mostra os métodos de triangulação, para obtenção do valor do ângulo do spray θ . No método 1 o triângulo foi delimitado pela cebola interna do spray, já no método 2 a base do triângulo foi situada a uma distância de 50 mm do orifício de descarga do injetor, por fim, no método 3 a base do triângulo foi situada a uma distância de 100 mm do orifício de descarga do injetor. Para cada método foram testadas 10 pressões diferentes, e em cada pressão foram obtidas 5 imagens schlieren e para cada imagem foram aplicados filtros de diferenças Gaussianas e Laplaciano para a detecção das bordas, ou seja, para definição dos contornos do spray e das gotas, totalizando 15 imagens para cada pressão investigada. O filtro de Diferença de Gaussianas executa duas desfocagens gaussianas diferentes na imagem, com um raio diferente de desfocagem em cada uma, e subtrai as imagens desfocadas para obter o resultado. Já o filtro Laplaciano de detecção de borda opera uma derivada segunda na imagem, produzindo bordas finas, da ordem do tamanho de um píxel. Para tratamento das imagens foi utilizado o software GIMP 2.10.28, que é livre e de código aberto. As medidas do ângulo de spray foram realizadas a partir de um software de análise de imagens desenvolvido *in house* por (VÁSQUEZ, 2011).

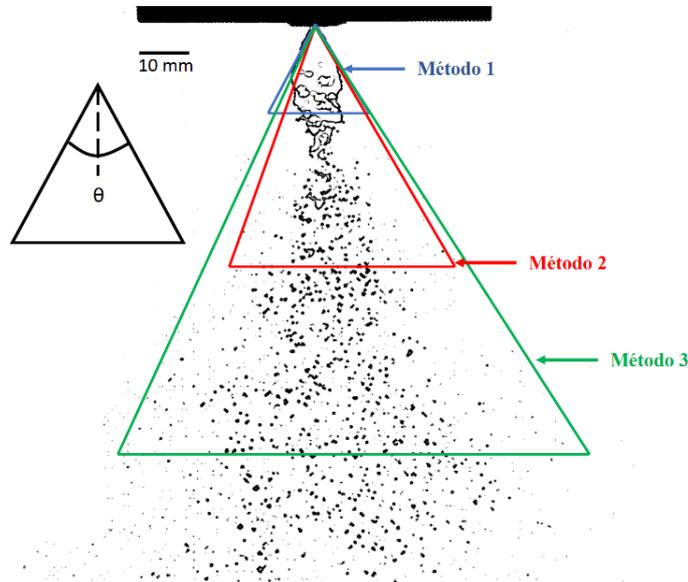


Figura 3. Triangulação do spray a diferentes distâncias do orifício de descarga do injetor.

3. Resultados e Discussão

A Tabela 1 mostra as condições de operação do injetor, utilizando água como fluido de testes. Pode-se observar que para pressões acima de 2 bar as vazões apresentam maior variação. A pressão do líquido foi medida utilizando-se um transmissor de pressão da marca Novus, modelo HUBA 510, com precisão de 0,5 % do fundo de escala. Já a vazão de líquido foi medida por um rotâmetro da marca OMEL, modelo 3P, com precisão de 2% do fundo de escala.

Tabela 1. Pressão de injeção em função da vazão

Testes	Vazão (L/h)	T (K)	ΔP (bar)
1	5	303,3	0,04
2	10	303,3	0,22
3	15	303,3	0,50
4	20	303,3	1,02
5	25	303,3	1,70
6	30	303,5	2,38
7	35	303,5	3,26
8	40	303,5	4,48
9	45	303,5	6,01
10	50	303,5	7,34



A Figura 4 mostra a curva de vazão volumétrica versus a pressão de injeção (pressão manométrica) e a curva de ajuste.

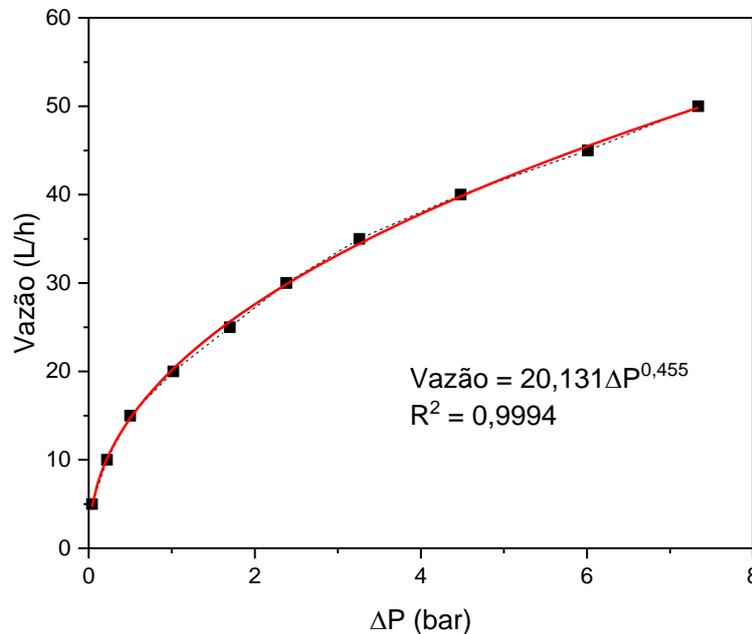


Figura 4. Vazão versus pressão de injeção (manométrica).

A Figura 5 mostra as imagens schlieren obtidas nos 10 testes realizados, a uma taxa de 5 kfps, shutter de $2 \mu s$ e tamanho de 300×300 px. A coluna da esquerda é composta por imagens schlieren cujo único pré-processamento foi a conversão das cores da imagem para preto e branco. No método schlieren Toepler com imagens coloridas é recomendada a aplicação de filtro preto e branco ou, se possível, devem ser obtidas diretamente as imagens em modo monocromático, sendo o ideal a utilização de câmera que funcione apenas em modo monocromático. Imagens em escala de cinza normalmente apresentam melhor contraste e menor ruído e câmeras monocromáticas apresentam maior sensibilidade à luz. Nas imagens da coluna do meio da Figura 5 aplicou-se um filtro Laplaciano e nas imagens da coluna da direita aplicou-se um filtro de diferenças Gaussianas para identificação de contornos (bordas). Ao se empregarem filtros de identificação de borda, normalmente são necessários ajustes no contraste, afinamento e para os casos de imagens com muito ruído é necessário aplicar um filtro passa baixa, uma vez que o Laplaciano gera quantidade maior de ruído por ser obtido a partir da segunda derivada. Gonzalez e Woods (2009) e Sonka et al. (2013) detalham formas coerentes de aplicação de filtros.

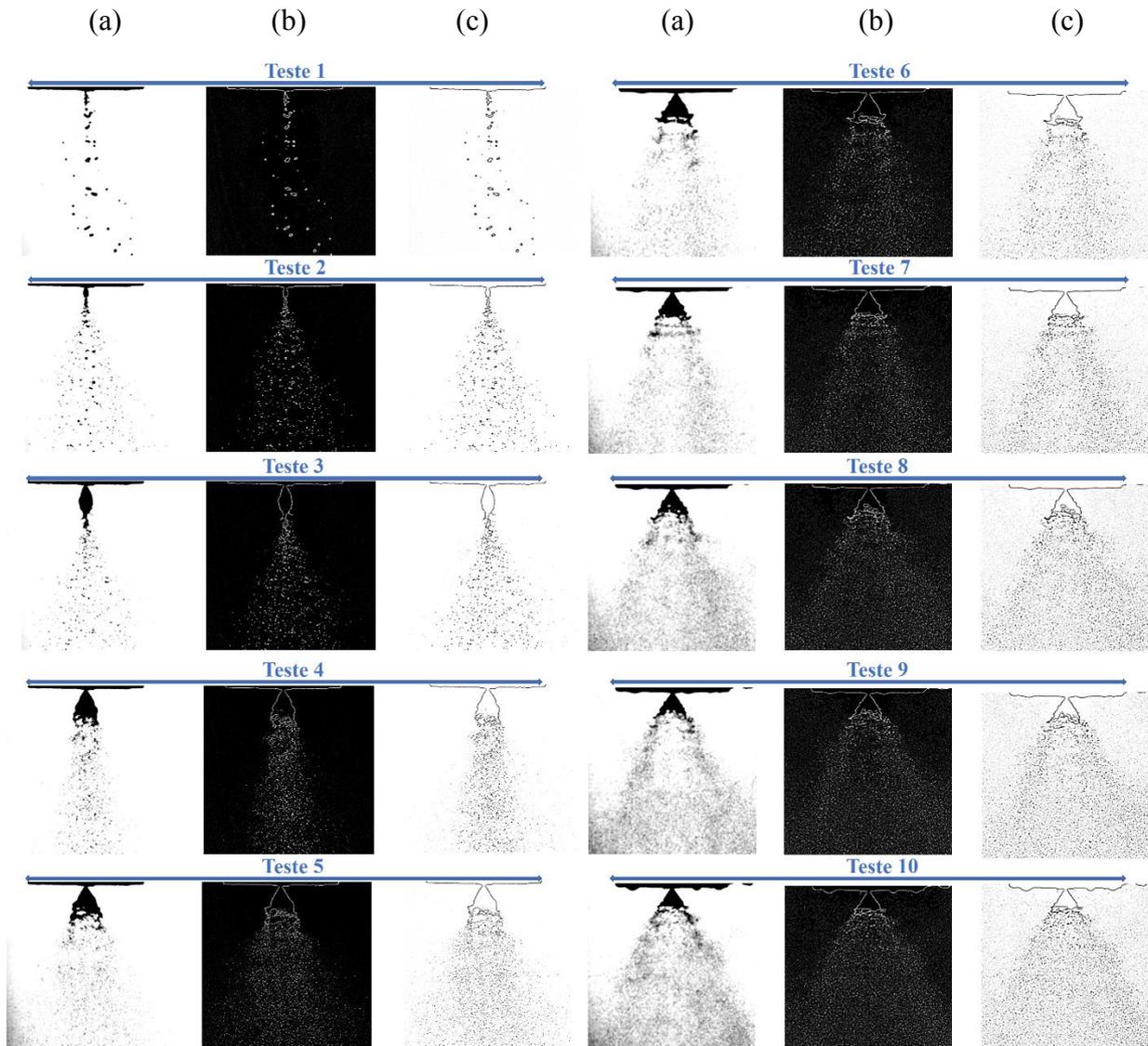


Figura 5. Imagens schlieren dos sprays em diferentes pressões de atomização.
(a) Imagem colorida convertida em preto e branco; (b) Imagem preto e branco com filtro laplaciano de detecção de borda; (c) Imagem preto e branco com filtro gaussiano de detecção de borda.

Segundo Fischer (2019) e Vásquez (2011), as equações semi-empíricas que apresentam resultados mais próximos dos valores experimentais para medidas do ângulo são as de Benjamin (1998) e Lefebvre e McDonell (2017). A Figura 6 mostra os valores do ângulo de spray fornecidos pelas equações de Benjamin e Lefebvre e os valores de ângulos obtidos pelo método 1, onde cada ponto corresponde ao valor médio de 5 imagens e o erro foi obtido pelo desvio padrão. A triangulação foi delimitada pelo cone primário do spray, região conhecida como “cebolinha”.

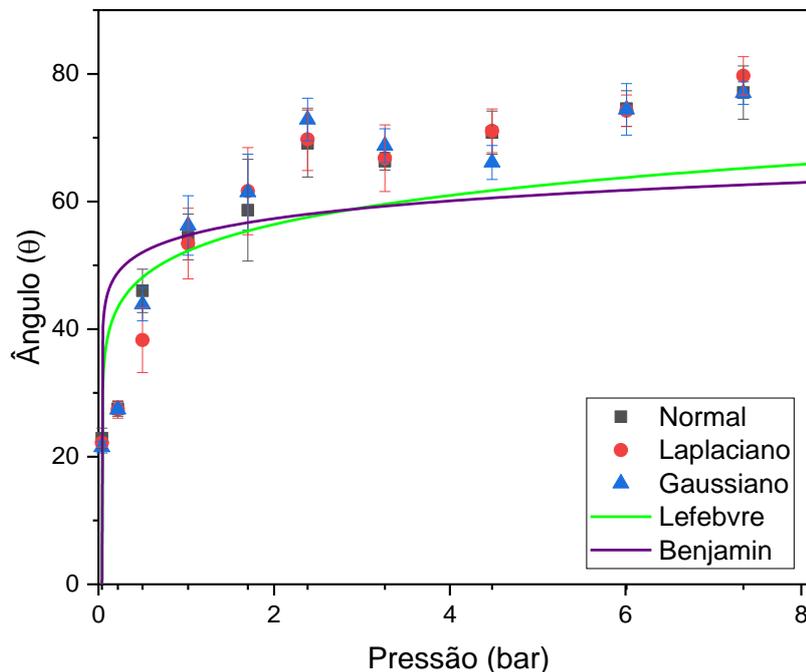


Figura 6. A Comparação dos valores teóricos e experimentais do ângulo de cone do spray de água pelo método 1.

Pode-se observar na Figura 6, um melhor ajuste entre os resultados experimentais e a equação semi-empírica de Lefebvre para as pressões de injeção abaixo de 2,5 bar. O desvio padrão nas medidas é devido principalmente às instabilidades na superfície do cone interno. Essas instabilidades têm origem no movimento rotacional do fluido dentro do injetor, que provocam aumento e diminuição periódicos da área do cone interno, que por sua vez fazem com que o valor do ângulo flutue.

A Figura 7 mostra os valores teóricos e experimentais dos ângulos de spray obtidos pelo método 2 de triangulação, em que a base do triângulo fica situada a 50 mm da saída do injetor. Do mesmo modo que no método 1, cada ponto corresponde ao valor médio de 5 imagens e o erro é dado pelo desvio padrão. Pode-se observar que os valores experimentais ficam mais próximos aos valores das equações semi-empíricas para pressões menores que 0,5 bar e entre 1,8 e 3,5 bar. O desvio padrão das medidas pelo método 2 diminuiu significativamente em relação ao método 1, sendo que as imagens pré-processadas pelo filtro gaussiano apresentam o menor desvio padrão.

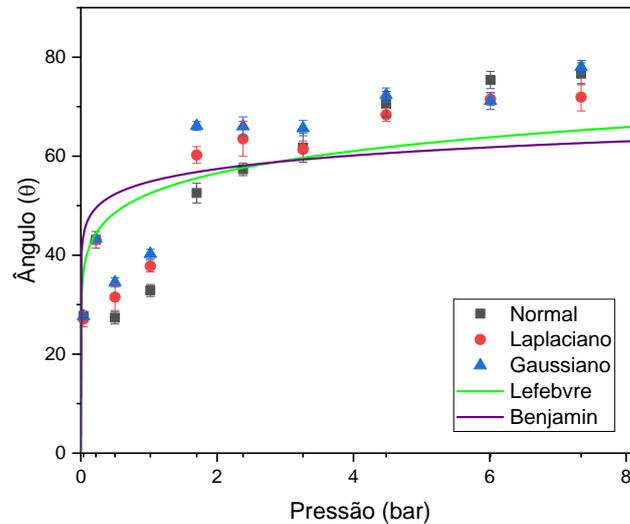


Figura 7. A Comparação dos valores teóricos e experimentais do ângulo de cone do spray de água pelo método 2.

A Figura 8 mostra os valores experimentais obtidos pelo método 3, em que a base do triângulo se encontra a 100 mm da saída do bocal, e apresenta os valores correspondentes das equações semi-empíricas. Do mesmo modo que nos métodos 1 e 2, cada ponto corresponde ao valor médio de 5 imagens e o erro é dado pelo desvio padrão. Pode-se observar uma discrepância maior entre os valores experimentais e teóricos para pressões acima de 0,5 bar em relação aos outros dois métodos. O desvio padrão das medidas são os menores dentre os 3 métodos, evidenciando que as instabilidades geradas no cone interno são dissipadas pela trajetória, causando poucas flutuações sobre os valores de ângulo em uma distância de 100 mm a partir do orifício de descarga.

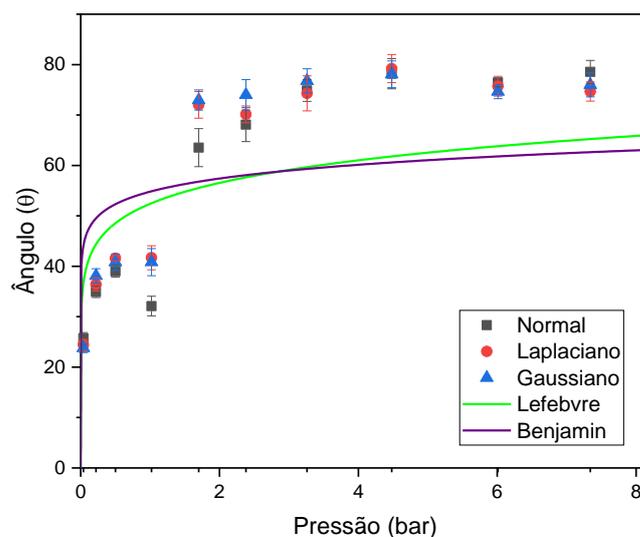


Figura 8. A Comparação dos valores teóricos e experimentais do ângulo de cone do spray de água pelo método 3.



Os erros médios quadráticos entre os valores médios experimentais obtidos sem filtro (SFT), com filtro laplaciano (LAP) e com filtro gaussiano (GAU) em relação às equações semi-empíricas de Lefebvre (LEF) e Benjamin (BEN) são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 – Erro médio quadrático.

	SFT – LEF	SFT – BEN	LAP – LEF	LAP – BEN	GAU – LEF	GAU – BEN
Método 1	10,21	12,84	11,31	14,02	10,92	13,47
Método 2	11,42	13,94	9,13	11,66	10,09	12,33
Método 3	13,37	15,66	12,72	14,75	13,51	15,43

As imagens com filtro Gaussiano apresentaram os menores desvios padrão das medidas do ângulo de spray, todavia as imagens com filtro Laplaciano apresentaram o menor erro quadrático em relação às equações semi-empíricas. O uso do filtro gaussiano permite uma melhor observação das instabilidades do spray devido ao contraste da imagem.

4. Conclusão

Três métodos foram considerados para medidas de ângulos de sprays produzidos por um injetor centrífugo. O método 1, baseado no cone inicial de fluido, apresentou o maior desvio padrão das medidas experimentais em decorrência das instabilidades hidrodinâmicas. O método 2, com a base do triângulo de medição localizada a 50 mm da saída do injetor, produziu a menor discrepância entre os valores experimentais e as equações semi-empíricas para uma maior faixa de pressões, porém forneceu valores intermediários de desvio padrão das medidas de ângulos de spray. O método 3, com a base do triângulo de medição localizada a 100 mm da saída do injetor, apresentou o menor desvio padrão das medidas, porém apresentou a maior discrepância entre as equações semi-empíricas e resultados experimentais. O método 2 usando filtro Laplaciano de borda apresentou o menor erro quadrático em relação às soluções semi-empíricas. Portanto sugere-se a utilização do método 2 com adoção de um filtro Laplaciano para identificação dos contornos da imagem do spray e determinação dos ângulos de cone dos sprays produzidos pelo injetor centrífugo nas condições operacionais testadas.

Agradecimentos: à CAPES pela concessão de bolsa de doutorado ao primeiro autor.



Referências

- AESET, A. et al. (2019). Fuel atomization in gas turbines: A review of novel technology. **Int J Energy Res.**; 43: 3166-3181. DOI: <https://doi.org/10.1002/er.4415> .
- BENJAMIN, M. et al. (1998). Film Thickness, Droplet Size Measurements and Correlations for Large Pressure-Swirl Atomizers. ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition. DOI: <https://doi.org/10.1115/98-GT-537>.
- FISCHER G. A. A. (2014). Injetores centrífugos duais e jato-centrífugos para aplicação em propulsão de foguetes. **Dissertação de mestrado**, INPE, São José dos Campos. Disponível em <http://mtc-m16d.sid.inpe.br/rep/8JMKD3MGP7W/3FMU43L>, acesso em 30 set 2021.
- FISCHER G. A. A. (2019). Atomização de géis por injetores centrífugos e jato-centrífugos para aplicações em propulsão de foguetes. **Tese de doutorado**, INPE, São José dos Campos. Disponível em <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/03.08.17.13>, acesso em 30 set 2021.
- GALIULLIN, L. A.; AND VALIEV R. A. (2017). Diagnostics technological process modeling for internal combustion engines, International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), pp. 1-4. DOI: [10.1109/ICIEAM.2017.8076124](https://doi.org/10.1109/ICIEAM.2017.8076124).
- GONZALEZ, R C.; WOODS, R E. (2009). **Processamento Digital de Imagens**, Editora Pearson, 3ª ed.
- HUANG, D. et al. (2020). Large eddy simulations of turbulent combustion of kerosene-air in a dual swirl gas turbine model combustor at high pressures, **Fuel**, Volume 282, 118820, ISSN 0016-2361, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118820>.
- KANG, Z. et al. (2018). Review on pressure swirl injector in liquid rocket engine, **Acta Astronautica**, Volume 145, Pages 174-198, ISSN 0094-5765, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.12.038>.
- LEFEBVRE, A.H., MCDONELL, V.G. (2017). **Atomization and Sprays** 2nd ed. CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315120911>.
- MACHADO D A, et al. (2020). Visualização de Escoamentos pelos Métodos Ópticos Shadowgraph e Schlieren. **Revista Brasileira de Ensino de Física**. 42. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2020-0146>.
- RUIZ-RODRIGUEZ, I. et al. (2019), Investigation of Spray Angle Measurement Techniques," **IEEE Access**, vol. 7, pp. 22276-22289. DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2899214](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2899214).
- SONKA, M. et al. (2014). **Image Processing, Analysis, and Machine Vision**, Editora: Cengage Learning, 4ª ed.
- VÁSQUEZ, R. A. (2011) Desenvolvimento de um injetor centrífugo dual para biocombustíveis líquidos. **Dissertação de mestrado**, INPE, São José dos Campos. Disponível em <http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m19/2011/03.21.19.00>, acesso em 30 set 2021.