



**RENATA FAJGENBAUM**

# **Influência da temperatura do combustível nos parâmetros de atomização de um atomizador utilizado em bicos injetores automotivos**

89/2013

**CAMPINAS  
2013**



UNICAMP

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

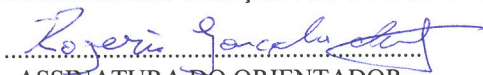
RENATA FAJGENBAUM

# **Influência da temperatura do combustível nos parâmetros de atomização de um atomizador utilizado em bicos injetores automotivos**

Orientador: Prof. Dr. Rogério Gonçalves dos Santos

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestra em Engenharia Mecânica, na Área de Térmica e Fluidos.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO  
FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA  
ALUNA RENATA FAJGENBAUM, E ORIENTADA PELO  
PROF. DR. ROGÉRIO GONÇALVES DOS SANTOS

  
.....  
ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS  
2013

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

F178i Fajgenbaum, Renata, 1985-  
Influência da temperatura do combustível nos parâmetros de atomização de um atomizador utilizado em bicos injetores automotivos / Renata Fajgenbaum. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Rogério Gonçalves dos Santos.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Atomização. 2. Automóveis - Motores - Sistemas de injeção eletrônica de combustível. 3. Gasolina. 4. Motores a gasolina. 5. Etanol. I. Santos, Rogério Gonçalves dos. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Influência da temperatura do combustível nos parâmetros de atomização de um atomizador utilizado em bicos injetores automotivos

**Palavras-chave em inglês:**

Atomization

Electronic fuel injection systems in automobiles

Gasoline

Spark ignition engines

Ethanol

**Área de concentração:** Térmica e Fluídos

**Titulação:** Mestra em Engenharia Mecânica

**Banca examinadora:**

Rogério Gonçalves dos Santos [Orientador]

Erick de Moraes Franklin

Pedro Teixeira Lacava

**Data de defesa:** 20-08-2013

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUIDOS**


**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO**

**Influência da temperatura do combustível nos  
parâmetros de atomização de um atomizador  
utilizado em bicos injetores automotivos**

Autor: Renata Fajgenbaum

Orientador: Prof. Dr. Rogério Gonçalves dos Santos

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



**Prof. Dr. Rogério Gonçalves dos Santos, Presidente.  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP**



**Prof. Dr. Erick de Moraes Franklin  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP**



**Prof. Dr. Pedro Teixeira Lacava  
Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA**

Campinas, 20 de agosto de 2013.

Dedico este trabalho à minha família.

## Agradecimentos

Este trabalho não poderia ter sido feito sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Aos meus pais e irmã, que sempre me incentivaram a trilhar meu caminho e buscar meus objetivos, fornecendo todo suporte e respaldo necessários;

Ao meu noivo, por todo apoio, amor e compreensão;

Ao meu orientador, por sanar minhas dúvidas e compartilhar comigo parte de sua experiência;

A Magneti Marelli Sistemas Automotivos Ltda, por acreditar e financiar meu projeto, por todo o acesso a que tive direito durante a montagem do aparato experimental e em especial à equipe que encabeçou o projeto e que colaborou em todos os detalhes (Senhores Fernando Luiz Windlin, Thomas Moura, Marcelo Moura, Guilherme Alegre, Marcelo Cavaglieri, Marco Antônio Leal Pilato, José Augusto Nogueira, Geraldo dos Reis, Paulo César Baptista de Oliveira, José Roberto Siriane, Osmar Rondina e Diogo Pereira Bessa);

A todos os professores, técnicos e colegas de departamento, cuja ajuda foi imprescindível para o sucesso do trabalho, em especial ao Arthur Vieira de Oliveira, colega, amigo e grande colaborador. Obrigada por partilhar suas idéias brilhantes e construtivas comigo;

A Faculdade de Engenharia Química da Unicamp, que disponibilizou o laboratório e os equipamentos para a realização dos testes, em especial Professor Doutor Milton Mori, Karina Klock da Costa, Rodrigo Amaral e João Lameu da Silva Junior. A este último, obrigada pela boa vontade ilimitada e por cada momento que você abdicou de seus compromissos para me ajudar;

A LaVision Inc. e a QuantumTech pelo suporte técnico, em especial ao Steven Anderson e Fábio Savassi, os quais me auxiliaram tecnicamente em diversos aspectos. Obrigada por todos os e-mails respondidos, pelos momentos preciosos de aconselhamento, explicações e boa vontade que tivemos pessoalmente;

A PUC-Rio e ao ITA pela disponibilidade na troca de informações;

A CAPES pela bolsa concedida;

A FAEPEX pela verba aprovada para compra de materiais e serviços.

*Se não puder se destacar pelo talento, vença pelo esforço.*  
(Dave Weinbaum)

## Resumo

A motivação em se estudar os fenômenos que acontecem em cada subsistema de um motor de combustão interna ciclo Otto reside na possibilidade de se prever e otimizar seu funcionamento, em especial com os diferentes combustíveis de nova geração que estão sendo inseridos no mercado. O processo de atomização que ocorre nos bicos injetores de combustível, dispositivos integrantes do sistema de injeção eletrônica do motor, apresenta forte relação com a posterior reação de combustão e, por conseguinte, com a eficiência térmica do motor. No presente trabalho, experimentos foram conduzidos para investigar o efeito da temperatura do líquido em parâmetros de atomização de um atomizador do tipo mecânico-centrífugo utilizado em bicos injetores de combustível automotivos. O aparato experimental consistiu de uma bancada de injeção de combustível conectada a um sistema de controle de calor, este com objetivo de variar a temperatura do combustível. Os parâmetros de atomização foram avaliados por meio da técnica de *Shadowgraphy*, a fim de se medir diâmetro de gotas, distribuição de partículas e campo de velocidades. Gasolina e etanol em diferentes temperaturas foram usados para fornecer variação nas propriedades do líquido, ambos com a mesma pressão de injeção. Os resultados de tamanho de gota foram dados, principalmente, em termos de *Sauter Mean Diameter* (SMD) e outros diâmetros representativos que se mostraram pertinentes. Todas as medições foram realizadas em duas diferentes distâncias axiais do orifício de descarga. Para as duas distâncias escolhidas, 25 mm e 100 mm, o SMD e a velocidade se mostraram insensíveis à faixa de temperatura testada, devido à baixa variação das propriedades dos combustíveis. Por outro lado, a distribuição das partículas permitiu visualizar o efeito da temperatura nos diâmetros das gotas, mostrando que o aumento da temperatura proporciona diminuição no tamanho das gotas, e o comparativo entre os parâmetros nas duas distâncias axiais permitiu visualizar o efeito da primeira e segunda atomização sobre o *spray*.

*Palavras chave:* Atomização; *Spray*; *Shadowgraphy*; SMD; Velocidade de gota; Distribuição de partículas.



## Abstract

*The motivation in studying the phenomena that happen in each internal combustion engine subsystem lies in the possibility to predict and optimize its operation. The atomization process that occurs in fuel injectors, devices that belong to engine injection system, has a strong relation with the subsequent combustion reaction and thus with the engine thermal efficiency. Experiments were performed to investigate the liquid temperature effect on atomization parameters in an internal combustion engine pressure-swirl atomizer. The experimental apparatus consisted of a flow control rig connected with a heat control system. The flow rig, which is an injection system, was built specifically for that purpose and the heat system goal was to vary the liquid temperature. The atomization parameters were evaluated by means of Shadowgraphy technique in order to measure drop mean diameter, particle size distribution and drop velocity field. Gasoline and ethanol in different temperatures were used to provide variation in liquid properties and the same injection pressure was used for both fuels. The results for drop sizing were expressed in terms of Sauter Mean Diameter (SMD) and the velocity field as well as the particle size distribution measurements were taken in two different axial distances from the nozzle exit. At both distances, 25 mm and 100 mm, SMD and velocity seemed to be insensitive to the range of temperature used because it provided low variation in fuel properties. On the other hand, particle size distribution allowed the visualization of temperature effect on drop diameters, showing that increasing temperatures decrease droplet sizes, and the comparison between two axial distances allowed seeing the effects of first and second atomization on the spray.*

*Key Words: Atomization; Shadowgraphy; SMD; Drop velocity; Particle size distribution.*

## Lista de Ilustrações

Figura 1: Características elétricas e de fluxo dos injetores. ....	6
Figura 2: Sistema de alimentação de ar e combustível de motores de injeção indireta. ....	7
Figura 3: Esquema do fluxo do bico injetor e aspectos geométricos. ....	8
Figura 4: Vista em corte do injetor de combustível. ....	8
Figura 5: Veias de geração do espiral – ranhuras típicas de atomizadores mecânicos-centrífugos. ....	15
Figura 6: Obturador do atomizador – função de causar turbilhonamento no líquido e formar o <i>spray</i> cônico. ....	15
Figura 7: Fluxograma da atomização em um atomizador mecânico-centrífugo. ....	19
Figura 8: Curva de velocidade do jato vs. comprimento de quebra do jato. ....	20
Figura 9: Ângulos do <i>spray</i> . ....	22
Figura 10: Morfologia do <i>Spray</i> - regiões de desenvolvimento. ....	24
Figura 11: Localização dos diâmetros representativos. ....	26
Figura 12: Influência da viscosidade no SMD. ....	31
Figura 13: SMD vs Pressão Ambiente. ....	33
Figura 14: Esquema das técnicas não intrusivas. ....	40
Figura 15: Esquema de instalação do sistema de <i>Shadowgraphy</i> . ....	44
Figura 16: Esquema do sistema hidráulico da bancada de testes. ....	48
Figura 17: Esquema do sistema eletrônico da bancada de testes. ....	49
Figura 18: Esquema do sistema térmico da bancada de testes. ....	49
Figura 19: Bancada de testes detalhada – vista 1. ....	51
Figura 20: Bancada de testes detalhada - vista 2. ....	52
Figura 21: Imagem do sistema <i>laser</i> Nd:YAG – ‘cabeça’ do <i>laser</i> por onde a luz é emitida e enviada ao difusor por fibra óptica. ....	53
Figura 22: Imagem das Fontes de refrigeração (a água) do <i>laser</i> . ....	54
Figura 23: Imagem do Difusor de luz – acoplado ao <i>laser</i> por fibra óptica. ....	54
Figura 24: CCD câmera <i>Imager Intense</i> com lente <i>12X Ultra Zoom Lens</i> . ....	55
Figura 25: Esquema da disposição final dos equipamentos. ....	58
Figura 26: Disposição final dos equipamentos. ....	59
Figura 27: Variação da viscosidade da gasolina em função da temperatura. ....	60
Figura 28: Variação da viscosidade do etanol em função da temperatura. ....	61
Figura 29: Reômetro rotativo da Haake. ....	61
Figura 30: Variação da tensão superficial do etanol em função da temperatura para os dados interpolados da Tabela 3. ....	63
Figura 31: Injetor de combustível utilizado nos testes. ....	64
Figura 32: Imagem da calibração. ....	65
Figura 33: Imagem de referência. ....	66
Figura 34: Trocador de calor – seleção da temperatura. ....	68

Figura 35: Seleção dos parâmetros de operação do injetor: (a) máquina completa; (b) painel de controle; (c) ajuste de pressão. ....	68
Figura 36: Distâncias axiais do bico injetor. ....	70
Figura 37: Histograma representativo das intensidades mostrando o pico da iluminação de fundo e o pico das gotas. ....	72
Figura 38: Representação esquemática da imagem de sombra da gota e os perfis de intensidade para partículas focadas (a) e desfocadas (b). ....	74
Figura 39: Placa de calibração com escalas crescentes de diâmetros (linhas) e escalas decrescentes de foco (colunas). ....	76
Figura 40: Direções do volume de testes (a) e campo de visão dependendo do diâmetro das partículas (b). ....	78
Figura 41: Gráfico de distribuição das partículas para diferentes tamanhos de campos de visão: à medida que o campo aumenta as partículas menores deixam de ser detectadas. ....	80
Figura 42: Imagem processada onde eventos de coalescência foram presenciados e passaram despercebidos pelo <i>software</i> . ....	81
Figura 43: Ilustração do campo de velocidades obtido quando o <i>spray</i> completo do bico injetor de teste foi medido. ....	84
Figura 44: Imagens capturadas para análise e processamento para os dois combustíveis a diferentes posições axiais. ....	91
Figura 45: Imagem processada típica. ....	91
Figura 46: SMD em função da temperatura para etanol e gasolina a 25 mm de posição axial. ....	96
Figura 47: SMD em função da temperatura para etanol e gasolina a 100 mm de posição axial. ....	97
Figura 48: Distribuição das gotas a duas temperaturas (16 e 55 °C) para o etanol a 25 mm. ....	98
Figura 49: Distribuição das gotas a duas temperaturas (16 e 55 °C) para o etanol a 100 mm. ....	99
Figura 50: Comparativo das distribuições das gotas nas duas posições axiais. ....	100
Figura 51: Distribuição das gotas a duas temperaturas (16 e 55 °C) para a gasolina a 25 mm. ....	101
Figura 52: Distribuição das gotas a duas temperaturas (16 e 55 °C) para a gasolina a 100 mm. ....	101
Figura 53: Verificação do cálculo das velocidades. ....	102
Figura 54: Velocidades das gotas do etanol em função de seus diâmetros para (a) 16 °C, 25 mm (b) 55 °C, 25 mm (c) 16 °C, 100 mm (d) 55 °C, 100 mm. ....	104
Figura 55: Componentes $V_y$ e $V_x$ da velocidade a 16 °C e 100 mm. ....	105
Figura 56: Velocidades das gotas da gasolina em função de seus diâmetros para (a) 16 °C, 25 mm (b) 55 °C, 25 mm (c) 16 °C, 100 mm (d) 55 °C, 100 mm. ....	106
Figura 57: SMD em função da temperatura para o etanol a 3 bar avaliados pela equação de SMD e experimentalmente. ....	109
Figura 58: Resultados obtidos para SMD em função da temperatura (Extraída e modificada de Aleiferis et al. [2]). ....	110
Figura 59: Forma geral do <i>spray</i> do etanol em três diferentes tempos de injeção: tempo de injeção A < tempo de injeção B < tempo de injeção A. ....	111
Figura 60: SMD em função da pressão de injeção. ....	113
Figura 61: Velocidades em função dos diâmetros das gotas a 20 °C para diferentes pressões: 1, 2, 3, 4 e 5 bar. ....	114

Figura 62: Posições radiais do bico injetor.....	115
Figura 63: Velocidades das gotas da gasolina em função de seus diâmetros para 4 posições radiais, indicadas nos gráficos: 0, 10, 20 e 40 mm. ....	116

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Regimes de ruptura do líquido. ....	19
Tabela 2: Especificação dos combustíveis de teste.....	60
Tabela 3: Variação da tensão superficial do etanol com a temperatura. ....	62
Tabela 4: Especificações do injetor de combustível. ....	64
Tabela 5: Teste de repetibilidade com vazão dinâmica (PWM de 5 ms) realizado na posição axial de 100 mm com relação ao orifício de descarga. ....	86
Tabela 6: Teste de repetibilidade com vazão estática realizado na posição axial de 100 mm com relação ao orifício de descarga. ....	86
Tabela 7: Exemplo da propagação do erro de escala para um instrumento em centímetros e um em micrômetros.....	89
Tabela 8: Parâmetros operacionais dos testes executados.....	90
Tabela 9: Resultados experimentais para o etanol a 25 mm do orifício de descarga, pressão atmosférica (~1 bar).....	93
Tabela 10: Resultados experimentais para o etanol a 100 mm do orifício de descarga, pressão atmosférica (~1 bar).....	93
Tabela 11: Resultados experimentais para a gasolina a 25 mm do orifício de descarga, pressão atmosférica (~1 bar).....	95
Tabela 12: Resultados experimentais para a gasolina a 100 mm do orifício de descarga, pressão atmosférica (~1 bar).....	95

## Lista de Abreviaturas e Siglas

### *Letras Latinas*

<b>V</b> – velocidade	[m/s]
<b>v</b> – velocidade relativa	[m/s]
<b>D</b> – diâmetro (da gota)	[m]
<b>d<sub>0</sub></b> – diâmetro do orifício de descarga	[m]
<b>P</b> – pressão	[Pa]
<b>ΔP</b> – diferencial de pressão	[Pa]
<b>l</b> – espessura de filme	[m]
<b>t</b> – tempo	[s]
<b>c<sub>p</sub></b> - calor específico	[J/kg.K]
<b>B</b> – número de transferência	[-]
<b>C<sub>d</sub></b> – coeficiente de arrasto	[-]
<b>S</b> – área de referência	[m <sup>2</sup> ]
<b>A</b> – área	[m <sup>2</sup> ]
<b>R</b> – constante universal dos gases perfeitos	[J/kg.mol]
<b>T</b> – temperatura	[K]
<b>n</b> – número de partículas	[-]
<b>We</b> – número de Weber	[-]
<b>Re</b> – número de Reynolds	[-]
<b>Oh</b> – número de Ohnesorge	[-]
<b>NF</b> – número de fluxo	[m <sup>2</sup> ]
<b>Q</b> – fração do volume que contém diâmetros menores do que D	[-]
<b>q</b> – parâmetro de distribuição	[-]
<b>X</b> – diâmetro característico	[m]
<b>g</b> – distância entre placas	[m]
<b>r</b> – raio da placa circular	[m]

<b>Tq</b> – torque	[N.m]
<b>N</b> – velocidade de rotação	[rpm]
<b><i>m</i></b> - vazão mássica	[kg/s]
<b>z</b> – distância axial a partir do orifício de descarga	[m]
<b>E, F</b> – constantes	[-]
<b>p</b> – probabilidade	[-]
<b>L</b> – distância	[m]
<b>e</b> – erro	[m]

.....

### ***Letras Gregas***

<b><math>\theta</math></b> – semi-ângulo do cone do <i>spray</i>	[graus]
<b><math>\lambda</math></b> – condutividade térmica	[W/m.K]
<b><math>\mu</math></b> – viscosidade dinâmica	[N.s/m <sup>2</sup> ]
<b><math>\rho</math></b> – densidade	[kg/m <sup>3</sup> ]
<b><math>\sigma</math></b> – tensão superficial	[N/m]
<b><math>\tau</math></b> – tensão de cisalhamento	[Pa]
<b><math>\gamma</math></b> – taxa de cisalhamento	[1/s]

.....

### ***Subscritos***

<b>L</b> – líquido
<b>G</b> – gás
<b>A</b> – ar
<b>R</b> - relativa
<b>in</b> – injeção
<b>o</b> – inicial
<b>c</b> – combustão
<b>h</b> - aquecimento
<b>p e q</b> – indicadores do tipo de diâmetro representativo
<b>s</b> – relativo à folha de líquido
<b>cc</b> – câmara centrífuga
<b>DoF</b> – depth of field

**Border** - borda

.....

***Sobrescritos***

**a, b, c, d** – constantes

**x, y** - constantes

.....

***Abreviações***

**PMS** – Ponto Morto Superior

**PMI** – Ponto Morto Inferior

**IC** – Ignição por Centelha

**SMD** – Diâmetro Médio de Sauter (*Sauter Mean Diameter*)

**PIV** – *Particle Image Velocimetry*

**PCI** – Poder Calorífico Inferior

**PCS** – Poder Calorífico Superior

**CCD** – *Charge Coupled Device*

**PTU** – *Programmable Timing Unit*

**PFI** – *Port Fuel Injection*

**GDI** – *Gasoline Direct Injection*

**PTV** – *Particle Tracking Velocimetry*

**CFD** – *Computational Fluid Dynamics*

***Siglas***

**DETF** - Departamento de Engenharia Térmica e Fluidos



# SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Considerações Iniciais.....	1
1.2 Motivações e Objetivos.....	2
1.3 Organização da Dissertação .....	3
1.4 Recursos .....	4
2 REVISÃO DA LITERATURA.....	5
2.1 Bicos Injetores de Combustível.....	5
2.2 Tipos de Atomizadores.....	9
2.3 Atomizadores dos Injetores de Combustível.....	14
2.4 Processo de Atomização.....	16
2.5 Parâmetros de Atomização.....	21
2.6 Parâmetros que Afetam a Atomização .....	28
2.7 Influência da Atomização na Combustão.....	33
2.8 Análise Dimensional e Correlação para o SMD em Atomizadores Mecânicos-Centrífugos.....	36
2.9 Métodos Ópticos de Medição.....	39
2.10 Medidas de Parâmetros de Atomização em Injetores Automotivos com Técnicas a <i>laser</i> .....	44
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	47
3.1 Aparato Experimental .....	47
3.2 Condições de Teste.....	59
3.3 Calibração do Sistema de Medição .....	64
3.4 Procedimento Experimental .....	67
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	71
4.1 Parâmetros de Processamento .....	71
4.2 Teste de Repetibilidade .....	85
4.3 Análise das Incertezas .....	87
4.4 Considerações Gerais .....	90
4.5 SMD em função da Temperatura .....	92
4.6 Distribuição das Gotas em função da Temperatura.....	97
4.7 Velocidades em função da Temperatura .....	102

4.8 Validação dos Resultados.....	106
4.9 Análise Qualitativa do <i>Spray</i> .....	111
4.10 Testes e Análises Adicionais.....	112
5 CONCLUSÕES .....	117
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	118
Referências.....	120

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações Iniciais

Motores alternativos de combustão interna são largamente utilizados, especialmente nos carros, motos e ônibus, onde eles ainda representam o principal meio de se obter energia. Muitos dos estudos direcionados a este campo estão voltados à questão de redução do consumo de combustível, redução da emissão de poluentes para a atmosfera e utilização de combustíveis mais limpos ou ecologicamente corretos. Todos estes pontos podem ser diretamente relacionados ao aprimoramento e otimização do sistema de alimentação de combustível e ar do motor, de modo a aumentar a sua eficiência e flexibilidade.

Além da questão da redução na emissão de poluentes para a atmosfera, há que se ater ao fato de que combustíveis baseados em petróleo não são renováveis e podem se tornar economicamente inviáveis. Portanto, o estudo especializado, através da experimentação e modelamento, permite que combustíveis como a gasolina e o diesel sejam utilizados para a combustão de forma mais eficiente, enquanto o etanol e os biocombustíveis sejam melhor adaptados aos sistemas existentes.

O sistema de alimentação de combustível e ar dos motores de combustão interna é a chamada injeção eletrônica e constitui um conjunto complexo de sensores e atuadores. Segundo Taylor [62], o principal objetivo deste sistema é dosar o combustível a ser adicionado ao ar, na câmara de combustão, de forma inteligente, a fim de se obter a melhor relação ar/combustível para os diferentes níveis de carga.

Um componente importante do sistema de injeção eletrônica é o bico injetor de combustível, uma válvula eletromagnética operada por um solenóide, que tem a função de fornecer a quantidade correta de combustível, previamente determinada pela central eletrônica, para o motor. Em motores ciclo Otto tradicionais com sistema “*multipoint*” de injeção eletrônica ele é estrategicamente posicionado no fim dos condutos do coletor de admissão de maneira a direcionar seu jato no chamado “pé” da válvula de admissão. Além de injetar a porção adequada

de combustível e direcionar o jato do *spray*, a válvula injetora tem a função de atomizar o líquido que passa por ela, transformando-o em uma nuvem de pequenas gotículas. A finalidade da atomização é aumentar a área superficial da massa de líquido para que a vaporização do combustível ocorra mais rapidamente, facilitando, assim, a subsequente mistura com o ar de admissão e a posterior queima na câmara de combustão.

A atomização é um processo muito eficiente para promover o aumento da área de contato entre o elemento a ser atomizado e suas vizinhanças, observa Couto [17]. Para a formação da mistura ar-combustível, independentemente da forma de conversão ou aplicação de combustíveis líquidos, é necessário primeiramente vaporizá-lo convenientemente. A garantia de uma boa vaporização e posterior mistura com a corrente de ar de admissão está diretamente ligada ao processo de atomização.

## 1.2 Motivações e Objetivos

Investigar o fenômeno da atomização em bicos injetores de combustível utilizados em motores de combustão interna ciclo Otto, avaliando os parâmetros envolvidos no processo, permite buscar correlações entre estes parâmetros e condições previamente estabelecidas.

Para o presente trabalho, a condição previamente estabelecida que se almeja estudar é a influência da temperatura do combustível nos parâmetros de atomização. Para tanto, a temperatura dos fluidos de trabalho (etanol e gasolina) será variada e para cada valor estabelecido um conjunto de parâmetros de atomização será avaliado.

Os parâmetros a serem avaliados são: diâmetros representativos das gotas (com ênfase no diâmetro médio de Sauter), distribuição de gotas ao longo de algumas fases da atomização (fases diferenciadas pela distância axial a partir do orifício de descarga), campo de velocidades e aspectos macroscópicos do *spray*.

Conhecendo-se a relação entre os parâmetros de atomização, os aspectos geométricos do bico injetor e diferentes condições de ensaio, é possível modificar características físicas do injetor, prever e otimizar seu funcionamento.

Portanto, o presente trabalho tem como principais objetivos:

- realizar uma investigação experimental sobre o processo de atomização de líquidos em bicos injetores de motores de combustão interna;
- caracterizar os principais parâmetros do *spray* gerado, por meio de experimentos, buscando-se relacionar esses efeitos com as propriedades do líquido à montante do injetor, condições operacionais e geometria do atomizador empregado no injetor, de forma a permitir uma avaliação de desempenho;
- obter funções de correlação entre os principais parâmetros e as propriedades acima mencionadas, de forma a oferecer ferramentas de engenharia úteis ao projeto e desenvolvimento de injetores.

Tais objetivos se justificam porque as funções de correlação constituem uma importante ferramenta para melhoramento dos injetores e, indiretamente, a melhoria do desempenho global do motor, tanto em consumo de combustível (conservação de energia) como em emissões de poluentes (conservação ambiental).

### **1.3 Organização da Dissertação**

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, descritos a seguir.

No Capítulo 1 foi apresentada a introdução, descrevendo as principais considerações e contextualizando o leitor sobre o assunto. Em seguida, os objetivos do trabalho, bem como as motivações que levaram a escrevê-lo foram apresentados.

No Capítulo 2 uma revisão da literatura será realizada, com intuito de melhor desenvolver o assunto e suas implicações, assim como demonstrar o estado de arte da tecnologia de atomização e os estudos já realizados por importantes autores da área. Ainda neste capítulo, considerações de propriedades que influenciam o processo de atomização foram ressaltadas, a fim de se adquirir embasamento para justificar a execução deste trabalho.

O Capítulo 3, nomeado de Materiais e Métodos, servirá para descrever a montagem da bancada de testes, os equipamentos envolvidos, o procedimento experimental e as técnicas de medição utilizadas na aquisição dos dados que serão posteriormente analisados.

No Capítulo 4 os resultados serão expostos e discutidos minuciosamente, realçando o que se obteve de mais importante.

No Capítulo 5 será apresentada uma conclusão sobre o que foi realizado durante o trabalho, onde os principais resultados serão destacados.

No Capítulo 6 sugestões de estudos futuros serão feitas.

## **1.4 Recursos**

Este projeto de pesquisa foi financiado por três instituições, com os recursos distribuídos da seguinte maneira:

- 1) Bolsa-Auxílio da CAPES para o aluno;
- 2) Patrocínio da empresa Magneti Marelli Sistemas Automotivos Ltda, através do fornecimento de matéria-prima, equipamentos, *know-how* e construção da bancada de testes;
- 3) Auxílio à Pesquisa aprovado pelo Fundo de Apoio ao Ensino, à Pesquisa e à Extensão (FAEPEX) da Unicamp, por meio do processo número 0859/2012, concedido para compra de materiais de consumo, materiais permanentes, contratação de serviços e encargos.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será feita uma revisão da literatura relacionada ao tema do presente trabalho.

Primeiramente, uma descrição sobre bicos injetores de combustível será realizada e posteriormente o processo de atomização que ocorre nestes bicos injetores será estudado minuciosamente, incluindo os fenômenos envolvidos, bem como os métodos utilizados para medição de parâmetros deste processo.

### 2.1 Bicos Injetores de Combustível

O bico injetor de combustível, também conhecido por válvula injetora ou apenas injetor, é uma válvula eletromagnética operada por um solenóide. A tensão pulsada que energiza o bico injetor induz uma corrente no campo magnético da bobina, que, por sua vez, gera uma força eletromagnética. Esta força é responsável por atrair um componente do injetor que serve como ímã, fechando o circuito elétrico e abrindo o hidráulico para a passagem do fluido.

Por conta da tensão pulsada que ele recebe o seu ciclo operacional não é contínuo, quando está energizado abre a passagem para o fluido e quando não está fecha a passagem, portanto o bico injetor trabalha “abrindo” e “fechando”.

A quantidade de combustível a ser injetado é controlada por um sistema de sensores e atuadores, os quais vão fornecer informações à central eletrônica sobre a carga requerida pelo motor em tempo real. Esta informação é enviada ao injetor pela central eletrônica através de um valor que representa a largura do pulso - o PWM (*Pulse Width Modulation*).

O PWM ou largura do pulso de um bico injetor diz respeito ao tempo completo do pulso: o tempo de abertura mais o tempo de injeção mais o tempo de fechamento da válvula. Quanto mais se quer injetar maior deverá ser o valor de PWM.

Na prática, todo o controle sobre a quantidade injetada pelo bico injetor é feito pelo tempo de injeção, ou seja, pelo tempo em que ele permanece aberto, injetando combustível

propriamente, pois os tempos de abertura e fechamento não mudam em um mesmo injetor. Isto porque existe uma inércia associada ao processo de abertura e fechamento da válvula. Para que o bico injetor inicie a sua abertura, ele precisa, primeiramente, receber o sinal elétrico para depois executar a ação de abrir, fato que só ocorrerá quando vencer a força mecânica da mola de retorno. Este processo leva um tempo, conhecido como tempo de abertura. O tempo de abertura vem seguido do tempo de injeção, que vem seguido do tempo de fechamento (tempo necessário para o ímã retornar a posição inicial).

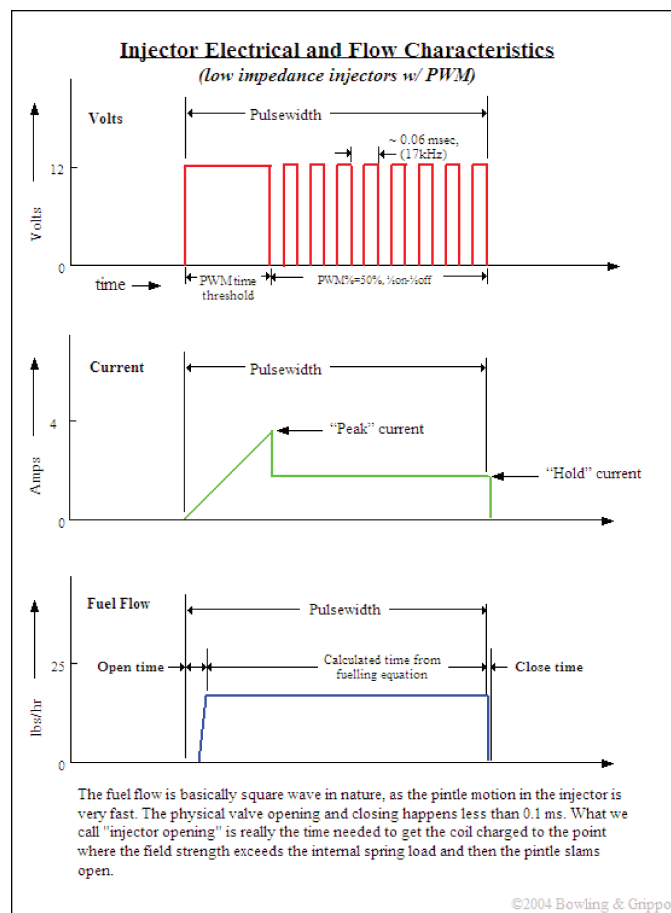


Figura 1: Características elétricas e de fluxo dos injetores (Extraída de <http://manual.msbr.com.br>).

Na Figura 1, o primeiro gráfico ilustra a *voltagem x tempo*, que é a tensão modulada entregue ao injetor em forma de ondas quadradas; o segundo diz respeito à *corrente x tempo*



durante um PWM; o terceiro é a *vazão mássica x tempo* durante o PWM, com os três tempos de injeção presentes (abertura, injeção e fechamento).

A injeção indireta de combustível ou *port fuel injection (PFI)*, como é conhecido este tipo de injeção, de motores ciclo Otto difere da injeção direta, GDI (*Gasoline Direct Injection*), destes mesmos motores, especialmente pelas pressões de trabalho. Sistemas PFI comumente operam com pressões de 3 a 6 bar enquanto sistemas GDI usam pressões na ordem de  $10^2$  bar. A Figura 2 ilustra um sistema típico de alimentação de ar e combustível de um motor de injeção indireta. Os bicos injetores são fixados à galeria de combustível que, por sua vez, é fixada na porção final do coletor de admissão. A mistura ar/combustível é realizada antes de entrar na câmara de combustão.

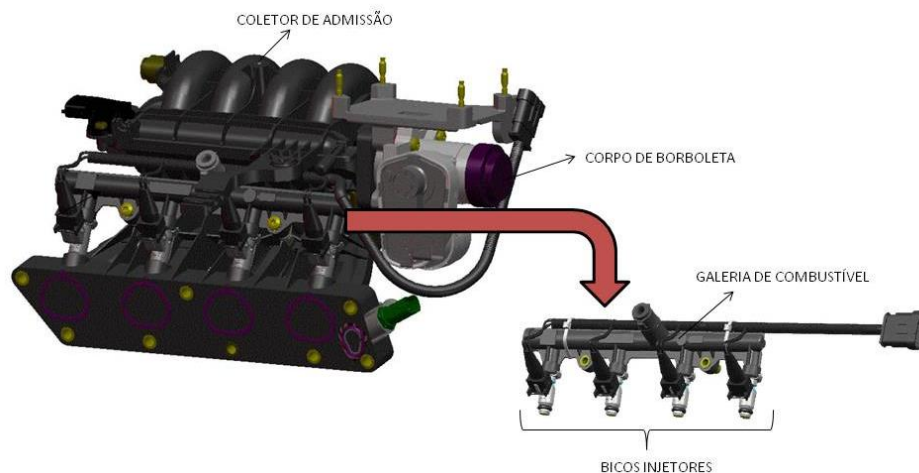


Figura 2: Sistema de alimentação de ar e combustível de motores de injeção indireta (Cedida por Magneti Marelli Sist. Aut. Ltda).

Além de ser responsável pela entrega da dosagem correta de combustível ao motor, o bico injetor ainda tem a função de atomizar o combustível, então, além de ser uma válvula de controle de fluxo, ele é um atomizador. O sentido do fluxo de líquido no interior do bico injetor é mostrado na Fig. 3. O combustível entra no bico injetor, seu fluxo é controlado pela porção da válvula, atinge a porção que representa o atomizador e sai pelos orifícios de saída destacados.

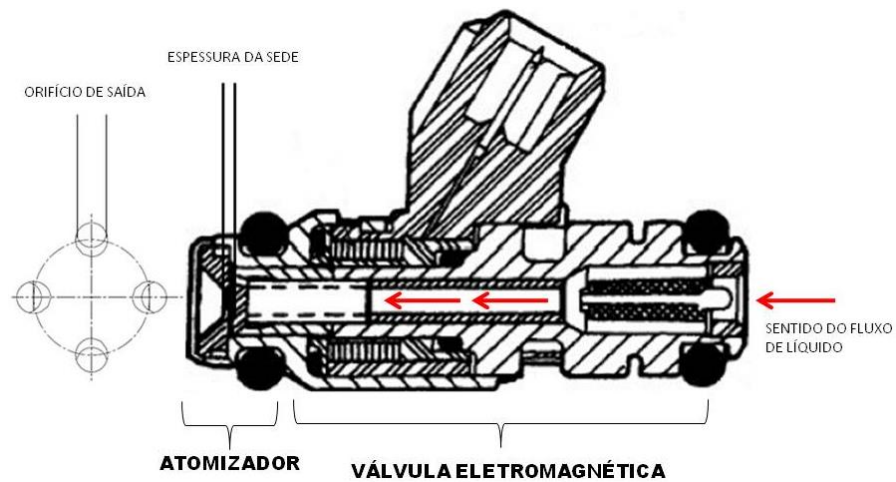


Figura 3: Esquema do fluxo do bico injetor e aspectos geométricos.

As partes que compõem o injetor de combustível estão enumeradas na Figura 4. Este não é o único modelo de injetor de combustível existente no mercado, mas é o modelo que será utilizado como objeto do presente trabalho.

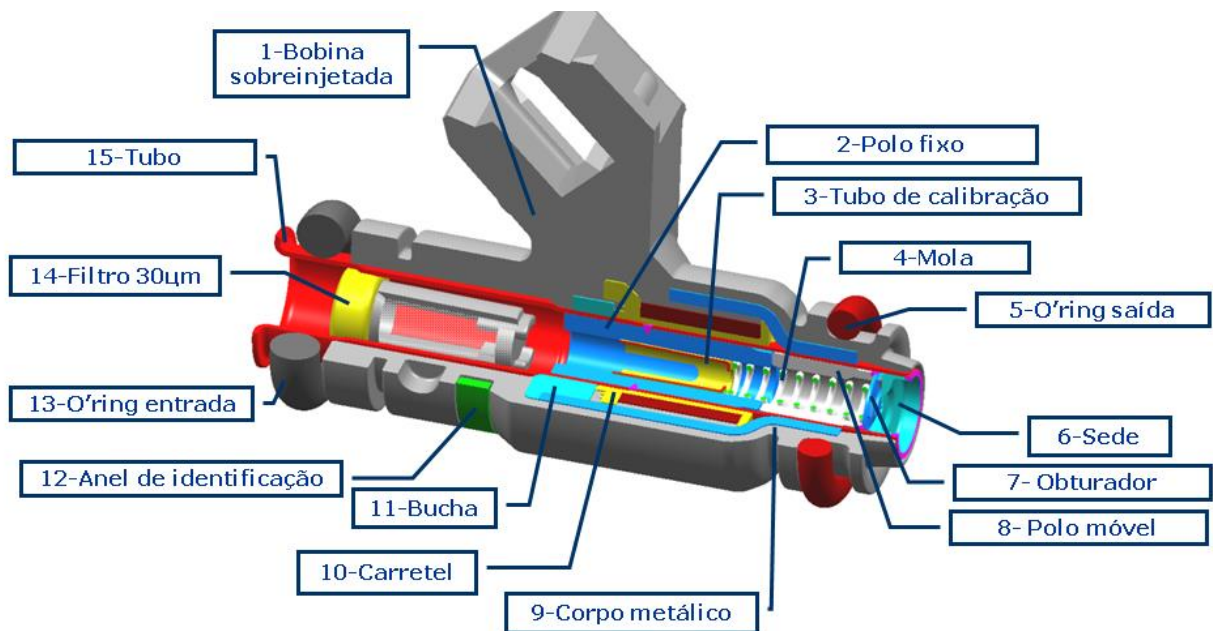


Figura 4: Vista em corte do injetor de combustível (Cedida por Magneti Marelli Sist. Aut. Ltda).

O Tubo (15) e o Corpo metálico (9) são partes da carcaça do injetor; o Carretel (10), Bobina (1), Pólo móvel (8), Pólo fixo (2) e a Mola (4) fazem parte do sistema da válvula

eletromagnética – responsável por abrir e fechar o circuito de passagem do fluido; o Obturador (7) e a Sede (6) são componentes do atomizador.

Os atomizadores são encontrados em diversas formas e para várias aplicações. A seguir serão descritos os tipos mais comuns de atomizadores existentes, para que posteriormente seja possível descrever o atomizador utilizado em bicos injetores.

## 2.2 Tipos de Atomizadores

Atomizadores são utilizados em diversas aplicações, como em processos de combustão, produtos farmacêuticos, processos de secagem e pulverização na indústria alimentícia, *sprays* de tinta para pintura, sistemas de irrigação, entre outros. Existem em diversas configurações e a sua escolha depende do tipo de aplicação que se deseja obter e de algumas particularidades como: grau de refinamento das gotas desejado, distribuição das velocidades apropriadas, extensão de vazão que se deseja operar, entre outros.

Os atomizadores podem ser classificados segundo a vazão mássica, distribuição de massa do líquido, padrão do *spray*, ângulo do *spray*, impacto do *spray* e tamanho de gota, conforme cita Omer e Ashgriz [45]. Entretanto, segundo eles, estes atributos dependem de fatores como a pressão de alimentação, a natureza do líquido a ser injetado, sem contar que eles se afetam entre si, como por exemplo, o tamanho da gota depender do padrão do *spray*. Por conta disso, um tipo de atomizador pode, muitas vezes, receber mais de uma classificação.

Em termos gerais, conforme sugere Lefebvre [38], alguns tipos de atomizadores podem ser agrupados em uma grande família denominada atomizadores de pressão, enquanto, segundo Omer e Ashgriz [45], outra categoria de atomizadores pode ser inserida no grupo dos atomizadores duplo-fluido. O restante dos modelos é caracterizado, tanto por um autor quanto pelo outro, de atomizadores rotativos, eletrostáticos, ultrasônicos, entre outros.

Os atomizadores duplo-fluido compreendem os assistidos a ar (*air-assist*), os de jato de ar (*airblast*) e o efervescente (*effervescent*). Já o de orifício plano (*plain orifice*), jato plano (*flat fan*) e mecânico-centrífugo (*swirl*) são classificados como atomizadores de pressão.

### 2.2.1 Atomizadores Duplo-fluido

O princípio de funcionamento dos atomizadores duplo-fluido é a transferência de quantidade de movimento entre uma corrente de gás de alta velocidade (usualmente o ar) e uma corrente de líquido (a ser atomizado) quando colocadas em choque. Com isso, a pressão dinâmica do ar quebra o jato líquido em ligamentos e gotas. Este tipo de atomizador tem como característica gerar uma atomização refinada por meio de pressões de injeção e vazões do líquido relativamente baixas e esta é a sua principal vantagem. O parâmetro de análise mais importante desses injetores é a razão entre a vazão mássica de gás e a de líquido (GLR – *gas liquid ratio*).

De acordo com a maneira com a qual o ar entra em contato com o líquido os atomizadores duplo-fluido podem ser categorizados como: *airblast*, *air-assist* ou efervescente.

#### 2.2.1.1 *Airblast*

A energia cinética da corrente de ar é responsável por desintegrar o jato ou folha de líquido em atomizadores *airblast*. A mistura dos dois fluidos pode ser feita interna ou externamente ao atomizador. Os tipos mais comuns são constituídos por um tubo interno que conduz o líquido, envolto por um anular por onde passa o gás. O líquido é descarregado na câmara de gás onde é atomizado. As vazões dos fluidos normalmente são altas e suas aplicações mais comuns são em sistemas aeronáuticos e navais.

#### 2.2.1.2 *Air-assist*

Nesse tipo de atomizador, que tem o mesmo princípio de funcionamento de um *airblast*, o ar no qual o líquido é descarregado deve estar pressurizado. Por conta disto, o ar é fornecido

quando necessário e não continuamente como no *airblast*. O auxílio do ar é normalmente requerido quando as vazões de operação são baixas.

### 2.2.1.3 Efervescente

Nos atomizadores efervescentes, aplicados em turbinas a gás, fornos e caldeiras, o gás é injetado dentro do conduto por onde o líquido passa, gerando bolhas no escoamento, as quais se expandem rapidamente devido à queda de pressão no orifício de descarga, rompendo o líquido em gotas. A porção de gás injetado no sistema é bem menor do que a dos outros dois tipos de atomizadores duplo-fluido.

### 2.2.2 Atomizadores Rotativos

Atomizadores são ditos rotativos quando possuem algum elemento interno, normalmente um disco, prato ou copo, que exerce movimento de rotação. O líquido é conduzido de cima para o elemento rotativo, o qual gira em altas velocidades, e a força centrífuga faz com que o líquido se espalhe e seja atomizado para, posteriormente, entrar em contato com o ar circundante. A principal vantagem deste tipo de atomizador é gerar gotas pequenas de maneira bastante uniforme. Quanto maior a velocidade angular do elemento e menor a vazão do líquido melhor a qualidade da atomização.

### 2.2.3 Atomizadores Eletrostáticos

Geram atomização por meio de uma pressão eletrostática criada pela repulsão de cargas de mesmo sinal entre o líquido a ser atomizado e a superfície de impacto. A tensão superficial do

líquido se opõe a essa pressão e a ruptura dos ligamentos líquidos ocorre quando esta supera a outra.

A pressão elétrica foi introduzida por Graf [28] e é definida como a razão entre a voltagem aplicada *vezes* a fração da carga que de fato se atem à superfície da gota e a área da gota multiplicada por oito.

#### 2.2.4 Atomizadores Ultrasônicos

Estes dispositivos utilizam um elemento piezelétrico feito de cerâmica para converter energia elétrica em vibrações mecânicas. Estas vibrações geram ondas na corrente de líquido, as quais são responsáveis por causar instabilidades e quebrá-lo em gotas. Comumente utilizados em equipamentos laboratoriais, na área farmacêutica e em umidificadores.

#### 2.2.5 Atomizadores de Pressão

Atomizadores de pressão também são conhecidos por atomizadores hidráulicos. Seu princípio de funcionamento consiste em converter energia de pressão em energia cinética, traduzindo-se em velocidade para o líquido. Conforme o próprio nome sugere, atomizadores de pressão se utilizam de pressão para forçar o líquido a passar pelo orifício de descarga e, uma vez ultrapassado, o líquido entra em contato com o ar do ambiente e é atomizado. Quanto maior a pressão de injeção mais refinada é a atomização, ou seja, menor é o tamanho das gotas formadas.

Atomizadores de pressão podem apresentar configurações diferentes, variando principalmente o formato da porção que compreende o orifício de saída, e sua escolha depende da aplicação que se deseja obter.

Tipos de atomizadores de pressão:

#### 2.2.5.1 Orifício Plano

O mais simples modelo de atomizador de pressão é o de orifício plano. Seu mecanismo consiste em forçar o líquido a passar por um orifício circular pequeno. Quanto menor o diâmetro do orifício de saída melhor resulta a atomização. O aspecto do jato que emerge do injetor se assemelha a de um jato contínuo, porém, diferente deste, o de orifício plano contém gotas quando a pressão de injeção é alta ou quando excede a pressão do ambiente em que o gás está inserido. Sua principal aplicação é em injetores diesel.

#### 2.2.5.2 Jato Plano

Os atomizadores conhecidos por jato plano (*flat fan*) foram concebidos com o propósito de gerar jatos com formato retangular ou elíptico. Normalmente são constituídos por ranhuras em forma de "V" na entrada, as quais interceptam uma cavidade esférica, e possibilitam o líquido a fluir paralelamente na saída (Omer e Ashgriz [45]).

#### 2.2.5.3 Mecânico centrífugo

Atomizadores mecânicos-centrífugos são aqueles especializados em criar uma espécie de "turbilhonamento" no líquido antes que ele atinja o orifício de descarga, a fim permitir que o *spray* cônico seja desenvolvido na saída.

O movimento de rotação ou redemoinho do fluido é realizado por meio da geometria convenientemente projetada à montante do orifício de saída do atomizador - ranhuras usinadas que direcionam o fluido. O cone do *spray* formado pode ser vazio ou cheio e a direção de alimentação do líquido pode ser axial ou tangencial (Omer e Ashgriz [45]).

Bachalo [6] enfatiza que para esses atomizadores, a alta pressão de injeção permite atingir altas velocidades de saída do líquido, excedendo a velocidade do ar ao redor. A energia cinética, a turbulência e as forças de cisalhamento são os principais responsáveis pela quebra do líquido em gotas, fazendo com que o fluxo de ar tenha um papel secundário neste mecanismo, diferentemente dos atomizadores assistidos a ar.

O modelo mais simples desse tipo de atomizador é o chamado “Simplex”, composto por uma câmara centrífuga logo acima do orifício de descarga. Existem ainda os modelos “Duplex”, constituído por dois “Simplex” dentro de uma câmara centrífuga, trabalhando em conjunto ou alternadamente, e o “*Spill Return*”, que é basicamente um modelo “Simplex”, porém com uma passagem que serve de retorno para o líquido.

Atomizadores de pressão mecânicos-centrífugos encontraram bastante aceitação em turbinas a gás, combustores domésticos e industriais por causa de sua simplicidade e baixo custo, comenta Bachalo [6]. São os mais utilizados atualmente, principalmente nos sistemas de injeção eletrônica utilizados em motores de combustão interna.

### **2.3 Atomizadores dos Injetores de Combustível**

Os injetores de combustível são dispositivos que acoplam a função de válvulas eletromagnéticas à função de atomizadores. A parte superior de sua geometria atua como válvula, abrindo ou fechando o dispositivo sempre que é acionada a bobina. A parte inferior de sua geometria abrange o atomizador propriamente dito, que é classificado como mecânico-centrífugo.

Nos injetores comuns de combustível não se observa a geometria característica de ranhuras à montante do orifício de descarga dos atomizadores mecânicos-centrífugos, igual a que pode ser vista na Figura 5. Ao invés disto, eles possuem uma peça chamada de “obturador”, que realiza uma função similar a das ranhuras - de direcionar o fluido e formar uma espécie de espiral- como pode ser visto na Figura 6. Apesar de não possuir uma geometria idêntica a dos clássicos atomizadores mecânicos-centrífugos, convencionalmente se classifica injetores de combustível nesta categoria de atomizador porque o resultado do *spray* obtido é cônico (oco).



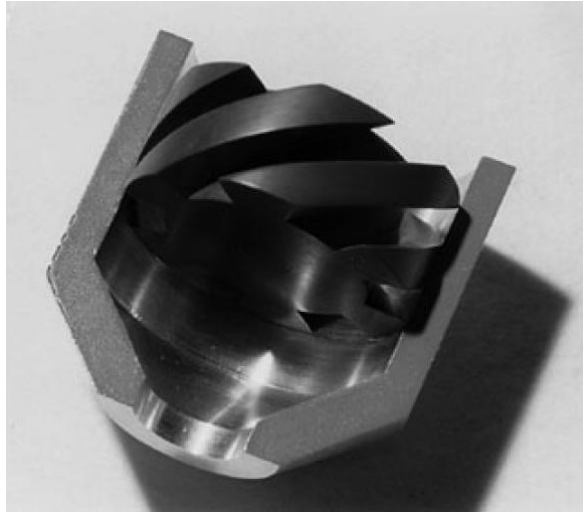


Figura 5: Veias de geração do espiral – ranhuras típicas de atomizadores mecânicos-centrífugos (Extraída de Eslamian e Ashgriz [19]).



Figura 6: Obturador do atomizador – função de causar turbilhonamento no líquido e formar o *spray* cônico.

## 2.4 Processo de Atomização

A atomização é um processo decorrente de interações entre forças viscosas e de tensão superficial do líquido e de forças aerodinâmicas provenientes do meio gasoso circundante.

Do primeiro contato que o fluxo de líquido, saindo do atomizador, tem com o meio gasoso surgem as primeiras instabilidades e logo após ocorre a chamada primeira atomização, que é caracterizada por gotas de tamanhos médios ou grandes. Esta quebra inicial do líquido é acompanhada de mais instabilidades, as quais geram uma segunda desintegração, ou segunda atomização, caracterizada por gotas menores. A primeira etapa da atomização é prioritariamente dominada pelas instabilidades inerentes ao próprio escoamento e pela ação das forças de ruptura internas ao líquido. A segunda etapa da atomização é regida pela atuação das forças aerodinâmicas.

As forças intermoleculares no interior de um volume líquido atuam em todas as direções e, portanto, tendem a possuir resultante nula. O fenômeno que ocorre na superfície do líquido ou na interface líquido-gás (no caso da atomização) é diferente, pois a atração que as outras moléculas causam nessas moléculas superficiais não atua em todas as direções, resultando em uma força não nula, a qual aponta para o interior do líquido. Isto é o que gera uma espécie de "membrana" na superfície líquida, proporcionando elasticidade a ela, definida como tensão superficial.

A instabilidade capilar clássica trata sobre o caso de uma coluna de líquido em queda livre, emergindo de um orifício circular: a partir de certo comprimento crítico do jato intacto (não perturbado) e inicialmente em formato cilíndrico, a tensão superficial provoca a sua decomposição em gotas esféricas. A geometria esférica se deve ao fato de que as moléculas se arranjam de forma a ocupar a menor área possível para um dado volume, pois esta é a configuração de mínima energia, e para um mesmo volume a esfera é a geometria com menor área superficial.

Uns dos precursores na análise teórica da quebra de jatos líquidos devido a instabilidades hidrodinâmicas capilares foram Rayleigh [52] e Plateau [47, 48]. Plateau [48] desenvolveu a formulação física do problema e, posteriormente, Rayleigh [52] realizou a análise matemática,

empregando o método de pequenas perturbações para prever as condições necessárias para causar o colapso do jato líquido (Lefebvre [38])). Assumindo líquidos invíscidos e desconsiderando a interação com o meio gasoso e a turbulência do escoamento, ele obteve uma equação para a taxa de crescimento de uma dada perturbação axissimétrica de superfície pelo equacionamento das energias potencial e cinética computadas para o escoamento. Posteriormente, com a hipótese de que o distúrbio de máximo crescimento levaria à quebra do jato, ele obteve uma expressão para o tamanho resultante da gota, assumindo que este seria na ordem de grandeza do comprimento de onda do distúrbio que o provocou (Ashgriz e Yarin [5]).

As investigações teóricas de instabilidade capilar podem ser divididas em duas grandes categorias: análise temporal e espacial. Em cada uma delas a análise das perturbações pode ser linear ou não-linear. Segundo Bogy [8], a instabilidade do jato líquido pode iniciar de uma perturbação inicial (temporal), que pode crescer no tempo, mas não no espaço. Os distúrbios também podem iniciar de uma excitação no tempo localizada no espaço (instabilidade espacial), que podem crescer até que numa posição fixa do espaço comecem a decair. Se estes distúrbios, originados temporalmente ou espacialmente, continuassem a crescer em tempo e espaço a instabilidade absoluta seria alcançada.

O distúrbio ao qual o jato líquido pode ser submetido para causar sua ruptura pode ser na forma de deslocamento da superfície, flutuações na pressão ou velocidade no sistema de abastecimento ou na própria superfície do jato, bem como flutuações nas propriedades do líquido, tais como temperatura, viscosidade ou tensão superficial (Ashgriz e Yarin [5]).

A formulação realizada por Rayleigh-Plateau pode ser denominada de análise de instabilidade capilar linear de jatos líquidos invíscidos. Partindo de equações fundamentais da mecânica dos fluidos (Continuidade e Navier-Stokes), eles concluíram que qualquer distúrbio com comprimento de onda maior do que o diâmetro do jato inicial torna o jato instável. Uma vez que todo o espectro de perturbação está sempre presente no jato, as perturbações que tiverem maior taxa de crescimento são as que vão dominar o processo de quebra. Ou seja, para um processo natural de quebra, as ondas mais instáveis serão as reais causadoras da quebra do jato e, com base no comprimento de onda destas ondas, é possível estimar o tamanho da gota formada.

O mecanismo de atomização almeja promover o rompimento além das gotas capilares, ou seja, se propõe a aumentar a área superficial e diminuir o tamanho de cada partícula. A tensão superficial auxilia o processo de formação das gotas capilares, mas se opõe ao aumento da área

superficial depois disso; ela tende a restaurar a área inicial, portanto, na atomização, a tensão superficial atua como uma resistência à formação de gotas menores.

Já as forças oriundas da viscosidade do líquido têm a função de atrasar o processo de atomização, suprimindo as instabilidades requeridas para que o volume de líquido se quebre (Lefebvre [38]). Nas formulações realizadas por Weber [71], incluindo o efeito da viscosidade ao estudo anterior de Plateau-Rayleigh, ele descobriu que o efeito da viscosidade é o de desacelerar as taxas de crescimento das ondas de maior perturbação, que são as que causam, de fato, a quebra do jato (Ashgriz e Yarin [5]).

Partindo do equacionamento de Plateau-Rayleigh e também considerando um modelo de jato infinito, Weber [71] estendeu a análise prévia, adicionando à solução invíscida o termo correspondente à viscosidade cinemática. Com isso, concluiu que a viscosidade amortece a instabilidade e altera o crescimento da perturbação mais acelerada para ondas maiores (Ashgriz e Yarin [5]).

Para aumentar a área superficial do líquido faz-se necessário realizar trabalho, o que é alcançado com o auxílio de forças externas, que, no caso do processo de atomização, são as forças aerodinâmicas. A inclusão da influência das forças aerodinâmicas na análise de instabilidade, portanto, é de suma importância.

Além disso, a turbulência no escoamento do líquido pode contribuir bastante para o processo de atomização. Esta turbulência pode ser prioritariamente descrita pela velocidade do escoamento do líquido, que quanto maior mais facilmente atomiza. A atomização normalmente é alcançada combinando-se a energia cinética do líquido com o contato entre a corrente de líquido e gás. Para tanto, imprime-se uma velocidade a um dos fluidos ou aos dois simultaneamente. Em atomizadores de pressão, o líquido, em alta velocidade, entra em contato com o ar parado ou se movendo com baixa velocidade. Vale ressaltar que a turbulência por si só já é capaz de romper o líquido, não havendo necessidade, em alguns casos, de haver forças externas.



Figura 7: Fluxograma da atomização em um atomizador mecânico-centrífugo.

Outras formulações para o processo de quebra do jato foram feitas considerando-se o que havia sido suprimido pelas análises pioneiras, até que se chegasse à atomização, que é um processo de ruptura desorganizado e aleatório.

Reitz [53] esquematizou quatro regimes de ruptura:

- 1) Regime de Rayleigh;
- 2) Primeira quebra por vento induzido;
- 3) Segunda quebra por vento induzido;
- 4) Atomização.

Esquemáticamente, tem-se:

REGIME	RAYLEIGH	1º VENTO INDUZIDO	2º VENTO INDUZIDO	ATOMIZAÇÃO
ESCOAMENTO	LAMINAR	TRANSIÇÃO	TURBULENTO	COMPLETAMENTE DESENVOLVIDO
GOTAS	$D > d_0$	$D \sim d_0$	$D \ll d_0$	$D \lll d_0$

Tabela 1: Regimes de ruptura do líquido.

Onde,  $D$  é o diâmetro médio da gota e  $d_0$  o diâmetro inicial do jato, ou seja, do jato intacto.

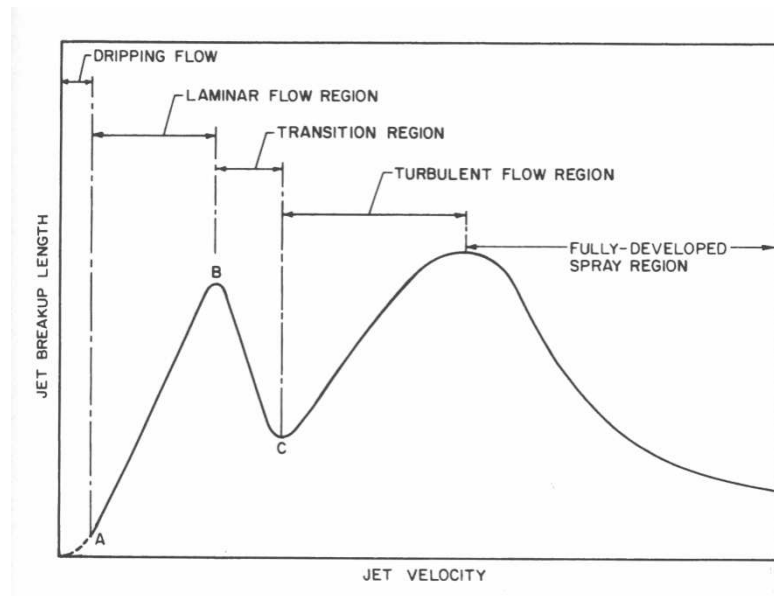


Figura 8: Curva de velocidade do jato vs. comprimento de quebra do jato (Extraída de Lefebvre [38]).

A Figura 8 ilustra a relação entre a velocidade do jato e o comprimento de quebra, que seria a distância axial a partir do orifício de descarga até o ponto de rompimento do jato, para os quatro regimes de Reitz [53].

#### 2.4.1 Números adimensionais importantes

O primeiro número adimensional que se deve ter conhecimento na área de atomização é o número de Weber. Este número relaciona as forças inerciais com as de tensão superficial. É dado pela razão entre estas forças:

$$We = \frac{\rho_A v_R^2 D}{\sigma} \quad (2.1)$$

Onde,  $\rho_A$  é a densidade do ar (mas pode ser a do líquido,  $\rho_L$ ),  $v_R$  é a velocidade relativa entre o líquido e o gás circundante,  $D$  é o diâmetro da gota (ou do orifício de descarga do atomizador,  $d_0$ ) e  $\sigma$  é a tensão superficial do líquido.

Há, ainda, o número de Reynolds, que relaciona as forças inerciais com as viscosas:

$$Re = \frac{\rho_L V_L D}{\mu_L} \quad (2.2)$$

Onde,  $\rho_L$  é a densidade do líquido,  $V_L$  é a velocidade do líquido e  $\mu_L$  é a viscosidade do líquido.

O número de Weber não leva em conta a viscosidade do líquido e, para tanto, existe o número de Ohnesorge, o qual relaciona as forças viscosas com as de tensão superficial ou o número de Weber com o de Reynolds:

$$Oh = \frac{\sqrt{We}}{Re} = \frac{\mu_L}{\sqrt{\rho_L \sigma D}} \quad (2.3)$$

Em geral, os três grupos adimensionais são usados em conjunto para prever o regime de formação de gotas.

## 2.5 Parâmetros de Atomização

Ao *spray* de gotas formado atribuem-se alguns parâmetros que tem a finalidade de caracterizar a atomização, em âmbito macro e microestrutural. Esta caracterização é capaz de dosar, direta ou indiretamente, quão eficaz foi a transformação do líquido em uma nuvem de gotículas em diferentes aspectos, além de permitir escolher a qual aplicação tal dispositivo, que deu origem àquela atomização, se destina.

Dentre os parâmetros de atomização, existem aqueles que caracterizam o *spray* como um todo e aqueles que caracterizam a gota.

## 2.5.1 Parâmetros Macroestruturais

### 2.5.1.1 Ângulo do *spray*

O ângulo do cone do *spray* é o parâmetro que mede a abertura do jato atomizado. No âmbito de bicos injetores de combustível do ramo automotivo o atomizador pode conter um ou mais orifícios de saída, fazendo com que o *spray* seja monojato, bijato e assim por diante. Dependendo do número de jatos produzido pelo atomizador, um ou mais tipos de ângulos deverão ser medidos. A Figura 9 ilustra um bico injetor de combustível quadrijato.

O ângulo  $\beta$  mede a abertura de um jato (proveniente de um orifício de saída). O ângulo  $\alpha$  mede a abertura entre dois jatos consecutivos. Ambos os ângulos são medidos em uma determinada posição do injetor, que, por convenção, é tida como a vista frontal. O ângulo  $\gamma$  mede a inclinação dos jatos com relação ao eixo vertical do injetor, tendo como referência a vista lateral.

#### DEFINICAO DOS ANGULOS DE SPRAY SPRAY ANGLE DISTRIBUTION

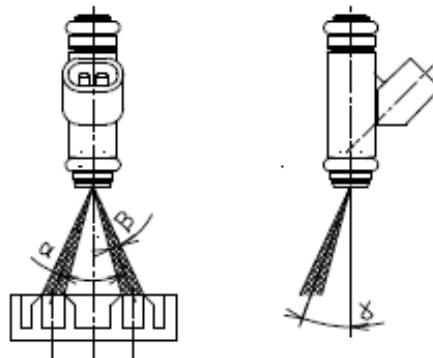


Figura 9: Ângulos do *spray* (Cedida por Magneti Marelli Sist. Aut. Ltda).



Linhas retas imaginárias são traçadas nas fronteiras do jato para facilitar a medição, uma vez que, na realidade, os contornos do *spray* são curvados quando injetado em um meio que não seja o vácuo.

#### 2.5.1.2 Penetração do *spray*

O parâmetro penetração pode ser definido como o alcance máximo do *spray*. Sua medida considera a máxima distância que o *spray* atinge, portanto é como se um uma linha imaginária fosse traçada entre o orifício de descarga e o ponto onde o *spray* termina. É um parâmetro importante para o projeto de motores, pois, quando devidamente considerado, minimiza o choque do *spray* com as paredes dos condutos e, portanto, a perda de combustível.

#### 2.5.1.3 Aspectos qualitativos - Morfologia do *spray*

O *spray* é dividido em regiões, de acordo com seu estágio de desenvolvimento. Estas regiões são posições tomadas axialmente ao injetor a partir de seu orifício de descarga e podem ser visualizadas na Figura 10.

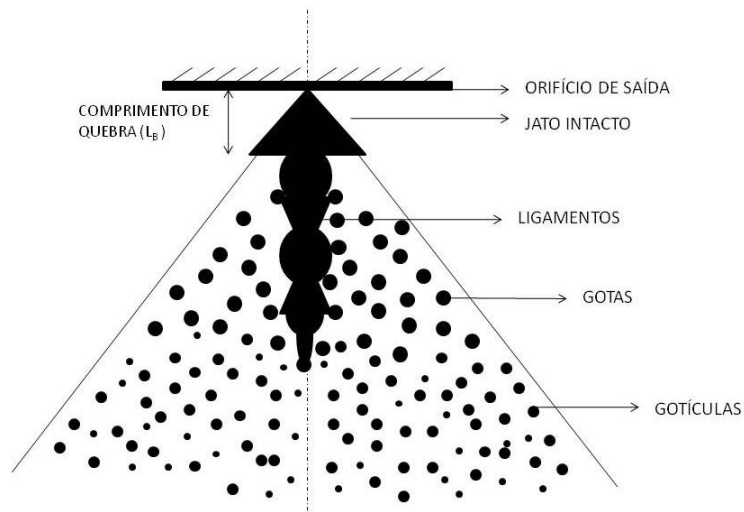


Figura 10: Morfologia do *Spray* - regiões de desenvolvimento.

#### 2.5.1.4 Comprimento de quebra

O comprimento de quebra é um parâmetro que mede a distância do orifício de descarga até o ponto onde o filme líquido inicia sua quebra em ligamentos e deixa de ser contínuo. A Figura 10 contém uma marcação, denotada por  $L_b$  (*break length*), que permite visualizar o fenômeno.

#### 2.5.2 Parâmetros Microestruturais

##### 2.5.2.1 Diâmetro médio das gotas

Em um *spray* as gotas formadas pelo processo de atomização nunca possuem o mesmo tamanho, por mais uniforme que a distribuição possa parecer. O que na realidade ocorre é que existe uma variedade de diâmetros nas diversas gotas e gotículas formadas. Para que fosse

possível adotar este parâmetro como um critério de atomização, foi necessário estabelecer um diâmetro, ou uma média de diâmetros, que fosse capaz de representar um grupo amostral de gotas. Para tanto, criou-se o conceito de diâmetro médio de gotas, cuja notação foi introduzida e padronizada por Mugele e Evans [43] e cuja função é representar uma população de gotas com diferentes diâmetros através de um diâmetro representativo:

$$D_{pq} = \left[ \frac{\int_0^{\infty} D^p n(D) dD}{\int_0^{\infty} D^q n(D) dD} \right]^{\frac{1}{p-q}} \quad (2.4)$$

Onde D se refere ao diâmetro representativo, “p” e “q” são os índices que dependem do tipo de média que se quer calcular e n é o número de gotas de uma determinada amostra contendo diâmetro D. A forma discreta para a equação 2.4 é dada por:

$$D_{pq} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^{\infty} n_i D_i^p}{\sum_{i=1}^{\infty} n_i D_i^q} \right]^{\frac{1}{p-q}} \quad (2.5)$$

Segundo Bayvel e Orzechowski [7], o diâmetro médio não fornece informação sobre a gota em si; não obstante, é uma quantidade que oferece uma avaliação sobre a qualidade da atomização.

O que normalmente se faz é selecionar a região do *spray* que se deseja estudar e fazer a média estatística dos diâmetros presentes naquela região. Existem diversos tipos de diâmetros representativos já concebidos e sua escolha depende da aplicação em questão. Os mais comuns são: linear ( $D_{10}$ ), de área superficial ( $D_{20}$ ), de volume ( $D_{30}$ ), de Sauter ( $D_{32}$ ) e de Brouckere ( $D_{43}$ ).

O  $D_{10}$ , chamado de *diâmetro médio aritmético*, é uma média aritmética dos diâmetros de um conjunto de gotas; o  $D_{20}$ , chamado de *diâmetro médio de área*, traz um diâmetro de gota que tem área superficial equivalente a área superficial do conjunto das gotas da amostra, caso fosse multiplicada pelo número de gotas da amostra; o  $D_{30}$ , chamado de *diâmetro médio de volume*, é o diâmetro de uma gota com um volume que se fosse multiplicado pelo número de gotas da amostra resultaria no volume total da amostra.

Para aplicações na área de combustão, o  $D_{32}$  é o mais utilizado. Ele é chamado de *diâmetro médio de Sauter (SMD)* e recebe este nome em homenagem ao cientista que lhe deu

origem. Ele representa o diâmetro da gota cuja razão volume/área superficial é a mesma do que a da amostra.

$$SMD = \left[ \frac{\int_{D_{min}}^{D_{max}} D^3 n(D) dD}{\int_{D_{min}}^{D_{max}} D^2 n(D) dD} \right] \quad (2.6)$$

Diversos autores da área utilizaram e utilizam o SMD como parâmetro para investigar a qualidade da atomização. Em especial, este é um parâmetro bastante recorrente em estudos que avaliam a influência de propriedades dos fluidos na atomização, por isso foi escolhido, dentre os diâmetros representativos, para os testes deste trabalho.

Ainda existem as notações que representam a porcentagem de ocorrência de determinado volume de líquido em um determinado diâmetro. Por exemplo,  $D_{0.5}$  é um diâmetro tal que 50% do volume total do líquido está contido em diâmetros menores do que ele;  $D_{0.99}$  é um diâmetro tal que 99,9% do volume total do líquido está contido em diâmetros menores do que ele.

Representativamente, em uma curva de freqüências, os diâmetros estão alocados de acordo com a Figura 11.

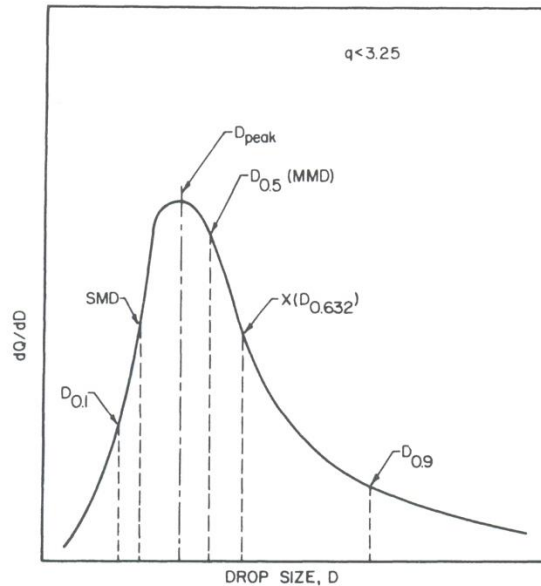


Figura 11: Localização dos diâmetros representativos (Extraída de Lefebvre [38]).

### 2.5.2.2 Distribuição dos diâmetros das gotas

Conforme visto no item anterior, por mais uniforme que o *spray* seja o tamanho de todas as gotas geradas nunca é o mesmo, apenas variam em torno de um valor médio representativo. Devido à heterogeneidade do processo, faz-se necessário conhecer como estas gotas de variados diâmetros se distribuem ao longo do *spray*.

Atualmente a função de distribuição de gotas melhor aceita no âmbito de *sprays* é a desenvolvida por Rosin and Rammler [56]:

$$1 - Q = \exp - \left(\frac{D}{X}\right)^q \quad (2.7)$$

Onde Q é a fração do volume total de líquido que contém gotas com diâmetros menores do que D, X é um diâmetro representativo constante e 'q' é o parâmetro de distribuição das gotas propriamente dito. A avaliação da distribuição se faz por meio de 'q', que aponta a uniformidade do *spray* no sentido crescente.

A expressão de Rosin-Rammler modificada foi desenvolvida por Rizk and Lefebvre [55] para abranger gotas de maiores diâmetros com maior precisão:

$$1 - Q = \exp - \left(\frac{\ln D}{\ln X}\right)^q \quad (2.8)$$

### 2.5.2.3 Coeficiente de arrasto da gota

O coeficiente de arrasto,  $C_d$ , mais utilizado na área de *sprays* foi obtido experimentalmente por Putnam [50] e é recomendada para números de Reynolds menores do que 1000.

$$C_d = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{1}{6} Re^{2/3}\right) \quad (2.9)$$

### 2.5.3 Número de fluxo

É definido por Lefebvre [38] como a área de fluxo efetiva do injetor [m<sup>2</sup>] e é dada por:

$$NF = \frac{\text{vazão mássica [kg/s]}}{(\text{Diferencial de pressão [Pa]}^{1/2} * (\text{densidade } [\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}])^{1/2}} \quad (2.10)$$

## 2.6 Parâmetros que Afetam a Atomização

O processo de atomização, avaliado por meio dos parâmetros que o caracterizam, listados no item anterior, pode ser influenciado por fatores relacionados ao líquido a ser atomizado ou ao ambiente no qual o líquido será despejado. Há, ainda, fatores relacionados à geometria do atomizador e a condições de operação que podem influenciar no resultado da atomização, porém não serão descritos aqui por fugirem do escopo do trabalho.

Tanto o líquido quanto o meio que interage com ele afetam o processo de atomização por meio de suas propriedades intensivas.

### 2.6.1 Influência das propriedades do líquido na atomização

As propriedades dos líquidos que exercem influência no processo de atomização são: densidade, tensão superficial e viscosidade.

Em termos práticos, segundo lista Bayvel e Orzechowski [7], a influência de cada uma das propriedades acima mencionadas pode ser descrita como:

- Líquidos com densidade alta desenvolvem diâmetros de gotas menores;
- Líquidos com tensão superficial alta desintegram com diâmetros de gotas maiores.
- Líquidos com viscosidade alta geram gotas maiores;

Para autores como Lefebvre [38] e Bayvel e Orzechowski [7] a densidade do líquido é a propriedade que menos afeta a sua atomização, se comparada às outras duas propriedades. Isto ocorre por dois motivos: o primeiro é que os fluidos comumente utilizados para atomização possuem densidades próximas umas das outras, o que dificulta a comparação desta propriedade entre eles; o segundo é que quando dois fluidos de densidades bastante distintas são utilizados para fins de teste, as outras propriedades, como viscosidade e tensão superficial, variam amplamente também, o que prejudica a análise individual da densidade.

Um estudo sobre a influência da densidade e viscosidade do líquido nas características internas de fluxo de um atomizador do tipo simplex foi realizado por Rizk e Lefebvre [54], onde se concluiu que os efeitos da viscosidade (em parâmetros como ângulo de cone, coeficiente de velocidade, espessura de filme, entre outros) foram muito mais pronunciados do que os da densidade. Chung e Presser [15] testaram oito tipos de fluidos, de viscosidades variando num fator de 6,7 e tensões superficiais variando num fator de 3,1. Para tais faixas, as densidades variaram num fator de 1,4, o que demonstra que se a densidade fosse o foco do trabalho e seu intervalo de interesse tivesse de ser mais amplo, as outras propriedades variariam em proporções muito maiores.

Segundo Lefebvre [38], a força de tensão superficial é definida como a tensão superficial multiplicada pelo aumento da área superficial do líquido após ser atomizado. A tensão superficial é a propriedade responsável por se opor ao processo de atomização, ou melhor, se opor a este aumento de área. Por esta razão é que a tensão superficial é um parâmetro de atomização importante, pois quanto maior for o seu valor mais difícil será romper o filme líquido em gotas e gotículas e formar essa nova área superficial.

A viscosidade é a propriedade com maior visibilidade nos estudos que investigam a influência de parâmetros na atomização. Isto porque, segundo Lefebvre [38], uma modificação desta propriedade afeta não só o tamanho médio das gotas geradas como também o padrão do *spray* e a vazão através do bocal de saída do injetor. A viscosidade do fluido, assim como a tensão superficial, também se relaciona com a dificuldade que o líquido enfrenta ao entrar em contato com o ar e se romper em gotas e gotículas. Está ligada às perdas viscosas e, portanto, na quantidade de energia disponível para que o processo de atomização ocorra.

Testes conduzidos por Chen et al. [12] em injetores do tipo simplex mecânicos-centrífugos, utilizando uma mistura de água e glicerina como fluido de trabalho, mostraram que

um aumento na viscosidade do líquido resultou em diâmetros de gotas (Diâmetro médio de Sauter – SMD) maiores. Um aumento na viscosidade do fluido de um fator de 12 (0,001 a 0,012 kg/m.s) gerou um aumento em SMD de 40% (~ de 37 a 52  $\mu\text{m}$ ), além de se constatar que o aumento na viscosidade do líquido diminuiu a uniformidade do *spray*, ou seja, influenciou negativamente em sua distribuição. Ainda com referência a este estudo, vale ressaltar que a variação da propriedade viscosidade inevitavelmente interferiu na propriedade tensão superficial, que diminuiu num máximo de 6% para todo o range de viscosidades. Com este percentual de variação a tensão superficial pôde desprezada durante os ensaios.

Em um estudo feito por Li et al. [40], onde se buscava investigar o efeito independente da viscosidade na atomização de injetores duplo-fluido, a mistura de água e glicerina também foi utilizada como fluido de trabalho. O efeito da viscosidade sobre a atomização foi considerado independente porque na faixa de teste escolhida a tensão superficial variou muito pouco - viscosidade variando de 1,3 a 120 mPa.s, tensão superficial de 74,1 a 66,3 mN/m. Para tanto, a variação da tensão superficial pode ser desprezada. Os resultados mostraram que, para valores altos de pressão de injeção e razão entre massa de ar e líquido, um aumento de 1,3 para 120 mPa.s na viscosidade produziu um aumento de 27% no SMD.

Goldsworthy et al. [27] estudaram a influência da viscosidade na performance de atomizadores efervescentes, utilizando diesel comum automotivo e diesel com 75% canola, e descobriram que o combustível com maior viscosidade (75% canola) apresentou maiores tamanhos de gotas e maiores velocidades. Para os dois combustíveis escolhidos, as viscosidades foram de 0,0022 e 0,042 kg/m.s, enquanto que a tensão superficial se manteve a mesma, de 0,03 N/m.

Carmi e Ghassemzadeh [11] publicaram estudo da influência da viscosidade em atomizadores duplo-fluido utilizando misturas de carvão e óleo para alterar a viscosidade. Os resultados mostraram que o aumento da viscosidade (de 0,2 a 5 kg/m s) causou um aumento no SMD (de 40 a 130  $\mu\text{m}$ ), para pressões de 1,38 bar, e um aumento no SMD (de 40 a 110  $\mu\text{m}$ ) para pressões de 3,45 bar, comprovando, ainda, que o aumento da pressão de injeção diminui o diâmetro das gotas formadas.

Para atomizadores do tipo mecânico-centrífugo, objeto do presente trabalho, segundo Lefebvre [38], a propriedade do líquido que realmente importa é a viscosidade, já que a densidade e a tensão superficial variam muito pouco nos combustíveis comerciais, os quais são



comumente utilizados nestes atomizadores. A viscosidade chega a variar em até duas ordens de magnitude em algumas aplicações.

Testes conduzidos por diversos autores mostraram que a relação entre o diâmetro representativo de *Sauter* e a viscosidade obedece ao seguinte padrão:

$$SMD \propto \mu_L^b \quad (2.11)$$

Onde a constante “b” pode assumir valores de 0,05 a 0,2, dependendo das condições de teste e do fluido utilizado. Em especial, Wang e Lefebvre [68] obtiveram os resultados ilustrados na Figura 12, onde é possível visualizar a variação de SMD com a viscosidade.

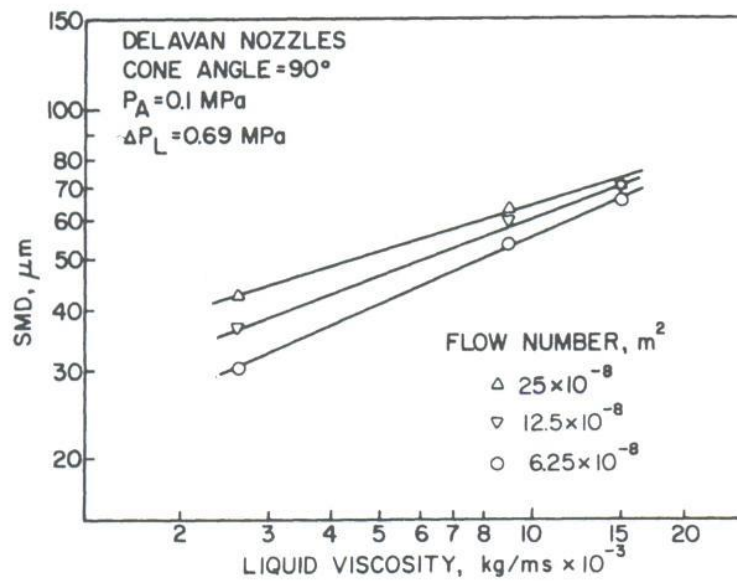


Figura 12: Influência da viscosidade no SMD (Extraída de Wang e Lefebvre [68]).

O efeito da viscosidade também pode ser percebido na distribuição das gotas no *spray*, dependendo da distância axial de medida.

## 2.6.2 Influência das propriedades do meio na atomização

Sabe-se do mecanismo de atomização que o processo de quebra do líquido em ligamentos e gotas é parte da interação entre as forças do líquido e as aerodinâmicas (do ar circundante). Como o ar no entorno tem influência direta na ocorrência da atomização é esperado que suas propriedades também tenham. A força de arrasto é a responsável por exprimir a resistência do ar à superfície da gota e é função direta da densidade do ar. A pressão e a temperatura são os estados que mais afetam as condições do ar, as quais podem ser prontamente relacionadas à propriedade densidade.

$$F_d = \frac{1}{2} C_d \rho_A v^2 S \quad (2.12)$$

Na equação 2.12, onde  $C_d$  representa o coeficiente de arrasto da interface dos dois fluidos,  $v$  a velocidade do objeto relativa ao fluido e  $S$  a área de referência, a força de arrasto  $F_d$  é diretamente proporcional à densidade do ar, o que implica que o aumento da densidade do ar confere maior força de arrasto a ele e, portanto, maior eficiência na quebra do líquido, gerando gotas menores.

Da equação de estado dos gases ideais, tem-se que:

$$\rho_A = \frac{P_A}{RT_A} \quad (2.13)$$

Da eq. 2.13 e das observações anteriores pode-se afirmar que um aumento na pressão do ar causaria diminuição no tamanho das gotas, entretanto não é isto que se observa na prática.

De Corso [18], um dos precursores na análise da influência do meio na atomização, investigou o efeito da pressão ambiente no tamanho da gota formada em um injetor mecânico-centrífugo e observou o seguinte resultado:

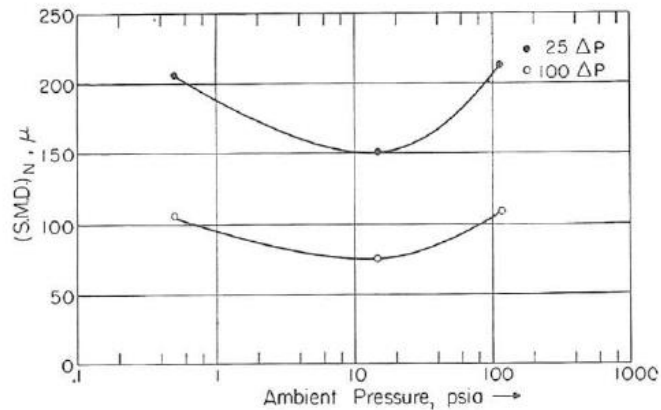


Figura 13: SMD vs Pressão Ambiente (Extraída de De Corso [18]).

Ele atribui a anomalia do resultado – o crescimento do tamanho da gota a partir de certo valor de pressão – ao crescimento da coalescência das gotas do *spray* com o aumento da pressão.

Mais tarde, em 1976, Wang e Lefebvre [69] estudaram a influência da pressão ambiente em seis diferentes atomizadores mecânicos-centrífugos e constataram o mesmo comportamento observado por De Corso: para valores crescentes de pressão (acima da atmosférica) o SMD primeiramente diminui até certo valor e depois começa a crescer. Tal conduta foi atribuída à possibilidade de coalescência das gotas e ao fato de que o aumento na pressão diminui o ângulo do *spray*, reduzindo a velocidade relativa do ar e da gota.

Neya e Sato [44] encontraram uma relação para o efeito da pressão do ar no SMD para pressões variando de 1 a 5 atm:

$$SMD \propto P_A^{0,27} \quad (2.14)$$

## 2.7 Influência da Atomização na Combustão

Quando se estuda a combustão de líquidos para obtenção de energia em motores, as condições nas quais o *spray* é injetado, disperso, vaporizado e queimado após misturar com o ar de admissão são de suma importância. Estes fatores afetam a estabilidade, eficiência e os

produtos da combustão. Em particular, a eficiência aerodinâmica da redistribuição e mistura do combustível e ar na câmara de combustão e a diluição dos produtos de combustão a um dado perfil de temperaturas determinam a qualidade da combustão e os níveis de emissão gerados, conforme enfatiza Bachalo [6]. Revisões mais detalhadas sobre o assunto podem ser encontradas em Chigier [13, 14], Faeth [23] e Williams [72].

Um parâmetro importante na análise de um modelo simplificado de combustão é o tempo de combustão de uma gota, que pode ser calculado por meio da equação 2.15, deduzida em Coelho e Costa [16]:

$$t_c = \frac{D_o^2 \rho_L}{8 \left( \frac{\lambda_G}{c_{p,G}} \right) \ln(B+1)} \quad (2.15)$$

Nesta eq.,  $t_c$  representa o tempo de combustão da gota [s],  $D_o$  é o diâmetro inicial da gota [m],  $\lambda_G$  é a condutividade térmica do gás [W/mK],  $c_{p,G}$  o calor específico do gás (a pressão constante) [J/kg.K] e B é o número de transferência (parâmetro que é função do poder calorífico e do calor latente de vaporização).

Pela análise da equação, realizada na mesma referência em que foi deduzida, os parâmetros constantes no denominador do termo do lado direito, assim como a densidade do líquido no numerador, variam muito pouco com  $t_c$ , fazendo com que este seja, sobretudo, função do diâmetro inicial da gota  $D_o$  - o tempo de queima de uma gota é proporcional ao quadrado de seu diâmetro inicial. Com isso, pode-se concluir que  $t_c$  varia pouco com as condições ambiente e com as propriedades do combustível, dependendo bastante do tamanho da gota e, conseqüentemente, do grau de atomização. Quanto mais refinada a atomização mais elevadas são as taxas de evaporação e combustão (Coelho e Costa [16]).

Outro parâmetro importante na análise de combustão e que indica o problema de não uniformidade de aquecimento da gota é o tempo de aquecimento da gota, dado por Sirignano [59]:

$$t_h = \frac{\rho_L c_{p,L} D_o^2}{4 \lambda_L} \quad (2.16)$$

Na eq. 2.16,  $t_h$  representa o tempo de aquecimento da gota [s],  $D_o$  é o diâmetro inicial da gota [m],  $\lambda_L$  é a condutividade térmica do líquido [W/mK],  $c_{p,L}$  o calor específico do líquido (a pressão constante) [J/kg.K] e  $\rho_L$  é a densidade do líquido [kg/m<sup>3</sup>].

A razão entre as equações 2.15 e 2.16 demonstra que o problema de não uniformidade no aquecimento das gotas é independente do diâmetro inicial da gota (Bachalo [6]).

Foi visto pela equação 2.15 que quanto menor for o diâmetro inicial da gota menor será o seu tempo de queima e, por conseguinte, mais rápida será a combustão. Contudo, esta análise individual da gota não é a mais indicada para se estudar combustão de *sprays* heterogêneos. Isto porque o processo de combustão é bastante complexo e ele depende, essencialmente, da precedência da evaporação do líquido. A taxa de evaporação das gotas de um *spray* pode ser baseada na teoria de gotas isoladas, enquanto que o processo posterior de combustão pode ser estudado por meio de uma nuvem de gotas proveniente da evaporação.

Quando se avalia a influência que o processo de atomização exerce na combustão, o entendimento de algumas questões relativas à combustão de *sprays* se faz necessário. Num modelo simplificado, existem quatro regiões importantes a se considerar: a região do *spray* que acabou de ser formado (1), a região de evaporação do líquido disperso (2), a região da combustão propriamente dita (3) e a região dos produtos formados após a combustão (4). Se a região (1) não estiver bem desenvolvida, isto é, se as gotas formadas pela atomização não forem pequenas o suficiente, a região (2) será afetada, de forma que as gotas não consigam evaporar completamente. Com efeito, na região (3) a combustão das gotas não evaporadas não se completará, fazendo com que adentrem a região (4) gotas ou vapor de combustível, e não apenas os produtos da combustão.

Com o melhor entendimento do processo de atomização e os parâmetros do *spray* que mais afetam a combustão, como o tamanho médio de gota, a distribuição dos tamanhos de gota, o campo de velocidades, o número de densidade das gotas e a temperatura da gota, a combustão pode ser otimizada. Além disso, para a melhor compreensão do processo de mistura e distribuição do combustível, é importante estudar a interação entre *sprays* e turbulência (Coelho e Costa [16]).

## 2.8 Análise Dimensional e Correlação para o SMD em Atomizadores Mecânicos-Centrífugos

Quando se deseja desenvolver correlações para parâmetros de *spray*, neste caso para o diâmetro representativo médio de *Sauter*, é imprescindível que se conheça todas as grandezas físicas envolvidas no processo.

O processo de atomização é influenciado por propriedades do líquido a ser atomizado, propriedades do meio onde o líquido é descarregado, parâmetros operacionais e geometria do atomizador e parâmetros do processo, ou seja, um número considerável de variáveis. Para tanto, a análise dimensional do problema permite correlacionar estas variáveis envolvidas de forma a simplificar a análise.

Conforme já descrito, as propriedades do líquido que afetam a atomização são viscosidade ( $\mu_L$ ), tensão superficial ( $\sigma$ ) e densidade ( $\rho_L$ ) e a propriedade do meio gasoso que sobressai é a densidade ( $\rho_A$ ). Com relação à geometria do atomizador, o orifício de descarga ( $d_o$ ), a pressão de injeção ( $P_{in}$ ) e sua vazão mássica ( $\dot{m}_L$ ) são de suma importância. Já os parâmetros do processo compreendidos nessa investigação são: diâmetro representativo da gota ( $D$ ), semi-ângulo do cone do *spray* ( $\theta$ ), velocidade do líquido na saída do bocal ( $V_L$ ) e distância de medição a partir de orifício de descarga ( $z$ ).

Todas essas variáveis podem ser relacionadas pelo teorema Pi de Buckingham [9] em grupos adimensionais. O desenvolvimento destes grupos para esta aplicação pode ser visto detalhadamente em Souza [60], de onde se extrai que o diâmetro representativo da gota é função dos parâmetros adimensionais mostrados a seguir:

$$\frac{D}{d_o} = f\left(\frac{\rho_A}{\rho_L}; \frac{z}{d_o}; \frac{P_{in}}{V_L^2 \rho_L}; \theta; Re; We\right) \quad (2.17)$$

O passo seguinte seria encontrar a função ( $f$ ) que relaciona esses números adimensionais. A maioria dos autores da área recorre a correlações empíricas. Em se tratando de diâmetro representativo médio de Sauter (SMD), as mais populares tem a forma:

$$SMD \propto \sigma^a \mu^b \dot{m}_L^c \Delta P_L^d \quad (2.18)$$

Autores como Wang e Lefebvre [67], Kennedy [31], Khavkin [32] e vários outros desenvolveram correlações para o diâmetro médio de *Sauter* (SMD), conforme compila Omer e Ashgriz [45] em seu artigo, onde concluem que a performance desses tipos de atomizadores depende muito mais das propriedades do líquido do que da geometria do injetor.

Vale ressaltar a equação proposta por Lefebvre [39] e demonstrada por Wang e Lefebvre [68], a qual será a utilizada como base no presente trabalho para eventuais comparações. A seguir as considerações utilizadas pelos autores e parte de seu desenvolvimento serão apresentados:

Conforme exposto na seção 2.4, os fatores responsáveis pela atomização do líquido são as suas propriedades, as instabilidades presentes no escoamento (principalmente na primeira atomização) e a interação com o ar circundante. Por se tratar de um conjunto de fatores, a função de SMD pode ser subdividida em duas outras funções – SMD<sub>1</sub> (primeiro estágio da atomização) e SMD<sub>2</sub> (segundo estágio da atomização), as quais serão somadas posteriormente.

SMD<sub>1</sub> é governado por Reynolds, que fornece uma medida das forças de ruptura inerentes ao líquido; e Weber, que representa o desenvolvimento de instabilidades capilares na superfície do líquido:

$$\frac{SMD_1}{l_s} \propto (Re * \sqrt{We})^{-x} \quad (2.19)$$

Onde  $l_s$  é a espessura inicial da folha de líquido após sair pelo orifício de descarga. Da definição de Re e We em 2.4.1, apenas altera-se o parâmetro de distância, trocando D por  $l_s$  nas equações, para que fosse possível incluir o ângulo de cone na avaliação, pois:

$$l_s = l \cdot \cos\theta \quad (2.20)$$

A variável  $l$  é a espessura de filme dentro do orifício de descarga. Existem diversas equações para calcular a espessura de filme, porém a utilizada nesta dedução foi a de Suyari e Lefebvre [61], em que:

$$Y = \frac{(d_o - 2l)^2}{d_o^2} \quad (2.21)$$

$$\frac{(1-Y)^3}{1+Y} = 0.09 \left[ \frac{A_{cc}}{D_{cc}d_o} \right] \left[ \frac{D_{cc}}{d_o} \right]^{0.5} \quad (2.22)$$

Levando-se em consideração que, por se tratar de atomizadores mecânicos-centrífugos, aspectos geométricos específicos destes tipos de atomizadores devem ser incluídos no equacionamento, como é o caso de  $A_{cc}$  e  $D_{cc}$ , que representam área e diâmetro da câmara centrífuga, respectivamente. E  $d_o$  é o diâmetro do orifício de descarga do atomizador.

Substituindo as eqs. 2.20 a 2.22 em 2.19 e fazendo-se algumas considerações,  $SMD_1$  resulta em:

$$SMD_1 \propto \left( \frac{\sigma^{0.5} \mu_L}{\rho_A^{0.5} \Delta P_L} \right)^x (l \cos \theta)^{1-1.5x} \quad (2.23)$$

O  $SMD_2$  representa o segundo estágio da atomização, em que o líquido vai finalmente quebrar em ligamentos e gotas. Nesta fase a interface líquido/ar é mais importante e o número de Reynolds pode ser desprezado, pois apenas a tensão superficial tem influência no processo. Portanto, o SMD vai ser apenas função de Weber agora:

$$\frac{SMD_2}{l_s} \propto We^{-y} \quad (2.24)$$

Usando a mesma definição para  $l_s$  e as mesmas considerações anteriores,

$$SMD_2 \propto \left( \frac{\sigma \rho_L}{\rho_A \Delta P_L} \right)^y (l \cos \theta)^{1-y} \quad (2.25)$$

E, portanto, SMD fica:

$$SMD = SMD_1 + SMD_2 = E \left( \frac{\sigma^{0.5} \mu_L}{\rho_A^{0.5} \Delta P_L} \right)^x (l \cos \theta)^{1-1.5x} + F \left( \frac{\sigma \rho_L}{\rho_A \Delta P_L} \right)^y (l \cos \theta)^{1-y} \quad (2.26)$$



Onde  $x$  e  $y$  são 0,5 e 0,25, respectivamente, obtidos experimentalmente e  $E$  e  $F$  são constantes que dependem do bico injetor utilizado. Para o caso estudado, a forma final da equação é:

$$SMD = 4.52 \left( \frac{\sigma \mu_L^2}{\rho_A \Delta P_L^2} l \cos \theta \right)^{0.25} + 0.39 \left( \frac{\sigma \rho_L}{\rho_A \Delta P_L} (l \cos \theta)^3 \right)^{0.25} \quad (2.27)$$

Ainda segundo Wang e Lefebvre [68], vale ressaltar que esta equação não é resultado de tratamento matemático, mas apenas baseada em considerações dos aspectos físicos do problema de atomização. Além disso, algumas conclusões podem ser tiradas pela observação da equação:

- 1) Esta equação é constituída de dois termos, dos quais apenas o primeiro se relaciona com a viscosidade. Este termo demonstra maior dependência da pressão de injeção do que o outro, o que significa que o aumento da pressão reduz mais o primeiro termo do que o segundo, fazendo com que o SMD se torne menos dependente da viscosidade quando a pressão aumenta;
- 2) A influência da viscosidade no SMD é menos pronunciada quando os ângulos de cone são menores e quanto maior o ângulo menor o SMD.

## 2.9 Métodos Ópticos de Medição

Das técnicas atuais de medição de parâmetros gerados pela atomização do líquido em bicos injetores, alguns dos métodos mais utilizados são: *Phase Doppler Interferometry* (PDI), *Laser Diffraction* (LD), *Particle Image Velocimetry* (PIV), *Particle Tracking Velocimetry* (PTV) e *Shadowgraphy*. Estes métodos configuram-se como não intrusivos, pois a aplicação deles não interfere no processo de atomização em si e, portanto, não altera a realidade. Além disso, em todos os casos, a fonte de luz é o *laser*, por se tratar de luz praticamente monocromática e coerente.

Métodos mecânicos eram largamente aplicados, mas o estado atual da arte no âmbito da atomização concentra-se nos métodos ópticos, que tem as vantagens de fornecer resultados em

tempo real, não serem intrusivos e realizar a medição de dois ou mais parâmetros simultaneamente.

Souza [60] fez uma espécie de fluxograma, que resume de forma bastante clara as principais técnicas ópticas de medição aplicadas a *sprays*.



Figura 14: Esquema das técnicas não intrusivas (Extraído de Souza [60]).

### 2.9.1 Phase Doppler Interferometry – PDI

O método baseado na técnica de interferometria de espalhamento de luz pode efetuar medidas de tamanho e velocidade de gotas individuais. É constituído por uma fonte de luz de *laser* e um receptor. A fonte de luz emite dois feixes de igual intensidade que se interceptam em algum ponto. A medição é realizada fazendo-se uma partícula, líquida ou sólida, cruzar esta intersecção. Ao passar pela intersecção, que possui um padrão de franjas de interferência inicial,

a partícula promove o espalhamento da luz e faz com que surja uma diferença de fase entre as ondas dos feixes de luz, alterando o padrão das franjas de interferência. O comprimento de onda do padrão num dado local será inversamente proporcional ao diâmetro da gota (Dantec [20]).

Esta é uma técnica bastante utilizada para prever parâmetros de *spray*, dado que seus resultados são bastante confiáveis.

### 2.9.2 *Laser Diffraction - LD*

Método óptico que utiliza o princípio da difração de Fraunhofer para calcular tamanho de gotas e sua distribuição. O equipamento é composto por um transmissor - uma fonte de luz de *laser* utilizada para iluminar o *spray* - e um receptor - uma ou mais lentes utilizadas para focar a luz espalhada pelo *spray*. Ambos são alinhados por meio de uma bancada óptica. (Malvern [42]).

A técnica consiste em emitir uma luz de *laser* que incida nas gotas do *spray* que está sendo injetado. Quando o feixe de luz passar pelas gotas do *spray* será espalhado devido à difração, formando franjas. O padrão de espalhamento depende do tamanho da gota. O receptor alinhado ao emissor é capaz de detectar a luz difratada e a interpretação dos dados é feita por meio de um *software* especialmente desenvolvido.

### 2.9.3 *Particle Image Velocimetry – PIV*

A velocimetria por imagem de partícula é uma técnica que se dispõe a medir o campo instantâneo de velocidades de um escoamento. O processo consiste em capturar imagens de regiões do escoamento por meio de uma câmera de alta resolução, sincronizada a uma fonte de iluminação a *laser*. A iluminação é entregue de forma pulsada e focada em apenas um plano, suficientemente fino, para que apenas as partículas daquele plano sejam destacadas e não haja dispersão de luz das partículas em outros planos (Dantec [20]).

A velocidade é calculada medindo-se a distância que uma partícula percorre num curto espaço de tempo. O deslocamento é medido por meio da captura de duas imagens consecutivas, em que uma câmera especial é utilizada para que a primeira imagem (*frame*) seja armazenada rápida o suficiente para ser comparada com a segunda imagem. O tempo entre um *frame* e outro é pré-estabelecido e depende da velocidade do escoamento e do tamanho do campo. A maioria dos sistemas PIV atuais tem limite mínimo de tempo de 10 ns.

O PIV pode ser usado para diversas finalidades no campo da atomização e *sprays*. A aplicação mais recorrente é para avaliar o campo de velocidade das gotas. Em trabalho feito por Goldsworthy et al. [27] em 2011, o PIV foi adotado justamente para investigar a velocidade das gotas. Porém, em trabalho realizado por Rottenkolber et al. [57], técnicas de PIV bifásico foram utilizadas para analisar a interação entre o *spray* e o meio circundante (ar).

#### 2.9.4 *Particle Tracking Velocimetry – PTV*

*Particle Tracking Velocimetry* (PTV) e *Particle Image Velocimetry* (PIV) são ambas técnicas de velocimetria por imagem, que tem princípios de metodologia comuns. A determinação do deslocamento é factível, pois uma partícula pertence a um grupo característico (vizinhança), o qual tem um padrão local de distribuição específico. Para a comparação das vizinhanças no processo de avaliação, a maioria dos algoritmos usa análise de correlação-cruzada entre a vizinhança referenciada no primeiro frame e uma possível vizinhança candidata no segundo frame (Varga e Józsa [64]).

A diferença entre PTV e PIV é a forma de avaliar as imagens. Em PIV todas as imagens são subdivididas em pequenas e regulares subáreas denominadas de "áreas ou janelas de interrogação", as quais são avaliadas separadamente umas das outras. Assume-se que todas as partículas dentro de uma área de interrogação tenham se movido homoganeamente entre as duas gravações e que os deslocamentos dessas áreas de interrogação sejam determinados por correlação-cruzada entre a área de interrogação do primeiro frame e o movimento nas duas direções (2D) da área de interrogação correspondente (aquela que está na mesma posição) do segundo frame (Raffael et al. [51]).

Ou seja, o PIV está fornecendo um vetor de velocidade para cada janela de interrogação. Ao contrário, no PTV cada partícula é identificada separadamente no primeiro frame e possivelmente redescoberta no segundo frame. O deslocamento de cada partícula é efetivamente determinado usando a informação da vizinhança. Isto significa que o PTV fornece um vetor de deslocamento para cada partícula, o que é eficiente em termos de tempo de processamento para números baixos de partículas. Os vetores obtidos com o PTV não são regularmente localizados, então falsos vetores podem ser difíceis de eliminar. Entretanto, os vetores de velocidade resultantes permitem o rastreamento das partículas e elas não precisam ser distribuídas homogeneamente, além de o limite da extensão dos deslocamentos não precisar mais ser o tamanho da janela de interrogação (Varga e Józsa [64]).

De qualquer forma, uma janela de interrogação deve ser determinada para o uso do PTV, pois é através dela que o deslocamento é, propriamente, detectado, com a diferença de que a janela é usada para cada partícula e não um grupo delas. Na janela de interrogação definida, o *software* faz uma correlação entre as duas exposições. Na distância que a gota se move relativa à posição inicial (i.e. primeira exposição) haverá um pico na função de correlação devido ao padrão de pixels "iluminados" - como a luz está se dispersando nas partículas em todas as direções, elas se tornam fontes de pontos de luz visíveis na imagem. A posição desse pico de correlação relativa à origem do sistema define o deslocamento sofrido pela partícula. Um deslocamento inicial (*initial shift*) é determinado e representa o tanto que a segunda janela de interrogação está deslocada da primeira (primeiro *frame*). Isto efetivamente move a janela de interrogação na direção que as gotas estão se movendo e ajuda a melhorar a correlação (LaVision [34]).

### 2.9.5 *Shadowgraphy*

O método de *Shadowgraphy* se baseia na avaliação de imagens. Além de calcular o campo de velocidades das partículas, por meio do sistema PTV, parâmetros como tamanho de gota e a distribuição desses tamanhos em uma determinada região do *spray* também são obtidos com a técnica.

Da mesma forma que o PIV, a técnica é baseada em imagens de alta resolução e iluminação pulsada, portanto o *laser* continua sendo a fonte de iluminação pulsada, a câmera fotográfica continua sendo de alta resolução e apenas adicionam-se um difusor e um conjunto de lentes especiais, para que seja possível fornecer uma luz difusa no fundo do volume a ser medido e produzir a sombra.

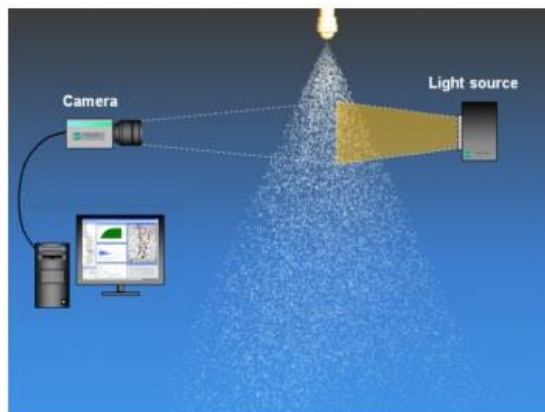


Figura 15: Esquema de instalação do sistema de *Shadowgraphy* (Extraída de <<http://www.dantecdynamics.com>>).

No esquema da Figura 15, de um lado o *spray* é iluminado pela fonte de luz e de outro, alinhado ao *laser*, a câmera fotografa o escoamento. A vantagem deste método está em seu conceito de que ‘o que é visto é o que será medido’ e de que nenhuma informação prévia sobre as partículas é requerida (Dantec [20]). Esta tecnologia foi adotada para o trabalho e será descrita com mais detalhes no Capítulo 3.

## 2.10 Medidas de Parâmetros de Atomização em Injetores Automotivos com Técnicas a *laser*

Este item se destina a mostrar o estado de arte dos estudos relacionados ao tema no qual o presente trabalho se insere.

No caso da combustão, a atomização mais refinada garante mais eficiência no processo de mistura com o ar de admissão e este refino é quantificado pelo tamanho das gotas formadas no processo: quanto menores melhor a atomização. Diversos estudos foram realizados na área com intuito de associar propriedades dos fluidos ou condições operacionais com os parâmetros de atomização, em especial diâmetro de gotas, penetração, ângulo, velocidade e distribuição. Em estudo realizado na década de 90, Chen et al. [12] observaram a diminuição de SMD, de 52 a 37  $\mu\text{m}$ , com a diminuição da viscosidade, de 13 a 0,5  $\text{mkg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ , para atomizadores mecânicos-centrífugos. Também observaram a relação de SMD com a pressão de injeção e o quanto a dependência de SMD com a viscosidade diminui com o aumento da pressão de injeção. Os fluidos de teste utilizados foram água e água com glicerina.

Em se tratando de medições de parâmetros de atomização utilizando álcool, gasolina ou misturas destes como combustível de teste, quase a totalidade dos trabalhos encontrados na área estudaram bicos injetores automotivos de injeção direta. As técnicas ópticas utilizadas para efetuar as medidas foram as mais diversas, como *Shadowgraphy*, PIV, PDI, Difração de *laser* e Fotografia de *Shilieren*.

Diversos autores investigaram experimentalmente o comportamento de SMD em função da variação de alguns parâmetros. Lee et al. [37], em 2001, utilizaram gasolina em seus experimentos e concluíram que o SMD diminui (de 16 para 14,2  $\mu\text{m}$ ) com o aumento da pressão de injeção (de 5 para 7 MPa) e com o aumento da distância axial a partir do orifício de descarga. Já Zhang et al. [73], que também variaram a pressão de injeção, porém utilizando Isooctano como fluido, encontraram o mesmo resultado qualitativo, porém tamanhos de gota maiores para a pressão de 7 MPa, de 16-27  $\mu\text{m}$ . Para o Etanol, eles encontraram valores de SMD em torno de 11-22  $\mu\text{m}$ . Ainda dispendo da pressão como parâmetro de entrada, Wang et al. [70] variaram a pressão de injeção do etanol e do ambiente onde o jato é lançado e obtiveram mudanças nos parâmetros de atomização. Tanto o etanol quanto a gasolina demonstraram aumento na penetração e ângulo de cone com o aumento da pressão de injeção. Já o SMD foi testado para pressões ambientes diferentes e constatou-se que há diminuição nos valores do diâmetro com o aumento desta pressão.

Posteriormente, em 2011, Goldsworthy et al. [27] comprovaram a diminuição de SMD com a diminuição da viscosidade do líquido, porém utilizando diesel e mistura de diesel e canola 75% como combustível de teste. Importantes observações quanto à distância axial de medição,

tendo como origem o orifício de descarga, foram feitas por eles. Para uma penetração de ~140 mm, a distância axial ótima de medição é de 100-120 mm. Acima disto o *spray* é muito denso e abaixo pouco denso. Isto foi levado em consideração para os testes realizados no trabalho.

Em trabalho mais recente, realizado por Aleiferis et al. [2], tanto a gasolina quanto mistura de etanol e gasolina (E85) apresentaram variações no SMD com a variação da pressão de injeção e da temperatura do combustível. O aumento da temperatura, que causa redução da viscosidade, fez o SMD decrescer, ao passo que o aumento da pressão de injeção tornou o SMD menor. Os valores encontrados foram em torno de 22-8  $\mu\text{m}$  para a gasolina e 27-10  $\mu\text{m}$  para E85.

Gao et al. [24] e Park et al. [46] também realizaram medidas com gasolina, etanol e misturas dos dois procurando observar aspectos mais qualitativos ou macroscópicos do *spray*, em que o foco principal era comparar os combustíveis. Dentre os resultados, tem-se, por exemplo, que o álcool puro ou misturado com proporções baixas de gasolina oferece menor penetração e maior ângulo de cone de *spray* do que para a gasolina pura.

Anand et al. [3] é o trabalho mais próximo do que foi realizado aqui, pois avalia a injeção indireta de combustíveis. O tamanho das gotas encontradas por eles, por meio de SMD, foi na ordem de 130  $\mu\text{m}$  para misturas de gasolina e etanol na pressões de injeção de 2,5 e 6 bar.



## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi concebido com o propósito de investigar a influência da temperatura em alguns parâmetros de atomização, como tamanho de gota, campo de velocidade das gotas e distribuição do tamanho das gotas.

O processo de atomização que se almejou estudar foi o de um injetor de combustível utilizado em motores de combustão interna ciclo Otto e o método óptico escolhido para efetuar a medição dos parâmetros deste processo foi o *Shadowgraphy*.

Para que fosse possível reproduzir o mecanismo existente em sistemas de injeção em motores, construiu-se uma bancada para representar o sistema de injeção de combustível. Para reproduzir a variação da temperatura do combustível, integrou-se à bancada um sistema de troca de calor e para medir os parâmetros de atomização adaptou-se o equipamento completo a um sistema de medição a *laser*.

### 3.1 Aparato Experimental

O aparato experimental completo é composto por uma bancada, que comporta o sistema de injeção de combustível, e um equipamento independente com um trocador de calor, ambos centralizados entre os equipamentos que compõem o *Shadowgraphy* (uma câmera, um *laser*, um difusor e um conjunto de lentes especiais).

#### 3.1.1 Construção da Bancada de Testes

A bancada de testes foi projetada pela presente aluna e construída pela empresa Magneti Marelli Sistemas Automotivos Ltda e doada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas. Os testes foram realizados na Faculdade de Engenharia

Química da UNICAMP, no Laboratório de Pesquisa em Processos Químicos e Gestão Empresarial (PQGe), que possui o equipamento de diagnóstico a laser – *Shadowgraphy* - e onde a bancada foi instalada.

A bancada de testes foi construída com o intuito de gerar um equipamento que tivesse um sistema de injeção de combustível autônomo capaz de ser adaptado a medições a *laser*. Para tanto, precauções como uma câmara transparente no entorno do injetor de combustível e dimensões de acordo com o espaço onde o *Shadowgraphy* está instalado tiveram de ser tomadas.

A unidade experimental é composta por três grandes grupos, divididos da seguinte maneira: sistema hidráulico, sistema eletrônico e sistema térmico. O detalhamento de cada grupo encontra-se relatado a seguir:

### Sistema Hidráulico

O projeto hidráulico diz respeito ao circuito de passagem do combustível líquido, do tanque de combustível até o injetor. Para auxiliar no percurso do líquido foram alocados os seguintes componentes: bomba elétrica de combustível (automotiva comum), filtro de combustível, regulador de pressão, manômetro e galeria de combustível.

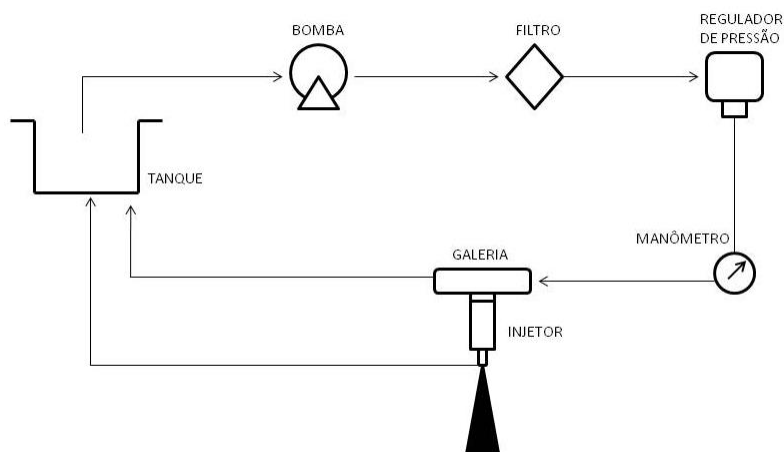


Figura 16: Esquema do sistema hidráulico da bancada de testes.

### Sistema eletrônico

O projeto eletrônico abriga o *driver* de pilotagem do injetor, um transformador de tensão de 12 V para 220 V para ligá-lo à tomada, e uma fonte 12V/15A para ligar a bomba elétrica.

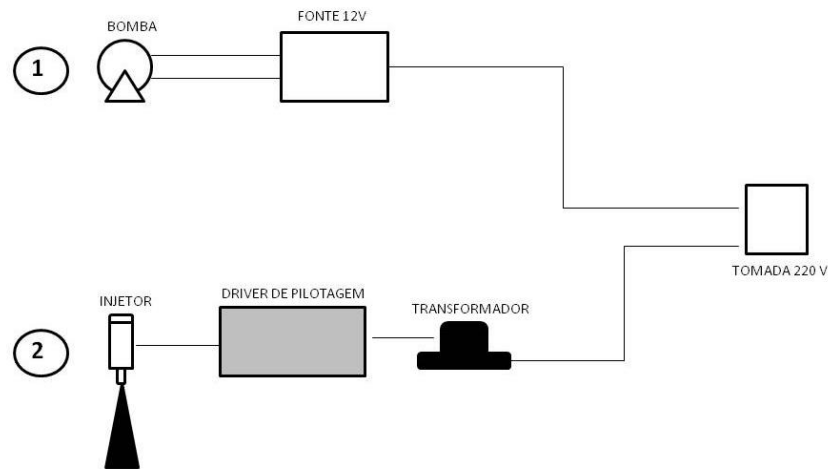


Figura 17: Esquema do sistema eletrônico da bancada de testes.

Sistema térmico:

O projeto térmico tem como objetivo realizar trocas de calor com o combustível a ser injetado para que a sua temperatura possa ser variada. Consiste de um trocador de calor, uma serpentina posicionada dentro do tanque e dois termopares.

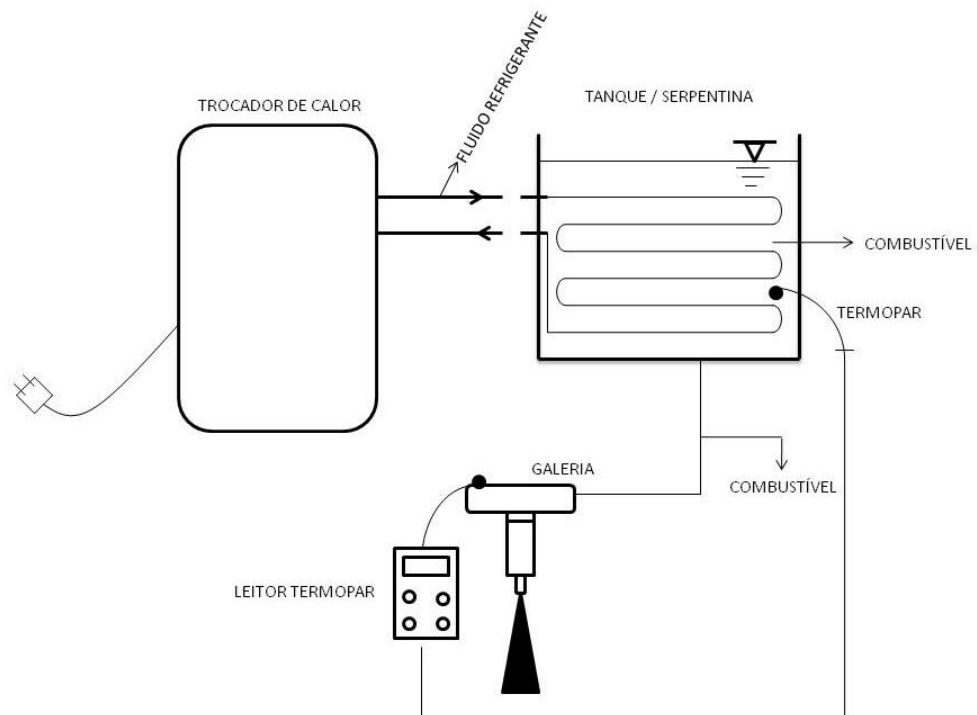


Figura 18: Esquema do sistema térmico da bancada de testes.

O trocador de calor é de fabricação da empresa HAAKE e suas especificações técnicas são: modelo HAAKE F3, capacidade 12 litros, 220V, 50-60 Hz, 1100 VA. O termômetro digital, composto por dois termopares mais o leitor e *display* são da marca Minipa, modelo MT-405 e precisão de 1° C.

### 3.1.2 Projeto Final da Bancada de Testes

O projeto final encontra-se esquematizado na Figura 19 a seguir, com os principais componentes indicados. A dimensão da bancada é de 140 x 70 x 50 cm total e a da câmara transparente 30 x 70 x 50 cm, feita de Policarbonato (material transparente e altamente resistente) e projetada com tais dimensões para impedir que o cone do *spray* atingisse qualquer uma das paredes.

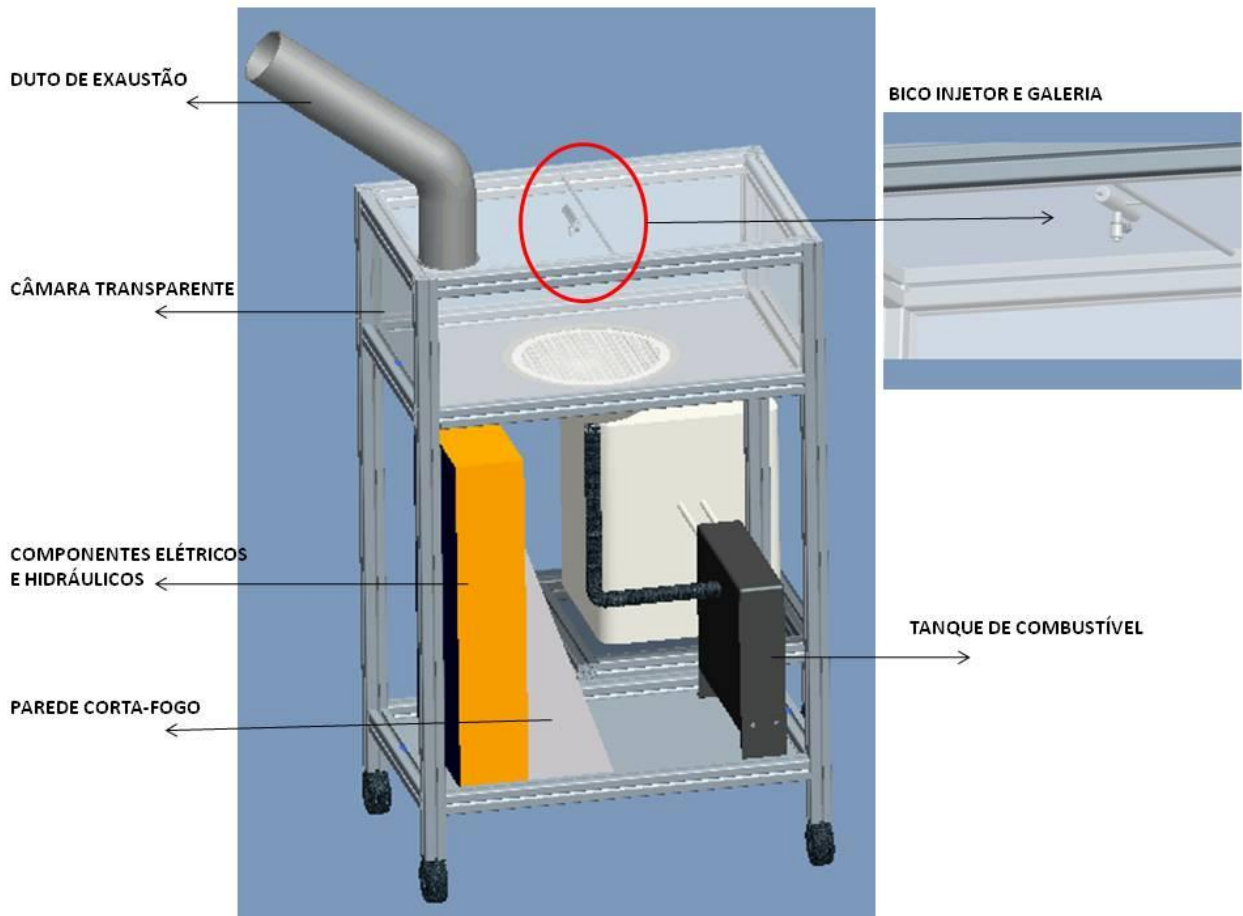


Figura 19: Bancada de testes detalhada – vista 1.

A finalidade de se ter uma câmara transparente abrigando o injetor é permitir que o *spray* possa ser iluminado e fotografado pela câmera fotográfica que compõe o *Shadowgraphy*. Parte do sistema hidráulico e todo o sistema elétrico, descritos anteriormente, estão inseridos na “caixa” onde estes componentes estão indicados na Figura 19.

A parede corta-fogo serve como uma barreira para evitar contato da parte elétrica com o combustível do tanque.

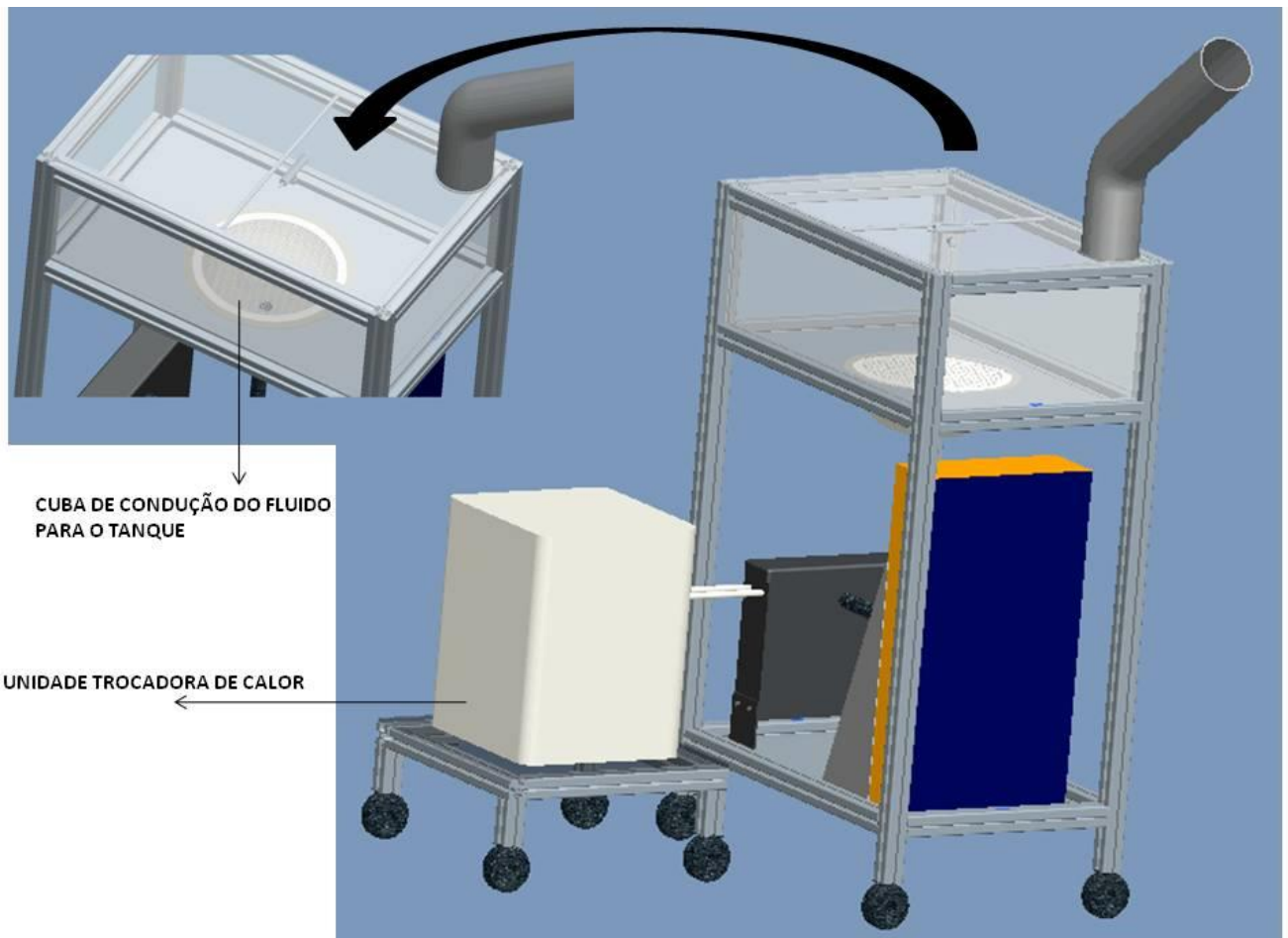


Figura 20: Bancada de testes detalhada - vista 2.

Vale ressaltar que o fluido de trabalho da unidade trocadora de calor é água com aditivo de radiador a base de Monoetilenoglicol e que a serpentina por onde o fluido transita está conectada a outra serpentina localizada no interior do tanque de combustível. A cuba, localizada na parte inferior da câmara de injeção, tem a função de melhor conduzir o combustível de volta para o tanque.

### 3.1.3 Sistema Óptico de Medição

O sistema óptico de medição utiliza a tecnologia de *Shadowgraphy* e tem o nome comercial de *ParticleMaster Shadow*, confeccionado pela LaVision. O volume a ser medido é iluminado por uma luz difusa, fotografado por uma câmera de alta resolução e analisado por um *software* próprio do equipamento.

#### 3.1.3.1 Sistema de Iluminação e Aquisição de Imagens

O sistema de iluminação do *Shadowgraphy* é composto por um *laser* pulsado Nd:YAG (Neodímio: Ítrio-Alumínio-Gálio) de duas cavidades e pulso de 50 mJ, com duração de 8 ns, comprimento de onda de 532 nm e frequência máxima de 5 Hz. Leva o nome comercial de *Big Sky Ultra PIV 50* e é fabricado pela Quantel (Figura 21 o *laser* e Figura 22 o sistema de refrigeração do mesmo).



Figura 21: Imagem do sistema *laser* Nd:YAG – ‘cabeça’ do *laser* por onde a luz é emitida e enviada ao difusor por fibra óptica.



Figura 22: Imagem das Fontes de refrigeração (a água) do *laser*.

O difusor, conectado ao *laser* por meio de fibra óptica, serve para fornecer a luz de fundo, característica do *Shadowgraphy*. A iluminação é transmitida do *laser* para o difusor, o qual está posicionado atrás do volume de testes, agindo como uma luz de fundo. A iluminação tem formato circular, devido à geometria do difusor, como pode ser visto na Figura 23, e é transmitida de forma pulsada também. É um difusor com placa de corante e seu nome comercial é *High Efficiency Diffuser*, fornecido pela LaVision.



Figura 23: Imagem do Difusor de luz – acoplado ao laser por fibra óptica.

Para a aquisição de imagens conta-se com uma câmera digital, com nome comercial de *Imager Intense*, de alta sensibilidade e alta resolução, da LaVision. Ela possui um sensor CCD (*charge coupled device*) de 1376 pixels x 1040 pixels, com imagem digital de 12 bit, tempo de exposição de 500-1000 ns, tempo de *interframe* de até 500 ns e taxa de *frame* de 10 *frames/s*. Sua



lente objetiva, *12X (Ultra) Zoom Lens*, é específica para altas ampliações, com faixa de *zoom* de 12X (0,58 a 7X), distância focal variando de 32 a 341 mm, abertura numérica de 0,018 - 0,1 e campo de visão de 0,01 mm a 83 mm. Consiste de um corpo principal de lentes, da marca NAVITAR, e uma variedade de acessórios opcionais e obrigatórios, dentre os quais a lente adicional de 0.25X foi escolhida, com intuito de aumentar a distância de trabalho. Um filtro passa-banda, modelo VZ07-0132, da LaVision, de 532 nm é fixado na lente mais superficial da câmera.

O *software* PTU9 (*Programmable Timing Unit, versão 9*) vem integrado à câmera e funciona como um sincronizador entre a captura de imagem da câmera e a emissão da luz do *laser*. A câmera CCD trabalha com base no efeito fotoelétrico, convertendo fótons em cargas elétricas.



Figura 24: CCD câmera *Imager Intense* com lente *12X Ultra Zoom Lens*.

### 3.1.3.2 Sensor CCD e Magnificação da Imagem

Sensores CCD consistem em milhares (ou milhões) de células sensíveis à luz ou *pixels* que são capazes de produzir uma carga elétrica proporcional à quantidade de luz que recebem. Cada *pixel* (elementos de imagem) tem um tamanho na ordem de  $10\ \mu\text{m} \times 10\ \mu\text{m}$ . Um dos parâmetros fundamentais de um CCD é a resolução, que é igual ao número total de *pixels* que compõe a área sensível à luz do dispositivo. Os sensores CCD são, em essência, circuitos integrados e são, portanto, como *chips* de computador (Taylor [63]).

O sensor CCD da câmera utilizada é de 1376 x 1040 pixels, sendo 6,45 x 6,45  $\mu\text{m}^2$  a dimensão de cada pixel, e formato 2/3". O tamanho do sensor pode influenciar diferentes aspectos da fotografia.

Um deles é o fator de corte, que é o tamanho da diagonal do sensor comparado com um sensor *full-frame* 35 mm.. É chamado assim porque efetivamente corta a imagem. Quase todas as lentes são mais nítidas em seus centros, enquanto a qualidade se degrada progressivamente em direção às bordas. Isto significa que um sensor "cortado" eficazmente descarta as porções de qualidades mais baixas da imagem, o que é bastante útil quando se usa lentes de baixa qualidade. Por outro lado, descarta parte da informação da imagem. Outro aspecto é a profundidade do campo de visão, que diminui com o aumento do sensor para uma dada abertura da lente. Isto porque sensores maiores requerem que a câmera se aproxime mais do objeto ou que as distâncias focais sejam maiores, de forma a preencher o quadro com o objeto/assunto. O terceiro aspecto relaciona a difração ao tamanho do sensor, que, de forma geral, dita que sensores maiores podem utilizar aberturas menores antes que os efeitos da difração possam ser evidenciados. O último aspecto influenciado pelo tamanho do sensor é o tamanho do *pixel*. Sensores maiores normalmente possuem *pixels* maiores, que lhes dão potencial de produzir menor ruído de imagem e aumentar a faixa dinâmica, que é a gama de tons que um sensor pode capturar (Cambridge in Colour [10]).

A magnificação da imagem descreve o tamanho que um objeto aparece no sensor comparado ao seu tamanho real (Cambridge in Colour [10]). Para o presente trabalho foi utilizada um *zoom* de 6X na lente, com tubo de extensão de 1X e uma lente acessório de 0,25X, portanto a magnificação resultante do sistema (tamanho da imagem/tamanho do objeto) é de 1,5X ( $6 * 1 * 0,25 = 1,5$ ).

Com esta magnificação, o campo de visão obtido foi de 4 x 3 mm e a resolução do sistema 2,95  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ .

### 3.1.3.3 Processamento do *Shadowgraphy*

O sistema de controle da iluminação e aquisição das imagens, bem como o processamento delas é feito pelo *software* DAVIS 7, da LaVision, que está instalado em um computador INTEL quad core 2, 4 Gb de memória e 250 Gb de disco rígido, fornecido pela LaVision.

A técnica de *Shadowgraphy* é baseada em imagem de alta resolução e iluminação pulsada de fundo. Para medir as partículas, um algoritmo de segmentação (com dois passos) é aplicado às imagens. Como o próprio nome denuncia, o *Shadowgraphy* analisa as imagens por uma técnica de sombra ou contraste entre iluminação e partícula.

O princípio básico do algoritmo utilizado no processamento é a inversão da imagem capturada, que inicialmente é mais clara no fundo, devido à iluminação do *laser*-difusor, e mais escura na frente, de acordo com as partículas que estão sendo medidas. Esta inversão da imagem proporciona intensidade alta para as partículas e baixa para a luz de fundo, o que é feito subtraindo-se a imagem a ser medida de uma imagem de referência. As duas segmentações serão feitas nesta imagem invertida (LaVision [35]).

A primeira segmentação é feita de acordo com um valor delimitador, escolhido pelo usuário, que representa a diferença entre máxima e mínima intensidades, i.e o grau de contraste requerido. O algoritmo vai detectar as partículas e selecionar regiões cujo contraste esteja acima do valor delimitador.

As regiões que foram selecionadas na primeira segmentação seguirão para a segunda segmentação, onde serão particionadas em área menores e analisadas individualmente.

Algumas correções são aplicadas para a validação das partículas, antes que possam seguir para os cálculos estatísticos. Elas se fazem necessárias pelo fato de que o volume a ser examinado pelo *software* DAVIS 7 varia de acordo com o tamanho da partícula, porém deve ser compatível com a resolução espacial e os limites de detecção (LaVision [35]).

Uma vez detectadas, corrigidas, se necessário, e validadas, as partículas serão submetidas aos cálculos estatísticos: diâmetros representativos e velocidade das partículas, baseada no deslocamento detectado pelo algoritmo e no tempo conhecido entre uma imagem e outra.

### 3.1.4 Disposição da Bancada no Laboratório

O resultado final da disposição dos equipamentos no laboratório onde ocorreram os testes está esquematizado na Figura 25:

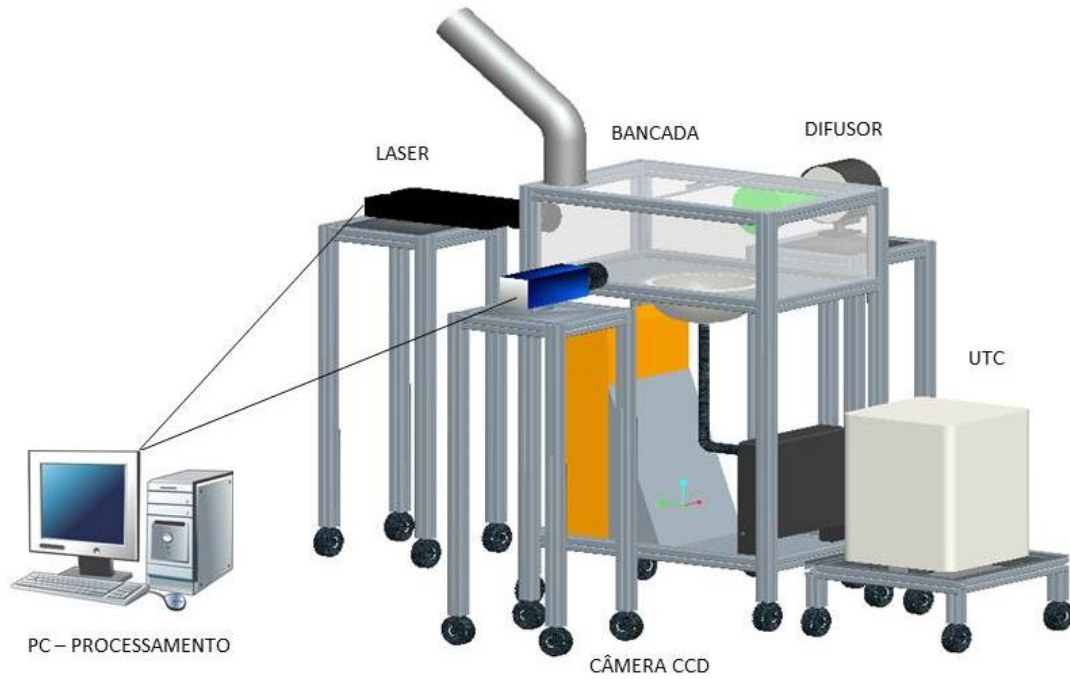


Figura 25: Esquema da disposição final dos equipamentos.

A imagem real do equipamento instalado no laboratório se encontra a seguir:



Figura 26: Disposição final dos equipamentos.

## 3.2 Condições de Teste

### 3.2.1 Especificações dos Combustíveis de Teste

Gasolina comercial padrão tipo C e álcool etílico hidratado veicular foram utilizados no trabalho. Conforme explicado em capítulo anterior, as propriedades dos fluidos de maior interesse, quando se deseja analisar a atomização, são densidade, viscosidade e tensão superficial. Para os combustíveis em teste, as propriedades estão listadas na Tabela 2, todas cedidas pelo fornecedor do produto.

Um teste específico foi conduzido para elucidação do comportamento da viscosidade em função da temperatura. Os resultados encontram-se nas Figuras 27 e 28.

GASOLINA	
Composição	Hidrocarbonetos (75 – 87%) e álcool anidro (13 – 25%)
Faixa de destilação	27 – 220 °C a 101,325 kPa
Pressão de vapor	79 kPa a 37,8 °C
Densidade	0,73 – 0,77 g/cm <sup>3</sup>
ETANOL	
Composição	Etanol (92,6 – 93,8%) e água (6,2 – 7,4%)
Ponto de ebulição	77 °C a 101 kPa
Densidade	0,8093 g/cm <sup>3</sup>

Tabela 2: Especificação dos combustíveis de teste.

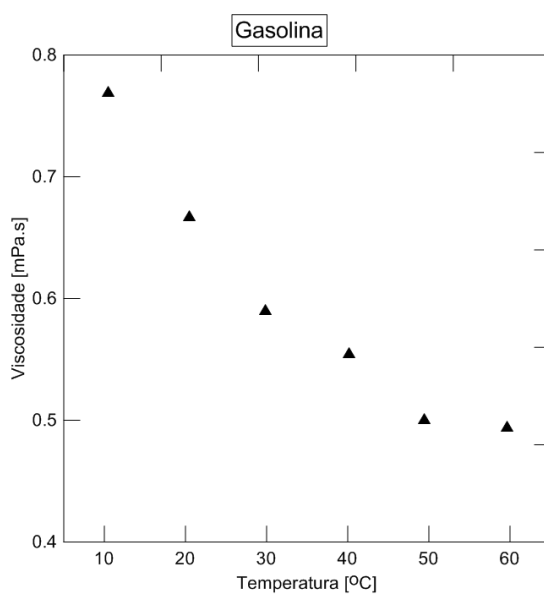


Figura 27: Variação da viscosidade da gasolina em função da temperatura.

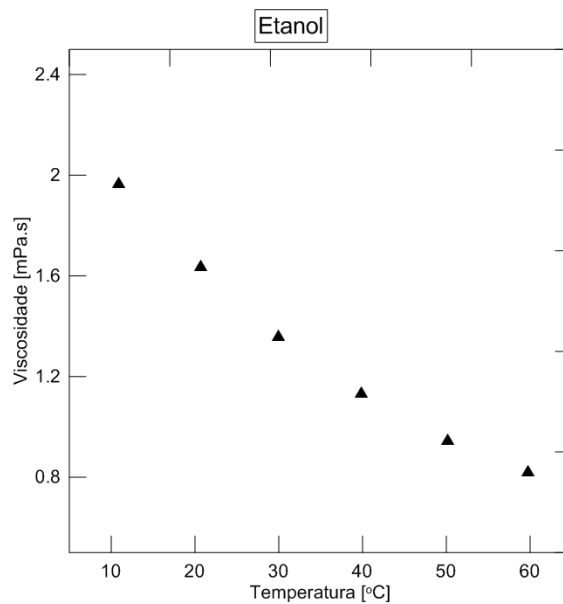


Figura 28: Variação da viscosidade do etanol em função da temperatura.

Os testes de viscosidade em função da temperatura foram realizados em um reômetro rotativo da marca HAAKE, modelo HAAKE MARS III, pelo laboratório CEPETRO da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp e é mostrado na Figura 29.



Figura 29: Reômetro rotativo da Haake (Extraída de <[www.thermoscientific.com](http://www.thermoscientific.com)>).

É um viscosímetro rotativo do tipo placa-placa, que, conforme descreve Machado [41], determina a viscosidade de acordo com a seguinte equação:

$$\mu_L = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{60g}{\pi^2 r^4} * \frac{Tq}{N} \quad (3.1)$$

Onde  $\mu_L$  é a viscosidade dinâmica,  $\tau$  é a tensão cisalhante,  $\gamma$  é a taxa de cisalhamento,  $g$  é a distância entre as placas,  $r$  é o raio da placa circular,  $Tq$  é o torque a ser medido e  $N$  é a velocidade de rotação.

Para a faixa de temperatura estabelecida, 10-60 °C, a gasolina proporcionou uma variação da viscosidade num fator (*máximo valor/mínimo valor*) de 1,55 e o etanol de 2,4.

Os dados sobre a variação da tensão superficial com a temperatura foram extraídos da literatura, uma vez que não foi possível realizar os testes em laboratório por falta de equipamento adequado. Interpolando linearmente os dados encontrados por Vázquez et al. [65] para a mistura de água e etanol (álcool hidratado), o gráfico da Fig. 30 foi obtido. Como a proporção de etanol no combustível varia de 92,6 a 93,8 %, a média aritmética desses dois valores foi escolhida para representar a propriedade de tensão superficial da mistura, qual seja 93,2 %. Os valores da referência estão apresentados na Tabela 3.

Etanol %	$\sigma/(\text{mN}\cdot\text{m}^{-1})$ a Temperatura/(°C)						
	20	25	30	35	40	45	50
90	23,23	22,72	22,32	21,94	21,53	21,13	20,71
100	22,31	21,82	21,41	21,04	20,62	20,22	19,82

Tabela 3: Variação da tensão superficial do etanol com a temperatura (Extraídos de Vázquez et al. [65]).

Os testes foram realizados utilizando um tensiômetro Prolabo. As soluções foram preparadas por peso com desvios de até 0,3 %. Cada valor mostrado é a média de 5-10 medições com desvio máximo de 0,4 % (Vázquez et al. [65]).



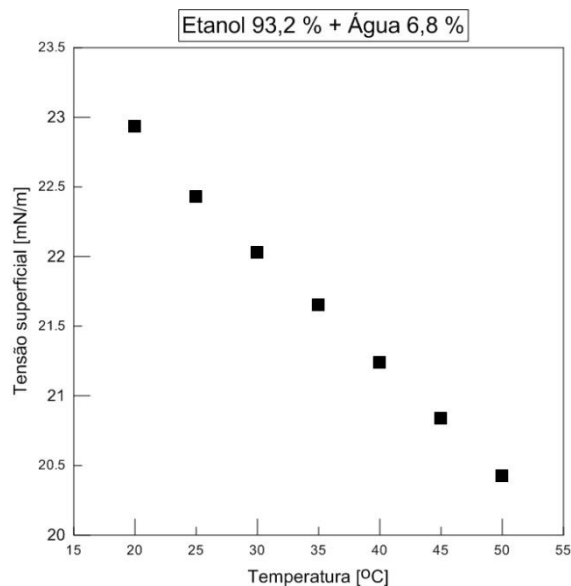


Figura 30: Variação da tensão superficial do etanol em função da temperatura para os dados interpolados da Tabela 3 (Fonte dos dados: Vázquez et al. [65]).

Para a faixa de temperatura estabelecida, 10-50 °C, o etanol proporcionou uma variação máxima da tensão superficial de um fator de 1,12.

Em se tratando da tensão superficial da gasolina, não foi possível encontrar na literatura dados de sua variação com a temperatura, mas apenas o valor a 20 °C, respeitando a composição de gasolina (75 – 87%) e álcool anidro (13 – 25%). Como a proporção de hidrocarbonetos no combustível varia de 75 a 87%, a média aritmética desses dois valores foi escolhida para representar a propriedade de tensão superficial da mistura, qual seja 81% e, portanto, a quantidade de álcool é representada por 19%. De acordo com os dados encontrados em Wang et al. [66], a tensão superficial da gasolina nestas condições é de 21,59 mN/m.

### 3.2.2 Injetor de Combustível

O bico injetor de combustível escolhido para os testes é fabricado pela empresa Magneti Marelli Sistemas Automotivos, com nome comercial de IPE009, e pode ser visualizado na Figura 31. Foi escolhido pelo fato de o *spray* gerado possuir características similares a maioria dos

injetores utilizados em motores com injeção no p $\acute{o}$ rtico e ser adequado para avaliar a influ $\acute{e}$ ncia da temperatura do combust $\acute{i}$ vel na atomiza $\acute{c}$ o. Suas caracter $\acute{i}$ sticas t $\acute{e}$ cnicas est $\acute{o}$  descritas na Tabela 4. Testes pr $\acute{e}$ vios foram realizados nos injetores selecionados quanto  $\grave{a}$  repetibilidade de suas propriedades, a fim de se garantir consistentes condi $\csc$ oes de opera $\csc$ o. Este bico injetor  $\acute{e}$  utilizado em motores de inje $\csc$ o indireta.



Figura 31: Injetor de combust $\acute{i}$ vel utilizado nos testes.

BICO INJETOR IPE009					
Ângulo de abertura do cone	Vazão dinâmica (g/1000 inj) @ 2,7 bar	Vazão estática (g/s)	Resistência ( $\Omega$ )	Indutância (mH) @ 1000 Hz	Número de furos
$15^{\circ} \pm 3,5^{\circ}$	$4,4 \pm 3,5\%$	$2,5 \pm 3\%$	$12,5 \pm 5\%$	$8,7 \pm 20\%$	4
Diâmetro dos furos (mm)	Comprimento dos furos (mm)	Razão comprimento/diâmetro			
0,255	$0,2 \pm 0,02$	0,78			

Tabela 4: Especifica $\csc$ oes do injetor de combust $\acute{i}$ vel.

### 3.3 Calibra $\csc$ o do Sistema de Medida $\csc$ o

A calibra $\csc$ o do sistema de medida $\csc$ o  $\acute{e}$  a etapa em que os dispositivos do *Shadowgraphy* s $\tilde{a}$ o ajustados em conformidade com o que se deseja medir e as configura $\csc$ oes que o *software*

DAVIS 7 requer, para interpretar as imagens que forem capturadas durante o procedimento experimental, são fornecidas.

Primeiramente, é necessário ajustar três parâmetros relativos à câmera fotográfica: a distância de trabalho da câmera, o foco e a ampliação da lente que será utilizada. A ampliação da imagem visa obter um campo de visão pequeno o suficiente a ponto de garantir resolução adequada da imagem. Para *sprays* de bicos injetores de combustível, a magnificação da imagem deve ser tal que o campo tenha dimensões milimétricas, devido à dimensão das partículas formadas. Em conformidade com a magnificação adotada, a distância de trabalho e o foco devem garantir que a imagem que está sendo capturada no plano focal esteja perfeitamente nítida.

Em seguida, é preciso fornecer a escala real do objeto / volume a ser examinado, o que é feito associando-se o número de *pixels* contidos em uma determinada região da imagem à dimensão real daquele trecho. Para tanto, posiciona-se no plano de medidas uma régua, ou qualquer dispositivo de aferição, e captura-se uma imagem. Nesta imagem, selecionam-se dois pontos com distância conhecida, que, no caso, é determinada pela marcação da régua, e o DAVIS 7 associa com a quantidade de *pixels* existentes entre estes dois pontos. A origem do sistema de coordenadas também deve ser fornecida e fica a cargo do usuário.

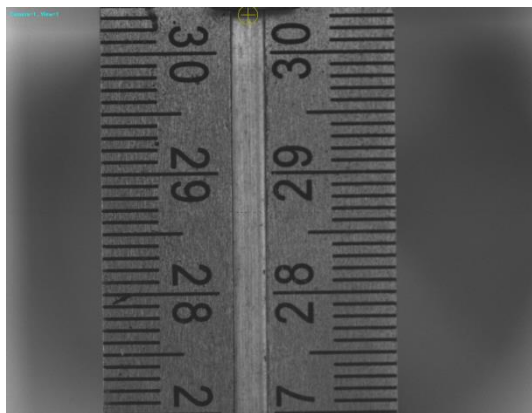


Figura 32: Imagem da calibração.

A Figura 32 mostra uma imagem capturada para a calibração da bancada de testes, porém, vale ressaltar, que esta imagem em escala real é uma foto 3 x 4 cm. Como a resolução necessária para calcular parâmetros de *spray* de bicos injetores automotivos exige que se tenha um campo de visão de ordem milimétrica, a ampliação da lente da câmera é ajustada de modo a atingir este

valor, portanto esta é apenas uma imagem ilustrativa para permitir melhor visualização. Na parte de cima da figura é possível visualizar a ponta do bico injetor e uma marcação, que é a origem do sistema de coordenadas.

Posteriormente, faz-se necessário fornecer uma imagem de referência ao *software*, o que é feito por meio da aquisição de imagens iluminadas pelo *laser*, porém sem o escoamento envolvido. Isto porque o *Shadowgraphy* trabalha com subtração e inversão de imagens em seus cálculos:

(imagem invertida = imagem de referência - imagem da partícula).

Para corrigir a imagem de referência basta ajustar a potência dos dois disparadores do *laser*, até que se perceba que a iluminação está uniforme e que os dois *frames* estão com iluminação semelhante, isto é, os dois pulsos do *laser* estão aparentemente com a mesma intensidade.

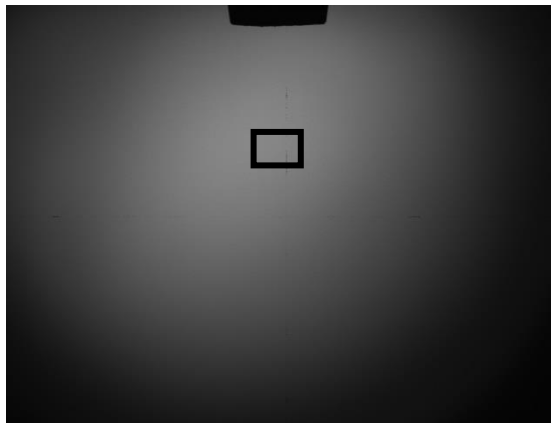


Figura 33: Imagem de referência.

A Fig. 33, assim como a Fig. 32, é apenas ilustrativa. Uma imagem real de referência para o caso em questão teria dimensões aproximadamente iguais a do quadrado assinalado na figura.

Por último, faz-se necessário selecionar o intervalo de tempo ( $dt$ ) entre um pulso e outro do *laser*, com intuito de garantir que os pares de partículas tenham uma separação adequada para o cálculo da velocidade. A LaVision recomenda que para densidade de escoamento alta o valor de “ $dt$ ” seja baixo, portanto para o presente trabalho um  $dt$  de 5  $\mu$ s foi escolhido.

Existe, ainda, outro procedimento de calibração, denominado “calibração de profundidade de campo” (*depth of field calibration* - DoF). Seu intuito é fornecer informações acerca da

profundidade do campo de visão do objeto/assunto que está sendo medido. Sua aplicação demanda a utilização de uma placa (“placa DoF”) com diversas circunferências impressas cujos diâmetros são conhecidos com precisão de  $\pm 2\%$ . Esta calibração só se faz necessária se a vazão mássica for o escopo de medição, pois, neste caso, é necessário ter conhecimento das três dimensões do objeto a ser medido, uma vez que a vazão leva em conta o volume. Caso contrário, para os parâmetros bidimensionais medidos no presente trabalho, ela não é obrigatória e não afeta os resultados.

### **3.4 Procedimento Experimental**

Depois de finalizada a etapa de calibração do sistema de medição, o experimento pode ser iniciado. A temperatura de trabalho deve ser selecionada no trocador de calor, porém esta é a temperatura do fluido de refrigeração que circula na serpentina e não a temperatura do combustível propriamente dita. Para tanto, um termopar foi instalado dentro do tanque de combustível, a fim de reconhecer a temperatura do combustível no tanque, e outro termopar foi instalado na entrada do bico injetor, mais especificamente na galeria de combustível. A diferença entre a temperatura exibida no trocador de calor e a exibida na entrada do injetor é de aproximadamente  $4^{\circ}\text{C}$  no sistema já estabilizado, o que leva cerca de 20 min para acontecer. As temperaturas que serão consideradas para fins de experimento, aqui denominadas de temperatura do combustível, serão as da entrada do injetor, portanto 20 min adicionais serão necessários para permitir que o fluido dentro do injetor atinja temperatura similar a da galeria de combustível.



Figura 34: Trocador de calor – seleção da temperatura.

O próximo passo é configurar o tipo de operação do bico injetor, o que inclui a escolha de uma rotação apropriada da máquina em [RPM], que simula a rotação do motor do veículo, da largura do pulso do injetor (tempo de injeção) em [ms] e da pressão de trabalho em [bar].

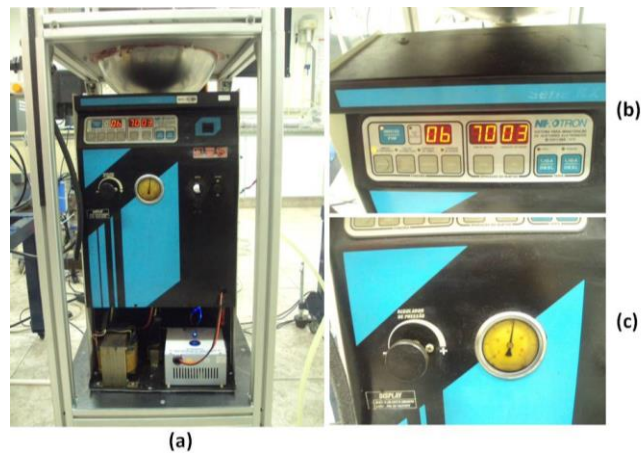


Figura 35: Seleção dos parâmetros de operação do injetor: (a) máquina completa; (b) painel de controle; (c) ajuste de pressão.

A próxima etapa consiste em disparar o *laser* e iniciar a gravação das imagens, comandos estes que são efetuados por intermédio do *software* DAVIS 7.

Antes de iniciar o processamento das imagens é preciso realizar um pré-processamento da imagem de referência. A quantidade de imagens de referência, que é fornecida na etapa de calibração do sistema, é selecionada pelo usuário e indica-se que seja feita uma média aritmética

dessas imagens para resultar em apenas uma. Feito isso, configuram-se os parâmetros de processamento e inicia-se o processo.

Os parâmetros de saída são: diâmetros representativos - D10, D32,  $D_{0.1}$ ,  $D_{0.5}$ ,  $D_{0.9}$  – campo de velocidades e distribuição das partículas. Para cada temperatura testada, é necessário deixar o sistema entrar em regime permanente e coletar novas imagens para serem processadas, porém a etapa de calibração não precisa ser repetida.

As temperaturas utilizadas no trocador de calor foram 10, 20, 30, 40, 50 e 60 °C. Para cada temperatura foram calculados: D10 (média aritmética dos diâmetros), D32 (SMD) e campo de velocidade das partículas. Além disso, questões qualitativas sobre o aspecto do *spray* foram abordadas. A pressão de injeção, rotação do motor e largura de pulso foram mantidos constantes para todos os testes e receberam os valores de 3 bar, 5000 rpm e 5 ms, respectivamente. Todas as medidas foram tomadas nas distâncias axiais de 25 mm e 100 mm abaixo do orifício de descarga do injetor, em coordenadas verticais, e no centro do *spray* em coordenadas horizontais, conforme pode ser visualizado no esquema da Figura 36.

A posição de 25 mm foi escolhida por representar a porção do *spray* referente à primeira atomização e a de 100 mm por representar a porção referente à segunda atomização. No que diz respeito à escolha da coordenada horizontal central, segundo Wang e Lefebvre [68] e vários outros autores, para *sprays* cônicos as medidas na linha de centro do injetor são as preferidas, porque elas incluem tanto gotas pequenas do núcleo do *spray* quanto gotas maiores da periferia do *spray*.



Figura 36: Distâncias axiais do bico injetor.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo os resultados referentes aos testes realizados serão discutidos. Primeiramente, os testes preliminares serão abordados e, posteriormente, os resultados principais serão apresentados.

Os testes preliminares foram conduzidos com objetivo de encontrar a melhor configuração para os parâmetros de processamento das imagens no que diz respeito aos dados utilizados pelo *software* DAVIS 7 para realizar os cálculos. Outras questões relativas ao comportamento da técnica e do equipamento e à calibração do sistema também foram avaliadas. Todos os testes preliminares foram feitos com o etanol.

A segunda etapa de testes, concernente à avaliação dos aspectos da atomização em função da temperatura e suas principais implicações, foco principal do trabalho, utilizou-se da configuração ótima encontrada na etapa anterior para a realização dos ensaios.

### TESTES PRELIMINARES

#### 4.1 Parâmetros de Processamento

Segundo Ahlers e Alexander [1], a técnica de *Shadowgraphy*, assim como outros métodos baseados em análise de imagem, possui algumas limitações e problemas inerentes, os quais incluem a existência de gradientes de escala de cinza nas bordas das partículas devido à difração nas fronteiras, não-linearidades geométricas, correção de profundidade de campo e não-linearidades fotométricas.

A determinação dos parâmetros que serão utilizados na configuração do processamento das imagens não é baseada em critérios fixos pré-estabelecidos, ela é dependente do que se deseja medir e avaliar com a técnica. A seguir, os parâmetros de maior relevância para as medições realizadas serão descritos e analisados em detalhes.

#### 4.1.1 Determinação do Nível de Contraste

Talvez um dos itens mais importantes no método de sombreamento de imagens seja o nível de contraste empregado. Este contraste que, para o caso particular do equipamento utilizado, tem o nome de “*global threshold*”, se refere à diferença de intensidades entre as partículas a serem medidas e a iluminação de fundo. Com base no valor de contraste fornecido, o algoritmo aceita ou descarta regiões da imagem, então um *global threshold*, p.e., de 50% significa que regiões da imagem que tiverem intensidades menores do que 50% da máxima intensidade não serão consideradas partículas e, portanto, serão descartadas para fins de cálculos.

De forma a distinguir as gotas da iluminação de fundo dentro da imagem, o *threshold* aplicado será configurado em uma escala de cinza que se situa entre dois picos, os quais correspondem ao pico da partícula (menor) e ao pico da iluminação (maior). O algoritmo do *software* escaneia ao longo da imagem, *pixel* por *pixel*, e, baseado no nível de contraste estabelecido, determina os *pixels* que correspondem à iluminação e os que correspondem às gotas (Kashdan et al. [30]). Na Figura 37 é possível visualizar um histograma ilustrativo desses dois picos de intensidade.

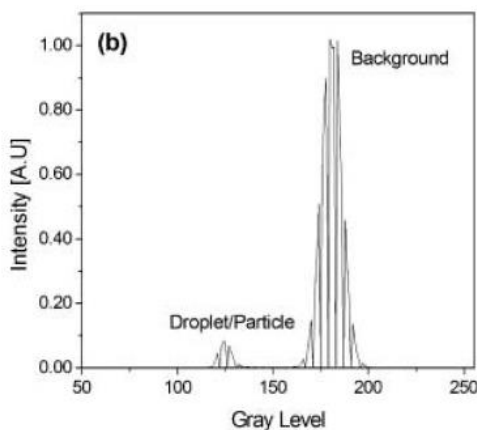


Figura 37: Histograma representativo das intensidades mostrando o pico da iluminação de fundo e o pico das gotas (Extraído de Kashdan et al. [30]).

Um valor baixo de *global threshold* permite que mais partículas sejam detectadas, entretanto partículas com contraste mais pobre serão validadas. O perigo em admitir estas

partículas extras consiste no fato de que, conforme descrito acima, as medições são feitas com base nesse contraste e se o critério de aceitação das partículas não for rígido o suficiente as medidas podem se tornar bastante imprecisas, fazendo com que as intensidades dos *pixels* da iluminação que estiverem próximas das intensidades dos *pixels* das partículas sejam confundidas. Além disso, ruídos da imagem provavelmente serão considerados como partículas pequenas. Se o nível de *threshold* for muito alto, as partículas começam a se confundir com a luz de fundo, portanto um compromisso entre esses fatores deve ser observado.

Para que seja possível definir um nível de contraste global ótimo e especificar os outros níveis de *thresholds* a serem aplicados, primeiramente, é preciso discutir acerca do problema das partículas desfocadas, assunto do próximo item.

#### 4.1.2 Identificação de Partículas Desfocadas

O posicionamento da câmera fotográfica (distância focal) é feito de forma a obter o ajuste do foco exatamente no plano a ser medido. As partículas que estiverem neste plano estarão focadas e as partículas que estiverem localizadas em algum ponto deslocado do plano focal estarão desfocadas. Um dos maiores problemas na análise de fotografias de *sprays* consiste em medir com precisão as partículas desfocadas.

A Figura 38 mostra um esquema feito por Kashdan et al. [30] para demonstrar e ilustrar o principal obstáculo encontrado nas técnicas de medição por imagem – as partículas desfocadas. A principal limitação causada pelo desvio de foco é na identificação correta das bordas da gota, que deixam de ser perfeitamente nítidas.

Observando-se a Fig. 38 (a), é possível compreender como uma partícula que está localizada no plano focal é vista pelo algoritmo de cálculo. O contraste entre a partícula e a iluminação de fundo é perfeitamente nítido, o que pode ser identificado pelo perfil de intensidades. Quando isso ocorre é fácil detectar quais *pixels* pertencem à iluminação e quais pertencem à partícula, pois a mudança de intensidade é abrupta, fazendo com que o diâmetro seja fácil de medir.

Ainda acompanhando a análise de Kashdan et al. [30], quando a partícula está desfocada (Fig. 38 (b)) surge um gradiente de intensidades entre o centro da gota, que permanece escuro, e a iluminação de fundo. A região entre o centro escuro da imagem e o limiar da luz de fundo é denominada de auréola e normalmente tem um gradiente constante de intensidades. O diâmetro dessa auréola é uma forma de quantificar quão desfocada a partícula está e o seu valor aumenta com o aumento do desfocamento.

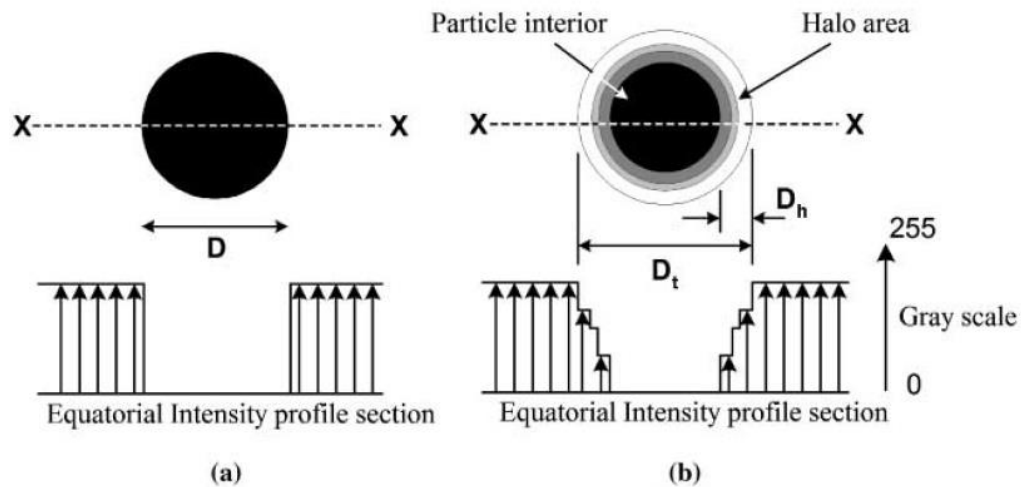


Figura 38: Representação esquemática da imagem de sombra da gota e os perfis de intensidade para partículas focadas (a) e desfocadas (b) (Extraída de Kashdan et al. [30]).

A gradação na intensidade do centro para as bordas torna difícil a delimitação correta da partícula, pois a partir de certo ponto a luz de fundo passa a se confundir com a própria partícula. Um nível de contraste pobre escolhido para ser o *global threshold* afetaria a correta medição na região da auréola, onde trechos que não correspondem à partícula poderiam ser aceitos como tal.

Com isso, torna-se necessário considerar o efeito das partículas desfocadas, por meio da área da auréola, na escolha do nível de contraste a ser utilizado. Neste contexto se insere o conceito do segundo nível de *threshold*, o qual atua na segunda etapa de segmentação da imagem. O *global threshold* é um parâmetro que serve para distinguir entre a partícula e a iluminação e o segundo *threshold* tem a função de diferenciar entre a área cinza da auréola e o interior escuro da partícula. Este segundo limiar é dividido em *low level*, que considera a maior área encontrada (mede o diâmetro em toda sua extensão, incluindo o nível mais baixo de cinza) e *high level*, que

considera a menor área encontrada, excluindo a porção da borda da partícula que ficou muito clara. O resultado final entregue é a média aritmética entre o maior e o menor diâmetro.

Publicação feita por Kim e Kim [33] sobre o assunto revela que um dos fenômenos mais importantes noticiados durante a análise das imagens é a existência de uma relação linear, com inclinação próxima à unidade, entre as partículas medidas com *global threshold* de 50% e o tamanho real das partículas, à medida que se afasta do plano focal. Os testes realizados por eles demonstraram que o nível global de contraste de 50% permite uma medição precisa para vários tamanhos de partículas e várias posições deslocadas do plano focal. Por esta razão, o valor de 50% foi escolhido para realizar as medições no presente trabalho.

Com base nos 50% de nível de contraste a iluminação de fundo é descartada da análise e de agora em diante a análise da imagem passa a ser feita apenas nas partículas, através dos parâmetros de *high e low level threshold*, que também devem ser definidos. Por meio da realização de testes foram determinados os valores de 55% e 45%, respectivamente. Para que o diâmetro encontrado com o *low level*, que é sempre o maior dos dois, não difira tanto do encontrado com o *high level*, um filtro de reconhecimento é fixado, para que exista uma limitação na relação desses diâmetros. A razão ( $D_{low}/D_{high}$ ) escolhida foi de 1,5.

#### 4.1.3 Correções Necessárias

A detecção de partículas individuais depende principalmente do tamanho do volume a ser examinado e a validação das partículas depende da resolução espacial. Uma vez que o volume a ser examinado muda de acordo com o tamanho da partícula, os limites de detecção influenciam os resultados estatísticos (Lavisson [35]). Esta mudança pode ser atribuída a dois efeitos: efeito da profundidade do campo e efeito das bordas.

O problema gerado por partículas fora de foco recai principalmente na determinação dos diâmetros das menores partículas, pois eles tendem a ficar completamente indistinguíveis a partir de certa distância do plano focal. De acordo com Kim e Kim [33], a correção de profundidade de campo é necessária devido ao fato de que as menores partículas tendem a sair de foco mais rapidamente do que as maiores, considerando a mesma distância com relação ao plano focal.

Já as partículas maiores não são tão afetadas pela profundidade do campo e o grau de foco em que se encontram; em contrapartida, a probabilidade de que estas partículas estejam completamente compreendidas na área do campo de visão é menor do que das menores partículas.

#### 4.1.3.1 Correção de Profundidade do Campo (*Depth of Field Correction*)

A Figura 39 mostra três linhas com diâmetros variando de 18  $\mu\text{m}$  a 145  $\mu\text{m}$ , cada uma representando uma posição com relação ao plano de foco. A primeira linha (de cima para baixo) corresponde ao plano focal, a segunda e a terceira correspondem a planos deslocados de 100  $\mu\text{m}$  e 400  $\mu\text{m}$  do plano focal, respectivamente.

A análise dessa figura permite extrair duas informações importantes. A primeira é que o tamanho da partícula é dependente da profundidade do campo, pois à medida que as partículas se afastam do plano focal suas imagens vão ficando distorcidas e seus diâmetros parecem maiores. A segunda observação é que quanto menor o diâmetro da partícula mais prejudicada pela perda do foco ela fica, tornando-se irreconhecível em distâncias maiores, conforme pode ser verificado para o diâmetro de 18  $\mu\text{m}$  na terceira linha.

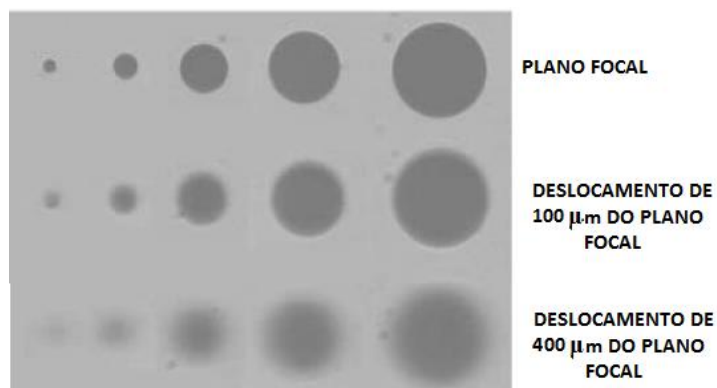


Figura 39: Placa de calibração com escalas crescentes de diâmetros (linhas) e escalas decrescentes de foco (colunas) (Extraída parcialmente e modificada de Kashdan et al. [30]).

Uma busca na literatura sinaliza que para distâncias a partir de 100  $\mu\text{m}$ , com relação ao plano focal, a imagem começa a ficar distorcida a ponto de causar erros de medição acima de 2%, sendo que as partículas pequenas são as mais afetadas. Utilizando 2% como erro mínimo nas medições para todas as faixas de diâmetros, no caso de Kashdan et al. [30] de 18  $\mu\text{m}$  a 145  $\mu\text{m}$ , o valor de 100  $\mu\text{m}$  foi utilizado como parâmetro de correção de profundidade de campo. Isto significa que todas as partículas que estiverem desfocadas a partir de 100  $\mu\text{m}$  serão corrigidas, aumentando a ponderação relativa para as partículas pequenas, pois estas possuem menor probabilidade de ser detectadas do que as grandes.

De acordo com a Lavisson [35], a correção é uma função linear do diâmetro e o tamanho da partícula é reavaliado de acordo com o inverso da sua probabilidade de ser detectada. A probabilidade é calculada por:

$$p_{DoF} = \frac{D_i}{D_{referência}} \quad (4.1)$$

Onde,  $p_{DoF}$  é a probabilidade da partícula ser detectada,  $D_i$  é o diâmetro dessa partícula e  $D_{referência}$  é arbitrário, porém com preferência para o valor do maior diâmetro encontrado.

#### 4.1.3.2 Correção das Bordas (*Border Correction*)

Considerando que a profundidade do campo de visão seja a direção “z” na Fig. 40 (a), então o plano focal xy estaria situado em ‘z = 0’ e esta seria a representação do campo de visão. A probabilidade de partículas grandes estarem totalmente inseridas dentro do campo de visão é menor do que a de partículas pequenas, portanto a correção das bordas é direcionada às partículas maiores. Para cada partícula uma correção com base em um fator de probabilidade é feita, aumentando a ponderação relativa para as partículas grandes. A probabilidade é calculada por:

$$p_{Border} = \frac{(W-D_i).(H-D_i)}{W.H} \quad (4.2)$$

Onde,  $W$  é *Width* e  $H$  é *Height*, de acordo com a Fig. 40, e  $D_i$  é o diâmetro da partícula cuja probabilidade se está calculando.

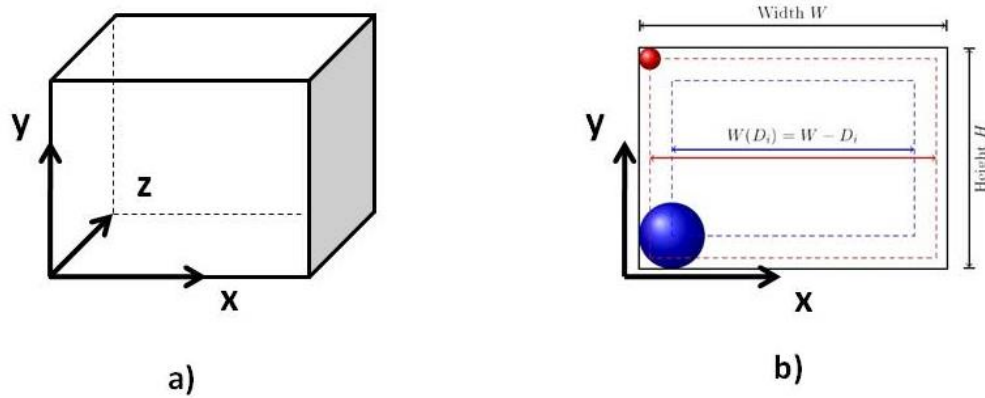


Figura 40: Direções do volume de testes (a) e campo de visão dependendo do diâmetro das partículas (b) (Extraída parcialmente de Lavision [35]).

#### 4.1.3.3 Correção nos Resultados Estatísticos

Por fim, a probabilidade individual ( $p_i$ ), definida como:

$$p_i = p_{DoF} \cdot p_{Border} \quad (4.3)$$

É utilizada para efetuar as correções nos cálculos dos diâmetros representativos, como é o caso do SMD, por exemplo:

$$SMD = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{D_i^3}{p_i}}{\sum_{i=1}^N \frac{D_i^2}{p_i}} \quad (4.4)$$



#### 4.1.4 Determinação do Campo de Visão

O campo de visão indicado para medidas de gotas de *spray* do tipo que se quer medir no presente trabalho é de ordem milimétrica. O recomendado é que tenha dimensões máximas de 3 x 2 mm, ou seja, o ideal é que ele seja ainda menor. Quanto maior a magnificação da lente objetiva, menor o campo de visão e menor o tamanho do *pixel*.

Existe uma limitação da própria técnica de medição quanto à mínima quantidade de *pixels* que um diâmetro deve conter para ser contabilizado. O número mínimo de *pixels* necessário para garantir mínima precisão no diâmetro calculado é de aproximadamente sete. A fim de que caibam os sete *pixels* dentro de um diâmetro pequeno, é preciso que o tamanho de cada *pixel* seja pequeno o suficiente. Quando as dimensões do campo de visão são aumentadas o tamanho do *pixel* também aumenta e, com isso, o diâmetro mínimo que o algoritmo passa a ser capaz de detectar aumenta de tamanho, pois os sete *pixels* que devem “caber” no diâmetro agora apresentam dimensões maiores.

Dessa forma, menos partículas serão contabilizadas à medida que o campo de visão for ampliado. A Fig. 41 apresenta um esquema do perfil dos histogramas para três diferentes dimensões de campos de visão hipotéticos: um menor (3 x 2 mm<sup>2</sup>), um médio (5 x 4 mm<sup>2</sup>) e um maior (7 x 6 mm<sup>2</sup>). O que ocorre com a distribuição das partículas com as alterações realizadas no campo de visão é o que está ilustrado: para campos maiores é como se o intervalo de partículas menores fosse cortado do histograma, pois elas não são mais detectadas pelo *software*. Assim, fica evidente que o SMD, bem como outros diâmetros representativos, varia em função do campo de visão.

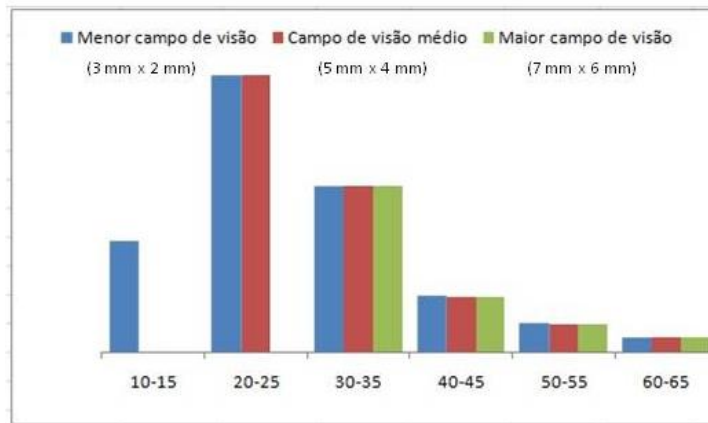


Figura 41: Gráfico de distribuição das partículas para diferentes tamanhos de campos de visão: à medida que o campo aumenta as partículas menores deixam de ser detectadas.

Por outro lado, ao reduzir o campo de visão, naturalmente menos partículas vão caber dentro das dimensões do plano de medição e menos partículas serão detectadas. Ainda assim, ter uma boa resolução é mais atrativo do que maior número de partículas detectadas, pois este último pode ser corrigido tirando-se mais fotos.

Como parte da execução dos ensaios preliminares, testes foram realizados para descobrir qual o menor campo de visão que se conseguiria atingir com o equipamento que se tem disponível. Neste caso, levando-se em conta a limitação da câmera, que deve se situar a uma distância de trabalho de, no máximo, 340 mm do alvo para que consiga obter foco. Outra limitação é da própria bancada de testes, que tem dimensões que não podem ser alteradas, como a câmara transparente que possui uma distância de 250 mm do bico injetor até o lado externo.

Tendo-se estas limitações em vista, a partir de dimensões menores do que 4 mm em coordenadas horizontais e menores do que 3 mm em coordenadas verticais para o campo não é mais possível obter foco pela câmera, o que fez com que as dimensões finais do campo de visão ficassem em 4 x 3 mm. A magnificação utilizada para obtenção desse campo foi de 1,5X e a resolução obtida foi de 2,95  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ .

#### 4.1.5 Limite Superior e Inferior do Diâmetro

Esse teste teve como objetivo estabelecer o limite superior e inferior para o valor dos diâmetros calculados, ou seja, fornecer ao *software* um valor máximo/mínimo de diâmetro acima/abaixo do qual os outros pudessem ser ignorados. O parâmetro de processamento que delimita o diâmetro superior é chamado de "*ignore diameters above*" e é importante porque, por mais que o DAVIS 7 calcule o tamanho das partículas com base no contraste e efetue algumas correções, ainda há chance de que ele não reconheça a coalescência das gotas, portanto esta é uma avaliação que deve ser feita pelo usuário.

Muitas vezes gotas coalescidas ou ligamentos são retratados como uma única gota de diâmetro grande. Se o objetivo da medição for medir algum diâmetro representativo por meio de uma amostra que represente, de fato, as gotas do *spray*, então estas gotas “falsas” devem ser eliminadas dos cálculos estatísticos. Para tanto, realiza-se uma inspeção de algumas imagens capturadas e já processadas, de maneira a determinar se os eventos de coalescência estão ocorrendo, bem como se ligamentos estão sendo incluídos nos cálculos.

A Figura 42 ilustra uma imagem processada, onde as partículas que apresentaram discrepâncias foram destacadas com um quadrado.

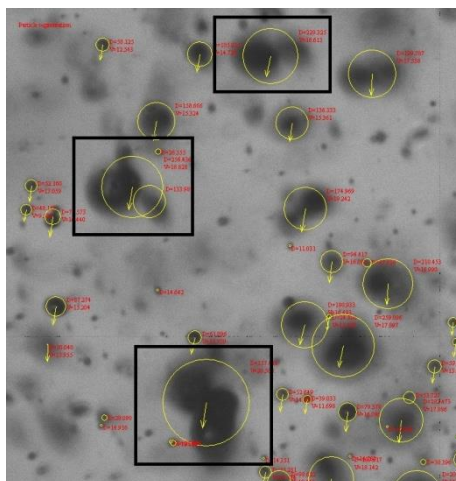


Figura 42: Imagem processada onde eventos de coalescência foram presenciados e passaram despercebidos pelo *software*.

A análise de diversas imagens (semelhantes a mostrada acima) revelou que valores acima de 250  $\mu\text{m}$  já não são mais representativos, uma vez que eles usualmente representam gotas onde a coalescência ocorreu, portanto o limite superior para o diâmetro foi selecionado como 250  $\mu\text{m}$ .

O parâmetro que delimita o diâmetro inferior é chamado de "*ignore diameters below*" e é fundamental na tarefa de evitar captação de ruídos. Conforme descrito anteriormente, o número mínimo aproximado de *pixels* necessários para compor um diâmetro é sete, o qual em unidades métricas representa aproximadamente 20  $\mu\text{m}$ . Testes realizados sem a adoção de filtro de limite inferior, á título de teste, não indicaram presença significativa de gotas menores do que o valor de 20  $\mu\text{m}$ .

#### 4.1.6 Determinação do Número de Imagens

Esse teste consistiu em estabelecer o número de imagens que seriam capturadas na realização dos testes principais, para que a amostra garantisse representatividade dos resultados. Quando se fala em número de imagens, fala-se indiretamente em número de partículas analisadas, que é o fator realmente determinante.

Lee et al. [37] investigaram a amostra mínima necessária para se obter precisão nos resultados e encontraram o valor de 2000 partículas para o início da estabilidade dos valores. Usaram um coeficiente de segurança de 10, avaliando, portanto, 20.000 partículas por vez. A Lavisson Inc. também recomenda um número mínimo de 2000 partículas para garantir convergência estatística.

Em termos práticos, 20.000 partículas representam, aproximadamente, 2000 imagens, no caso do equipamento *Shadowgraphy* e na aplicação em questão. Testes foram conduzidos no sentido de encontrar um número de imagens a partir do qual os valores de SMD (ou outros parâmetros) tivessem variação desprezível. Percebeu-se que a partir de 1000 imagens, correspondendo a aproximadamente 10.000 partículas, os valores começaram a estabilizar. Como garantia o valor de 3000 imagens, correspondendo a um valor em torno de 30.000 partículas, foi escolhido.

#### 4.1.7 Janela de Interrogação – Cálculo do Campo de Velocidades

No método de *Shadowgraphy* as velocidades das partículas são avaliadas individualmente. O intervalo de tempo ( $dt$ ) entre os dois pulsos do *laser* é conhecido (e pré-estabelecido de acordo com o tipo de escoamento) e o algoritmo é responsável por determinar o deslocamento sofrido por cada partícula entre um *frame* e outro. A velocidade é, então, calculada pelo deslocamento sobre o tempo decorrido. O algoritmo responsável pelo cálculo da velocidade é o *Particle Tracking Velocimetry* (PTV).

Antes de a velocidade ser calculada, o algoritmo de dimensionamento é aplicado para cada *frame* das imagens de origem. As informações sobre o tamanho de cada partícula e suas respectivas posições são arquivadas em duas listas separadas. Depois que todos os pares de imagem forem analisados, o cálculo da velocidade é executado nas duas listas de resultados. O algoritmo compara as duas listas e identifica os pares de partículas, por meio de dois critérios:

- 1) pelos diâmetros das partículas no primeiro e segundo *frame*, que serão correlacionados se um desvio máximo permitido for respeitado;
- 2) pelo deslocamento permitido.

O deslocamento inicial (deslocamento da primeira para a segunda exposição) da partícula define a posição central da janela de interrogação, dentro da qual as partículas serão aceitas. O algoritmo da velocidade trabalha de acordo com um número selecionado de passos. Um número maior de passos permite que a imagem seja checada várias vezes. A cada passo a janela de interrogação diminui de tamanho em uma proporção desejada e o deslocamento inicial vai sendo adaptado ao deslocamento médio do passo precedente (LaVision [35]).

Para se obter bons resultados é importante ajustar o  $dt$  de forma adequada à densidade do escoamento. Se a densidade for alta, como é o caso de *sprays*, o  $dt$  deve ser pequeno. Como regra informal, recomenda-se que o intervalo seja de pelo menos 3 *pixels* e cerca da metade do tamanho da menor partícula (LaVision [35]).

Os parâmetros adotados para o cálculo da velocidade foram:  $dt$  de 5  $\mu$ s, janela de interrogação com dimensões iniciais de 250 x 500  $\mu$ m, com 5 passos de verificação, taxa de decréscimo de 2 tempos por passe, chegando a um tamanho final de janela de 15,625 x 31,25  $\mu$ m, aceitando desvios de diâmetro de até 15%.

A escolha de uma janela de interrogação estreita foi feita com base no tipo do escoamento do *spray*, que é descendente. A Figura 43, meramente ilustrativa, mostra as direções e sentidos dos vetores de um campo de velocidades típico de *spray*. Esta configuração de velocidades mostrou que as componentes verticais são mais significativas e que, portanto, o deslocamento provável da partícula seja nesta direção. A escolha do número de passos foi feita de forma a conciliar a múltipla checagem com um tamanho final de janela de interrogação aceitável.

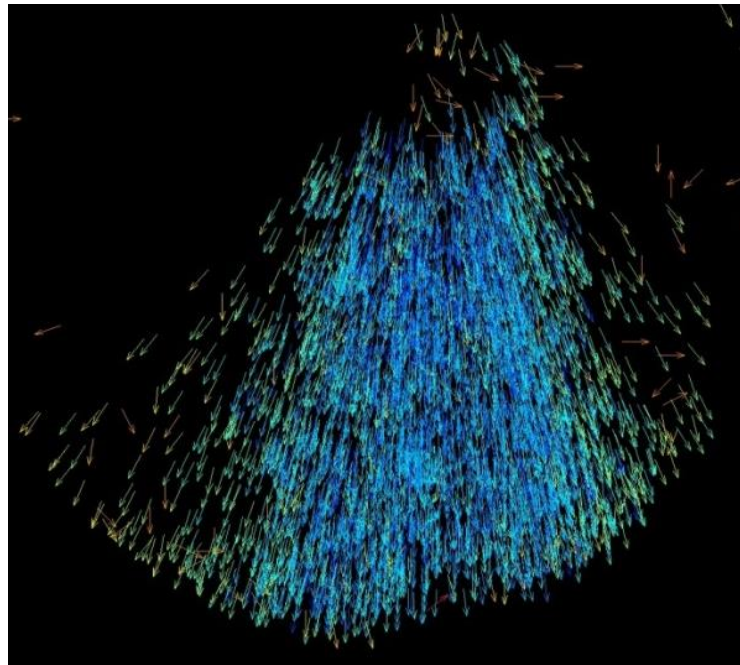


Figura 43: Ilustração do campo de velocidades obtido quando o *spray* completo do bico injetor de teste foi medido.

#### 4.1.8 Pré-Processamento

Dois parâmetros de pré-processamento são relevantes de se mencionar:

1) Filtro de pré-processamento das imagens do *Shadowgraphy* e das imagens de referência

Responsável pela suavização de ruídos, o filtro de nome “*no smoothing*” foi selecionado dentre os quatro disponíveis no *software* (os outros três são 3x3 avg, 3x3 median e 3x3 peak), pois ele é recomendado para imagens que tenham alta qualidade e baixo nível de ruído, como foi

o caso das imagens obtidas nos experimentos. Testes preliminares buscando encontrar diferenças entre os resultados dos diferentes filtros não revelou nenhuma alteração significativa.

## 2) Pré-processamento das imagens de referência

A média aritmética das imagens de referência gravadas é extraída. Conforme descrito anteriormente, as imagens de referência são aquelas obtidas apenas com a iluminação de fundo do *laser*, sem a presença do escoamento. Elas são utilizadas no processamento do *Shadowgraphy*, de forma que o algoritmo consiga distinguir o que pertence à iluminação nas imagens do experimento.

É inevitável que ocorram pequenas flutuações nos pulsos do *laser*, por isso recomenda-se que um conjunto de imagens seja tomado e pré-processado, para diminuir a influência dessas variações cíclicas. As intensidades dos dois pulsos do *laser* também não são exatamente iguais, portanto, para ajustar a iluminação entre os dois *frames*, é necessário fornecer potências diferentes para cada pulso do *laser*.

## 4.2 Teste de Repetibilidade

Sabe-se que o bico injetor trabalha de forma pulsada e que seu período pode ser variado. Sabe-se, também, que o *laser* trabalha de forma pulsada e que o tempo entre um pulso e outro pode ser variado. A câmera possui um sistema interno que permite sincronizá-la ao *laser* e as imagens são capturadas exatamente no momento em que o pulso do *laser* é disparado. Entretanto, neste trabalho, o conjunto *laser*-câmera não pôde ser sincronizado ao pulso do injetor, pois um sistema adicional (não disponível) teria de ser implementado, impossibilitando, portanto, que os disparos fossem dados sempre no mesmo "momento" do injetor. Com isso, houve a necessidade de se averiguar se para um mesmo padrão de operação, o fato de o disparo das imagens não estar sincronizado ao tempo do injetor resultaria em alterações expressivas. Esta apuração foi feita medindo-se os parâmetros de atomização com o injetor trabalhando em dois modos - pulsado e contínuo – e avaliando o comportamento da repetibilidade dos resultados para ambos. O modo pulsado é o de aplicação comum dos bicos injetores e fornece uma vazão dinâmica, enquanto o modo contínuo é aquele em que a tensão fornecida aos terminais do injetor é constante,

fornecendo uma vazão estática. A vazão estática significa que o injetor está trabalhando "aberto" o tempo todo e não mais na forma de pulsos (PWM) - "abrindo" e "fechando".

Além dessa comparação, o teste de repetibilidade visou examinar a consistência dos resultados de uma forma geral. Para o modo pulsado do injetor (vazão dinâmica), dez medições consecutivas foram tomadas a 20 °C e os resultados para SMD e D10 (média aritmética da amostra) podem ser vistos na Tabela 5. O teste com vazão estática foi realizado nos mesmos moldes do teste de vazão dinâmica e os resultados estão na Tabela 6.

Medição	SMD [ $\mu\text{m}$ ]	D10 [ $\mu\text{m}$ ]	Medição	SMD [ $\mu\text{m}$ ]	D10 [ $\mu\text{m}$ ]
1	76,4	31,4	6	78,4	31,1
2	77,0	28,9	7	86,4	29,7
3	78,3	30,4	8	79,2	30,6
4	81,0	30,3	9	71,8	30,7
5	82,7	30,9	10	73,0	28,2

Tabela 5: Teste de repetibilidade com vazão dinâmica (PWM de 5 ms) realizado na posição axial de 100 mm com relação ao orifício de descarga.

Medição	SMD [ $\mu\text{m}$ ]	D10 [ $\mu\text{m}$ ]	Medição	SMD [ $\mu\text{m}$ ]	D10 [ $\mu\text{m}$ ]
1	77,0	26,0	6	79,3	30,1
2	71,6	32,3	7	82,0	28,8
3	77,4	30,5	8	79,6	30,4
4	87,5	33,1	9	78,5	29,4
5	83,2	29,7	10	73,1	31,1

Tabela 6: Teste de repetibilidade com vazão estática realizado na posição axial de 100 mm com relação ao orifício de descarga.

Conforme se observa nos resultados de vazão dinâmica, os valores de SMD e D10 variaram pouco, cerca de 20% e 11% de máxima variação (*máx. – mín/mín*), respectivamente. A média aritmética dos valores é de 78,4  $\mu\text{m}$  para o SMD e 30,2  $\mu\text{m}$  para o D10, com desvio padrão de 4,3 e 1,0  $\mu\text{m}$ , respectivamente, demonstrando resultados bastante consistentes. Nos resultados de vazão estática, SMD e D10 variaram em torno de 20% e 27% de máxima variação, a média aritmética deu 78,9 e 30,1  $\mu\text{m}$ , com desvio padrão de 4,7 e 2,0  $\mu\text{m}$ , respectivamente,



demonstrando, novamente, resultados bastante consistentes. Com isso, constatou-se que a ausência de sincronia do equipamento com o bico injetor não afeta os resultados.

De fato, a única alteração que ocorre é no número de partículas detectadas para um mesmo número de fotos, que, para a vazão estática é bem maior. Isto porque, na vazão dinâmica, muitas das fotos tiradas não contêm partículas ou contêm poucas, visto que o injetor está fechado ou em vias de abrir/fechar, enquanto que na vazão estática a quantidade de partículas se mantém próxima em todas as imagens. Tal diferença não se reflete nos resultados, uma vez que o número mínimo de partículas para garantir convergência é respeitado mesmo para o número menor de partículas detectadas.

Mesmo que as condições de entrada sejam mantidas estritamente iguais, os valores esperados para os diâmetros não são estritamente constantes, apenas com o menor desvio possível. Isto porque existem diversas fontes de variação para esse tipo de medida, sendo elas provenientes do tipo de escoamento que está sendo avaliado, do equipamento ou da técnica de medição utilizada. Portanto, do ponto de vista de consistência pode-se dizer que houve repetibilidade dos resultados.

Goldsworthy et al. [27] fez uma investigação sobre este assunto, ao que ele denominou de repetibilidade tiro-a-tiro, onde a não repetibilidade estrita foi comprovada, mesmo com as condições de entrada sendo mantidas precisamente constantes. A explicação dada para tal fenômeno, segundo ele, é que a variabilidade tiro-a-tiro é uma resposta de um sistema não linear a pequenas variações nas condições iniciais. Está associada à aleatoriedade da formação das instabilidades das camadas de cisalhamento e da turbulência e cavitação do escoamento. Um acréscimo interessante em sua análise seria o de incluir os efeitos das fontes de variação externas ao escoamento, como é o caso de todas as flutuações que o sistema de medição pode gerar.

### **4.3 Análise das Incertezas**

As incertezas envolvidas no processo de medição aplicado no trabalho são, de forma geral, oriundas de erros instrumentais e erros estatísticos.

A primeira fonte de incerteza é originada pela calibração. O processo de calibração consiste basicamente em fornecer uma escala ao *software*, para referenciar a demarcação do campo de visão e os cálculos futuros. O procedimento foi anteriormente descrito no Capítulo 3. O desenvolvimento a seguir demonstra que a propagação do erro gerado pela calibração independe da escala do dispositivo (centímetro, milímetro ou micrômetro) utilizado para calibrar, pois, em termos de porcentagem, o erro se mantém.

Supondo um instrumento (régua, por exemplo) que forneça uma dimensão  $L \pm e_L$  mm e um diâmetro medido a partir desta escala com dimensão  $D \pm e_D$   $\mu$ m. Sabendo que a relação entre as medições é dada por:

$$D = k * L \quad (4.5)$$

Sendo k um fator multiplicador qualquer. Tem-se que,

$$k = \frac{D}{L} \quad (4.6)$$

Então a propagação do erro em D será dada por:

$$e_D^2 = \left(\frac{\partial D}{\partial L}\right)^2 e_L^2 \Rightarrow e_D^2 = k^2 \cdot e_L^2 \Rightarrow e_D = k \cdot e_L \Rightarrow k = \frac{e_D}{e_L} \quad (4.7)$$

Dessa forma,

$$\frac{D}{L} = \frac{e_D}{e_L} \Rightarrow \frac{e_D}{D} = \frac{e_L}{L} \quad (4.8)$$

E o erro propagado para o diâmetro é percentualmente o mesmo.

A Tabela 7 a seguir mostra dois exemplos de escalas fornecidas ao *software*, uma em milímetros e outra em micrômetros, e como elas refletem na medição posterior do diâmetro.

Exemplo 1	Exemplo 2
$L = 1,00 \pm 0,05 \text{ mm}$ (erro de 5%)	$L = 1,00 \pm 0,05 \text{ }\mu\text{m}$ (erro de 5%)
$D = 20 \text{ }\mu\text{m}$	$D = 20 \text{ }\mu\text{m}$
$k = D/L = 20/1000 = 0,02$	$k = D/L = 20/1 = 20$
$e_D = k \cdot e_L \Rightarrow e_D = 0,02 \cdot 50 = 1 \text{ }\mu\text{m}$	$e_D = k \cdot e_L \Rightarrow e_D = 20 \cdot 0,05 = 1 \text{ }\mu\text{m}$
$D = 20 \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ (erro de 5%)	$D = 20 \pm 1 \text{ }\mu\text{m}$ (erro de 5%)

Tabela 7: Exemplo da propagação do erro de escala para um instrumento em centímetros e um em micrômetros.

Portanto, a primeira fonte de incerteza instrumental está associada à calibração, proveniente principalmente do erro de escala, e é de aproximadamente 5%.

Por se tratar de uma técnica baseada em análise de imagens, alguns efeitos ópticos podem produzir erros nas medições, uma vez que interferem na qualidade da fotografia.

Difração é um efeito óptico que limita a resolução total da fotografia, independentemente da quantidade de *megapixels* que a câmera tenha. Raios de luz passando por um orifício pequeno começarão a divergir e interferir uns nos outros. Esta interferência produz um padrão de difração que, para uma abertura circular ideal, é chamado "*airy disk*". Quando o diâmetro central do *airy disk* se torna grande em relação ao tamanho do *pixel* na câmera, começa a haver um impacto visual na imagem. Além da difração, que está relacionada ao tamanho da abertura (*f-number*) da câmera, há a limitação de resolução causada por imperfeições nas lentes, as quais afetam a qualidade da imagem em termos de nitidez e contraste. A aberração de lentes é causada por imperfeições em seu *design*, que fazem com que uma fonte pontual luminosa da imagem não convirja para um ponto do sensor da câmera. Elas podem ser de origem cromática ou monocromática (Cambridge in Colour [10]).

A determinação dos erros instrumentais devido a fenômenos ópticos é complexa e foge do escopo do presente trabalho, uma vez que as principais medições realizadas são comparativas - os valores são comparados entre si em diferentes temperaturas – e isso diminui a rigidez na determinação das incertezas envolvidas, portanto eles serão desprezados.

Conforme detalhado no item 4.2, o teste de repetibilidade propiciou a medição da dispersão dos valores e o desvio padrão calculado sugere um erro estatístico de aproximadamente 6%.

O erro resultante ( $e_r$ ) do sistema será afetado, então, pelo  $e_i$  (erros instrumentais) e  $e_e$  (erros estatísticos) e é dado por:

$$e_r = \sqrt{e_i^2 + e_e^2} \quad (4.9)$$

O resultado é de uma incerteza de aproximadamente 7% nas medições.

## **RESULTADOS PRINCIPAIS**

### **4.4 Considerações Gerais**

Após determinar a configuração mais adequada dos parâmetros de processamento para a técnica de *Shadowgraphy* aplicada a *sprays*, os testes de variação da temperatura foram executados.

Etanol e gasolina foram avaliados num range de temperaturas de 10 a 60 °C, com os mesmos parâmetros operacionais e condições (Tabela 8), e os resultados de SMD, distribuição dos diâmetros e velocidades foram avaliados, sobre os quais diversas análises foram feitas.

Pressão injeção (bar)	PWM (ms)	Rotação do motor* (RPM)	Posição axial (mm)	Posição radial (mm)	Pressão ambiente
3,0 ± 0,1	5	5000	25 e 100 ± 0,5	0	Atmosférica

\*parâmetro que simula condições do motor no *driver* do injetor

Tabela 8: Parâmetros operacionais dos testes executados.

As imagens capturadas para a realização do processamento para as duas posições axiais e os dois combustíveis são mostradas na Figura 44 e uma imagem típica do pós-processamento é mostrada na Figura 45, onde os diâmetros aparecem demarcados e descritos e as velocidades aparecem representadas por um vetor com os respectivos valores descritos.

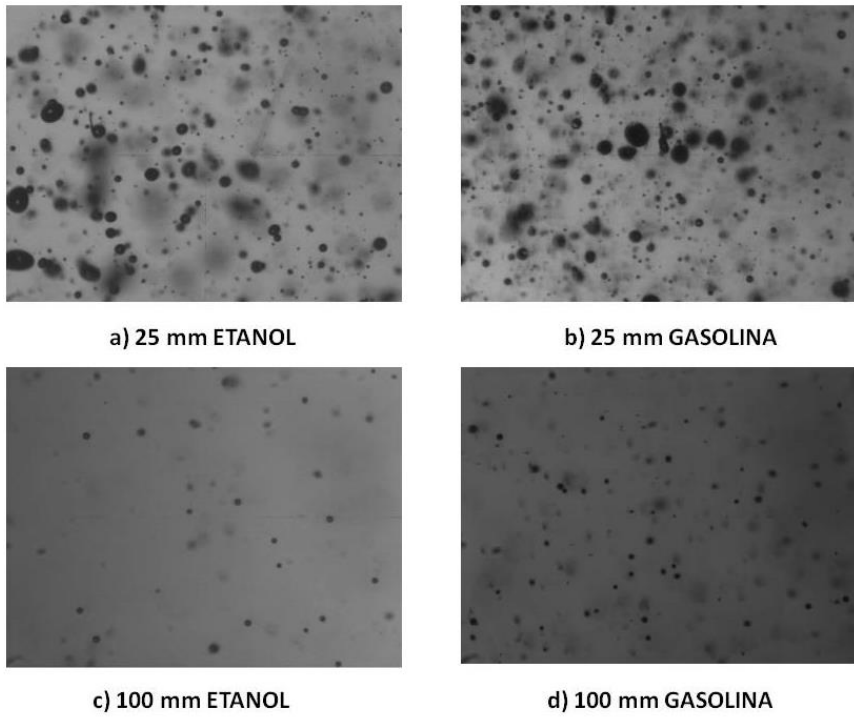


Figura 44: Imagens capturadas para análise e processamento para os dois combustíveis a diferentes posições axiais.

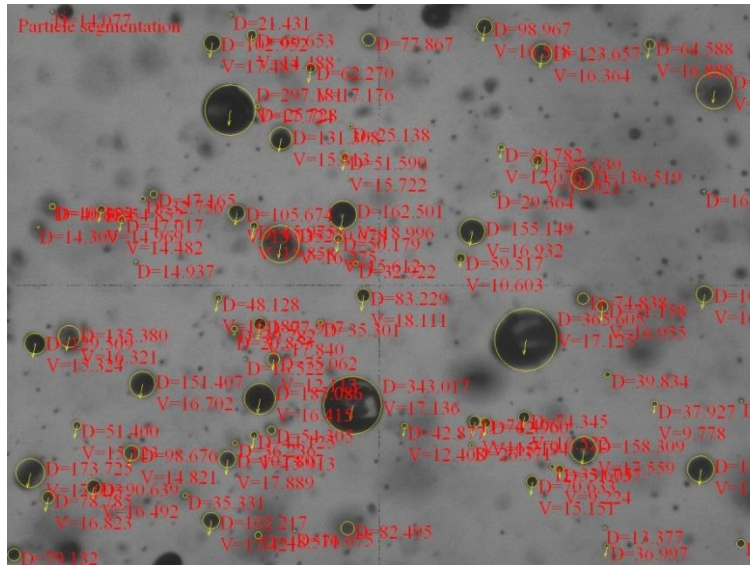


Figura 45: Imagem processada típica.

## 4.5 SMD em função da Temperatura

### 4.5.1 Etanol

As Tabelas 9 e 10 exibem resultados para o SMD e D10 (média aritmética dos diâmetros) para seis diferentes temperaturas do combustível e duas posições axiais diferentes. Com a variação de 10 a 60 °C do trocador de calor, passo de 10 °C, as temperaturas alcançadas no combustível foram as apresentadas nas tabelas, as quais são diferentes das do trocador devido às trocas de calor que ocorrem no trajeto trocador-tanque-galeria/injetor de combustível.

Em virtude da estrutura da bancada de testes, a máxima temperatura que se conseguiu atingir teve duas limitações: uma com relação ao local de aquecimento do combustível e a outra com relação ao local onde o combustível seria injetado. A primeira se refere ao fato de o aquecimento do combustível (troca de calor propriamente) ocorrer no interior do tanque, onde a pressão era a atmosférica. Dessa forma, a máxima temperatura permitida seria abaixo do ponto de ebulição do etanol, isto é, aproximadamente 70 °C. A segunda colocação diz respeito à visibilidade da câmara transparente pela câmera fotográfica à medida que o combustível fosse injetado. A partir de certa temperatura (40 °C) o etanol começa a evaporar enquanto está sendo injetado e as paredes da câmara vão se tornando embaçadas até um determinado ponto em que a câmera não consegue mais capturar as imagens fielmente.

Entretanto, o ofuscamento da câmara não ocorre imediatamente após o combustível ser injetado, leva um tempo até que a parede fique completamente embaçada e, de fato, atrapalhe a aquisição das imagens, mais precisamente cerca de 1000 imagens fotografadas. Por esse motivo é que acima de 40 °C o número de partículas detectadas decai abruptamente e continua decrescendo conforme a temperatura aumenta. Assim, para as duas temperaturas mais altas o número de imagens selecionado foi de 1000 e 700, respectivamente, sendo este último valor o limite inferior para garantir convergência estatística dos resultados sem nenhum prejuízo de precisão (no caso das medidas realizadas a 100 mm).

<b>Medidas realizadas a 25 mm da ponta do injetor</b>				
Temperatura do combustível (°C)	Temperatura ambiente (°C)	SMD (µm)	D10 (µm)	Número de partículas detectadas
16 ± 1	22,3 ± 0,1	113,8 ± 8,0	59,1 ± 4,1	51195
25 ± 1	21,1 ± 0,1	105,5 ± 7,4	50,2 ± 3,5	74859
33 ± 1	20,9 ± 0,1	101,1 ± 7,1	48,0 ± 3,4	86680
38 ± 1	21,0 ± 0,1	104,8 ± 7,3	53,0 ± 3,7	47185
47 ± 1	21,6 ± 0,1	102,5 ± 7,2	50,3 ± 3,5	35890
55 ± 1	21,6 ± 0,1	104,9 ± 7,3	53,3 ± 3,7	20551

Tabela 9: Resultados experimentais para o etanol a 25 mm do orifício de descarga, pressão atmosférica (~1 bar).

<b>Medidas realizadas a 100 mm da ponta do injetor</b>				
Temperatura do combustível (°C)	Temperatura ambiente (°C)	SMD (µm)	D10 (µm)	Número de partículas detectadas
16 ± 1	23,6 ± 0,1	79,7 ± 5,6	47,3 ± 3,3	14457
25 ± 1	23,5 ± 0,1	80,3 ± 5,6	47,8 ± 3,3	19517
33 ± 1	21,9 ± 0,1	76,3 ± 5,3	48,2 ± 3,4	22195
38 ± 1	21,8 ± 0,1	73,0 ± 5,1	47,4 ± 3,3	20917
47 ± 1	21,9 ± 0,1	70,3 ± 4,9	44,1 ± 3,1	8444
55 ± 1	23,0 ± 0,1	77,5 ± 5,4	41,7 ± 2,9	2637

Tabela 10: Resultados experimentais para o etanol a 100 mm do orifício de descarga, pressão atmosférica (~1 bar).

As posições de 25 mm e 100 mm foram escolhidas por se tratarem de regiões distintas do *spray* e interessantes de ser comparadas. A primeira posição abrange a região inicial do *spray*, onde apenas a primeira atomização ocorreu e há a presença de ligamentos e uma densidade grande de gotas. A segunda posição é próxima da porção final, já que a penetração do *spray* do bico injetor em teste é de 140 mm, e tende a representar a região completamente desenvolvida do *spray*, onde há presença de gotas menores.

Uma comparação entre as medições realizadas em 25 e 100 mm revela que as gotas são menores em regiões distantes da ponta do injetor. Isto é atribuído ao fato de o segundo processo de atomização ter ocorrido, quebrando as gotas em gotículas. Outra constatação é com relação ao número de partículas detectadas, que para 25 mm é bem maior do que para 100 mm. Isto se deve ao fato de o formato do *spray* gerado ser cônico e, portanto, mais concentrado em posições próximas à descarga e mais disperso em posições distantes, pois a base do triângulo do cone (cone visto em 2D) vai aumentando e abrindo espaço para a movimentação das gotículas. A dispersão das gotas em função da distância em que se encontram pode ser facilmente visualizada na Figura 44.

Medições adicionais foram realizadas a uma distância axial de 120 mm, que visavam a confirmar que a posição de 100 mm já era suficientemente representativa da região completamente desenvolvida do *spray*. Imagens foram capturadas a 20 °C e o SMD resultou em 70,6 µm, o que fez boa concordância com os valores medidos em 100 mm, corroborando a escolha.

A respeito dos valores de SMD medidos em cada temperatura (para as posições de 25 mm e 100 mm avaliadas separadamente), não é possível estabelecer uma relação clara entre eles e nem afirmar que houve influência da temperatura do combustível neste parâmetro de atomização. Os valores de SMD são próximos uns dos outros e não há nem uma tendência aparente de decréscimo de seus valores (com aumento da temperatura) possível de se validar.

O aumento da temperatura proporciona diminuição da viscosidade e tensão superficial, propriedades que, de formas distintas, se opõe ao processo de atomização. Seus valores mais baixos geram atomizações mais refinadas e, portanto, SMD menores. Com isso, um padrão de influência da temperatura seria relacionado caso o SMD tivesse diminuído à medida que a temperatura aumentasse (de 10 a 60 °C). Entretanto, este range de temperatura fornece baixa variação nas propriedades do etanol, tanto na viscosidade (razão de 2,4:1) quanto na tensão superficial (razão de 1,12:1).

Dessa maneira, acredita-se que o SMD seja insensível a esta faixa de variação das propriedades do fluido e que variações significativas no SMD exigiriam variações maiores nas propriedades, principalmente na viscosidade.

#### 4.5.2 Gasolina

As observações feitas para o etanol também cabem a gasolina. As tabelas a seguir mostram os resultados para a gasolina.



<b>Medidas realizadas a 25 mm da ponta do injetor</b>				
Temperatura do combustível (°C)	Temperatura ambiente (°C)	SMD (µm)	D10 (µm)	Número de partículas detectadas
16 ± 1	22,3 ± 0,1	125,4 ± 8,8	72,0 ± 5,0	36999
25 ± 1	21,1 ± 0,1	130,6 ± 9,1	73,4 ± 5,1	30599
33 ± 1	20,9 ± 0,1	125,7 ± 8,8	72,2 ± 5,1	29262
38 ± 1	21,0 ± 0,1	135,2 ± 9,5	72,0 ± 5,0	8239
47 ± 1	21,6 ± 0,1	127,0 ± 8,9	67,8 ± 4,7	18306
55 ± 1	22,0 ± 0,1	128,9 ± 9,0	71,2 ± 5,0	10112

Tabela 11: Resultados experimentais para a gasolina a 25 mm do orifício de descarga, pressão atmosférica (~1 bar).

<b>Medidas realizadas a 100 mm da ponta do injetor</b>				
Temperatura do combustível (°C)	Temperatura ambiente (°C)	SMD (µm)	D10 (µm)	Número de partículas detectadas
16 ± 1	22,3 ± 0,1	69,6 ± 4,9	45,2 ± 3,2	68566
25 ± 1	21,1 ± 0,1	67,2 ± 4,7	42,8 ± 3,0	94633
33 ± 1	20,9 ± 0,1	66,1 ± 4,6	42,8 ± 3,0	116361
38 ± 1	21,0 ± 0,1	64,0 ± 4,5	38,8 ± 2,7	93087
47 ± 1	21,6 ± 0,1	65,1 ± 4,6	40,3 ± 2,8	52645
55 ± 1	22,6 ± 0,1	64,3 ± 4,5	40,7 ± 2,8	35047

Tabela 12: Resultados experimentais para a gasolina a 100 mm do orifício de descarga, pressão atmosférica (~1 bar).

Curiosamente e ao contrário do que ocorreu com o etanol, o número de partículas detectadas na posição de 100 mm foi substancialmente maior do que da posição de 25 mm. Uma possível explicação para tal acontecimento é que o ajuste do equipamento (iluminação em acordo com a câmera fotográfica e plano focal) tenha sido favorecido quando a câmera foi mudada de posição (de 25 mm para 100 mm), de forma que propiciou o contraste mais acentuado e o reconhecimento da maioria das partículas presentes naquele plano focal e imediações, mesmo a densidade de partículas sendo maior na posição de 25 mm.

Por mais que esta explicação pareça plausível, o fato é que as próprias imagens da gasolina a 100 mm indicam a presença de inúmeras gotículas, principalmente as micro gotículas, portanto é possível que realmente haja maior número delas. Se comparada com o etanol, o fato de para um mesmo número de fotos a gasolina possuir mais do que o dobro de partículas detectadas, e as próprias imagens deixarem isto evidente, sugere que o processo de atomização da gasolina é mais eficiente, de maneira que para as mesmas condições operacionais mais partículas (e de menores diâmetros) sejam formadas. Há que se considerar que a viscosidade e a tensão superficial da gasolina são menores do que as do etanol para uma dada temperatura.

A variação de SMD em função da temperatura, assim como o etanol, não foi significativa, incorrendo na mesma análise feita anteriormente: A faixa de temperaturas escolhida para os testes não foi capaz de alterar o SMD de forma a estabelecer uma relação entre as variáveis, uma vez que nenhum padrão de variação foi observado.

#### 4.5.3 Comparativo

Uma análise na Figura 46 permite afirmar que na posição de 25 mm o SMD da gasolina e do etanol não demonstrou ter sido influenciado pela variação da temperatura de forma a se estabelecer um padrão, como por exemplo, assegurar que o aumento da temperatura diminui o SMD. Além disso, é possível identificar que o SMD da gasolina é maior do que do etanol para todos os pontos de temperatura.

O mesmo pode-se dizer da Figura 47, salvo o fato de o SMD da gasolina ser menor do que o do etanol para todos os pontos de temperatura nessa posição axial.

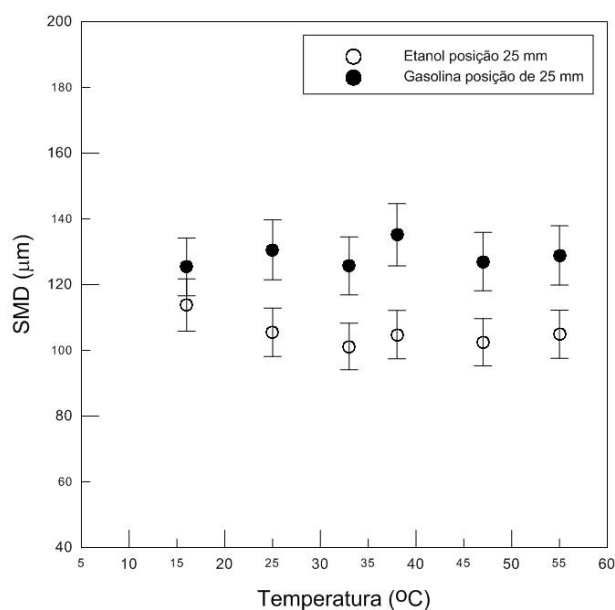


Figura 46: SMD em função da temperatura para etanol e gasolina a 25 mm de posição axial.

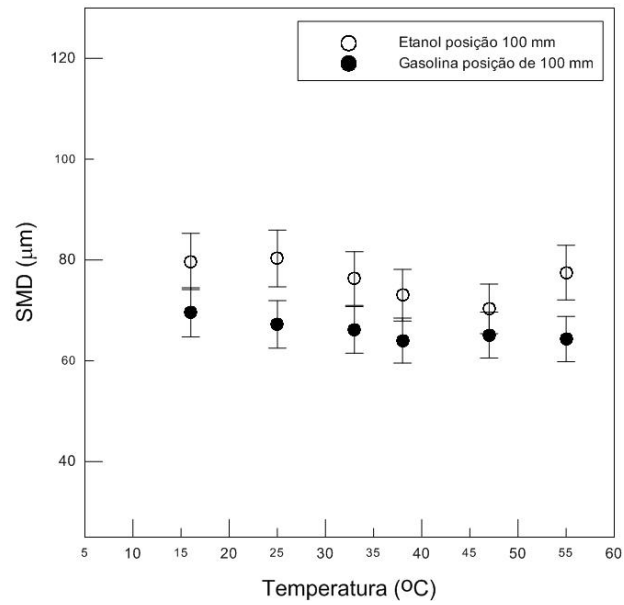


Figura 47: SMD em função da temperatura para etanol e gasolina a 100 mm de posição axial.

## 4.6 Distribuição das Gotas em função da Temperatura

### 4.6.1 Etanol

Para as medições de etanol a 25 mm do orifício de descarga, o histograma de distribuição de partículas, comparando os dois extremos de temperatura (16 e 55 °C), pode ser visto na Figura 48 .

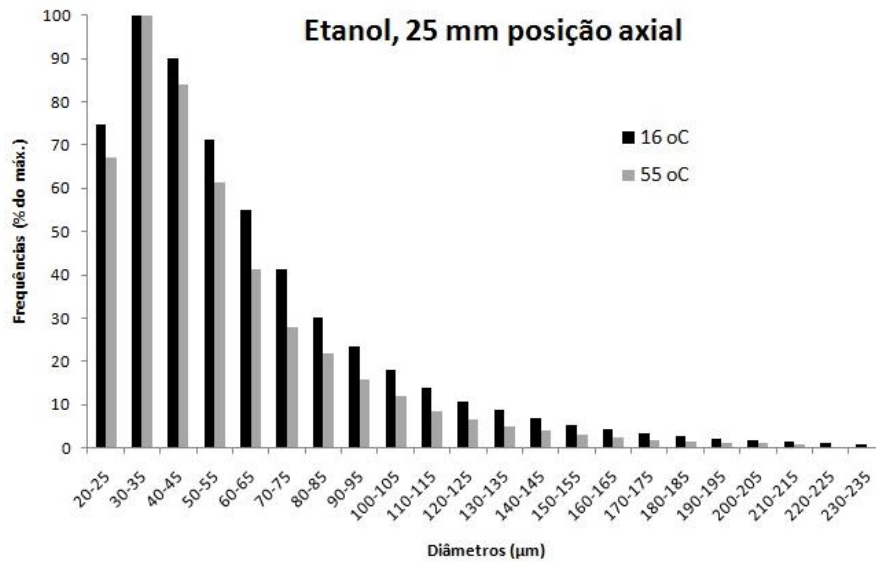


Figura 48: Distribuição das gotas a duas temperaturas (16 e 55 °C) para o etanol a 25 mm.

Observa-se que o perfil do histograma permanece o mesmo para ambas as temperaturas, fria e quente, isto é: a maior frequência de gotas se concentra no intervalo 20-55 µm, com máxima em 30-35 µm, diminuindo ao passo que o diâmetro aumenta. A diferença mais significativa entre as duas temperaturas se inicia no intervalo 40-45 µm e vai se tornando mais acentuada no sentido positivo da abscissa. Apesar de não se detectar uma frequência maior de gotas menores para a temperatura mais alta, nota-se que a frequência de gotas maiores é menor para a mesma temperatura.

O acréscimo de temperatura afeta a viscosidade e a tensão superficial no sentido de diminuí-las, diminuindo, conseqüentemente, o tamanho das gotas formadas de maneira geral. Este fenômeno poderia ser percebido tanto se o número de gotas pequenas tivesse aumentado quanto se o número de gotas grandes tivesse diminuído, sendo este último o que de fato ocorreu.

Para as medições de etanol a 100 mm do orifício de descarga, o histograma de distribuição de partículas, comparando os dois extremos de temperatura (16 e 55 °C), pode ser visto na Figura 49 .

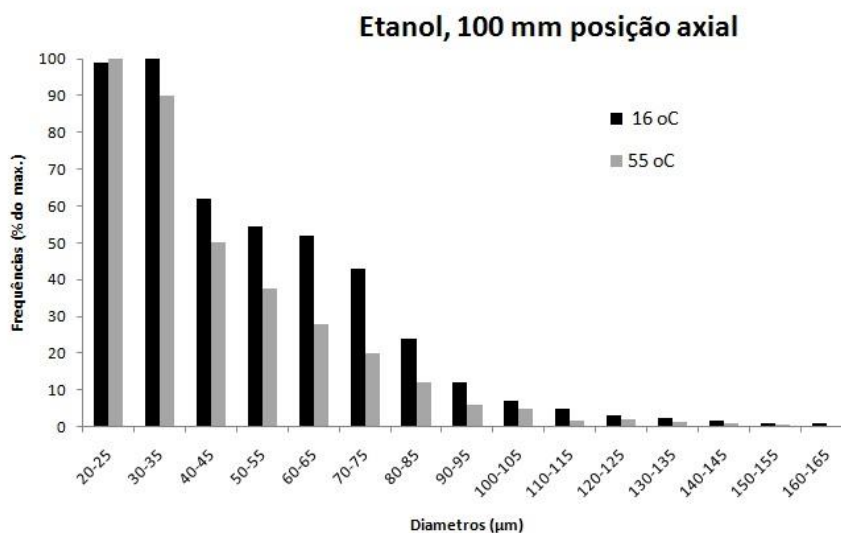


Figura 49: Distribuição das gotas a duas temperaturas (16 e 55 °C) para o etanol a 100 mm.

A análise feita no histograma anterior pode ser repetida para a Figura 49, com a diferença de que a temperatura mais alta (de 55 °C) também apresentou maior porcentagem de partículas menores no intervalo de 20-25 μm, além da menor porcentagem de diâmetros maiores, o que novamente está em concordância com o esperado. Tanto a posição de 25 mm quanto a de 100 mm mostram pequenas frequências de diâmetros grandes (acima de 100 μm), sendo que nos últimos intervalos de ambos os gráficos a presença de diâmetros de tais magnitudes ocorre somente para a temperatura baixa.

Por fim, um comparativo das distribuições entre as duas posições axiais (à mesma temperatura, 16 °C) é feito:

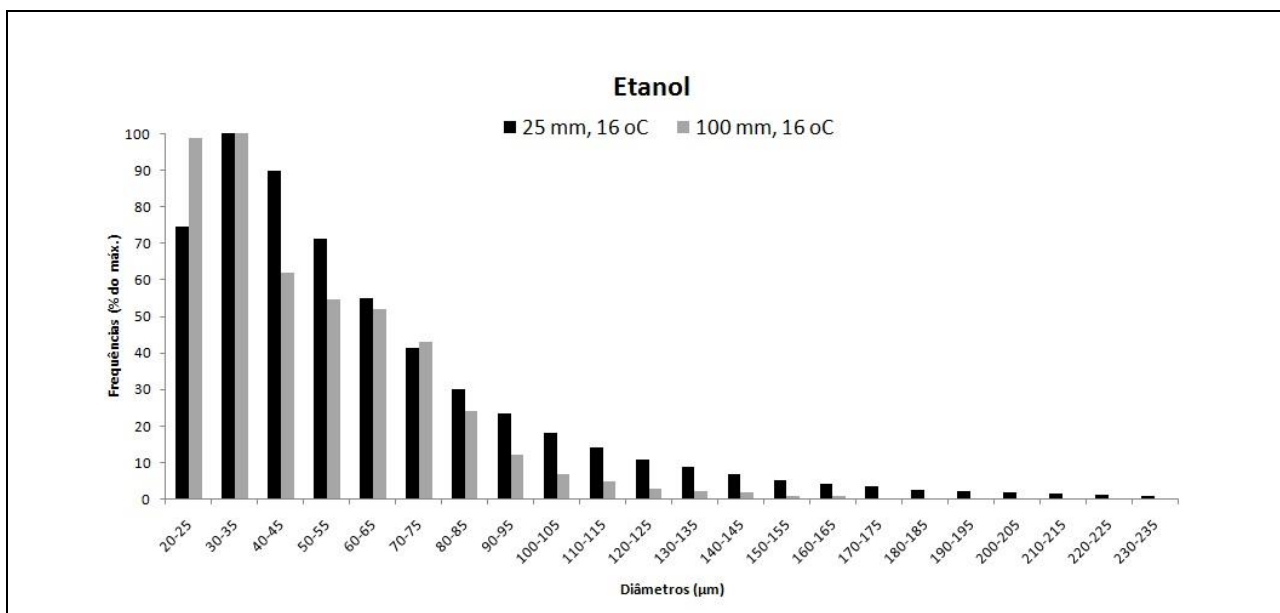


Figura 50: Comparativo das distribuições das gotas nas duas posições axiais.

A 100 mm a maioria das gotas se encontra no intervalo 20-35 μm, o que é esperado, uma vez que as gotas já se transformaram em gotículas, sendo a diferença mais acentuada concentrada no intervalo 20-25 μm. Para a mesma temperatura, diâmetros maiores do que 80 μm aparecem cada vez menos para a posição de 100 mm, desaparecendo a partir do intervalo de 170-175 μm.

Nota-se que apesar de a variação na distribuição das partículas, em função da temperatura, ter sido perceptível, ela não se mostrou suficiente para alterar o valor do SMD.

#### 4.6.2 Gasolina

O histograma de distribuição da gasolina a 25 mm mostra que a concentração de gotículas de diâmetros menores é maior para a temperatura alta (de 55 °C) e que, a partir do intervalo 60-65 μm até o fim, as concentrações são maiores para a temperatura baixa (de 16 °C).

O histograma de distribuição a 100 mm demonstra exatamente o mesmo comportamento, exceto pelo fato de compreender um intervalo de diâmetros menor devido à distância com relação ao orifício de descarga.

Os gráficos de distribuição de partículas da gasolina possibilitam visualizar de forma bem clara o que o aumento da temperatura e, portanto, a diminuição da viscosidade, acarreta no tamanho das gotas – atua no sentido de diminuí-las.

Por mais que a atuação dessa variação da temperatura seja notória no tamanho particular das gotas, ela não é suficientemente expressiva para alterar os diâmetros representativos, tanto no quesito média aritmética (D10) quanto em termos da média de volume (SMD).

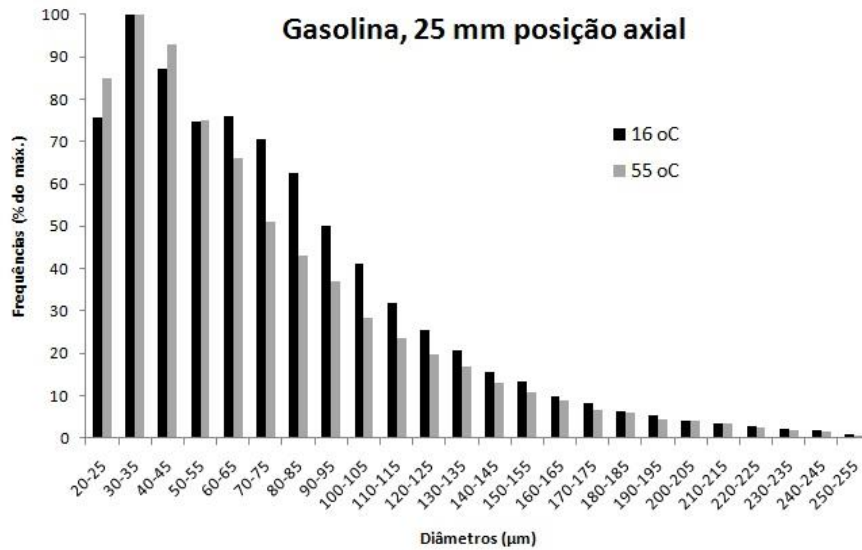


Figura 51: Distribuição das gotas a duas temperaturas (16 e 55 °C) para a gasolina a 25 mm.

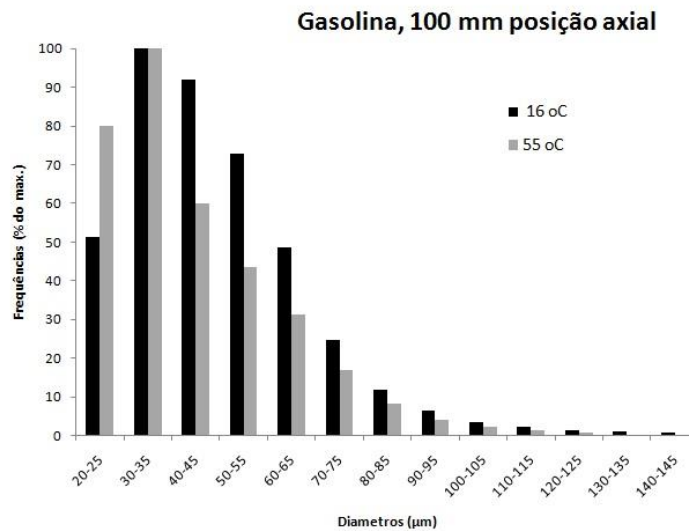


Figura 52: Distribuição das gotas a duas temperaturas (16 e 55 °C) para a gasolina a 100 mm

## 4.7 Velocidades em função da Temperatura

Primeiramente, a verificação do cálculo das velocidades foi realizada de acordo com as indicações mostradas na Figura 53, inclusive para se certificar de que as dimensões escolhidas para a janela de interrogação foram adequadas.

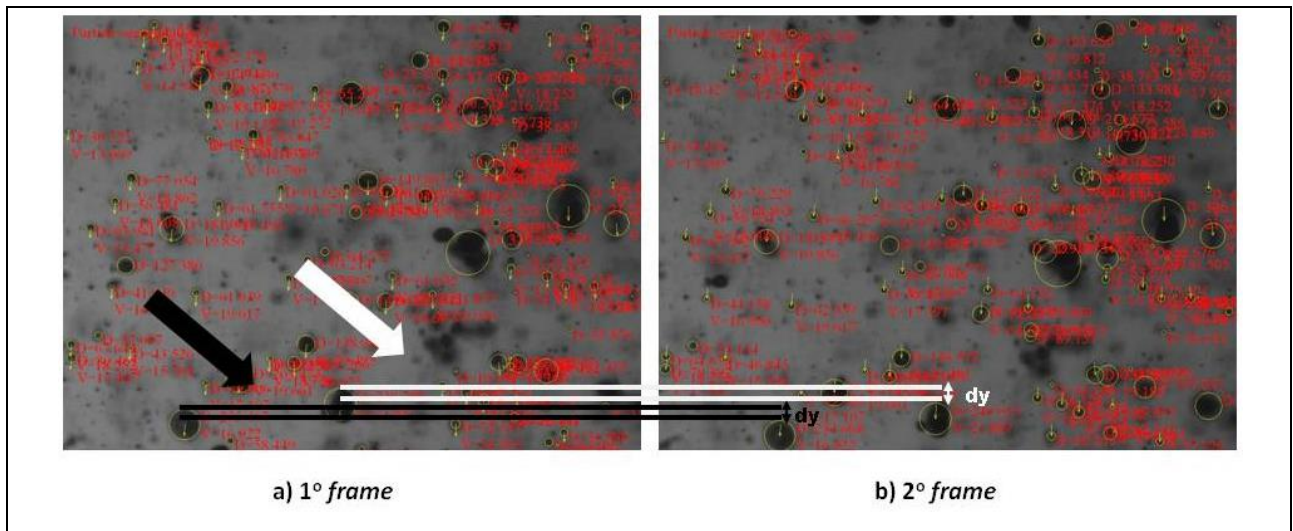


Figura 53: Verificação do cálculo das velocidades.

As imagens já processadas foram inspecionadas em sua primeira e segunda exposição. Algumas partículas mais fáceis de serem identificadas nos dois *frames* foram escolhidas para verificação de três critérios: seus deslocamentos ( $dy$ ), os vetores relacionados (direção e sentido) e as magnitudes das velocidades. O objetivo da inspeção era verificar a consistência dos cálculos realizados pelo algoritmo. O procedimento de verificação foi feito em um número substancial de imagens processadas e todas as velocidades se mostraram consistentes.

Além disso, a equação de vazão mássica foi utilizada para prever a ordem de grandeza da velocidade em locais próximos à área de saída do fluido.

$$\dot{m} = \rho VA \quad (4.10)$$



De acordo com os dados fornecidos anteriormente sobre as especificações dos combustíveis, as densidades ( $\rho$ ) do etanol e da gasolina a 20 °C são 0,8093 e 0,75 g/cm<sup>3</sup>, respectivamente. A área de passagem do fluido corresponde à área do orifício de descarga, dada por  $\pi d_o^2/4$ , onde  $d_o$  é o diâmetro do orifício de descarga, equivalente a 0,255 mm. Por se tratar de injetor 4 furos,  $A = \pi d_o^2$ . A vazão mássica ( $\dot{m}$ ) é fornecida pelo fabricante e tem o valor de 2,5 g/s.

Substituindo os valores na equação, a velocidade para o etanol fica 15,13 m/s e a velocidade para a gasolina fica 16,33 m/s.

#### 4.7.1 Etanol

As velocidades para os dois extremos de temperatura (16 e 55 °C) foram plotadas para as duas posições axiais e são mostradas na Figura 54. Cerca de 4000 pontos foram utilizados para a construção dos gráficos. Esta velocidade corresponde ao módulo da velocidade, isto é:

$$|V| = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} \quad (4.11)$$

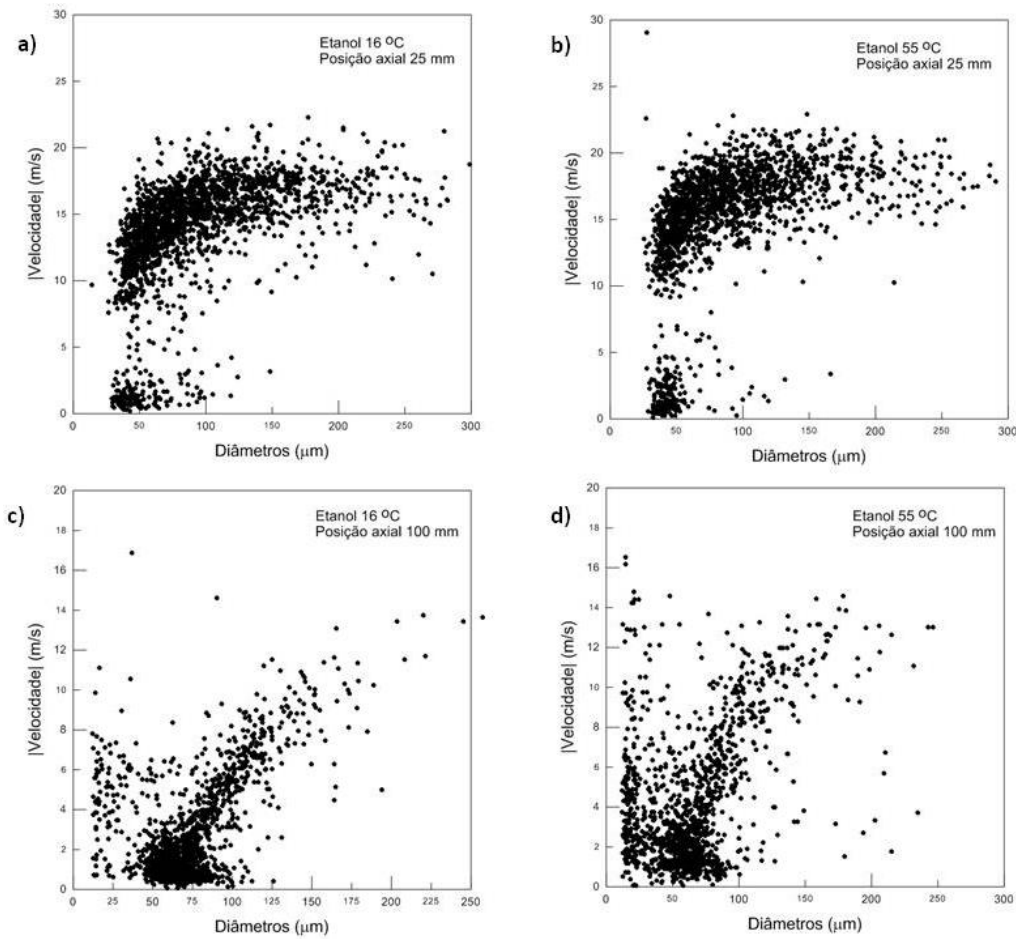


Figura 54: Velocidades das gotas do etanol em função de seus diâmetros para (a) 16 °C, 25 mm (b) 55 °C, 25 mm (c) 16 °C, 100 mm (d) 55 °C, 100 mm.

Uma breve observação nos gráficos de velocidade demonstra que os padrões de velocidade são bastante distintos quando comparados em diferentes posições axiais, porém são muito próximos quando comparados na mesma posição para diferentes temperaturas.

As velocidades para a posição de 25 mm estão prioritariamente concentradas na faixa de 10 a 20 m/s, enquanto que para a posição de 100 mm elas se condensam entre 0 e 10 m/s. A Fig. 54 (a) é muito semelhante à Fig. 54 (b), e a Fig. 54 (c) à Fig. 54 (d). Isto demonstra que a variação da temperatura não influenciou na velocidade das partículas.

Para a temperatura de 16 °C e posição 100 mm os gráficos das componentes da velocidade ( $V_x, V_y$ ) em função dos diâmetros podem ser vistos na Figura 55, onde é possível

visualizar que as componentes na direção vertical são as que realmente contribuem para a magnitude da velocidade  $|V|$ .

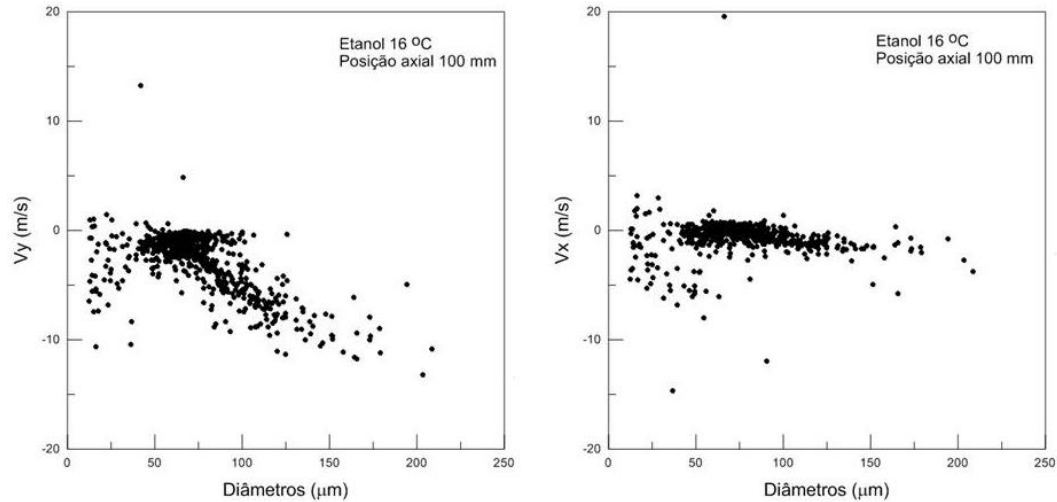


Figura 55: Componentes  $V_y$  e  $V_x$  da velocidade a 16 °C e 100 mm.

#### 4.7.2 Gasolina

Os resultados das velocidades em função dos diâmetros para as gotas de gasolina foram bastante semelhantes aos encontrados para o etanol, com pequenas diferenças nas magnitudes, que para a gasolina ficaram um pouco mais elevadas devido a menor densidade.

Importante ressaltar que para ambos os combustíveis, o decréscimo da velocidade com o afastamento do orifício de descarga (aumento da distância axial) ocorre devido à atuação das forças de arrasto aerodinâmicas. As gotas maiores possuem maiores velocidades devido ao menor coeficiente de arrasto. A diferença de temperatura não foi capaz de alterar as velocidades porque a faixa de variação das propriedades foi baixa, uma vez que a velocidade da gota é influenciada pelos mesmos parâmetros que o diâmetro delas.

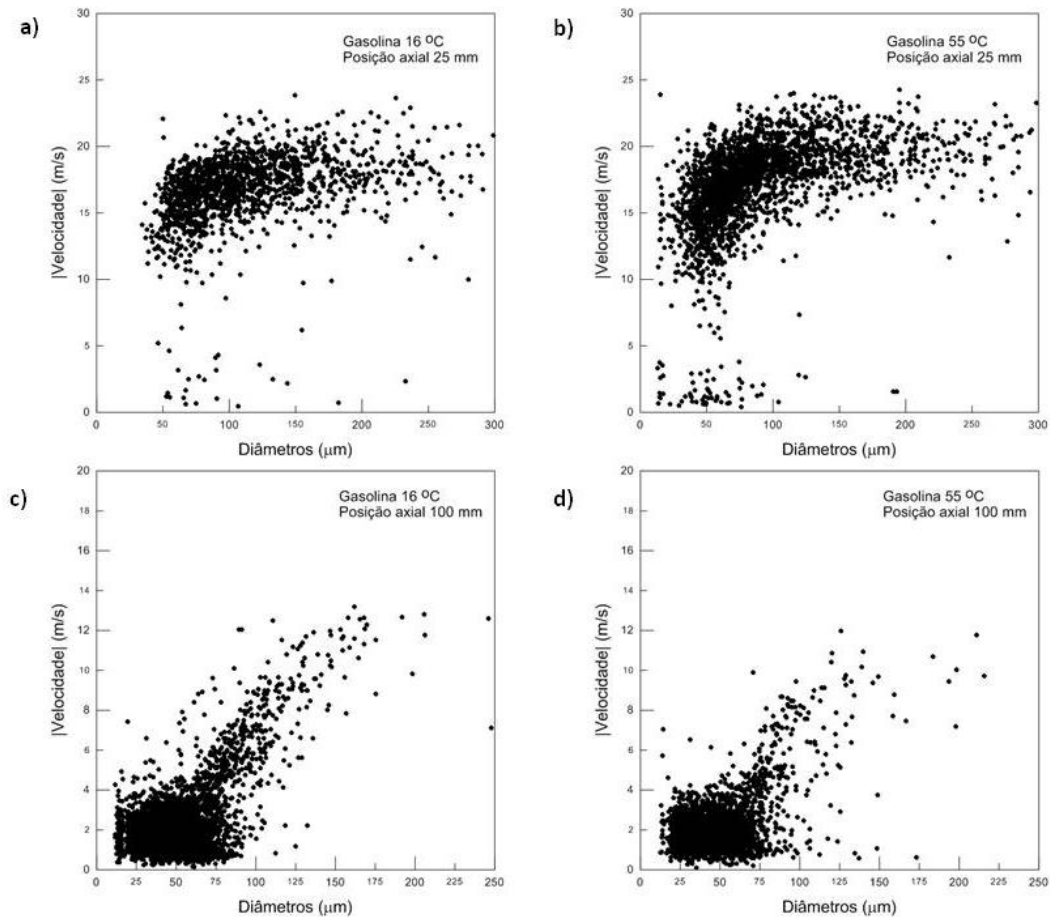


Figura 56: Velocidades das gotas da gasolina em função de seus diâmetros para (a) 16 °C, 25 mm (b) 55 °C, 25 mm (c) 16 °C, 100 mm (d) 55 °C, 100 mm.

#### 4.8 Validação dos Resultados

Ao se procurar referências para validar os resultados de tamanho de partículas há que se atentar para o fato de que diversos fatores devem ser levados em consideração antes que se possa, de fato, efetuar uma comparação. As comparações não podem ser feitas de forma arbitrária, pois os critérios listados a seguir influenciam diretamente as medições e seus resultados. É necessário garantir, portanto, que:

- 1) As propriedades dos fluidos estejam na mesma faixa de valores;
- 2) A geometria dos bicos injetores seja próxima e suas faixas de operação também;

- 3) As faixas de pressões de injeção sejam as mesmas ou, pelo menos, na mesma ordem de grandeza;
- 4) As medidas sejam tomadas nas mesmas posições axiais e radiais com relação ao orifício de descarga;
- 5) O ambiente no qual o líquido é descarregado esteja em condições similares;
- 6) As variações que ocorrem entre as diferentes técnicas ópticas, quando as técnicas comparadas são diferentes, sejam consideradas.

Certificando-se de que a técnica de referência seja *shadowgraphy*, os parâmetros de processamento devem ser observados também. Garantir principalmente que as configurações estejam determinadas para:

- 7) Valores próximos de *global threshold*;
- 8) Filtros de limite superior e inferior próximos;
- 9) Campos de visão e, por conseguinte, resolução, consideravelmente próximos, uma vez que influenciam muito nos resultados.

Qualquer discrepância entre estes itens altera o valor do SMD

Na falta de referências que preencham todos os requisitos, que é o que acontece na prática, as comparações com as referências são feitas de forma parcial. A seguir algumas análises sobre os resultados.

#### 4.8.1 Análise da Equação de SMD

Alguns aspectos da Eq. 2.27, desenvolvida em 2.8, podem ser analisados de maneira a fornecer uma noção de ordem de grandeza de variações do SMD em função das variáveis que se relacionam a ele. Uma análise simplificada pode ser feita para verificar a variação de SMD com a temperatura por meio de suas propriedades. Objetiva-se, portanto, calcular  $SMD(T_1) - SMD(T_2)$ , onde  $T_1$  e  $T_2$  são as temperaturas mínima (mais fria) e máxima (mais quente), respectivamente, para o etanol. Recapitulando a equação,

$$SMD = 4.52 \left( \frac{\sigma \mu_L^2}{\rho_A \Delta P_L} l \cos \theta \right)^{0.25} + 0.39 \left( \frac{\sigma \rho_L}{\rho_A \Delta P_L} (l \cos \theta)^3 \right)^{0.25} \quad (4.12)$$

Propriedades em T<sub>1</sub> (20 °C):  $\sigma = 0,02294$  N/m ;  $\mu = 0,00164$  Pa.s ;  $\rho_A = 1,2$  kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_L = 809$  kg/m<sup>3</sup>;  $\Delta P_L = 3 \cdot 10^5$  Pa;  $l = 2,2235 \cdot 10^{-4}$  m ;  $\theta = 7,5^\circ$  ;

Propriedades em T<sub>2</sub> (50 °C):  $\sigma = 0,02043$  N/m;  $\mu = 0,00095$  Pa.s;  $\rho_A = 1,2$  kg/m<sup>3</sup>;  $\rho_L = 780$  kg/m<sup>3</sup> ;  $\Delta P_L = 3 \cdot 10^5$  Pa;  $l = 2,2235 \cdot 10^{-4}$  m ;  $\theta = 7,5^\circ$ ;

Onde o  $l$  foi calculado com base nas dimensões do bico injetor em teste, através das Eqs. 2.21 e 2.22, reescritas abaixo, e  $\theta$  é a metade do ângulo do cone, valor este cedido pelo fabricante.

$$Y = \frac{(d_o - 2l)^2}{d_o^2} \quad (4.13)$$

$$\frac{(1-Y)^3}{1+Y} = 0.09 \left[ \frac{Acc}{D_{cc} d_o} \right] \left[ \frac{D_{cc}}{d_o} \right]^{0.5} \quad (4.14)$$

Acc, Dcc e d<sub>o</sub> são os mesmo para as duas temperaturas, pois o injetor é o mesmo:

Acc =  $1,178 \cdot 10^{-4}$  m; Dcc = 0,005 m ; d<sub>o</sub> = 0,00025 m;

Os resultados obtidos para SMD(T<sub>1</sub>) e SMD(T<sub>2</sub>) foram 74,9 e 68,7 μm, respectivamente, o que denota que a equação fornece resultados para gotas localizadas na região completamente desenvolvida do *spray*. Em termos de valores numéricos, os resultados da equação ficaram próximos dos resultados experimentais do etanol. Contudo, a variação máxima (SMD(T<sub>1</sub>) - SMD(T<sub>2</sub>) = 6,2 μm) não está de acordo com o observado experimentalmente, principalmente se o aspecto da curva de SMD em função da temperatura, para todo a faixa testada, for observado, como pode ser visto na Figura 57. As barras de erros dos resultados calculados pela equação não foram colocadas no gráfico porque os erros não foram encontrados na literatura.

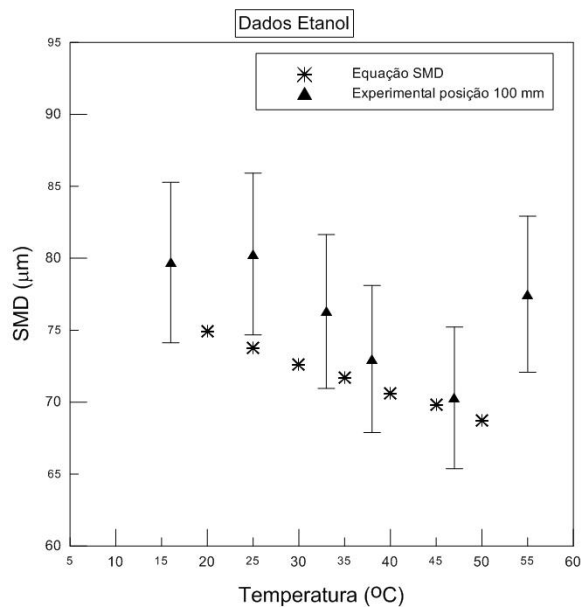


Figura 57: SMD em função da temperatura para o etanol a 3 bar avaliados pela equação de SMD e experimentalmente.

Testando a equação 4.12 para valores maiores de pressão (acima de 150 bar), de modo a avaliar o diâmetro representativo para injeção direta, os valores de SMD obtidos se mostraram de acordo com a literatura, o que permite ter uma base de comparação em termos de magnitude dos SMD's encontrados no presente trabalho. Já a não correspondência dos resultados da variação de SMD com a temperatura pode ter sido motivada por incertezas experimentais e instrumentais, incertezas da equação ou por a equação não retratar exatamente o comportamento na prática.

#### 4.8.2 Variações encontradas

Os resultados expostos anteriormente demonstraram a principal investigação realizada no trabalho (SMD em função da temperatura). A validação das variações encontradas tem como escopo buscar referências na literatura para se certificar de que o comportamento que foi observado nos experimentos condiz com o de outras pesquisas da área.

Conforme já discorrido, há uma série de requisitos a se contemplar antes de efetuar uma comparação direta de resultados. Certificando-se de que uma comparação parcial fosse possível,

o trabalho de Aleiferis et al. [2] foi utilizado para interpretação da variação de SMD com a temperatura. A Figura 58 mostra o resultado obtido por eles, onde o SMD foi calculado em função da temperatura do combustível. A faixa de temperaturas testada foi de 20 a 120 °C, para os combustíveis gasolina e E85 (mistura de gasolina com 85% etanol), a 25 mm de distância da ponta do injetor, com pressão ambiente de 1 bar, PWM de 2,5 ms e pressão de injeção de 150 bar.

Apesar de se tratar de injeção direta e os parâmetros não serem estritamente os mesmos, principalmente a pressão, deseja-se apenas avaliar a variação ocorrida ( $\Delta SMD$ ) e não o valor do SMD em si.

Para a gasolina a variação do SMD ( $SMD_{\max} - SMD_{\min} / SMD_{\min}$ ) com o intervalo completo ( $\Delta T = 100$  °C) foi de 88,9% e para o E85 foi de 90,9%. Para um intervalo similar ao utilizado no presente trabalho ( $\Delta T = 39$  °C), a variação sofrida pelo SMD é a que está destacada com um retângulo na Figura 58 e ampliada no lado direito. A análise exclusiva deste intervalo (20 a 50 °C) fornece uma variação do SMD de 21,4% para a gasolina e 10,5% para o E85, mas não permite determinar o comportamento do SMD para valores intermediários contidos neste intervalo. O que é possível aferir é que a variação acentuada e conclusiva do SMD em função da temperatura fica mais evidente com o range completo de temperatura, pois nesta faixa percebe-se claramente o comportamento descendente da curva.

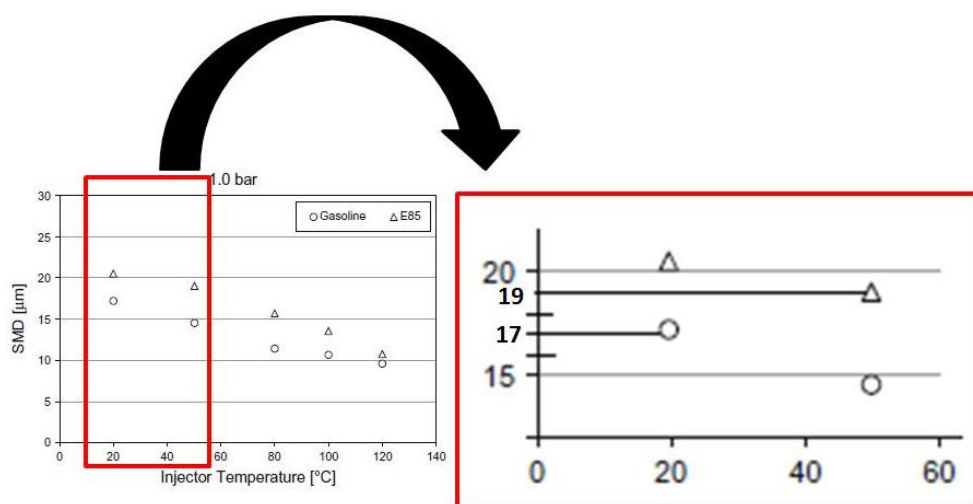


Figura 58: Resultados obtidos para SMD em função da temperatura (Extraída e modificada de Aleiferis et al. [2]).



#### 4.9 Análise Qualitativa do *Spray*

Para esta análise a lente da câmera fotográfica teve de ser substituída por uma lente objetiva com distância focal de 60 mm, modelo Micro-NIKKOR f/2.8D, da Nikon, para que fosse possível abranger o *spray* inteiro. As imagens obtidas para o etanol a 20 °C e 3 bar estão expostas na Figura 59.

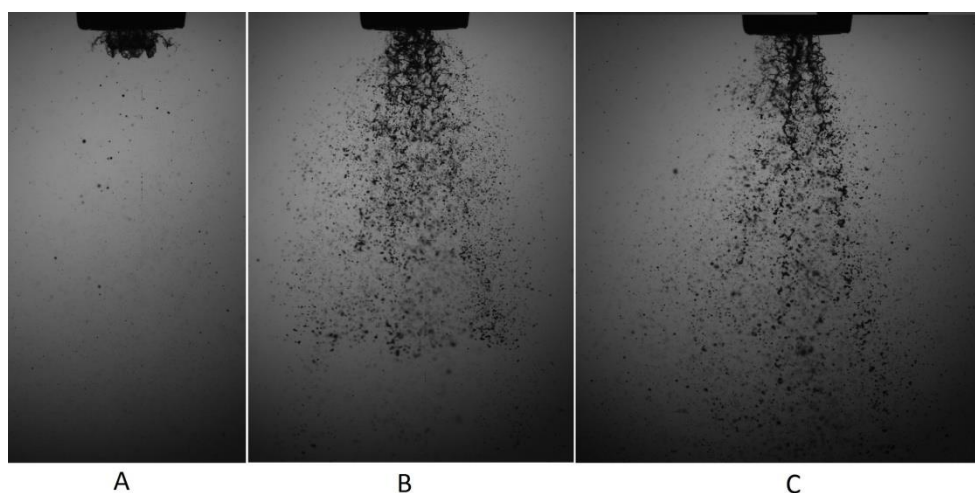


Figura 59: Forma geral do *spray* do etanol em três diferentes tempos de injeção: tempo de injeção A < tempo de injeção B < tempo de injeção A.

A imagem 59(A) apresenta o momento inicial do líquido saindo do bico injetor, onde é possível notar a presença de um núcleo de líquido e o início das instabilidades que darão origem aos ligamentos. Com relação à penetração do *spray*, observa-se que este parâmetro é função do tempo de injeção, aumentando à medida que o tempo aumenta.

Nota-se, ainda, a presença do núcleo líquido e ligamentos grandes em toda porção superior do *spray*, em posições próximas ao orifício de descarga, durante todos os tempos de injeção. Estes ligamentos se quebrarão em gotas e gotículas nas regiões mais afastadas da ponta do injetor. Ainda na porção inicial do *spray*, duas observações podem ser feitas: uma por meio da imagem 59(C), onde é possível distinguir os quatro jatos gerados por cada um dos quatro furos de saída e a interação entre eles; outra na imagem 59(B), onde o aspecto inicial do *spray* se

assemelha a uma folha líquida e não a um jato líquido – folhas líquidas são geradas por fendas enquanto jatos líquidos são gerados por orifícios circulares.

Estas duas constatações também foram obtidas por Anand et al. [3], que estudaram *port fuel injectors (PFI)* ou injetores de injeção indireta com quatro furos. Segundo eles, o formato de folha líquida se deve à interação dos quatro jatos na saída do injetor e o crescimento das instabilidades na região inicial do *spray* aumenta esta interação. Após conduzirem um teste com gasolina e etanol em um injetor único furo, eles concluíram que este jato singular só inicia seu rompimento a partir de 30 mm da saída do bocal, enquanto que o *spray* proveniente do injetor quadri-jato inicia sua quebra a 10 mm. Este comportamento foi atribuído à interação entre os quatro jatos e recebeu destaque no mecanismo de quebra de injetores que se utilizam de baixas pressões de injeção, especialmente quando se compara com injetores de injeção direta com jato único, onde a quebra ocorre devido às pressões altas de injeção.

#### **4.10 Testes e Análises Adicionais**

Os testes adicionais objetivaram investigar outros parâmetros relacionados à atomização, de maneira a aprofundar o conhecimento do sistema. Eles foram realizados apenas com a gasolina.

##### **4.10.1 Teste de Pressão**

A pressão de injeção é um parâmetro operacional que exerce grande influência no processo de atomização. Uma vez que a bancada experimental permitia a variação da pressão de injeção, limitada a faixa de 1 a 5 bar, um teste para avaliar a influência da pressão de injeção nos parâmetros SMD e velocidade das gotas foi conduzido e os resultados são apresentados nas Figuras 60 e 61.

Conforme se observa, o aumento de 4 bar na pressão de injeção causa uma diminuição no SMD de 48% ( $SMD_{máx} - SMD_{min}/SMD_{min}$ ), variando de 77,3 para 52,3  $\mu\text{m}$ . Mais importante do que a variação propriamente dita de SMD é a observação acerca do perfil da curva, que é claramente descendente. Portanto, fica evidente a relação de SMD com a pressão de injeção e, com isso, é possível mais uma vez constatar a insensibilidade de SMD com a faixa de temperatura testada.

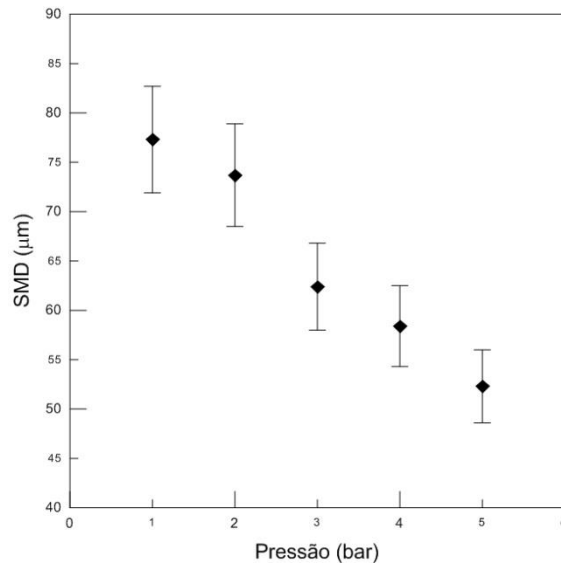


Figura 60: SMD em função da pressão de injeção.

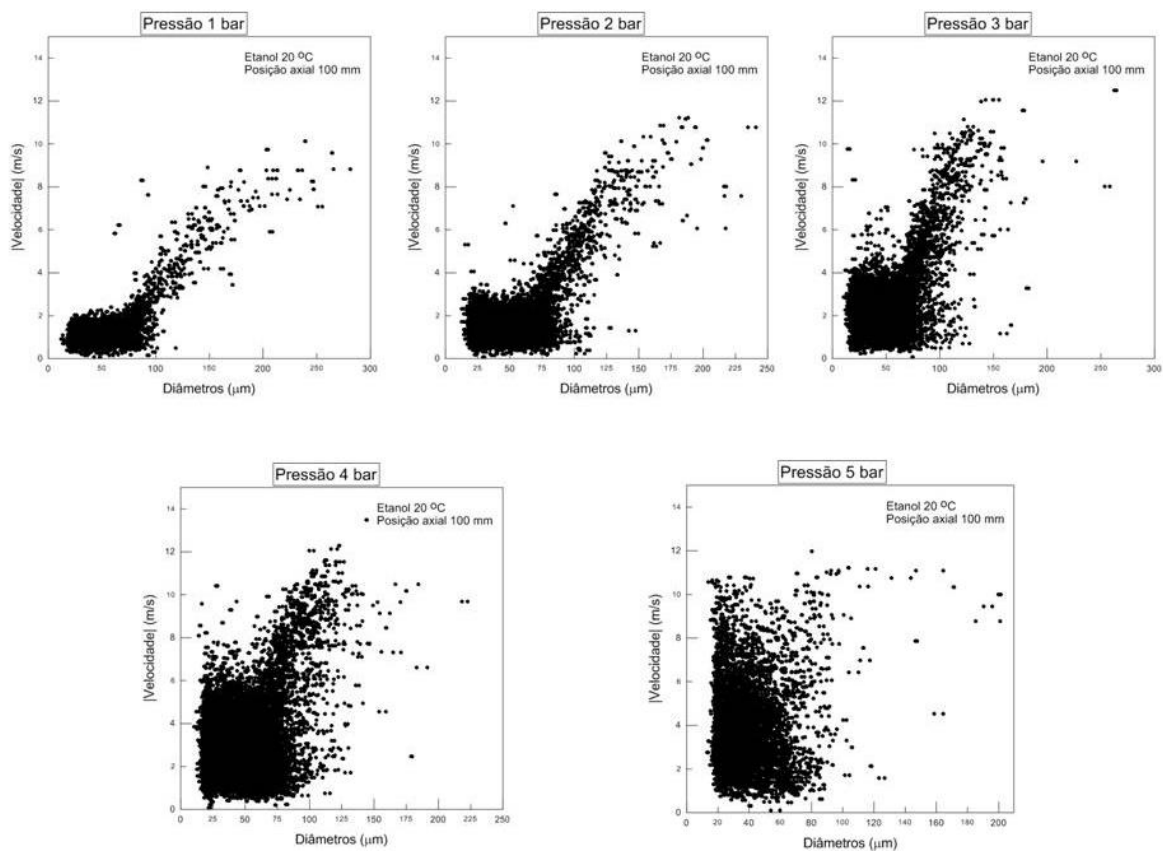


Figura 61: Velocidades em função dos diâmetros das gotas a 20 °C para diferentes pressões: 1, 2, 3, 4 e 5 bar.

A diminuição do tamanho das gotas, representada anteriormente pelo SMD, também pode ser vista nos gráficos de velocidade, em que a concentração maior de pontos se desloca para a esquerda à medida que a pressão aumenta. O aumento da pressão proporciona o aumento da velocidade, que por sua vez aumenta as forças inerciais, levando a um crescimento mais rápido das instabilidades, acelerando a quebra do líquido e, portanto, melhorando a atomização.

#### 4.10.2 Avaliação da Velocidade na Direção Radial

Um teste adicional foi realizado com o objetivo de avaliar a velocidade das gotas na direção radial, conforme indicado na Figura 62. Além da posição inicial  $(x,y) = (0,100)$  [μm], que

já havia sido avaliada nos testes anteriores, as velocidades nas posições (10,100), (20,100) e (40,100) foram calculadas. Os testes foram realizados a 20 °C, 3 bar e 5 ms e resultados estão apresentados na Figura 63.

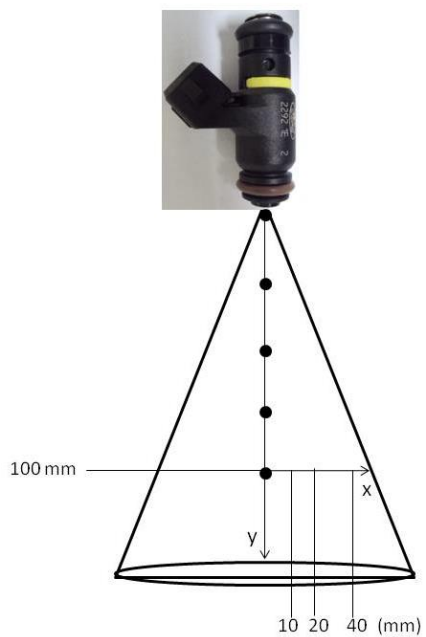


Figura 62: Posições radiais do bico injetor.

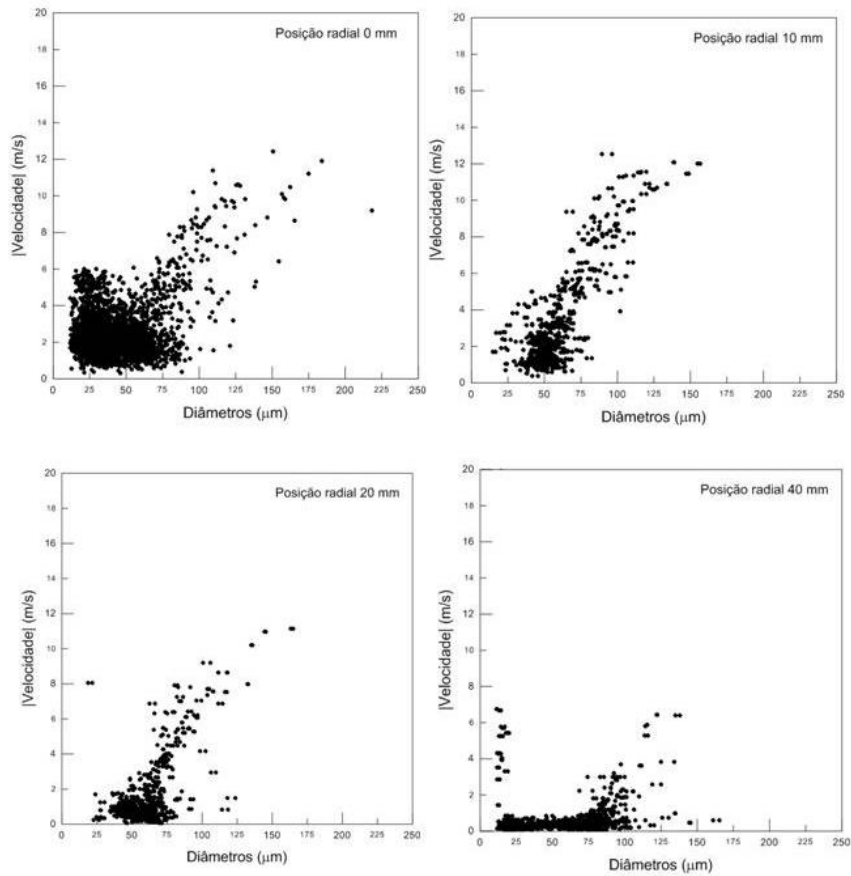


Figura 63: Velocidades das gotas da gasolina em função de seus diâmetros para 4 posições radiais, indicadas nos gráficos: 0, 10, 20 e 40 mm.

Conforme se observa pelo próprio gráfico, a quantidade de partículas detectadas diminui com o afastamento do eixo axial para um mesmo número de imagens capturadas. As velocidades na linha de centro são maiores e vão diminuindo à medida que se aproximam das bordas do *spray*.

## 5 CONCLUSÕES

Parâmetros de atomização do *spray* gerado por um bico injetor de injeção indireta foram estudados em duas posições axiais (25 e 100 mm) com relação a seu orifício de descarga. Gasolina e etanol foram utilizados como combustíveis de teste a diferentes temperaturas (10 a 60 °C). Tamanho de gotas, através do diâmetro representativo SMD (*Sauter Mean Diameter*), distribuição das partículas e campo de velocidades foram medidos a pressão de 3 bar e largura de pulso do injetor de 5 ms, por meio da técnica de *Shadowgraphy*.

Alguns parâmetros de processamento foram testados, de forma a encontrar a melhor configuração de utilização do equipamento, e os resultados mostraram que um nível de contraste (*global threshold*) de 50%, um número de 3000 imagens capturadas, um campo de visão de 4 x 3 mm, um limite superior de 250 µm e um limite inferior de 20 µm para o diâmetro, uma correção de profundidade de campo de visão a partir de 100 µm e uma janela de interrogação retangular estreita (250 x 500 µm) representam uma boa seleção.

A faixa de temperaturas escolhida para os testes não foi capaz de alterar os parâmetros de atomização SMD e velocidade de forma a estabelecer uma relação entre as variáveis, uma vez que nenhum padrão de variação foi observado. Acredita-se que a variação nas propriedades dos combustíveis tenha sido muito pequena para refletir no SMD e velocidade.

Em contrapartida, por meio das distribuições das gotas, foi possível perceber a influência da temperatura nos diâmetros das gotas, os quais diminuem com o aumento da temperatura, mesmo que de forma sutil.

Um comparativo entre a atomização dos dois combustíveis, gasolina e etanol, permitiu dizer que, apesar de formar gotas maiores na posição axial de 25 mm, a gasolina tem uma atomização mais refinada quando se trata do *spray* completamente desenvolvido (100 mm), pois produz gotas menores e em maior quantidade.

No que diz respeito às distâncias axiais, constatou-se que a posição de 100 mm é representativa do estágio completamente desenvolvido do *spray*, ou seja, é uma região onde a segunda atomização já ocorreu.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões para a continuidade desse trabalho são listadas abaixo.

- Se o mesmo equipamento experimental for utilizado, ventilar o duto de exaustão para que este seja o caminho preferencial do vapor de combustível e testar se isso impede que a câmara fique embaçada com temperaturas mais altas;
- Aumentar a faixa de temperatura utilizada nos testes, principalmente as temperaturas mais altas. Isto pode ser feito modificando-se o sistema de aquecimento do combustível. O resfriamento pode ser mantido o mesmo, porém o aquecimento no tanque não permite chegar a altas temperaturas. Realizar o aquecimento diretamente na galeria de combustível, através de resistências elétricas, aproveitando que a pressão é mais alta ali e, portanto, o ponto de ebulição também;
- Testar um fluido extra que possua viscosidade bem distinta da faixa da gasolina e etanol;
- Testar condições ambientes diferentes para verificar a sua influência, principalmente simulando condições similares a do motor;
- Modificar o sistema de pressurização do combustível, permitindo que as pressões cheguem próximas as da injeção direta (trocando o bico injetor também) e realizar exatamente os mesmos testes para examinar a diferença de comportamento;
- No que diz respeito à técnica óptica de medição utilizada, seria interessante melhorar as condições utilizadas:
  - Diminuir o campo de visão, através de alterações nas configurações da câmera fotográfica ou da disposição da bancada de testes, a fim de permitir que gotas menores do que 20  $\mu\text{m}$  sejam medidas, por exemplo;
  - Utilizar outros instrumentos para calibrar o sistema, como, por exemplo, lentes micrométricas para fornecer a escala no plano e, como uma segunda alternativa, uma placa de calibração da profundidade do campo para aprimorar a calibração do sistema, bem como estimar algumas das incertezas.
- Medir os ângulos do *spray* para diferentes temperaturas;



- Comparar os resultados do trabalho com testes similares realizados com outras técnicas, como PDI, PIV (para as velocidades), Difração (LD) ou outros;
- Testar outras equações empíricas de SMD;
- Realizar simulação (CFD) do modelo que foi testado experimentalmente para comparar resultados.

## Referências

- [1] AHLERS, K. D., ALEXANDER, D. R. *Microcomputer Based Digital Image Processing System Developed to Count and Size Laser-Generated Small Particle Images*. Opt. Eng., Vol. 24, No. 6, 1985, pp. 1060-1065.
- [2] ALEIFERIS, P. G. et al. *Mechanisms of Spray Formation and Combustion from a Multi-Hole Injector with E85 and Gasoline*. Combustion and Flame, Vol. 157, 2010, pp. 735-756.
- [3] ANAND, T. N. C., MOHAN, A. M., RAVIKRISHNA, R. V. *Spray Characterization of Gasoline-Ethanol Blends from a Multi-Hole Port Fuel Injector*. Fuel, Vol. 102, 2012, pp. 613-623.
- [4] ARTIUM TECHNOLOGIES INC. *Phase Doppler Interferometry Theory*. Disponível em <[www.artium.com](http://www.artium.com)>. Acesso em 11 de mar. 2013.
- [5] ASHGRIZ, N., YARIN, A. L. *Capillary Instability of Free Liquid Jets*. Handbook of Atomization and Sprays, Ch. 1, 2011, pp. 3-53.
- [6] BACHALO, W. D. *Injection, Dispersion, and Combustion of Liquid Fuels*. 25th Symposium on Combustion/The Combustion Institute, USA, 1994, pp. 333-344.
- [7] BAYVEL, L., ORZECOWSKI, Z. *Liquid Atomization*. Combustion: An International Series. EUA: Taylor & Francis, 1993.
- [8] BOGY, D. B. *Drop formation in a circular liquid jet*. Annu. Rev. Fluid Mech., Vol. 11, 1979, pp. 207-228.
- [9] BUCKINGHAM, E. *On Physically Similar Systems: Illustration of the Use of Dimensional Equations*. Physical Review, Vol. 4, No. 4, 1914, pp. 345-376.
- [10] CAMBRIDGE IN COLOUR. *A Learning Community for Photographers*. Disponível em <[www.cambridgeinclour.com](http://www.cambridgeinclour.com)>. Acesso em junho 2013.

- [11] CARMI, S., GHASSEMZADEH, M. R. *Viscosity and Spray Formation Studies of Coal-Oil Mixtures*. Fuel, 1981, Vol. 60.
- [12] CHEN, S. K., LEFEBVRE, A. H., ROLLBUHLER, J. *Influence of Liquid Viscosity on Pressure-Swirl Atomizer Performance*. Atomization and Sprays, Vol. 1, 1991, pp. 1-22.
- [13] CHIGIER, N. et al. *Spray Control for Maximizing Energy Efficiency and Reducing Emission in Combustion Engines*. Atomization and Sprays, Vol. 21, No. 7, 2011, pp. 553-574.
- [14] CHIGIER, N. A. *The Atomization and Burning of Liquid Fuel Sprays*. Progress in Energy and Combustion, Vol. 2, 1976, pp. 97-114.
- [15] CHUNG, I. P., PRESSER, C. *Fluid Property Effects on Sheet Disintegration of a Simplex Pressure-Swirl Atomizer*. Journal of Propulsion and Power, Vol. 17, No. 1, 2001, pp. 212–216.
- [16] COELHO, P., COSTA, M. *Combustão*. 1 ed. Edições Orion: Portugal, 2007. pp 163-192 e 431-497.
- [17] COUTO, H. S. *Atomização Sprays*. I Escola de Combustão, junho 2007.
- [18] DE CORSO, S. M. *Effect of Ambient and Fuel Pressure on Spray Drop Size*. Engineering for Power, 1960, pp. 10-18.
- [19] ESLAMIAN, M., ASHGRIZ, N. *Swirl, T-Jet and Vibrating-Mesh Atomizers*. Handbook of Atomization and Sprays, Ch. 33, 2011, pp. 755-773.
- [20] DANTEC DYNAMICS. *Phase Doppler Anemometry*. Disponível em <[www.dantecdynamics.com](http://www.dantecdynamics.com)>. Acesso em 5 de mar. 2013.
- [21] DÉCHELETTE, A., BABINSKY, E., SOJKA, P. E. *Drop Size Distributions*. Handbook of Atomization and Sprays, Ch. 23, pp. 479-495.
- [22] EJIM, C. E., FLECK, B. A., AMIRFAZLI, A. *Analytical Study for Atomization of Biodiesels and their Blends in a Typical Injector: Surface Tension and Viscosity Effects*. Fuel, Vol. 86, 2007, pp. 1534-1544.

- [23] FAETH, G. M. *Evaporation and Combustion of Sprays*. Progress in Energy and Combustion, Vol. 9, 1983, pp. 1-76.
- [24] GAO, J., JIANG, D., HUANG Z. *Spray Properties of Alternative Fuels: A Comparative Analysis of Ethanol-Gasoline Blends and Gasoline*. Fuel, Vol. 86, 2007, pp. 1645-1650.
- [25] GARCIA, R. *Combustíveis e Combustão Industrial*. Editora Interciência: Rio de Janeiro, 2002. pp 29-58.
- [26] GASOLINE-ENGINE *Management: systems and components*. 3rd Ed. Plochingen:Robert Bosch GmbH, 2006. 358p.
- [27] GOLDSWORTHY, L.C. et al. *Measurements of Diesel Spray Dynamics and the Influence of Fuel Viscosity using PIV and Shadowgraphy*. Atomization and Sprays, Vol. 21, No. 2, 2011, pp. 167-178.
- [28] GRAF, P. E. *Breakup of Small Liquid Volume by Electrical Charging*. Proceedings of API Research Conference on Distillate Fuel Combustion, API Publication 1701, Paper CP62-4, 1962.
- [29] HEYWOOD, J. B. *Internal combustion engine fundamentals*. New York: McGraw-Hill, 1988. 930p.
- [30] KASHDAN, J. T., SHRIMPTON, J. S., WHYBREW, A. *Two Phase Flow Characterization by Automated Digital Image Analysis. Part 1: Fundamental Principles and Calibration of the Technique*. Part. Part. Syst. Charact. Vol. 20, 2003, pp. 387-397.
- [31] KENNEDY, J. B. *High Weber Number SMD Correlations for Pressure Swirl Atomizers*. Journal of Engineering for Gas Turbine and Power, Vol. 108, Issue 1, 1986, pp. 191-1985.
- [32] KHAVKIN, Y. I. *Theory and Practice of Swirl Atomizers*. Taylor & Francis, Nova York, 2004.
- [33] KIM, K. S., KIM, S. S. *Drop Sizing and Depth-of-Field Correction in TV Imaging*. Atomization and Sprays, Vol. 4, 1994, pp. 65-78.

[34] LAVISION. *Laser Imaging in Fluids Techniques*. Disponível em <www.lavision.de>. Acesso em 5 de mar. 2013.

[35] LAVISION. *ParticleMaster Shadow – Product Manual*. LaVision, Alemanha, 2010.

[36] LEE, K., ABRAHAM, J. *Applications in Internal Combustion Engines*. Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications. Ashgriz, Nasser. 1st Ed, 2011, pp.777-810.

[37] LEE, C. et al. *Spray Structure and Characteristics of High-Pressure Gasoline Injectors for Direct-Injection Engine Applications*. Atomization and Sprays, Vol. 11, No. 2, 2001, pp. 35-48.

[38] LEFEBVRE, A. H. *Atomization and Sprays*. Combustion: An International Series. 1<sup>st</sup> Ed. EUA: Taylor & Francis, 1989.

[39] LEFEBVRE, A. H. *Atomization Performance of Gas Turbine Fuel Injectors*. Paper presented at Spring Meeting of Central States Section of Combustion Institute, Cleveland, OH, May, 1986.

[40] LI, Z. et al. *Effect of Liquid Viscosity on Atomization in an Internal-Mixing Twin-Fluid Atomizer*. Fuel (2012), <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2012.06.097>.

[41] MACHADO, J. C. V. *Reologia e Escoamento de Fluidos: Ênfase na Indústria do Petróleo*. 1<sup>a</sup> Ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2002.

[42] MALVERN. *Mastersizing 2000 manual*. Disponível em <www.malvern.com>. Acesso em 5 de mar. 2013.

[43] MUGELE, R., EVANS, H. D. *Droplet Size Distributions in Sprays*. Ind. Eng. Chem., Vol. 43, No. 6, 1951, pp. 1317 - 1324.

[44] NEYA, K., SATO, S. *Effect of Ambient Air Pressure on the Spray Characteristics of Swirl Atomizers*. Ship Res. Inst., Tokio, Paper 27, 1968.

[45] OMER, K., ASHGRIZ, N. *Spray Nozzles*. Handbook of Atomization and Sprays: Theory and Applications. Ashgriz, Nasser. 1st Ed, 2011, pp.497-579.

[46] PARK, S. H. et al. *Atomization and Spray Characteristics of Bioethanol and Bioethanol Blended Gasoline Fuel Injected Through a Direct Injection Gasoline Injector*. International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 30, 2009, pp. 1183-1192.

[47] PLATEAU, J. *Statique Expérimentale et Théorique des Liquides Soumis aux Seules Forces Moléculaires*. Paris: Gauthier-Villars, Vol. 2, 1873.

[48] PLATEAU, J. *Ann. Chim. Phys.*, Vol. 50, 1857, pp. 97-124.

[49] PULKRABEK, W. W. *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1997. 411p.

[50] PUTNAM, A. *Integratable Form of Droplet Drag Coefficient*. American Rocket Society, Vol. 31, No. 10, 1961, pp. 1467-1468.

[51] RAFFAEL, M., WILLERT, C. E., KOMPENHAUS, J. *Particle Image Velocimetry: A Practical Guide*. Springer: 1998.

[52] RAYLEIGH, L. *On the Instability of Jets*. Proc. London Math. Soc., Vol. 10, 1878, pp. 4-13.

[53] REITZ, R. D. *Atomization and Other Breakup Regimes of a Liquid Jet*. Tese de Ph.D: Princeton University, 1978.

[54] RIZK, N. K., LEFEBVRE, A. H. *Internal Flow Characteristics of Simplex Swirl Atomizers*. Journal of Propulsion and Power, Vol. 1, No. 3, 1985, pp. 193–199.

[55] RIZK, N. K., LEFEBVRE, A. H. *Drop Size Distribution Characteristics of Spill-Return Atomizers*. Journal of Propulsion and Power, Vol. 1, No. 3, 1985, pp. 16–22.

[56] ROSIN, P., RAMMLER, E. *The Laws Governing the Fineness of Powdered Coal*. Journal of the Institute of Fuel, Vol. 7, No. 31, 1933, pp. 29-36.

[57] ROTTENKOLBER, G. et al. *Spray Analysis of a Gasoline Direct Injector by Means of Two-Phase PIV*. Experiments in Fluids, Vol. 32, 2002, pp. 710-721.

- [58] SEMIÃO, V., ANDRADE, P., CARVALHO, M. G. *Spray Characterization: numerical prediction of Sauter mean diameter and droplet size distribution*. Fuel, Vol. 75, No. 15, 1996, pp. 1707 - 1714.
- [59] SIRIGNANO, W. A. *Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays*. Cambridge University Press, 1st Ed, United States of America, 1999.
- [60] SOUZA, E. J. J. *Concepção e Desenvolvimento de Correlações Experimentais para a Simulação, Controle e Otimização de Sprays Gerados em Atomizadores Mecânicos-Centrífugos*. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- [61] SUYARI, M., LEFEBVRE, A. H. *Film Thickness Measurements in a Simplex Swirl Atomizer*. Journal of Propulsion and Power, Vol. 2, 1986, pp. 528-533.
- [62] TAYLOR, C. F. *The internal Combustion Engine*. Massachusetts Institute of Technology – EUA: International Textbook Company, 1971. 558p.
- [63] TAYLOR, S. *CCD and CMOS Imaging Array Technologies: Technology Review*. Relatório Técnico EPC-1998-106, Cambridge, 1998.
- [64] VARGA, B. S., JÓZSA, J. *Particle Tracking Velocimetry (PTV) and its Application to Analyse Free Surface Flows in Laboratory Scale Models*. Per. Pol. Civil Eng., Vol. 52, No. 2, 2008, pp. 63-71.
- [65] VÁZQUEZ, G., ALVAREZ, E., NAVAZA, J. M. *Surface Tension of Alcohol + Water from 20 to 50 °C*. J. Chem. Eng. Data, vol. 40, 1995, pp. 611-614.
- [66] WANG, F., WU, J., LIU, Z. *Surface Tension of Mixtures of Diesel Oil or Gasoline and Dimethoxymethane, Dimethyl Carbonate, or Ethanol*. Energy & Fuels, Vol. 20, 2006, pp. 2471-2474.
- [67] WANG, X. F., LEFEBVRE, A. H. *Atomization Performance of Pressure Swirl Nozzles*. Joint Propulsion Conference, 22<sup>nd</sup>, Huntsville, 1986.

[68] WANG, X. F., LEFEBVRE, A. H. *Mean Drop Sizes from Pressure-Swirl Nozzles*. Propulsion and Power, Vol. 3, No. 1, 1987, pp. 11-18.

[69] WANG, X. F., LEFEBVRE, A. H. *Influence of Ambient Air Pressure on Pressure-Swirl Atomization*. Atomisation and Spray Technology, Vol. 3, No. 3, 1987, pp. 209-226.

[70] WANG, X. et al. *Spray Characteristics of High-Pressure Swirl Injector Fueled with Methanol and Ethanol*. Energy and Fuels, Vol. 19, 2005, pp. 2394-2401.

[71] WEBER, C. *On the breakdown of a fluid jet*, Zum Zerfall eines Flüssigkeitsstrahles. Z. Angew. Math. und Mech., Vol. 11, 1931, pp. 136–154.

[72] WILLIAMS, A. *Combustion of Droplets of Liquid Fuels: A Review*. Combustion and Flame, Vol. 21, 1973, pp. 1-31.

[73] ZHANG, J. et al. *An Experimental Study on Gasoline Direct-Injection Spray and Atomization Characteristics of Alcohol Fuels and Isooctane*. Atomization and Sprays, Vol. 21, No. 5, 2011, pp. 363-374.