

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA POLITÉCNICA

ANDRÉ GUSTAVO SOARES BRASIL SAMPAIO COSTA

Diagnóstico do sistema de injeção de Diesel de motores pesados pela medição da pressão de injeção e seus impactos no spray formado

São Paulo

2023

ANDRÉ GUSTAVO SOARES BRASIL SAMPAIO COSTA

Diagnóstico do sistema de injeção de Diesel de motores pesados pela medição da pressão de injeção e seus impactos no spray formado

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa: Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Energia e Fluidos

Orientador: Prof. Dr. Guenther Carlos Krieger Filho

São Paulo

2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Costa, Andre Gustavo Soares Brasil Sampaio
Diagnóstico do sistema de injeção de Diesel de motores pesados pela medição da pressão de injeção e seus impactos no spray formado / A. G. S. B. S. Costa -- versão corr. -- São Paulo, 2023.
102 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Moto-gerador 2.Motor de combustão interna pesado 3.Sistema de injeção usado 4.Pressão de injeção 5.Spray de Diesel I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

Nome: COSTA, André Gustavo Soares Brasil Sampaio

Título: Diagnóstico do sistema de injeção de Diesel de motores pesados pela medição da pressão de injeção e seus impactos no spray formado

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências. Programa: Engenharia Mecânica. Área de concentração: Energia e Fluidos

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr.

Instituição:

Julgamento:

Prof. Dr.

Instituição:

Julgamento:

Prof. Dr.

Instituição:

Julgamento:

AGRADECIMENTOS

À TEVISA, que financiou e contribuiu tecnicamente no Projeto de P&D No. 0718-000025 da ANEEL, propiciando o desenvolvimento desta Dissertação.

Ao Instituto Mauá de Tecnologia, que executou tecnicamente o Projeto de P&D No. 0718-000025 da ANEEL, desenvolvendo a bancada de testes e apoiando ativamente as fases de testes que são descritas e apresentadas neste texto.

Aos Dr. Clayton Zabeu, Dr. Rafael Berti, Eng. Vinícius Gonçalves, estudante de Eng. Mecânica Yuri Polizio e MSc. Eng. Eduardo Nigro, os meus mais sinceros agradecimentos pela atuação técnica no desenvolvimento da bancada de testes, apoio durante os ensaios em laboratório e pelo compartilhamento de experiências que permitiram a execução e sucesso dos ensaios realizados.

Ao Prof. Dr. Guenther Krieger, sou grato pelo apoio incondicional durante o processo de definição e orientação, dedicando-se atenciosamente à discussão de resultados.

À minha família, Fernando, Fátima, Ana Beatriz, namorada Beatriz e amigos, pela empatia nos momentos de ausência e suporte para transformar as dificuldades em conquistas.

“Se você quer ser bem-sucedido, precisa ter dedicação total, buscar seu último limite e dar o melhor de si”

Ayrton Senna

RESUMO

COSTA, A. G. S. B. S. Diagnóstico do sistema de injeção de Diesel de motores pesados pela medição da pressão de injeção e seus impactos no spray formado.

2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica de Energia e Fluidos – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

É crucial mencionar que com a crescente conscientização ambiental, as discussões sobre os limites de emissão de poluentes e pesquisas por soluções mais eficientes são potencializadas. No caso de termoelétricas que operam moto-geradores, a busca por eficiência e otimização com o propósito de redução de consumo de combustível e emissões de poluentes é constante, além da diminuição dos custos na produção de energia elétrica. Assim, esta dissertação objetivou comparar o desempenho de sistemas de injeção usados do moto-gerador Wärtsilä W20V32, com relação a um conjunto novo, em termos de pressão de injeção e buscando divergências no *spray* formado. Para realizar a caracterização da pressão de injeção dos sistemas testados, utilizou-se uma bancada experimental e duas técnicas avançadas de diagnóstico de *sprays*: aquisição de imagens com câmeras em alta velocidade para observação da macro geometria e interferometria por efeito Doppler para medição de distribuições de diâmetro e velocidade das gotículas do *spray*. Após ensaios de medição da pressão de injeção, verificou-se que desgastes na bomba de alta pressão são mais relevantes na perda de pressurização do fluido a ser injetado, causando alterações no tempo de injeção e quantidade de combustível injetado, quando comparado ao desempenho de injetores usados cuja variação de pressão não apresentou variações significativas. Além disso, observou-se que a variação de pressurização do fluido de teste impactou o desenvolvimento do comprimento de penetração e as distribuições de velocidade e diâmetros das gotículas do *spray*. Ao fim, concluiu-se que é importante monitorar o desgaste dos componentes do sistema de injeção responsáveis pela pressurização do combustível para redução de consumo e emissão de poluentes durante a operação dos motores pesados deste tipo para aplicações em geração de energia ou transporte de cargas.

Palavras-chave: Moto-gerador. Motor de combustão interna pesado. Sistema de injeção usado. Pressão de injeção. *Spray* de Diesel.

ABSTRACT

COSTA, A. G. S. B. S. **Diagnostic of injection system of heavy-duty Diesel engines by injection pressure measurement and their impacts on spray.** 2022. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

It is crucial to mention that with the growing environmental awareness, discussions about emission limits and research for more efficient solutions are encouraged. In the case of powerplants that operate large reciprocating gensets, the search for efficiency and operation optimisation with the purpose of reducing fuel consumption and emissions is constant, as well as reducing costs in the production of power. Therefore, this dissertation aimed to compare the performance loss of used injection systems of the Wärtsilä W20V32 reciprocating engine, when compared with a new set of components, in terms of injection pressure and possible divergences impacting the spray formed. To characterise the injection pressure of the tested systems, an experimental test bench and two advanced techniques for spray diagnosis were used: image acquisition with high-speed cameras to observe macro geometry and phase Doppler interferometry to measure distributions of diameter and velocity of the spray droplets. After testing and measuring the injection pressure, it was found that wear on the high-pressure pump is more relevant in the loss of pressurization, causing changes in the injection time and amount of injected fuel, when compared to the performance of used injectors whose pressure loss is irrelevant to performance drop. Also, it was observed that the fuel pressurization variation impacted the penetration length development and the spray droplet velocity and diameter distributions. In the end, it was concluded that it is important to monitor the wear of the injection system components responsible for pressurizing the fuel to reduce fuel consumption and emissions while operation such heavy duty reciprocating engines for power generation or transport applications.

keywords: Genset. Heavy-duty internal combustion engine. Used injection system. Injection pressure. Diesel spray.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Circuito de injeção de combustível.....	31
Figura 2 - Sistema pistão-cilindro com regulação de débito.....	32
Figura 3 – Principais componentes do porta-injetor	34
Figura 4 - Perfil de pressão de injeção da série MAN-B&W ME para motores 2 tempos	34
Figura 5 - Perfil de pressão de injeção de sistema dual fuel da Wärtsilä	35
Figura 6 - Componentes do sistema de injeção utilizado no W20V32	36
Figura 7 - Estrutura típica de um spray	37
Figura 8 - Esq. Imagem original. Dir. Imagem após detecção de bordas.....	39
Figura 9 - Pressões máximas em diferentes condições de mal funcionamento do sistema de injeção.....	41
Figura 10 - Taxa de liberação de calor para diferentes combustíveis testados com injetores novos (0h) e usados (após 300h)	42
Figura 11 – Visão frontal bancada de testes	43
Figura 12 - Visão traseira da bancada de testes.....	44
Figura 13 - Diagrama do conceito da bancada de testes	44
Figura 14 - Eixo de excêntricos original do motor	45
Figura 15 - Volante de inércia solidário	45
Figura 16 - Método de medição de velocidade angular.....	46
Figura 17 – Montagem do atuador linear	47
Figura 18 – Montagem do sensor Kistler no duto de alta pressão	48
Figura 19 – Acumulador tipo bexiga e pressostatos de monitoramento	48
Figura 20 - Arranjo experimental para ensaios de captura de imagens	51
Figura 21 - Plumias do spray	51
Figura 22 – Modelo de peça com excêntrico para sincronização das imagens	53
Figura 23 – Sinais de sincronização da câmera de alta velocidade	54
Figura 24 - Padrão de interferência ideal do cruzamento de dois feixes cilíndricos de laser. Na figura λ é o comprimento de onda, δ o espaçamento entre as franjas e γ o ângulo entre os feixes no cruzamento.....	55
Figura 25 - Desenho esquemático da variação do espaçamento entre franjas responsável pela mudança de fase no sinal Doppler medido no receptor	56

Figura 26 - Arranjo experimental para aplicação da técnica PDI para medição de diâmetro e velocidade das gotículas do spray	57
Figura 27 - Equipamentos do PDI.....	58
Figura 28 – Arranjo experimental para aplicação da técnica PDI	58
Figura 29 - Aparato experimental para isolamento de pluma e coleta de fluido	59
Figura 30 – Dispositivo para alinhamento dos feixes laser em um ponto de coordenadas conhecidas	60
Figura 31 – Sinal de trigger do equipamento PDI	60
Figura 32 – Pluma do spray utilizada nos experimentos com PDI.....	61
Figura 33 – Curva média da pressão no interior do cilindro utilizando equipamento da Windrock.....	63
Figura 34 – Distribuição dos valores do pico de pressão do cilindro.	64
Figura 35 – Distribuição dos valores de posição angular do pico de pressão de cilindro	64
Figura 36 – Distribuição dos valores de posição da cremalheira.....	65
Figura 37 – Distribuição de dados de pressão média efetiva indicada	66
Figura 38 - Massa de fluido de teste pesada em balança externa.....	67
Figura 39 – Ensaio de injetores (bomba injetora padrão)	68
Figura 40 – Ensaio de bombas injetoras com o injetor padrão (SI)	69
Figura 41 – Ensaio dos conjuntos de bomba e injetores oriundos dos moto-geradores	69
Figura 42 – Maior diferença no ensaio das bombas injetoras.....	71
Figura 43 – Maior diferença no ensaio dos injetores	71
Figura 44 – Maior diferença no ensaio dos conjuntos com respectivos componentes (bomba e injetor).....	72
Figura 45 – Ruído gerado pela névoa do fluido de teste	73
Figura 46 – Imagem obtida pela câmera sem processamento	73
Figura 47 – Histograma da imagem analisada antes do pós-processamento	74
Figura 48 – Imagem segmentada destacando as regiões do spray afetadas.....	74
Figura 49 – Resultado parcial dos pós processamentos do spray para avaliação de sua macro geometria	75
Figura 50 – Exemplo de variação de intensidade dos pixels nas imagens pré-processadas	76

Figura 51 – Histograma de imagens pré-processamento mostrando variação da intensidade dos pixels.	76
Figura 52 – Fluxograma de processamento das imagens para determinação da macro geometria.	77
Figura 53 – Variação do instante de início do evento de injeção.	77
Figura 54 – Evento de injeção indesejado após evento de injeção principal.	79
Figura 55 – Detalhe na imagem 56 do spray (pós-processamento) mostrando a presença de fluido de teste durante evento de injeção indesejado.	79
Figura 56 – Eventos de injeção de curta duração subsequentes ao evento de injeção principal (imagens pré-processamento)	80
Figura 57 – Detalhes das imagens pré-processadas (Esq. – Imagem 57 e Dir. – Imagem 59) do spray mostrando a presença de fluido de teste durante os eventos de injeção subsequentes.....	80
Figura 58 – Imagens média num determinado instante mostrando diferenças na geometria dos sprays formados de acordo com os ensaios de bomba e injetor	81
Figura 59 – Resultado de pós-processamento das imagens: Determinação de regiões do spray	82
Figura 60 – Determinação de regiões do spray para uma configuração de componentes usados	83
Figura 61 – Numeração das plumas do spray, respectivas regiões (em vermelho) e exemplo do comprimento de penetração (em preto) na pluma 1.	84
Figura 62 - Histórico de velocidade de uma medição com técnica PDI - Equipamento da Artium.....	86
Figura 63 – Filtro de velocidade aplicado aos dados obtidos para o conjunto N1.....	87
Figura 64 – Exemplo de distribuições de velocidade de gotículas dos sprays obtidas após aplicação de filtro.....	88
Figura 65 – Exemplo de distribuições de diâmetro de gotículas dos sprays obtidas após aplicação do filtro.....	88
Figura 66 – Distribuições de diâmetros pós-processadas para coordenadas $y = -63,3 \text{ mm} \mid z = 450 \text{ mm}$	89
Figura 67 – Distribuições de velocidades pós-processadas para coordenadas $y = -63,3 \text{ mm} \mid z = 450 \text{ mm}$	89
Figura 68 – Velocidade média das gotículas do spray para coordenadas $y = -63,3 \text{ mm} \mid z = 450 \text{ mm}$	90

Figura 69 – Diâmetro médio das gotículas do spray para coordenadas $y = -63,3 \text{ mm}$ | $z = 450 \text{ mm}$ 91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados do motor W20V32 C	35
Tabela 2 – Características do fluido Settori 4113.....	49
Tabela 3 – Condições dos componentes usados do sistema de injeção testados.....	62
Tabela 4 – Dados dos cilindros dos moto-geradores dos conjuntos selecionados para testes.....	66
Tabela 5 - Resultados de massa de injetada	68
Tabela 6 – Comprimento de penetração em milímetros (mm) para cada pluma dos sprays analisados.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

APCP – *Alpha Peak Cylinder Pressure*

CO – Monóxido de Carbono

ENCIT – Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas.

HFO – *Heavy Fuel Oil*

HP – *Horsepower*

HPPA – *High Pressure Pump A*

HPPB – *High Pressure Pump B*

IA – Injetor A

IB – Injetor B

IMEP – Indicated Mean Effective Pressure

IMT – Instituto Mauá de Tecnologia

kHz – Quilohertz

LFO – *Light Fuel Oil*

MCI – Motor de Combustão Interna

MIC – Motor de ignição por compressão

MW – Mega Watts

NO_x – Óxido Nitroso

OCB – Óleo combustível

PCP – *Peak Cylinder Pressure*

PDI – *Phase Doppler Interferometry*

PMS – Ponto morto superior

PNP – Positivo-negativo-positivo

RP – *Rack Position*

SAE – *Society of Automotive Engineers*

SI – *Standard Injector*

SP – *Standard Pump*

TEVISA – Termelétrica Viana AS

UG – Unidade Geradora

UTE – Usina Termoelétrica

LISTA DE SÍMBOLOS

P_0 sensor piezo resistivo 4067E da fabricante Kistler

P_1 monitoramento de pressão nas linhas de baixa pressão de fluido de teste

P_2 óleo lubrificante com pressostatos eletromecânicos

D diâmetro

v velocidade

f_d frequência do sinal Doppler gerado

δ espaçamento entre as franjas

λ função do comprimento de onda

γ ângulo de intersecção

Φ mudança de fase do sinal Doppler

Δ comprimento de onda espacial

F distância focal

s calibração

D_{10} diâmetro médio linear

D_{32} diâmetro médio de Sauter

$n_{c(i)}$ número de gotículas contadas da i -ésima classe de diâmetros

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	27
2	OBJETIVOS.....	29
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
3.1	SISTEMA DE INJEÇÃO DE MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO 31	
3.2	O MOTOR WÄRTSILÄ W20V32 E SEU SISTEMA DE INJEÇÃO	35
3.3	A INJEÇÃO DE COMBUSTÍVEL.....	36
3.3.1	Comportamento do spray – macro e micro geometria.....	37
3.3.2	Experimentos de estudo do spray	38
3.4	AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO DESEMPENHO DO SISTEMA DE INJEÇÃO NO PROCESSO DE COMBUSTÃO	40
4	MATERIAIS E MÉTODOS	43
4.1	A BANCADA DE TESTES.....	43
4.2	ENSAIOS DE MEDIÇÃO DE PRESSÃO E MASSA DE FLUIDO INJETADO 49	
4.3	EXPERIMENTOS PARA ESTUDO do <i>SPRAY</i> FORMADO	50
4.3.1	Metodologia experimental para comparação da macro geometria dos <i>sprays</i> 50	
4.3.2	Metodologia experimental para comparação da micro geometria dos <i>sprays</i> 54	
4.4	SELEÇÃO DE SISTEMA DE INJEÇÃO USADOS	62
4.4.1	Obtenção de dados do motor	62
4.4.2	Componentes selecionados para comparação de desempenho	63
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	67
5.1	MEDIÇÃO DE PRESSÃO DE INJEÇÃO E MASSA DE FLUIDO INJETADO DOS CONJUNTOS SELECIONADOS.....	67

5.2	COMPARAÇÃO DA MACRO GEOMETRIA DOS <i>SPRAYS</i> FORMADOS ..	72
5.2.1	Problemas na captura das imagens de alta velocidade	72
5.2.2	Resultados de imagens para avaliação da macro geometria do <i>spray</i> .	77
5.3	COMPARAÇÃO DA MICRO GEOMETRIA DO <i>SPRAYS</i> FORMADOS	86
5.3.1	Problemas na sincronização para obtenção de dados dos eventos de injeção	86
5.3.2	Resultados da técnica PDI para avaliação da micro geometria do <i>spray</i>	88
6	CONCLUSÕES	93
7	REFERÊNCIAS.....	95
	APÊNDICE A.....	99
	APÊNDICE B.....	101

1 INTRODUÇÃO

Devido à crescente conscientização ambiental, as discussões sobre limites de emissões de poluentes tornam-se mais frequentes e leis governamentais são criadas com o objetivo de reduzir emissões em equipamentos geradores de energia que utilizam combustíveis fósseis. Assim, é importante ter conhecimento dos processos que garantem a conversão da energia química do combustível em trabalho mecânico para propulsão de veículos, geração de energia elétrica e demais aplicações. Dentro do contexto de termelétricas e mais especificamente das que operam motores de combustão interna (MCI) para produção de energia elétrica, torna-se relevante o conhecimento de fatores que impactam no rendimento dos geradores.

Dentro da estratégia da matriz energética brasileira, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) realiza leilões para empresas produtoras de energia de reserva. Em 2007, a Termelétrica Viana SA (TEVISA) venceu um dos leilões e, em 2010, concluiu a instalação de uma usina termelétrica com capacidade de produção de, aproximadamente, 175 MW em Viana (UTE Viana). Esta usina produz energia elétrica ao utilizar moto-geradores da Wärtsilä (Motor W20V32 C) que queimam óleo combustível (OCB) como fonte primária.

Entre os componentes do MCI que influenciam diretamente seu consumo e emissão de poluentes, pode-se destacar o sistema de injeção de combustível, extremamente importante no processo de combustão em motores de ciclo Diesel, os motores de ignição por compressão (MIC). Para estes, sabe-se que o início da injeção de combustível tem efeitos particularmente relevantes na formação de NO_x , CO e material particulado. Atrasos no tempo de injeção de combustível resultam em níveis de pressões e temperaturas menores durante o processo de combustão, diminuindo a formação de NO_x . E, avanços no tempo de injeção proporcionam a entrada de combustível a menores pressões e temperaturas dentro do cilindro, retardando o início do processo de combustão e aumentando a quantidade de combustível injetada durante a fase inicial do processo (Duran et al., 2012).

Em outro trabalho publicado, Grados et al. (2009) destacaram a importância da temperatura de combustão na formação do NO_x . Segundo os autores, o processo de formação de NO_x é complexo. No entanto, alguns mecanismos de formação deste poluente são conhecidos, como o mecanismo de Zeldovich que modela a formação

do NO_x em função da temperatura durante a combustão e mostra seu aparecimento para temperaturas que excedem 2000 K. Contudo, mesmo que as emissões de NO_x estejam relacionadas à temperatura da combustão, existem combustíveis pesados que apresentam altas concentrações de nitrogênio e requerem atenção especial.

Apesar de todas as considerações feitas sobre a temperatura de combustão, Duran et al. (2009) objetivaram este artigo na investigação dos efeitos do desgaste dos componentes do sistema de injeção de motores Diesel de aplicação marítima e correlacionar seus respectivos impactos na emissão de NO_x. E no caso, os principais redutores de desempenho relacionados ao sistema de injeção de combustível nos motores de ignição por compressão são a redução de pressão de acionamento do injetor, desgaste do bico injetor, desgaste dos componentes da bomba de combustível, ocasionando desajustes no tempo de injeção e desgaste do excêntrico atuador do sistema de injeção, em aplicações de sistemas puramente mecânicos (sem atuadores eletrônicos).

Sabendo que o funcionamento do sistema de injeção de combustível é muito importante para o rendimento e emissões de gases poluentes dos motores, a TEVISA iniciou um projeto de pesquisa e desenvolvimento (P&D) sob influência de programas de incentivo da ANEEL em 2018 – Projeto P&D No. 0718-000025 – (Zabeu *et. al.*, 2022). Este projeto tem por objetivo entender como desgastes reduzem o desempenho do sistema de injeção e impactam no rendimento e emissões de poluentes de seus moto-geradores após horas em operação.

Embora esta dissertação esteja inserida no contexto do projeto de P&D citado, o foco deste texto é apresentar a caracterização de desempenhos de sistemas de injeção e seus impactos nos *sprays* formados. Também, apesar do tema desempenho de sistema de injeção estar relacionado diretamente ao processo de combustão, ensaios de motores e a parte de emissões não são abordados nesta dissertação. Inicialmente, o texto apresenta seu propósito e objetivos específicos, partindo da análise de medição da pressão de injeção de combustível. Em seguida, os próximos capítulos contextualizam este tema na literatura publicada, descrevem a metodologia utilizada nos experimentos realizados, mostram os resultados obtidos e respectivas discussões, finalizando com conclusões.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal desta dissertação é a análise comparativa entre desempenho de componentes de sistemas de injeção novos e usados por observações de variações da pressão de injeção e como estas impactam no *spray* formado.

Para que tal finalidade seja atingida, as seguintes etapas de trabalho foram determinadas como objetivos específicos a serem cumpridos:

- Testar diferentes configurações de sistemas de injeção novos e usados em uma bancada que permita reproduzir o funcionamento da bomba e injetor em condições de operação similares às do motor.
- Selecionar sistemas de injeção desgastados que possivelmente impactam o rendimento do motor para utilização no estudo proposto por esta dissertação.
- Realizar a medição da pressão de injeção e quantidade de combustível injetado nos sistemas usados que forem testados na bancada, comparando com um sistema de injeção novo utilizado como referência.
- Verificar existência de impactos na geometria do *spray* formado, a partir da captura de imagens em alta velocidade, para sistemas de injeção usados, e utilização de diagnóstico a laser por técnica de interferometria por efeito Doppler para medição das respectivas distribuições do diâmetro das gotículas e suas velocidades.
- Comparar os resultados de variações observadas de características geométricas e distribuições de diâmetro e velocidade das gotículas do *spray* que possam ser causadas pelo mal de desempenho do sistema de injeção em termos de pressão de injeção.

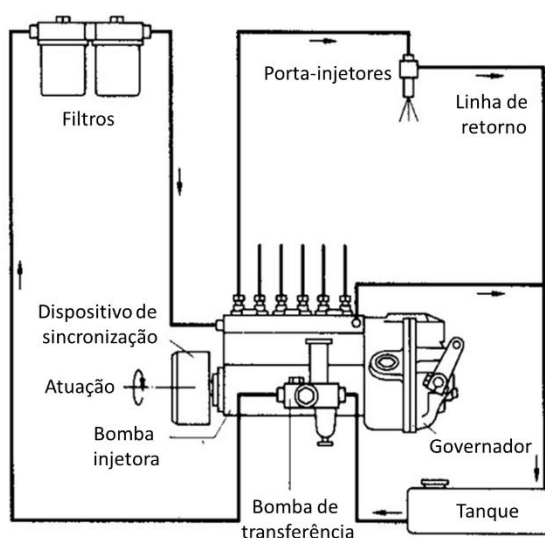
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Normalmente, em motores Diesel, o combustível é injetado diretamente dentro do cilindro momentos antes do pistão finalizar o tempo de compressão, atingindo seu ponto morto superior (PMS). Após frações de segundos do início de injeção de combustível, o processo de combustão começa e sua duração é maior que o tempo do evento de injeção. Portanto, esta parte do texto explica como são os princípios de funcionamento de um sistema de injeção, similar ao que será investigado, o desenvolvimento do spray e suas características importantes para o processo de combustão, concluindo com os impactos que podem ser causados na operação do motor e métodos para avaliação desses.

3.1 SISTEMA DE INJEÇÃO DE MOTORES DE IGNIÇÃO POR COMPRESSÃO

Os tradicionais sistemas de injeção são compostos pela bomba injetora com regulador de velocidade (governador) e avanço centrífugo, linhas de injeção e de retorno, porta-injetores, filtros de combustível, bomba de transferência (ou de alimentação) e tanque de armazenamento de combustível. Na Figura 1 encontra-se um exemplo do circuito básico de injeção de combustível.

Figura 1 - Circuito de injeção de combustível



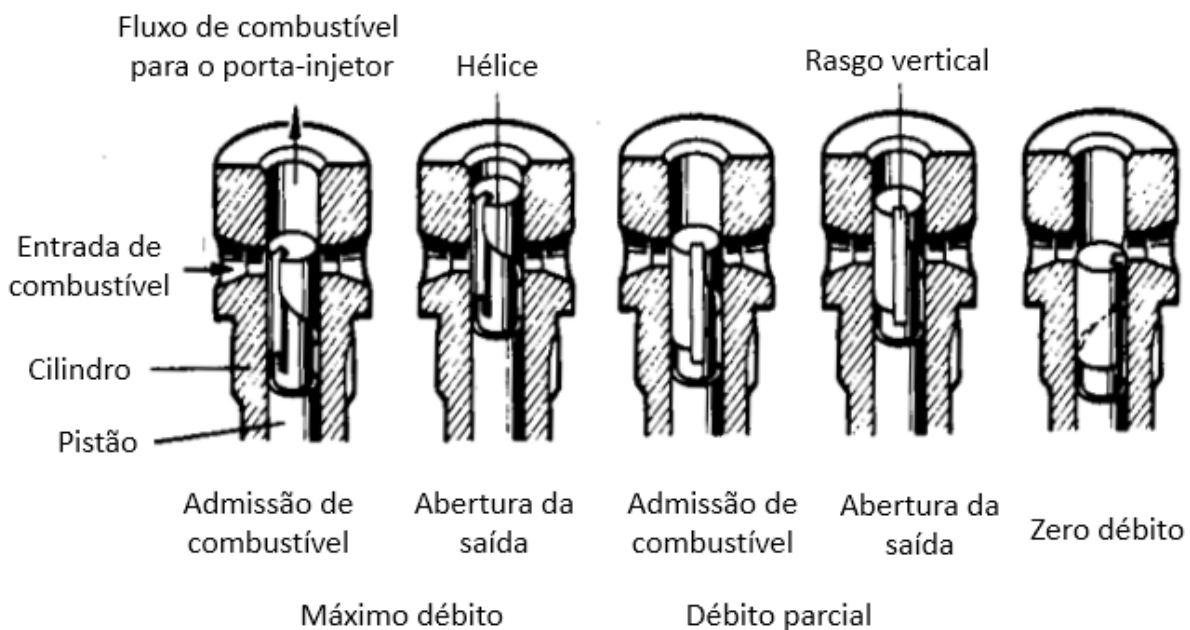
Fonte: Adaptado de Heywood (1988).

O circuito se inicia com a bomba de transferência retirando combustível do tanque e enviando à bomba de alta pressão (bomba injetora). No entanto, o

combustível é filtrado para garantir que corpos estranhos, que possam estar presentes no combustível, não danifiquem os componentes internos desta bomba.

Para atuação da bomba injetora, há um excêntrico que também serve como parte do dispositivo de sincronização do tempo de injeção em relação ao ciclo do motor. Assim, quando o combustível entra na bomba injetora, o excêntrico atua um pistão montado dentro de um cilindro (Figura 2). O movimento de subida e descida do pistão é responsável por pressurizar o combustível e enviá-lo ao porta-injetor.

Figura 2 - Sistema pistão-cilindro com regulagem de débito



Fonte: Adaptado de Heywood (1988).

Pela Figura 2, nota –se a existência de um rasgo na lateral do pistão da bomba injetora. Este rasgo, na vertical, tem formato de hélice e serve para determinar o fim do período de injeção de combustível, além de regular a quantidade de combustível injetada. O funcionamento de regulagem do débito de combustível acontece de acordo com as seguintes etapas:

- Combustível entra pelo orifício e preenche a cavidade do cilindro;
- Pistão sobe de acordo com o perfil do excêntrico atuante, pressurizando combustível por um duto de alta pressão até o porta-injetor e iniciando o período de injeção, conforme calibração de pressão do combustível que permita a abertura da agulha;

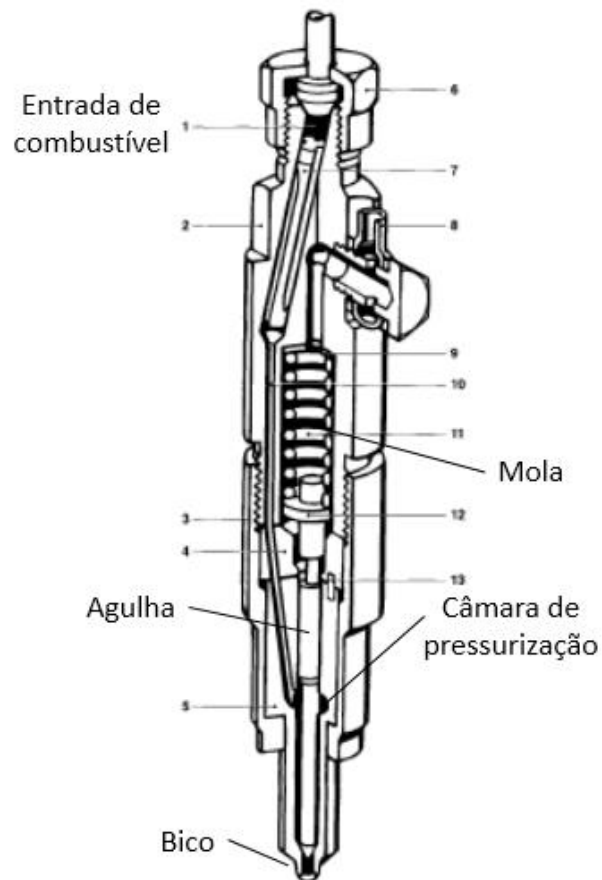
- Período de injeção é finalizado quando o rasgo em formato de hélice comunica a região do topo do pistão com o orifício de entrada do cilindro, aliviando a pressão nesta região e conseqüentemente, duto de alta pressão e porta-injetor. Neste último, causando o fechamento da agulha e impedindo a injeção de combustível no interior do cilindro do motor.

Assim, a quantidade de combustível injetada e o tempo de injeção em cada ciclo do motor são determinados pelo perfil do excêntrico atuante da bomba injetora e regulagem de débito de combustível, realizada de acordo com a posição do rasgo em formato de hélice. Deve-se ressaltar que o elemento atuante na regulagem do débito é composto por um mecanismo de pinhão e cremalheira que atua mudando a posição angular do rasgo, de forma a regular a quantidade de combustível a ser injetado. Isto afeta o curso efetivo do pistão, alterando a dinâmica de pressurização de combustível dentro do sistema e por fim, a massa de combustível entregue.

Nas configurações de sistema de injeção de combustível dos moto-geradores a serem investigados, o acionamento do injetor é mecânico. Conforme entrada de combustível no porta-injetor, o fluido em alta pressão preenche a câmara de pressurização empurrando a agulha com uma força superior a aplicada pela mola e assim, a agulha desloca-se para cima acionando o bico injetor e permitindo que o combustível seja injetado no interior do cilindro do motor pelos orifícios. O mecanismo deste porta-injetor pode ser ajustado apenas para uma determinada pressão durante o seu funcionamento. Assim, caso queira-se alterar a pressão de acionamento, é necessário regular a força da mola do porta-injetor para acionamento na pressão desejada. Uma vista em corte do mecanismo do porta-injetor é mostrada na Figura 3.

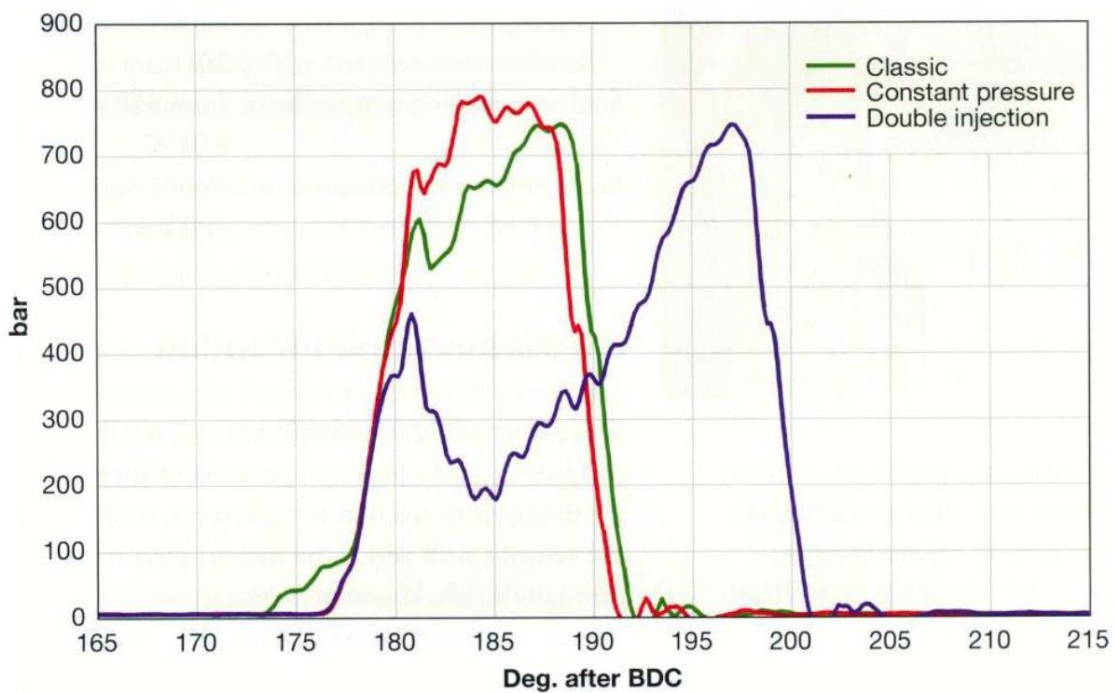
Como explicado, o processo de pressurização de combustível é o principal responsável pela dinâmica de funcionamento deste tipo mecânico de sistemas de injeção. Existem três tipos de classificações para diferentes curvas de pressão de sistema de injeção mecânicos: clássico, pressão constante e dupla injeção (Figura 4). Em outros projetos de injetores utilizados em motores da Wärtsilä, o perfil de pressão do combustível possui um comportamento bastante dinâmico (Figura 5) que se assemelha ao perfil “*classic*” observado na Figura 4.

Figura 3 – Principais componentes do porta-injetor



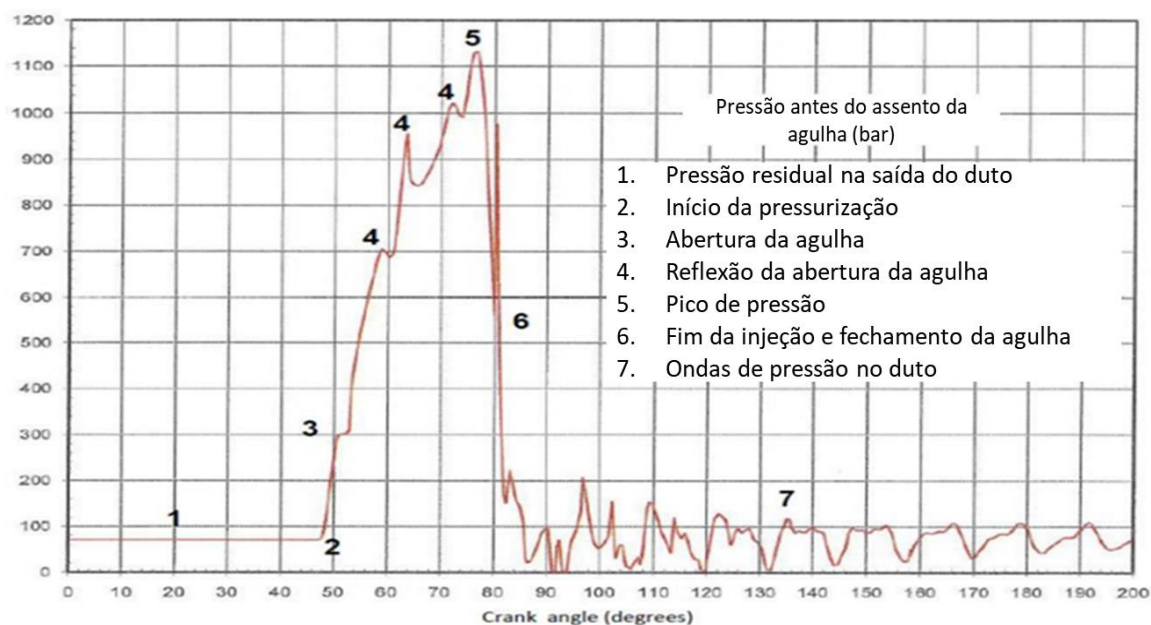
Fonte: Adaptado de Challen e Baranescu (1999).

Figura 4 - Perfil de pressão de injeção da série MAN-B&W ME para motores 2 tempos



Fonte: Kuiken, 2008.

Figura 5 - Perfil de pressão de injeção de sistema dual fuel da Wärtsilä



Fonte: Adaptado de Luoma, 2020.

3.2 O MOTOR WÄRTSILÄ W20V32 E SEU SISTEMA DE INJEÇÃO

O motor W20V32 C da Wärtsilä (Tabela 1) possui 20 cilindros em arquitetura de V (10 cilindros no banco A e outros 10 cilindros no banco B). Cada cilindro possui o próprio sistema de injeção (bomba de alta pressão e injetor) e produz uma potência indicada de aproximadamente 500 kW, dependendo das condições de seus componentes durante operação. O funcionamento do sistema de injeção de combustível utilizado nos moto-geradores da Wärtsilä aplicados na UTE Viana são baseados apenas em princípios mecânicos, ou seja, sem utilização de sensores para observação de parâmetros que permitiram a atuação eletrônica de seus componentes.

Tabela 1 - Dados do motor W20V32 C

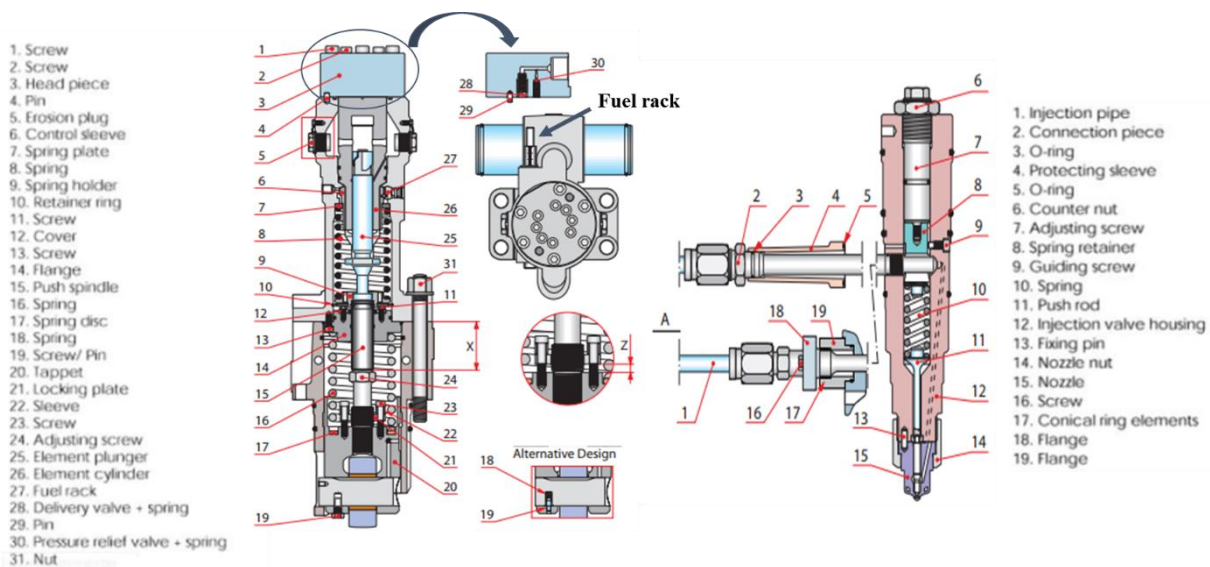
Diâmetro do cilindro	320 mm
Curso	400 mm
Número de válvulas por cilindro	2 válvulas de admissão 2 válvulas de escape
Sentido de rotação	Horário
Velocidade	720/ 750 rpm
Velocidade média do pistão	9,6/ 10 m/s
Eficiência mecânica	0,9
Razão de compressão	16,0:1

Fonte: Wärtsilä, 2014.

Conforme mencionado no item 3.1, a característica alternativa da bomba de combustível de alta pressão é obtida pelo movimento de subida e descida do pistão que está montado em um determinado excêntrico do eixo comando que também aciona as válvulas de admissão e exaustão do motor. Uma vez pressurizado pela bomba injetora, o combustível passa pela válvula de entrega (nº 29 – Figura 6, esquerda), escoando pelo duto de alta pressão até a uma câmara dentro do porta-injetor onde atua a agulha para permitir a injeção através dos orifícios do injetor. O injetor (nº 15 – Figura 6 direita) possui 10 orifícios com diâmetro de 0,50 mm cada cuja pressão para início da injeção é de 600 bar, calibrada pela pré-carga da mola (nº 10 – Figura 6 direita).

Devido à longa trajetória do projeto do motor W20V32 no mercado, pertencente à família de motores W32, há diversas peças do sistema de injeção que foram desenvolvidas para diferentes especificações da família do motor, possuindo diferentes desempenhos (Karakainen, 2015).

Figura 6 - Componentes do sistema de injeção utilizado no W20V32



Fonte: Costa *et. al.*, 2020.

3.3 A INJEÇÃO DE COMBUSTÍVEL

O processo de injeção de combustível no cilindro ocorre através do(s) orifício(s) do bico injetor à uma grande diferença de pressão. Normalmente a pressão de injeção é da ordem de centenas de bar ou até mesmo superior a 1000 bar para o caso de motores aplicados a moto-geradores, enquanto o ar contido no cilindro

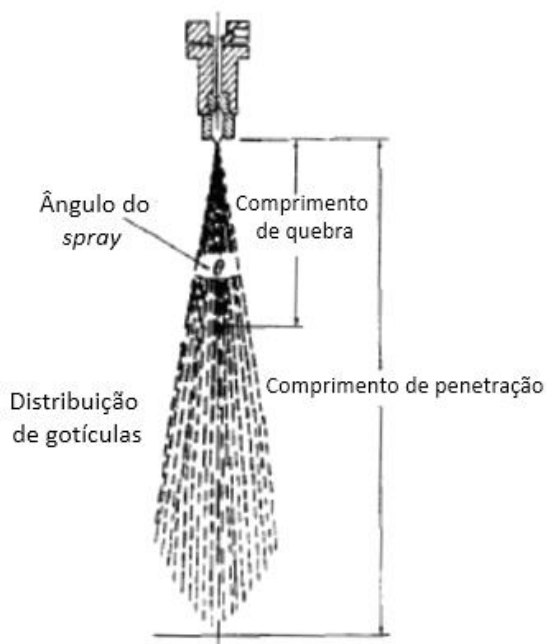
encontra-se entre 50 e 100 bar de pressão. Essa grande diferença de pressão é importante para que o jato de combustível entre à alta velocidade no ambiente interno do cilindro, permitindo a atomização do combustível, ou seja, que este se transforme em gotículas micrométricas, e possa interagir com o máximo de ar presente no cilindro antes do término da combustão.

A quebra do jato de combustível em gotículas constitui o spray cuja formação determina o processo de combustão e conseqüentemente, consumo de combustível e emissões. Então, torna-se necessário conhecer o comportamento do spray e a utilização de técnicas experimentais, que possibilitem quantificar informações sobre este, para entender como avaliar o impacto decorrente de variações de desempenho do sistema de injeção.

3.3.1 Comportamento do spray – macro e micro geometria

Quando o jato de combustível deixa o orifício, ele se torna turbulento e se espalha de forma a interagir com o ar ao seu redor, ocorrendo o fenômeno de entranhamento e mistura (Heywood, 2018). Na Figura 7, a estrutura típica de um spray de injeção direta é apresentada.

Figura 7 - Estrutura típica de um spray



Fonte: Adaptado de Heywood (1988).

Ao sair pelo orifício do bico injetor, a coluna de líquido se desintegra durante uma determinada zona, conhecida como comprimento de quebra. Nesta zona,

formam-se gotículas de combustível com tamanho de diferentes diâmetros da ordem de dezena de micrometro. Após o comprimento de quebra, o spray aumenta sua largura, a massa de ar contida na região do spray aumenta e a sua velocidade diminui. Após esta etapa, o spray começa a evaporar conforme o processo de entranhamento de ar se inicia. Quanto ao comprimento de penetração do spray, este cresce à medida que o processo de injeção acontece, porém a uma taxa decrescente.

O efeito de atomização do spray, para quebrá-lo em uma distribuição de gotículas com diâmetros muito menores do que o diâmetro do orifício do bico injetor, é relevante, pois influencia na formação do ângulo do spray. Este ângulo é uma característica macroscópica (geometria) e depende de alguns parâmetros, como a pressão de injeção – que influencia a velocidade do jato de combustível – e as características geométricas do projeto do bico injetor, onde pode ocorrer desgaste por cavitação, influenciando sua geometria inicial. Também é importante ter conhecimento da relação de densidades entre líquido injetado e o gás ambiente, pois as interações aerodinâmicas na interface gotícula e ar ambiente são de grande importância para o mecanismo de atomização do spray.

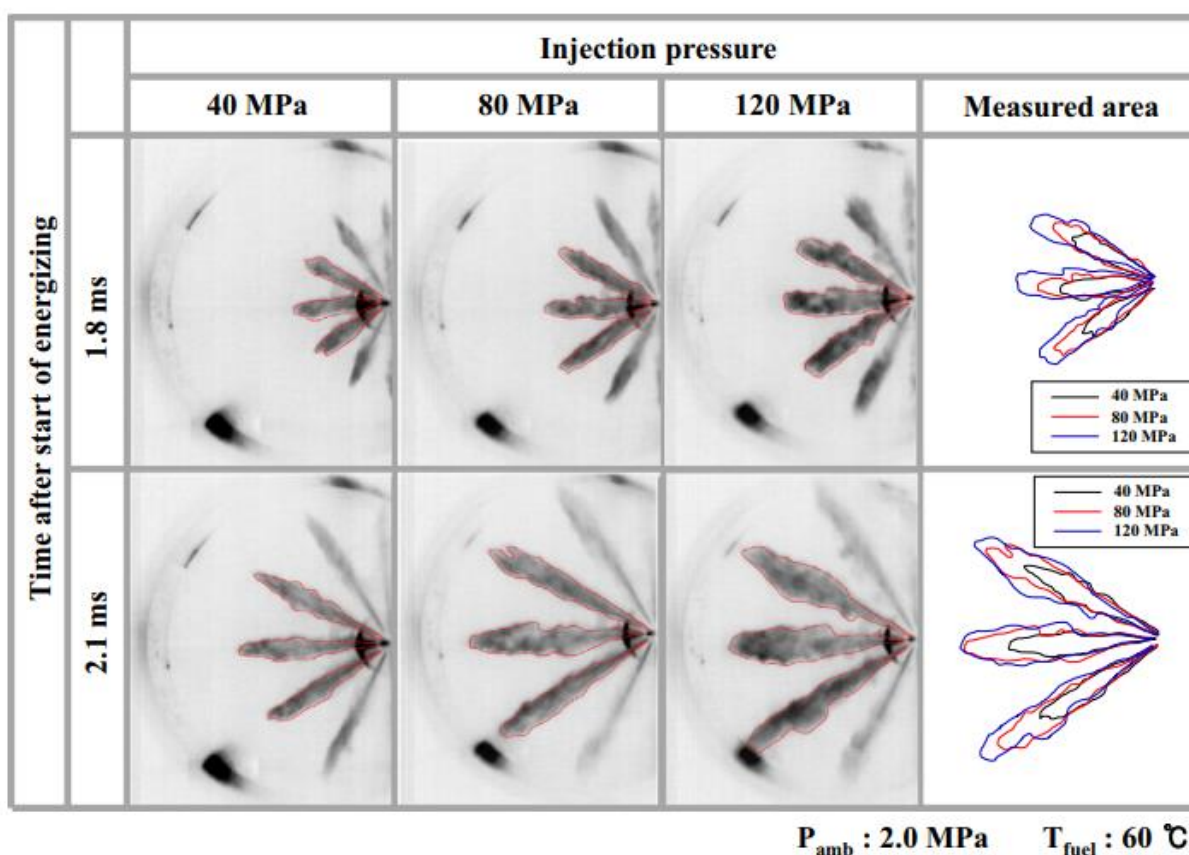
Para o comprimento de penetração do spray, a variação de pressão e do diâmetro do orifício de saída do bico injetor é fundamental, assim como a densidade e temperatura do gás ambiente no cilindro. Estes parâmetros são bem evidentes para estudos de injeção de combustível realizados em ambientes quiescentes, quando se pretender fazer comparações de características no spray formado (Fink et al., 2008, Park et al., 2015). Porém, para motores com movimentos de ar presentes no interior do cilindro (como *swirl* ou *tumble*), a característica do escoamento influencia no desenvolvimento da macro e micro geometria do *spray*.

3.3.2 Experimentos de estudo do spray

Atualmente, a técnica mais empregada na caracterização de propriedades macroscópicas do spray, como ângulo de spray e comprimento de penetração, é de diagnóstico por imagens. Esta técnica utiliza câmeras de alta velocidade, que são capazes de amostrar milhares de fotos por segundo, para estudar as características macroscópicas na evolução temporal do spray de combustível quando este é iluminado por laser ou outra fonte de luz. A iluminação é importante na realização da técnica, pois é necessário que a luz incida nas gotículas do spray e se espalhem para que as imagens possam ser capturadas com qualidade.

Resultados da aplicação desta técnica no estudo de sprays Diesel em câmaras de alta pressão, podem ser visualizados na Figura 8. Neste estudo, Park et al. (2015) destacaram as características do spray de óleo pesado (HFO – *Heavy Fuel Oil*) de motores marítimos variando a pressão de injeção, pressão do gás ambiente e temperatura do combustível injetado e mostrando que o comprimento de penetração do spray é impactado por mudanças nas pressões de injeção (Figura 8) e do ambiente, onde o combustível é injetado. Em ambientes pressurizados (26 bar) e aquecidos (650 K), pressões de injeção mais elevadas de injetor de grande porte (12 orifícios de 0,47 mm cada) atingem maiores comprimentos de penetração em menores tempos (maior velocidade do jato), tanto para fase líquida quanto para fase vapor do Diesel (Fink et al., 2008).

Figura 8 - Esq. Imagem original. Dir. Imagem após detecção de bordas



Fonte: Park et al., 2015.

A criação de indicadores geométricos a partir de imagens obtidas com câmera de alta velocidade também pode ser útil como métrica de avaliação para os diferentes níveis de desgaste de componentes de sistemas de injeção (Pielecha et al. 2018). No entanto, é necessário realizar um pós-processamento e método de

cálculo robusto para evitar incertezas significativas que impeçam a comparação dos resultados (Ruiz-Rodriguez *et. al*, 2018).

Dentre as técnicas não intrusivas para caracterização de escoamento de fluidos e estudo de sprays, que combinam a utilização de laser e sinal Doppler, existe a técnica PDI (do inglês, *Phase Doppler Interferometry*). Esta técnica é utilizada na medição de características microscópicas do *spray*, distribuições de diâmetros das gotículas e suas respectivas velocidades em determinados pontos espaciais de um escoamento.

A aplicação desta técnica deve ser realizada com cautela devido à dificuldade de posicionamento do volume de medição e por dificuldades referentes a densidade de *sprays* de combustível que limitam as medições em determinadas regiões do *spray* (Araneo e Tropea, 2000). Além destas, há escassez de dados de características microscópicas de *sprays* na literatura sobre injetores de motores pesados de (~ 500 kW/ cilindro).

3.4 AVALIAÇÃO DOS EFEITOS DO DESEMPENHO DO SISTEMA DE INJEÇÃO NO PROCESSO DE COMBUSTÃO

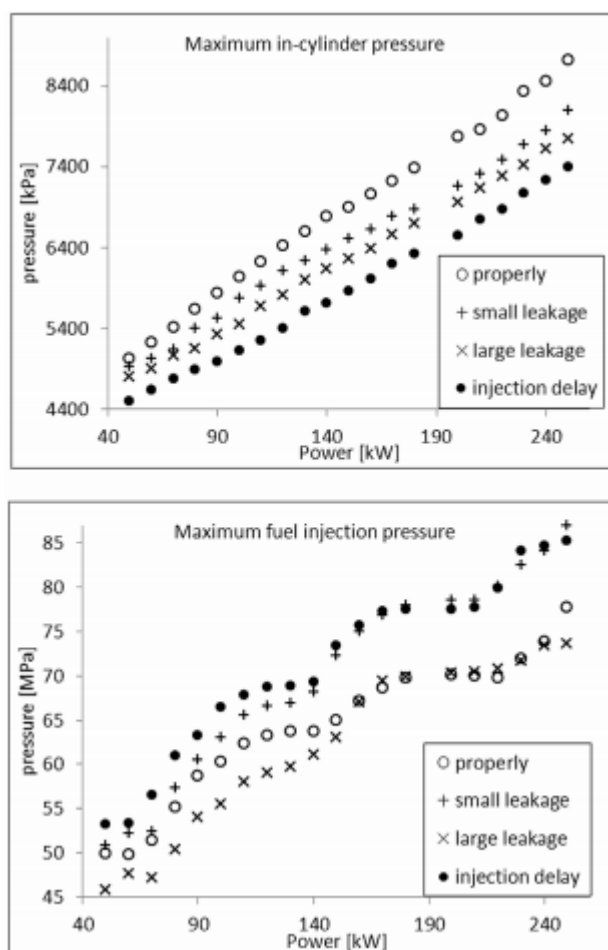
Ao longo deste texto, nota-se a importância do sistema de injeção de combustível no processo de desenvolvimento do *spray* de combustível. As variáveis deste sistema que impactam diretamente no processo de combustão são o tempo de injeção, quantidade de combustível injetada, velocidade e taxa de injeção, tamanho das gotículas e formato do *spray*.

Motores pesados de ciclo Diesel são projetados buscando um compromisso entre a relação de potência-consumo de combustível e emissões de NO_x (Kuiken, 2008). A influência do instante de injeção acontece da seguinte forma: se o evento inicia muito tarde as pressões e temperaturas são menores durante o processo de combustão (gráfico superior - Figura 9), diminuindo a formação de NO_x. No entanto se o início é prematuro o combustível é injetado em um ambiente com menor pressão e temperatura, retardando o início da combustão (Grados *et. al.*, 2009 e Duran *et. al.*, 2012).

Desgastes no contato entre o excêntrico e seguidor da bomba injetora podem causar os atrasos no tempo de injeção impactando o desempenho do motor e aumentando a pressão de injeção para o sistema Bosch testado por Kowalski (2014).

Além do atraso no tempo de injeção, sistemas mecânicos podem apresentar vazamentos de combustível nas bombas de alta pressão (desgaste no contato cilindro-pistão) que prejudicam o rendimento do motor, diminuindo a pressão máxima da combustão no interior cilindro. Outra consequência do vazamento é a diminuição da pressão máxima do combustível injetado que também impacta na quantidade de combustível entregue ao cilindro do motor (Kowalski, 2014). Ambos os casos decorrentes do mal funcionamento da bomba injetora (vazamentos) são vistos na Figura 9, que mostra pressões máximas no interior do cilindro do motor (gráfico superior) e de injeção de combustível (gráfico inferior) em função da potência aplicada por um gerador elétrico ao eixo do virabrequim. Kowalski (2014) também mostra que o atraso no tempo de injeção varia proporcionalmente ao aumentar-se a pressão máxima no interior do cilindro e potência aplicada pelo gerador.

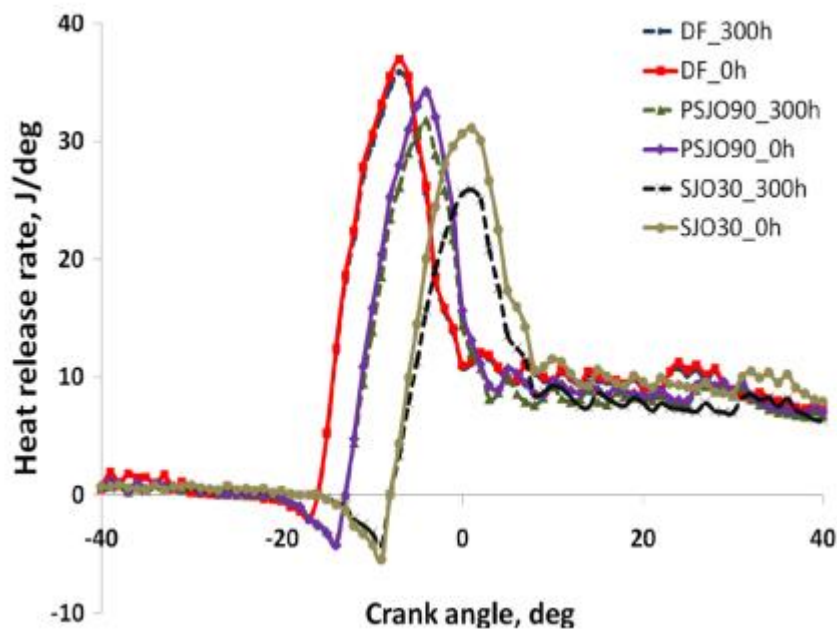
Figura 9 - Pressões máximas em diferentes condições de mal funcionamento do sistema de injeção



Fonte: Kowalski, 2014.

Um método para avaliar como o processo de combustão se desenvolve no motor de ignição por compressão é pela análise da curva da taxa de liberação de calor. Este método é baseado em estimativas após medição da pressão e conhecimento da variação de volume no interior do cilindro em função do ângulo do virabrequim do motor (Heywood, 2018). A análise da taxa de liberação de calor permite verificar degradações no injetor após horas de uso (Hoang et. al., 2019), além de estudos para comparação de aplicação de novos combustíveis (Patel et. al., 2016).

Figura 10 - Taxa de liberação de calor para diferentes combustíveis testados com injetores novos (0h) e usados (após 300h)



Fonte: Hoang et. al., 2019.

Por esta análise, pode-se avaliar a duração do processo de combustão e observar diferenças no atraso de ignição e a quantidade de calor necessária para evaporação do combustível e que é trocada com paredes do cilindro e pistão, anteriormente ao início do processo. Esta análise, juntamente com outras informações sobre o comportamento do spray e desempenho do sistema de injeção são fundamentais para entendimento de variações no consumo de combustível emissão de poluentes. Principalmente, se o intuito for investigar impactos do mal funcionamento de componentes do sistema de injeção.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Como descrito na seção anterior, o bom desempenho do sistema de injeção é crucial para manter o motor operando nas melhores condições possíveis, quando se discute indicadores de rendimento. Portanto, esse capítulo é dedicado a apresentar o conceito da bancada de testes utilizados na medição da pressão e quantidade de combustível injetado, arranjos experimentais e técnicas para estudo do comportamento do *spray* formado. Também, será apresentado a lógica de critérios de seleção dos sistemas de injeção testados é descrita juntamente com os dados usados para tomada de decisão.

4.1 A BANCADA DE TESTES

A bancada de testes (Figura 11 e Figura 12) foi desenvolvida no âmbito do projeto de P&D da ANEEL No. 0718-000025 (Zabeu *et. al.*, 2022), no IMT, e teve o intuito de reproduzir o funcionamento de cada componente do sistema de injeção em condições de operação similares às do motor. Durante o período do projeto, algumas opções de montagem para desenvolvimento da bancada foram feitas, além de limitações de exequibilidade reconhecidas e consideradas para os efeitos de finalidade dos testes. Também, considerou-se que adaptações necessárias para execução de testes para estudo dos *sprays* seriam realizadas, pois a finalidade da bancada contemplava apenas ensaios para medição de pressão do fluido injetado.

Figura 11 – Visão frontal bancada de testes



Fonte: O próprio autor (2022).

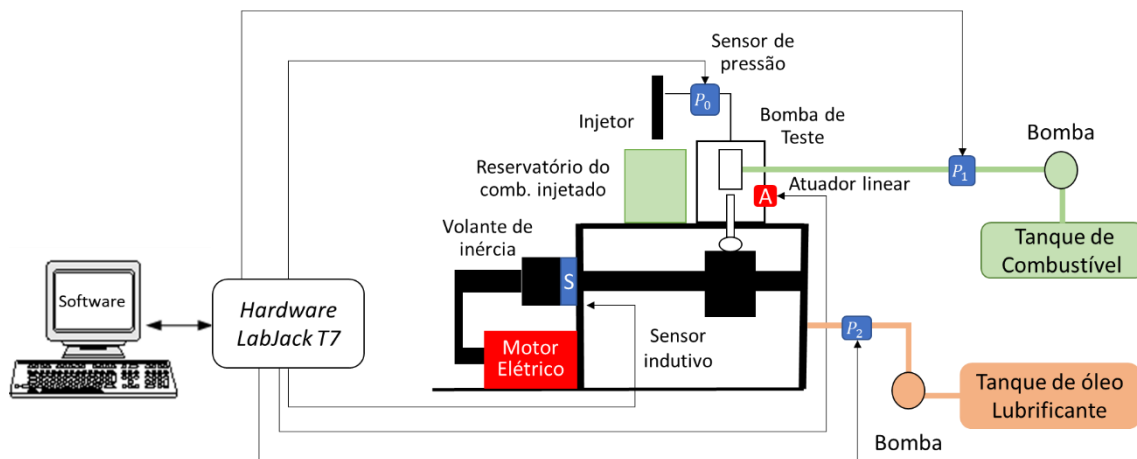
Figura 12 - Visão traseira da bancada de testes



Fonte: O próprio autor (2022).

O desenho esquemático mostrando o conceito da bancada de testes é apresentado na *Figura 13*, enquanto suas características e funcionamento são descritos na sequência.

Figura 13 - Diagrama do conceito da bancada de testes



Fonte: O próprio autor (2022).

Levando em consideração que a bomba de combustível é um sistema mecânico (pistão-cilindro) atuado por um excêntrico (mecanismo came-seguidor), optou-se pela utilização do eixo de excêntricos original do motor (*Figura 14*), garantindo que a dinâmica do acionamento da bomba seja a mesma do funcionamento do motor nos testes em bancada. A atenuação de variação de velocidade angular do eixo de excêntrico foi feita pela montagem de um volante de inércia solidário ao eixo rotativo

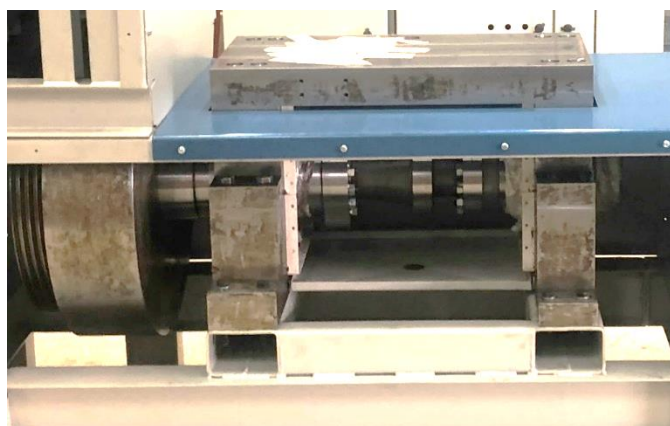
(Figura 15). O eixo principal foi acionado por um motor elétrico de 20 HP (do inglês, *Horsepower*) de potência nominal, controlado em malha fechada pelo sistema (software e *hardware*) desenvolvido para a bancada, comandado via inversor de frequência e operando com 360 rpm de velocidade angular (mesma velocidade de operação do motor).

Figura 14 - Eixo de excêntricos original do motor



Fonte: O próprio autor (2022).

Figura 15 - Volante de inércia solidário

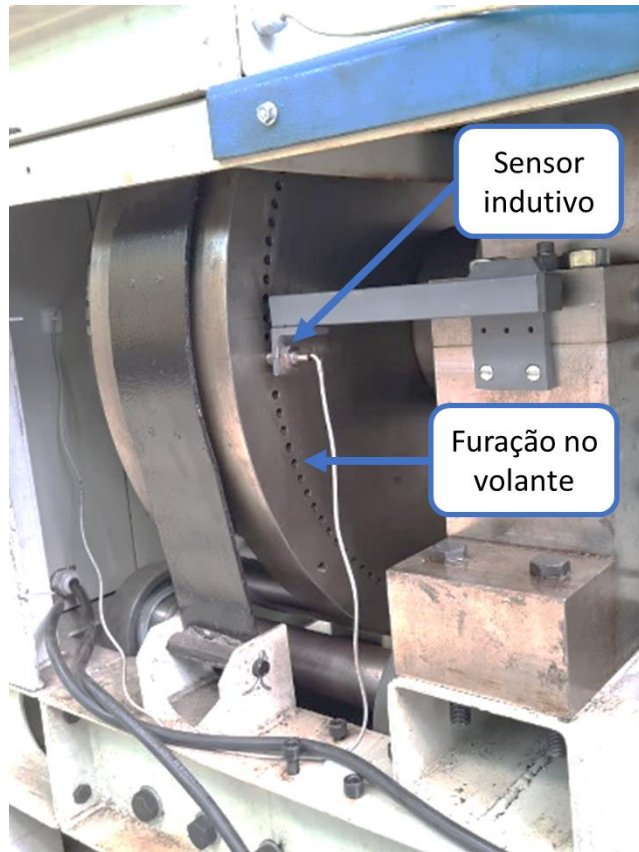


Fonte: O próprio autor (2022).

A medição de velocidade angular foi feita com um sensor indutivo PNP da Tecnotron (letra S no esquema da Figura 13) que detecta a presença de metal. Este sensor é instalado nas proximidades do volante de inércia que possui 119 furos a cada 3 graus de variação angular, tornando o método de medição de velocidade angular escolhido idêntico ao de uma roda fônica com 120 menos 1 dentes (Figura 16). Embora a medição de velocidade angular era de interesse para controle da velocidade dos testes, o sinal medido foi processado para que também se obtivesse a posição

angular do eixo excêntrico para observação de resultados das curvas de pressão de injeção medidas.

Figura 16 - Método de medição de velocidade angular



Fonte: O próprio autor (2022).

Já as bombas de engrenagens auxiliares instaladas são responsáveis pela lubrificação dos mancais do eixo principal e superfície de contato entre excêntrico e seguidor, além da alimentação de fluido de teste para a bomba de alta pressão da configuração de sistema de injeção testada. A pressão da linha de alimentação foi ajustada para 6,5 bar e sua vazão em 180 l/h, seguindo as instruções do manual do motor W20V32 (Wärtsilä, 2014). Na ausência do governador do motor para regular a posição da cremalheira e, conseqüentemente, a posição da hélice no pistão da bomba de alta pressão ajustando o débito de fluido a ser injetado, implementou-se um atuador linear para tal função, mostrado na Figura 17 e representado pela letra A no esquema da Figura 13.

Figura 17 – Montagem do atuador linear

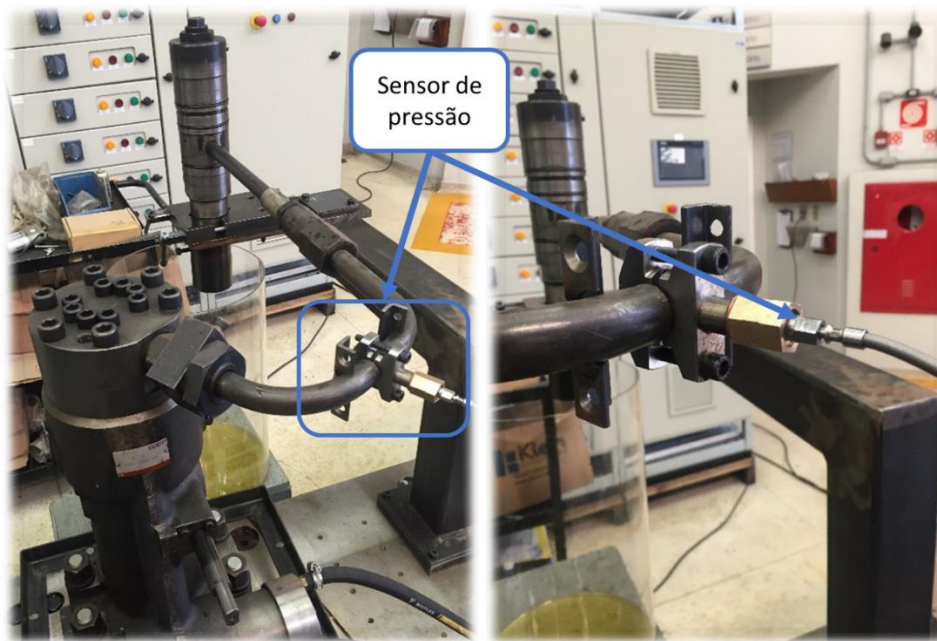


Fonte: O próprio autor (2022).

A medição da pressão de injeção do fluido de teste injetado foi realizada com um sensor piezo resistivo 4067E da fabricante Kistler (P_0 no esquema da Figura 13) e instalado no duto que conecta a saída da bomba de alta pressão e o injetor em teste (Figura 18). Para condicionamento do sinal medido pelo sensor de pressão em questão, utilizou-se o módulo amplificador 4624 A da mesma fabricante.

Além do sensor da Kistler instalado para medição de pressão do fluido de teste, houve o monitoramento de pressão nas linhas de baixa pressão de fluido de teste e óleo lubrificante com pressostatos eletromecânicos (P_1 e P_2 no esquema da Figura 13, respectivamente) para garantir que as bombas de engrenagens estavam em funcionamento com os respectivos fluxos de fluidos e pressão de operação durante a realização dos testes (Figura 19). Também, instalou-se um acumulador de bexiga com nitrogênio gasoso a 5 bar para atenuar a pulsação do fluido de teste nas mangueiras de baixa pressão.

Figura 18 – Montagem do sensor Kistler no duto de alta pressão



Fonte: O próprio autor (2022).

Figura 19 – Acumulador tipo bexiga e pressostatos de monitoramento



Fonte: O próprio autor (2022).

Durante os testes, o inversor de frequência e o atuador linear foram controlados e atuados pelo sistema de controle e a aquisição de dados da bancada. Este sistema é composto do módulo eletrônico LabJack T7 (taxa de aquisição de dados de até 100 kHz) e o software desenvolvido pela equipe técnica do projeto de P&D em MATLAB. Assim, durante a operação da bancada e realização dos ensaios, a pressão do fluido de teste em função da posição angular foi medida com frequência de aproximadamente 33 kHz.

4.2 ENSAIOS DE MEDIÇÃO DE PRESSÃO E MASSA DE FLUIDO INJETADO

Quando em operação no motor, os sistemas de injeção testados são capazes de injetar Diesel e óleo combustível leve (LFO – *Light Fuel Oil*), ou óleo combustível pesado (HFO – *Heavy Fuel Oil*) utilizando sistemas de pré-aquecimento do fluido a fim de obter viscosidades similares às opções anteriores. Porém, visando segurança durante execução dos ensaios, optou-se pela utilização do mesmo fluido de teste/ calibração (Settori 4113) que os colaboradores da TEVISA operam na manutenção dos componentes do sistema de injeção. Este fluido possui características (Tabela 2) similares a combustíveis leves (LFO).

Tabela 2 – Características do fluido Settori 4113

Cor	Âmbar
Densidade a 15°C	0,820 – 0,830 g/ ml
Ponto de fulgor	>75°C
Viscosidade 40°C	2,45 – 2,75 cSt

Fonte: O próprio autor (2022).

Os componentes disponibilizados pela TEVISA para ensaios, foram instalados na bancada de acordo com os tipos de investigação. Primeiramente, instalou-se a bomba do conjunto padrão (denominada *standard pump* - SP) e testaram-se todos os injetores selecionados a fim de verificar suas condições de desgaste. Similarmente, adotou-se o mesmo princípio para verificar as condições das bombas. Então, todas as bombas usadas foram montadas com o injetor do conjunto padrão (denominado *standard injector* – SI). Após estes ensaios, realizaram-se testes utilizando os pares de bomba e injetor conforme suas instalações anteriores nos motores que estavam em operação na TEVISA.

Para os ensaios de todas as configurações de bomba e injetor, os procedimentos adotados foram os mesmos visando garantir igualdade nas condições de teste e propiciar comparação de resultados com qualidade. Tais procedimentos são descritos a seguir:

- Velocidade do eixo principal 360 rpm (controle por malha fechada via software);
- Posição da cremalheira para regulação do débito de fluido – 40 mm;
- Medição de 500 eventos de injeção por teste;

- Cada configuração foi testada por três vezes para obtenção de dados estatísticos;
- Após realização de cada teste, remoção do fluido injetado do reservatório para um recipiente e pesado em uma balança externa com tara.

Ao fim de cada teste realizado, uma planilha com valores das pressões medidas era exportada do software da bancada e adicionado o registro de peso da quantidade de fluido injetada.

4.3 EXPERIMENTOS PARA ESTUDO DO *SPRAY* FORMADO

Os experimentos de estudo do comportamento do *spray* para os sistemas de injeção novos e usados testados foram divididos em duas partes. A primeira parte foi dedicada a observar variações de características na geometria do *spray* formado. A segunda parte obteve informações sobre variações nas distribuições de diâmetro e velocidades das gotículas do *spray* de combustível.

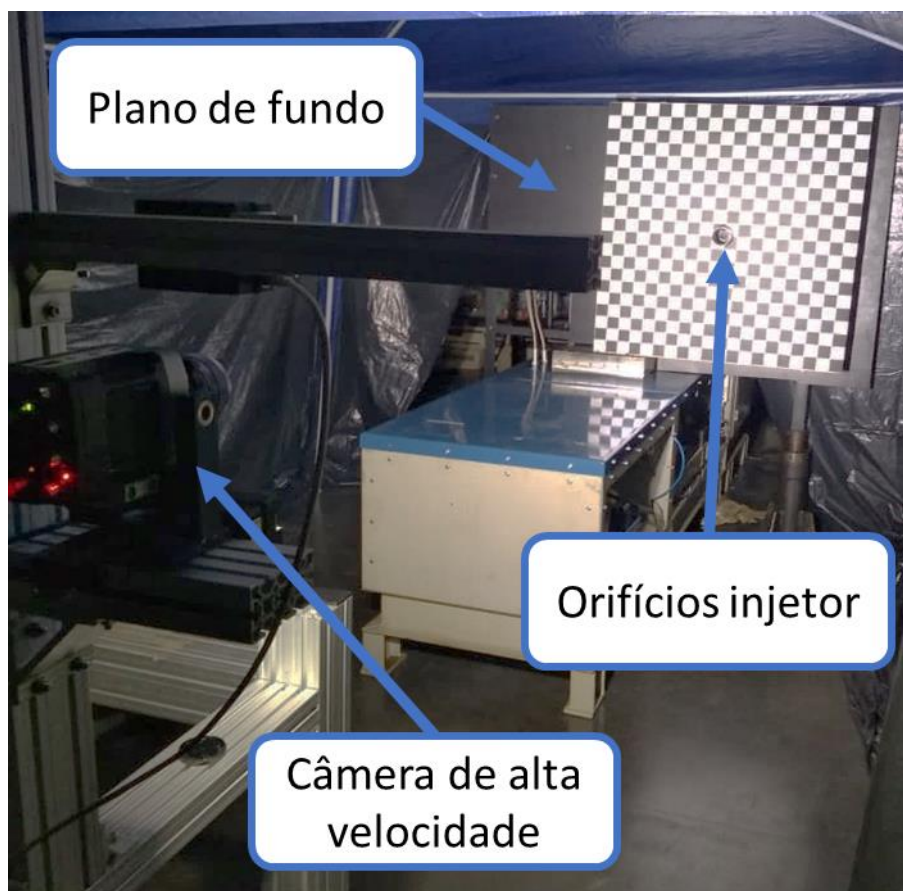
4.3.1 Metodologia experimental para comparação da macro geometria dos *sprays*

A metodologia aplicada fundamentou-se na captura de imagens com câmeras de alta velocidade buscando verificar possíveis variações geométricas durante a evolução temporal do *spray*. Assim, o arranjo experimental para captura de imagens do *spray* seguiu o esquema da (Figura 20). Uma câmera do modelo micro Lab 310 da fabricante Phantom, com capacidade de capturar imagens a taxas de repetição da ordem de 1 kHz em máxima resolução, foi posicionada em direção aos orifícios do injetor possibilitando a observação da evolução do *spray* (Figura 21).

Neste arranjo experimental, o injetor foi posicionado horizontalmente para que o *spray* pudesse ser visualizado em um plano ortogonal ao piso.

Para balanceamento do plano de fundo, uma chapa de madeira na cor preta foi utilizada e a aquisição destas imagens foi sincronizada conforme posição angular do eixo de excêntricos (4.3.1.1) que atua a bomba de alta pressão objetivando observar o *spray* formado e buscar uma correlação com o histórico de pressão de injeção medido em ensaios anteriores.

Figura 20 - Arranjo experimental para ensaios de captura de imagens



Fonte: O próprio autor (2022).

Figura 21 - Plumas do *spray*

Fonte: O próprio autor (2022).

Para garantir a qualidade das imagens obtidas nos experimentos, antes do início de cada teste, a câmera de alta velocidade foi calibrada por um plano xadrez (Figura 20) montado transversalmente ao eixo principal do injetor para ajustar o foco da

lente e uma imagem capturada com a mesma dimensão de todas as imagens obtidas no experimento (768x768 pixels). Essa imagem do plano xadrez foi utilizada para aferir a relação pixel/distância, pois é necessário colocar no software do sistema de aquisição de imagens, como dado de entrada, o tamanho do plano (1 m x 1 m) e o tamanho de cada quadrado do xadrez (50 mm cada aresta). Este dado permitiu estabelecer um fator de pixel por milímetro, parâmetro importante no cálculo de distâncias na imagem.

Após alguns ensaios preliminares, verificou-se uma dificuldade da medição de muitos eventos de injeção consecutivos devido ao acúmulo de gotículas no ambiente, prejudicando visualização do spray. Portanto, utilizaram-se dois ventiladores com operação contínua para remoção das gotículas de fluido injetado do campo de visão da câmera. Assim, criou-se a seguinte rotina de procedimentos para realização dos ensaios de aquisição de imagens do *spray* formado:

- Ajuste do foco da câmera e obtenção da relação pixel-milímetro;
- Velocidade do eixo principal 360 rpm (controle por malha fechada via software);
- Posição da cremalheira para regulagem do débito de fluido – 40 mm;
- Aquisição de imagens de três eventos consecutivos de injeção;
- Repetição do ensaio por quinze vezes para obtenção de dados estatísticos.

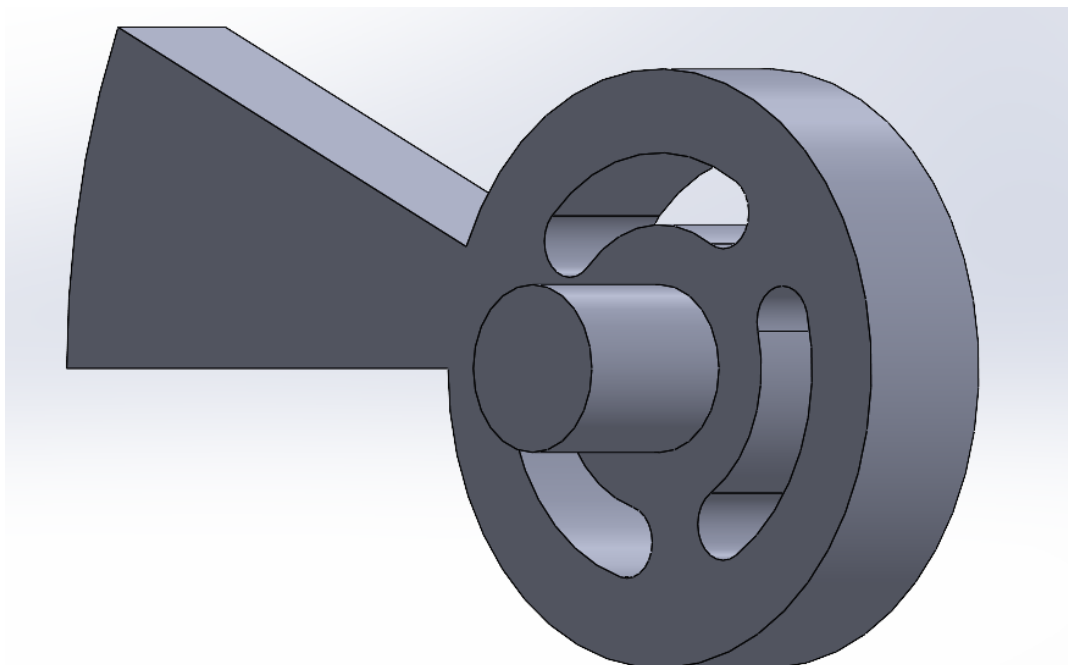
4.3.1.1 Dispositivo de sincronização das câmeras de alta velocidade

Para garantir sincronização das imagens obtidas com a câmera de alta velocidade a partir de uma referência, um dispositivo foi projetado e fabricado para instalação na bancada. Esse dispositivo foi composto de uma parte mecânica e outra eletrônica. A parte mecânica foi acoplada ao eixo principal da bancada e apresenta um excêntrico que foi utilizado para determinar o intervalo de observação do evento de injeção. Esse componente permitiu que a aquisição das imagens fosse realizada dentro de um intervalo fixo de posição angular, utilizado como referência para comparar os sistemas de injeção testados.

A Figura 22 mostra o modelo geométrico da peça fabricada e instalada no eixo da bancada. A parte eletrônica desse dispositivo foi composta por um sensor indutivo, utilizado para medição da posição angular e uma placa eletrônica para processamento entre o sinal do excêntrico com o sinal das furações do volante de inércia do eixo principal da bancada. Este sensor foi instalado para criar uma janela

de 27° graus, permitindo a observação da passagem da rampa de atuação do excêntrico da bomba injetora.

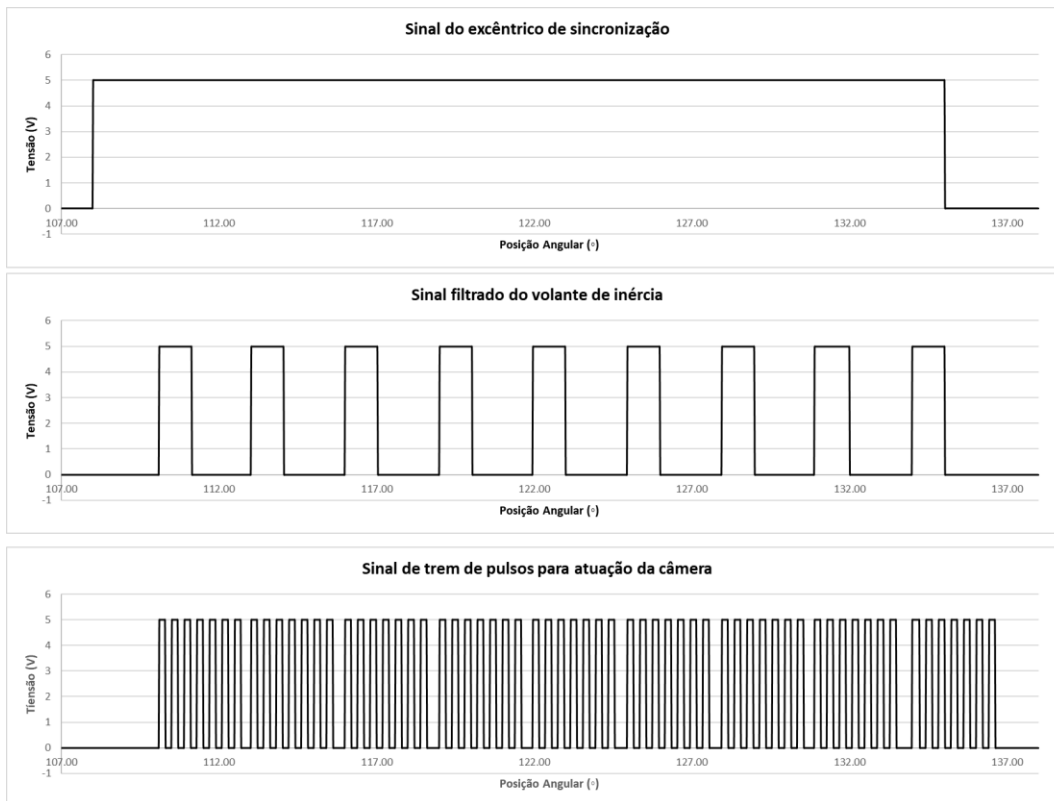
Figura 22 – Modelo de peça com excêntrico para sincronização das imagens



Fonte: O próprio autor (2022).

A placa eletrônica desenvolvida combinou o sinal do excêntrico com o sinal do volante utilizando porta lógica *AND* disparando um trem de 9 pulsos para outro dispositivo de sincronização de alta velocidade responsável pela atuação da câmera em alta frequência (gerador de pulsos Modelo 575 do fabricante Berkeley Nucleonics Corp.). O sinal recebido pelo gerador de pulsos permitiu que a partir da borda de subida de cada pulso identificado fosse gerado outros 7 pulsos para acionamento da câmera. Esta configuração foi realizada no *software* de controle da câmera de alta velocidade, totalizando a obtenção de 63 imagens para cada evento de injeção observado. A Figura 23 a seguir apresenta os sinais sincronizados utilizados para atuação da câmera de alta velocidade.

Figura 23 – Sinais de sincronização da câmera de alta velocidade



Fonte: O próprio autor (2022).

4.3.2 Metodologia experimental para comparação da micro geometria dos *sprays*

4.3.2.1 A técnica de interferometria por efeito doppler (PDI)

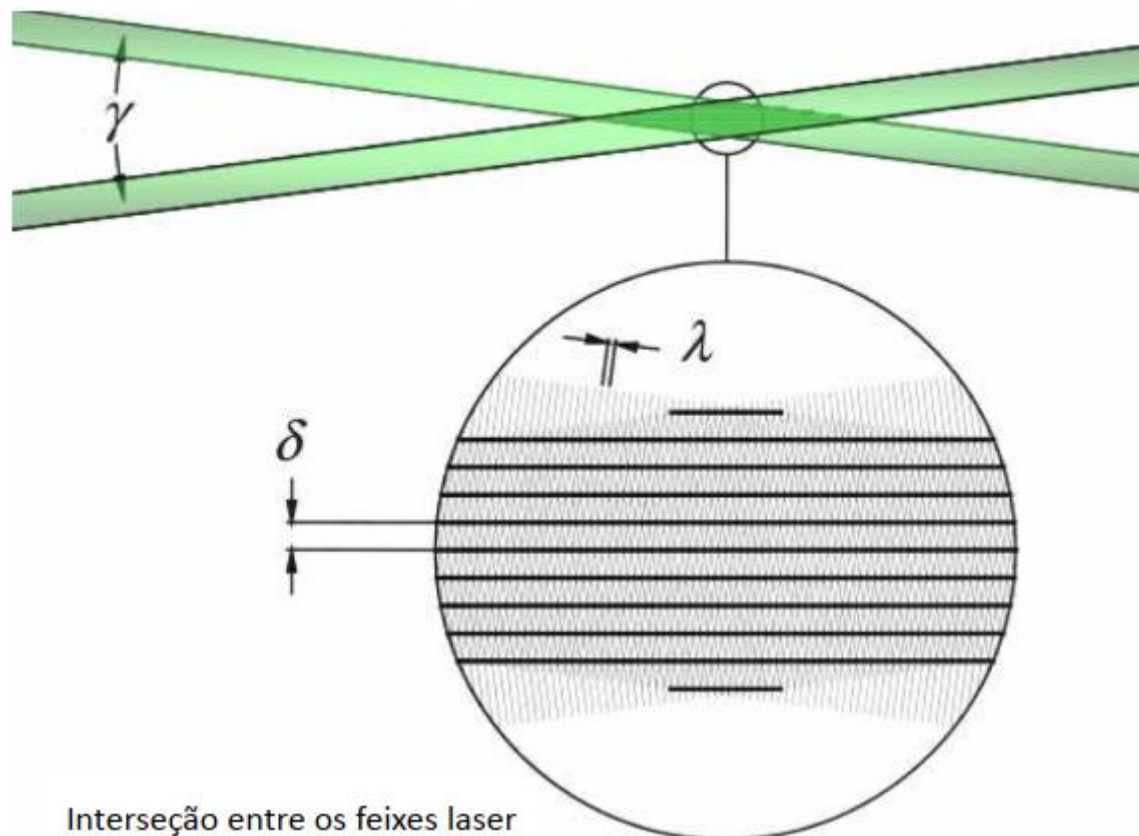
A técnica PDI possibilita medições de diâmetro e velocidade de uma singularidade esférica presente em um escoamento por meio de um fenômeno de interferência luminosa. Esta medição é resultado da análise do sinal gerado durante a passagem da singularidade pelo padrão de interferência produzido por dois feixes laser concorrentes. A Figura 24 mostra o padrão de interferência dos feixes laser.

Ao atravessar o padrão de interferência, a singularidade reproduz e modifica um sinal que é recebido por um dispositivo receptor, resultando nos cálculos de diâmetro (D) e velocidade (v). A velocidade da singularidade é função da frequência do sinal Doppler gerado (f_d) e do espaçamento entre as franjas (δ). Este espaçamento é função do comprimento de onda (λ) e do ângulo de intersecção (γ) dos feixes laser.

$$v = f_d \times \delta \quad (1)$$

$$\delta = \frac{\lambda}{2\sin(\gamma/2)} \quad (2)$$

Figura 24 - Padrão de interferência ideal do cruzamento de dois feixes cilíndricos de laser. Na figura λ é o comprimento de onda, δ o espaçamento entre as franjas e γ o ângulo entre os feixes no cruzamento

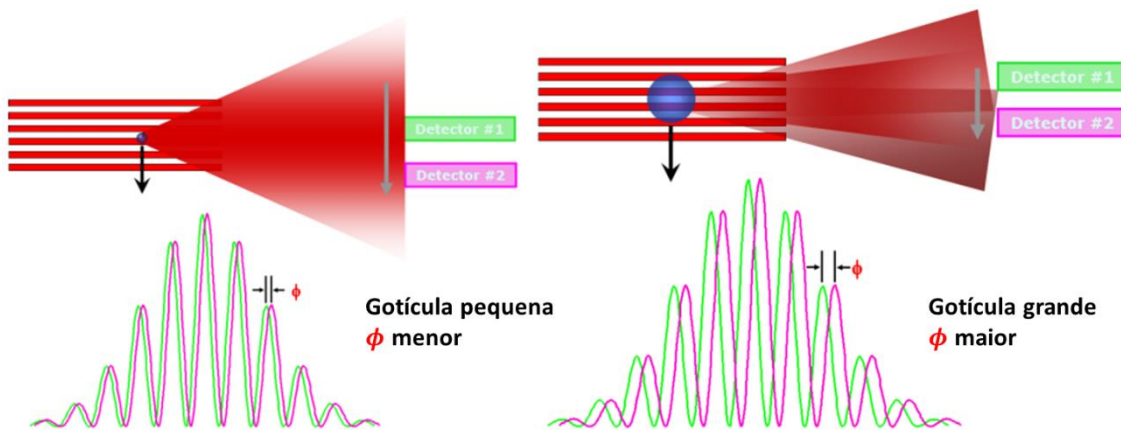


Fonte: (Pacífico et. al., 2015)

A medição do diâmetro da singularidade é feita por meio da avaliação do efeito de magnificação do espaçamento entre franjas nos diferentes detectores do receptor (Figura 25). Este efeito é percebido pela mudança de fase (ϕ) no sinal detectado e avaliado pelo parâmetro Δ (comprimento de onda espacial) que é proporcional à mudança de fase do sinal e distância entre os fotodetectores do receptor (Artium, 2019). Além deste parâmetro, a distância focal (F) e um fator de calibração (s) são necessários para o cálculo do diâmetro da singularidade que é apresentado na sequência – Equação (3).

$$D = \frac{F\delta}{s\Delta} \quad (3)$$

Figura 25 - Desenho esquemático da variação do espaçamento entre franjas responsável pela mudança de fase no sinal Doppler medido no receptor



Fonte: Adaptado de Pacífico et. al. (2015)

Ao realizar-se o teste com o *spray*, o software de controle e aquisição de dados da Artium (empresa fabricante do equipamento PDI) mostra as distribuições de diâmetro das gotículas medidas, além de apresentar valores de diâmetro especificamente calculados a partir dos dados. Dentre os valores específicos está o cálculo do diâmetro médio linear (D_{10}) e o diâmetro médio de Sauter (D_{32}) que são parte de norma da SAE J2715 (metodologia base para estudo de *spray*) para caracterização de *sprays* automotivos de gasolina de injeção direta (Hung et. al., 2008), e de injetores de Diesel (Hardalupas et. al., 1992).

$$D_{10} = \frac{\sum_i (n_{c(i)} D_i)}{\sum_i n_{c(i)}} \quad (4)$$

$$D_{32} = \frac{\sum_i (n_{c(i)} D_i^3)}{\sum_i (n_{c(i)} D_i^2)} \quad (5)$$

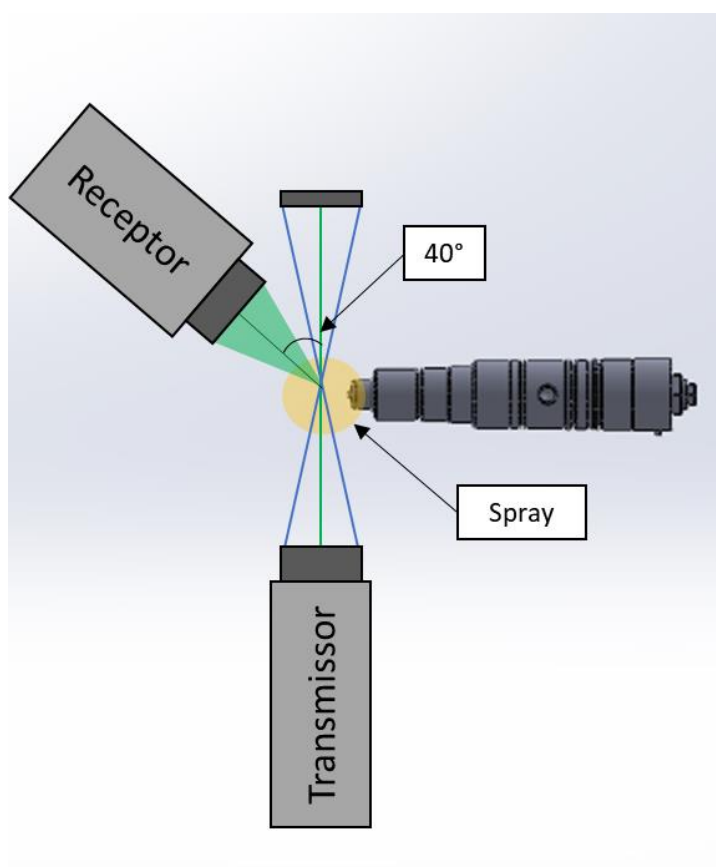
$n_{c(i)}$ é o número de gotículas contadas da i -ésima classe de diâmetros

É importante ressaltar que a técnica PDI é utilizada para medição de gotículas com formatos esféricos. No caso da gotícula não possuir tal formato, sua medição é descartada a partir da análise de uma distorção do sinal obtido pelo equipamento. Outra limitação da técnica que também distorce o sinal medido é decorrente da quantidade de gotículas no volume de medição no mesmo instante de tempo. Se há duas ou mais gotículas no volume de medição, o sinal observado no receptor apresenta distorções na forma de ruído ou grandes diferenças de frequência invalidando a medição.

4.3.2.2 Arranjo experimental para medição das gotículas

Um dos desafios encontrados para a realização deste experimento é o posicionamento dos equipamentos necessários à aplicação da técnica PDI, entre eles o emissor de feixe laser e receptor de sinais. Também, utilizou-se o posicionamento do injetor na horizontal para medição das gotículas. Um desenho esquemático do arranjo experimental pode ser visualizado na Figura 26.

Figura 26 - Arranjo experimental para aplicação da técnica PDI para medição de diâmetro e velocidade das gotículas do spray



Fonte: Próprio autor (2022).

Na Figura 27, pode-se visualizar o conjunto de equipamentos da fabricante Artium. O item 1 é o transmissor responsável pela emissão de dois pares de feixes laser correntes, enquanto o item 2 mostrado é o receptor dos sinais conforme mencionado anteriormente. Os demais equipamentos numerados (3, 4 e 5) são *hardware* eletrônicos de controle e processamento dos sinais capturados pelo receptor.

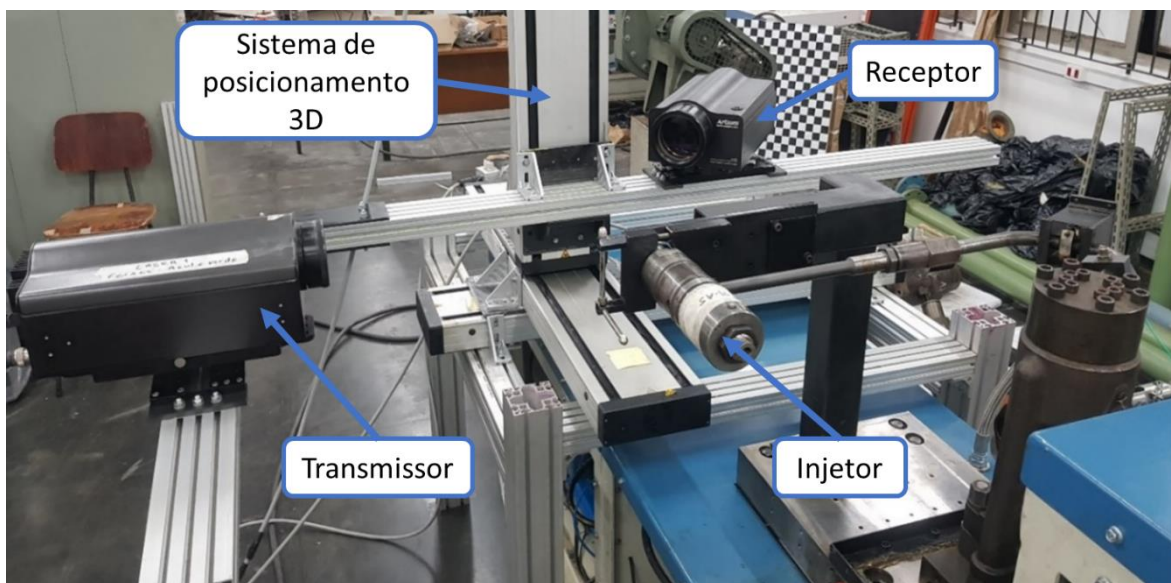
Figura 27 - Equipamentos do PDI



Fonte: O próprio autor (2022).

Para montagem do transmissor e receptor na configuração proposta (Figura 26), fabricaram-se suportes a fim de juntar perfis específicos para fixação destes equipamentos e permitir a fixação de todo o aparato em um sistema de posicionamento tridimensional, como mostra a Figura 28. E, este sistema de posicionamento foi montado sobre uma estrutura acima da bancada.

Figura 28 – Arranjo experimental para aplicação da técnica PDI

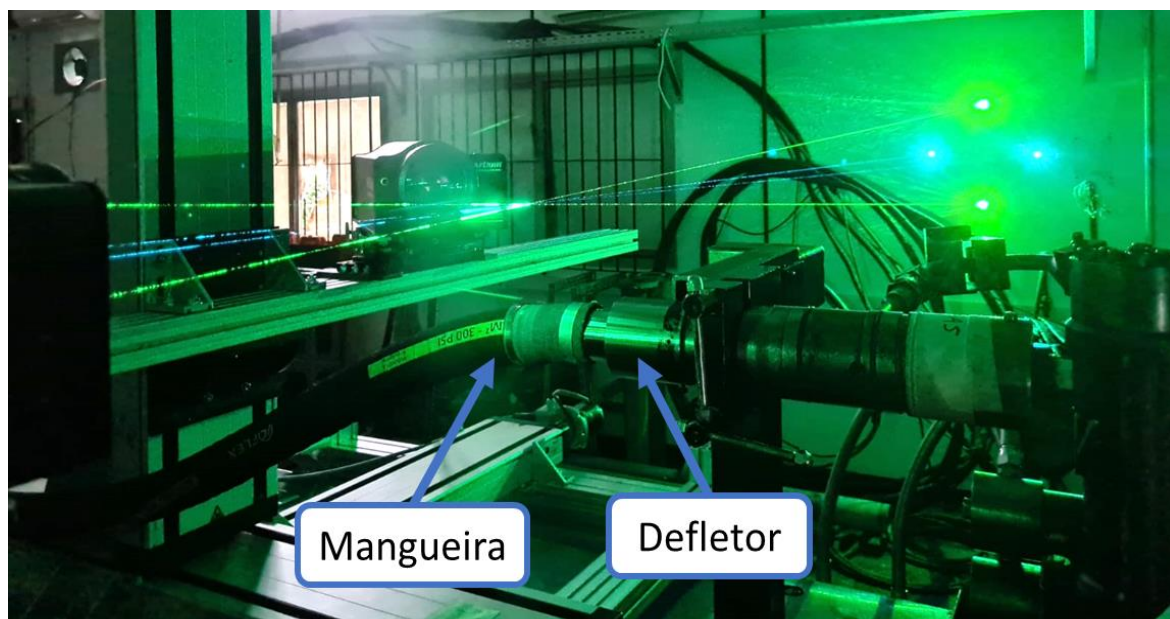


Fonte: O próprio autor (2022).

Para realização do experimento, foi necessário a utilização de um defletor para isolar apenas uma das 10 plumas do injetor testado. Este defletor possui um

rebaixo elíptico e um orifício para permitir a saída de apenas um jato, enquanto os demais jatos foram contidos dentro deste defletor e por meio de uma mangueira, o fluido injetado pelas demais plumas foi coletado. A *Figura 29* mostra a montagem do defletor no injetor e a instalação da mangueira para coleta do fluido de teste excedente.

Figura 29 - Aparato experimental para isolamento de pluma e coleta de fluido

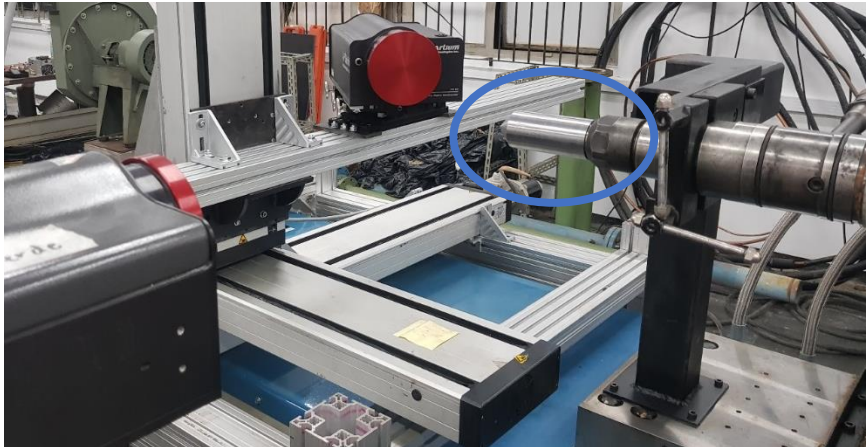


Fonte: O próprio autor (2022).

Esse defletor em questão, foi projetado a partir de orientações do Dr. Fabian Pinkert, especialista em sistemas de injeção e integrante do grupo de pesquisa do Prof. Bert Bucholz, ambos membros da Universidade de Rostock na Alemanha.

Após definição da montagem do arranjo experimental, também foi fabricado um dispositivo para alinhamento dos feixes laser em um ponto do espaço de coordenadas conhecidas. O dispositivo construído possuía em uma extremidade um orifício interno para encaixe no atomizador do injetor e na outra apresentava uma ponta cônica na qual foi possível posicionar o volume de medição (ponto de encontro entre os pares de feixe laser). A *Figura 30* mostra uma imagem desta peça instalada no injetor.

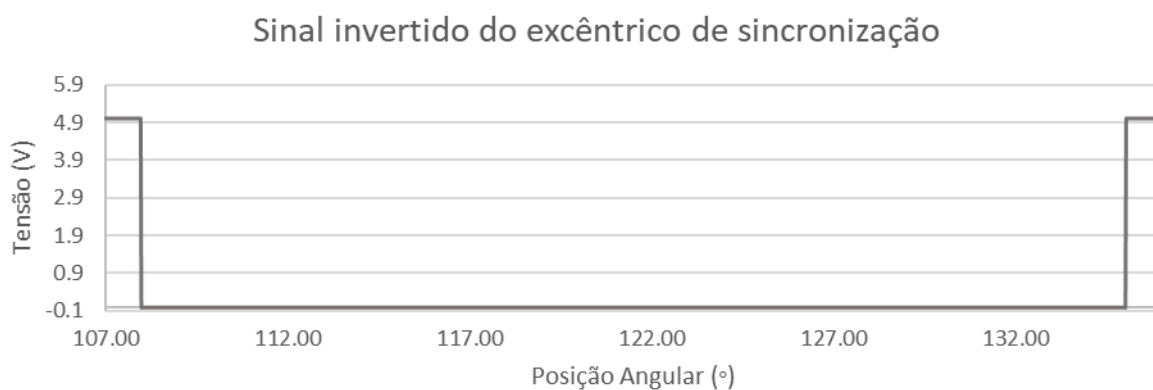
Figura 30 – Dispositivo para alinhamento dos feixes laser em um ponto de coordenadas conhecidas



Fonte: O próprio autor (2022).

Para este experimento, utilizou-se parte do sistema de sincronização já desenvolvido para o experimento de aquisição de imagens. Então, o mesmo dispositivo excêntrico com um sinal de janela (gráfico superior na Figura 23) foi utilizado para determinar o intervalo de medição do PDI – o intervalo de injeção e a placa eletrônica processadora de sinais foi modificada para inversão do sinal, pois o equipamento da Artium é sensível a borda de descida do sinal para início da medição (Figura 31).

Figura 31 – Sinal de trigger do equipamento PDI

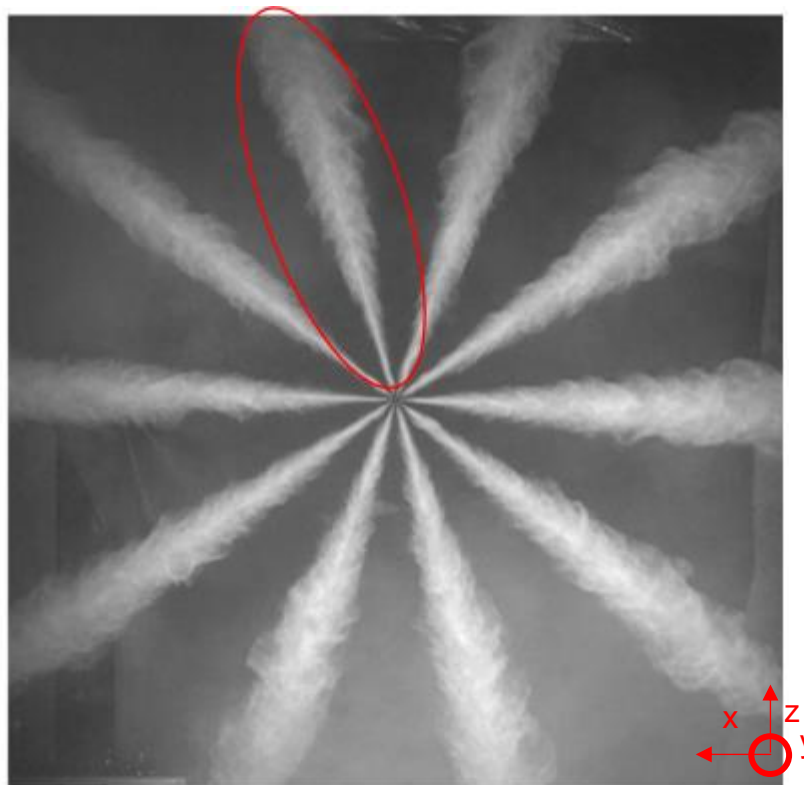


Fonte: O próprio autor (2022).

Após montagem de todos os equipamentos, iniciaram-se as medições preliminares para calibração de ganho do receptor de acordo pelo posicionamento do volume de medição em uma região dentro do *spray*. Também, foi colocado como dado de entrada para o *software* da Artium o valor do índice de refração do fluido Settari 4113 que é de 1,38.

O posicionamento do volume de medição foi feito empiricamente e observando o laser com relação ao jato de fluido. O jato segregado pelo defletor e utilizado para medição é mostrado na *Figura 32* juntamente com a orientação do sistema de coordenadas adotado para o experimento.

Figura 32 – Pluma do spray utilizada nos experimentos com PDI



Fonte: O próprio autor (2022).

Durante os experimentos realizados, a cremalheira da bomba foi ajustada para 40 mm e a velocidade do eixo principal mantida em 360 rpm, mesmos procedimentos adotados nos demais ensaios. A medição de diâmetro e velocidade das gotículas foi realizada por 10 segundos de operação contínua da bancada, totalizando a medição de 60 eventos de injeção. Ao fim da medição de cada ponto no espaço, os exaustores foram acionados para extrair a névoa de gotículas do fluido de teste utilizado. Em seguida, movimentava-se o sistema de posicionamento tridimensional para outro ponto de medição do *spray*, realizando a varredura de um espaço em torno da pluma.

Para a determinar os pontos de medição do *spray*, utilizou-se as imagens obtidas com o ensaio da câmera de alta velocidade a fim de mensurar uma altura (Plano Z) em que a região do *spray* não fosse muito densa por causa da limitação de

aplicação da técnica. Esta limitação é decorrente do fenômeno de multi-ocupação de gotículas no volume de medição posicionado em regiões mais densas, onde pode não haver a formação de gotículas esféricas. Com relação aos outros eixos foi necessário realizar uma varredura nas demais direções (X e Y), para buscar quantitativamente a região do *spray* e gerar vários pontos de medição em diferentes áreas.

4.4 SELEÇÃO DE SISTEMA DE INJEÇÃO USADOS

Inicialmente, com o intuito de validar o conceito de medição de pressão de injeção proposto para a bancada de testes, o critério de seleção foi fundamentado no número de horas em operação dos componentes da bomba e injetor. Este critério embasado no horímetro dos componentes determina necessidades de manutenção de acordo com os procedimentos para troca peças, seguindo as orientações de manutenção estabelecidos pela Wärtsilä, fabricante do moto-gerador. Portanto, o primeiro estudo de caso teve o objetivo de medir os desempenhos de um sistema com componentes novos e sistemas usados que foram retirados de funcionamento do motor após os respectivos números de horas, como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 – Condições dos componentes usados do sistema de injeção testados

Componentes	Número de horas em operação
Injetor A (IA)	1.400
Bomba de alta pressão A (HPPA)	4.096
Injetor B (IB)	368
Bomba de alta pressão B (HPPB)	26.882

Fonte: O próprio autor (2022).

Para a realização de outras comparações, optou-se por utilizar dados do motor que pudessem indicar degradação de desempenho dos componentes do sistema de injeção durante operação. As subseções a seguir explicam a metodologia utilizada para selecionar componentes diretamente da operação dos motores na UTE Viana.

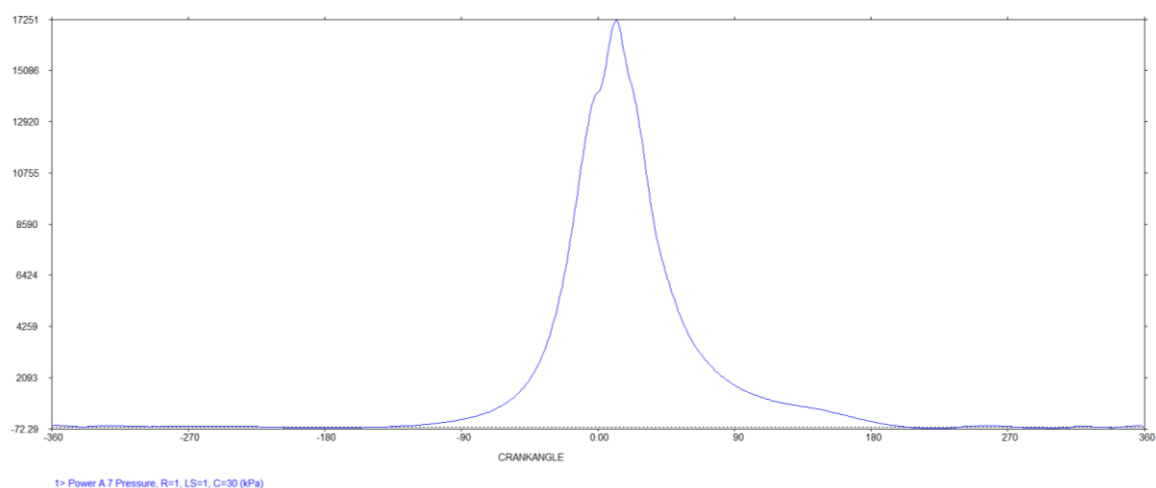
4.4.1 Obtenção de dados do motor

Os dados necessários à seleção dos componentes foram obtidos com a utilização do analisador portátil modelo 6320 da fabricante Windrock pelos times de operação e manutenção da TEVISA. Este equipamento da Windrock realiza a leitura

de pressão dentro do cilindro do motor pela montagem de um transdutor de pressão na saída da válvula de purga, único duto comunicante com o interior do cilindro. A pressão do cilindro é medida em função do ângulo de virabrequim (roda fônica do motor) e o transdutor de pressão da fabricante Kiene (A6084-08-01). A resolução da medição é de um ponto de pressão a cada um grau de ângulo do virabrequim e o resultado do sistema é um ciclo médio de 30 ciclos amostrados. Esse procedimento é o padrão adotado pela TEVISA.

Após aquisição dos dados de pressão com o analisador portátil, utilizou-se o *software* específico da Windrock para visualização e análise dos dados medidos, além da produção de relatórios com os parâmetros relevantes de funcionamento do motor. Um exemplo da curva de pressão que se obteve é mostrado na Figura 33.

Figura 33 – Curva média da pressão no interior do cilindro utilizando equipamento da Windrock



Fonte: O próprio autor (2022).

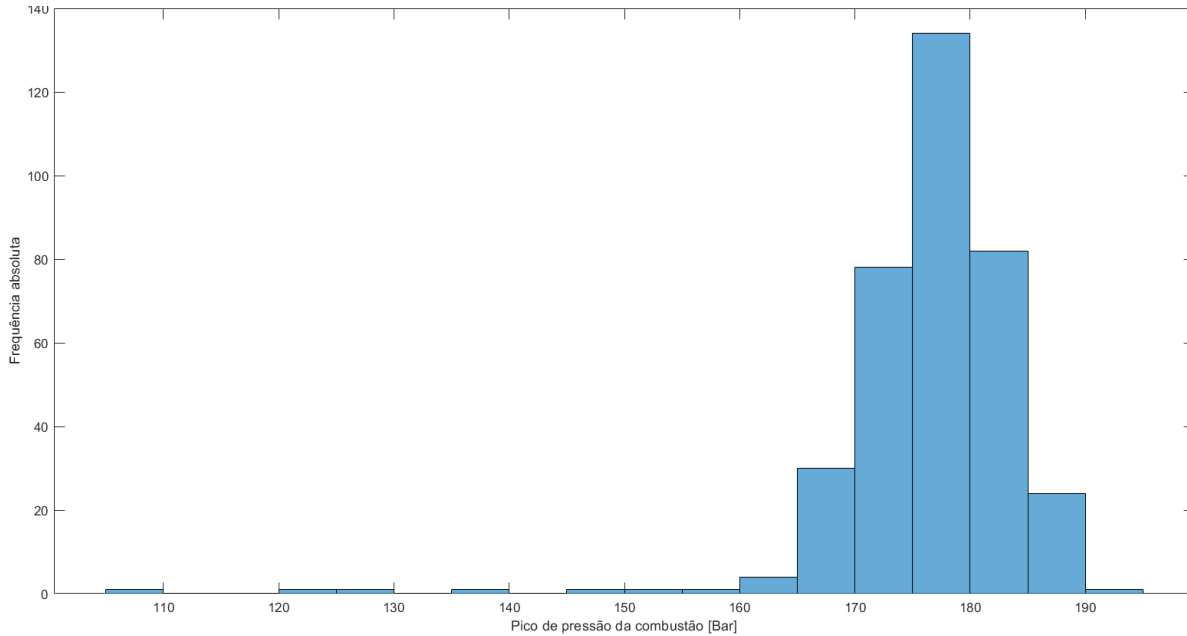
4.4.2 Componentes selecionados para comparação de desempenho

Os dados de pressão no interior dos cilindros obtidos e pós processados com os equipamento e *software* da *Windrock* foram organizados em distribuições estatísticas de pico de pressão de combustão (*Peak Cylinder Pressure – PCP*) e sua posição angular (*Alpha Peak Cylinder Pressure – APCP*), posição da cremalheira (*Rack Position – RP*) e pressão média efetiva indicada (*Indicated Mean Effective Pressure – IMEP*).

A distribuição das pressões de pico no interior dos cilindros, mostrada na *Figura 34*, revela que grande parte das pressões de pico está no intervalo entre 175 e

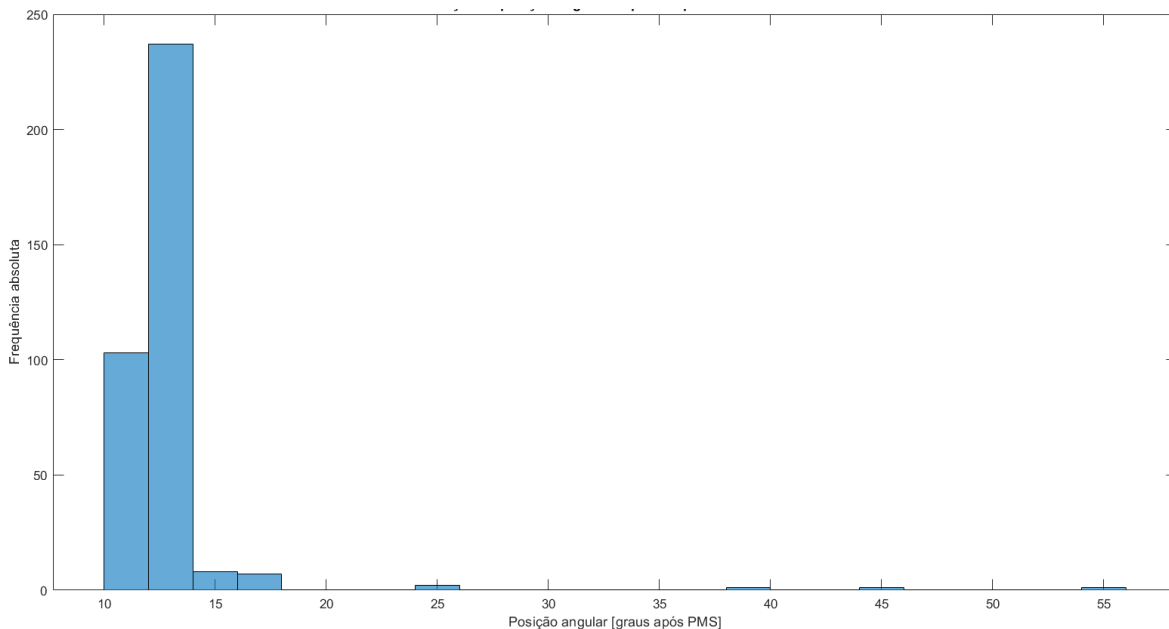
180 bar, e o local onde essa pressão máxima ocorreu estava majoritariamente entre 10° e 12,5° de virabrequim após o PMS (ponto morto superior), como indica Figura 35

Figura 34 – Distribuição dos valores do pico de pressão do cilindro.



Fonte: O próprio autor (2022).

Figura 35 – Distribuição dos valores de posição angular do pico de pressão de cilindro

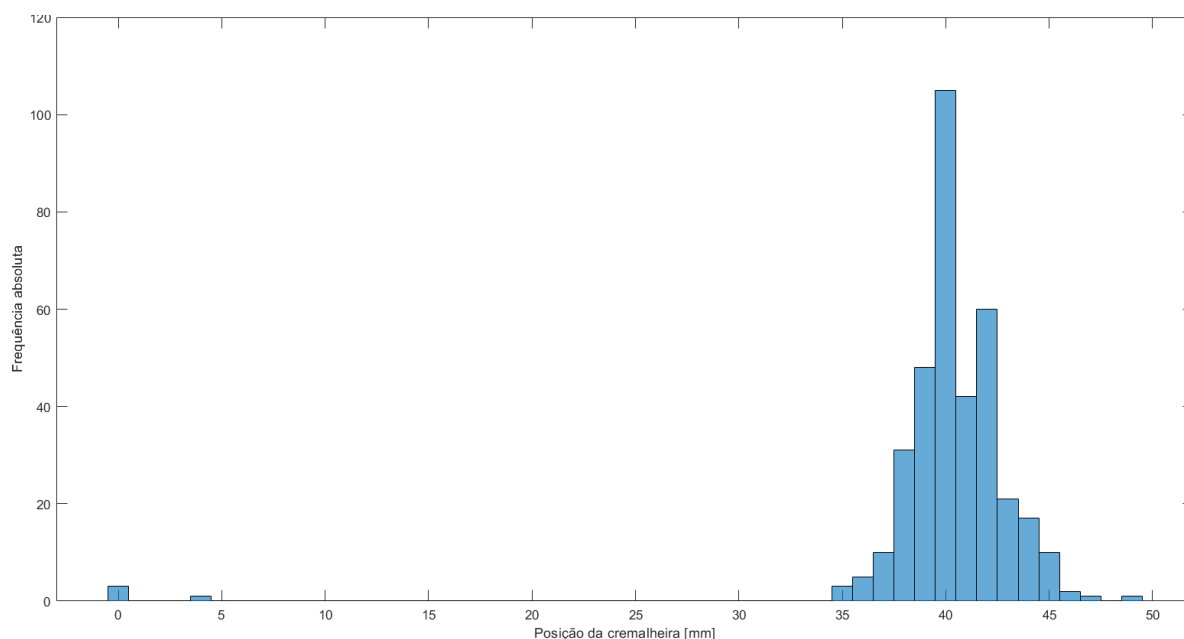


Fonte: O próprio autor (2022).

Porém, uma grande dispersão foi observada nos valores da posição da cremalheira das bombas injetoras, como mostra a *Figura 36* na qual nota-se que esses valores variaram de 35 a 48 mm. Além disto, sabia-se que os moto-geradores estavam operando a plena carga durante as medições realizadas, e como as pressões de pico

dos cilindros se encontravam com poucas variações, esta grande dispersão entres os valores das cremalheiras das bombas injetoras observadas indicavam possíveis variações de desempenho nos sistemas de injeção de combustível que poderiam ser ocasionados por degradação de seus componentes.

Figura 36 – Distribuição dos valores de posição da cremalheira.



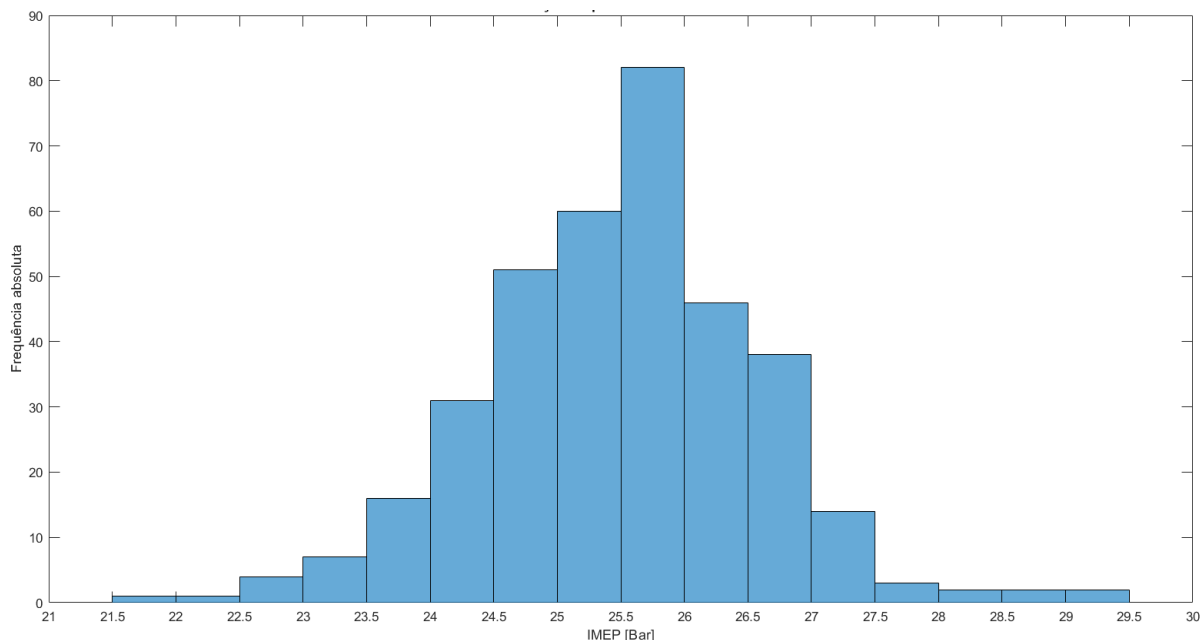
Fonte: O próprio autor (2022).

Também, notou-se uma significativa dispersão entre os valores de IMEP. Estes variaram de 21 a 28 bar de acordo com sua distribuição apresentada na Figura 37. Esta considerável variação de trabalho líquido por ciclo revelada na distribuição do IMEP, aliada à grande dispersão entre os valores das posições de cremalheira das bombas injetoras, era indicativo de que os sistemas de injeção dos motores da UTE Viana estavam operando em condições diferentes e, possivelmente, alguns de forma ineficiente.

Após analisar estas distribuições e as curvas de pressão medidas, verificou-se que alguns pontos espúrios (pontos fora das curvas) foram causados por inserção de dados incorretos nos arquivos de medição, como por exemplo valores inferiores a 35 mm de posição de cremalheira, ou cuja medição de pressão no interior do cilindro apresentou variações significativas por prováveis erros durante a aquisição dos dados, caso das distribuições de pico de pressão e sua respectiva posição angular. Ainda assim, a quantidade de dados obtidos foi suficientemente relevante para a escolha de sistemas de injeção (bomba injetora + injetor) que poderiam estar

afetando o desempenho do moto-gerador por operar em condições de falha ou desgaste excessivos, decidiu-se por desconsiderar estes pontos fora da curva.

Figura 37 – Distribuição de dados de pressão média efetiva indicada



Fonte: O próprio autor (2022).

Após desconsideração dos casos espúrios devido a erros de medições, o conjunto de dados restante foi minuciosamente analisado e três conjuntos de bombas e injetores foram selecionados para representar as diversas condições de operação presentes na planta da UTE Viana. Os dados destes conjuntos selecionados são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados dos cilindros dos moto-geradores dos conjuntos selecionados para testes

Parâmetros	UG02A4	UG03A2	UG11A5
RP	49 mm	46 mm	40 mm
PCP	179,3 bar	168,2 bar	127 bar
APCP	12,63°	11,47 °	38,14°
IMEP	25,6 bar	25,6 bar	25,2 bar

Fonte: O próprio autor (2022).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção tem foco na apresentação dos resultados e respectivas discussões da análise dos conjuntos selecionados conforme metodologia explicada no capítulo anterior. Vale ressaltar, que os resultados de validação da bancada e testes de viabilidade do diagnóstico de outras bombas e injetores degradados foram publicados no 18º Congresso Brasileiro de Ciências Térmicas – ENCIT 2020 (Costa *et. al.*, 2020) e relatório técnico do Projeto P&D No. 0718-000025 submetido para ANEEL. No final deste capítulo, há uma breve discussão do benefício da aplicação desta metodologia de diagnóstico de sistemas de injeção degradados para tomada de decisão na operação dos motores Wärtsilä W20V32.

5.1 MEDIÇÃO DE PRESSÃO DE INJEÇÃO E MASSA DE FLUIDO INJETADO DOS CONJUNTOS SELECIONADOS

Ao final de cada ensaio para caracterização de desempenho dos componentes, a quantidade de fluido de teste injetada durante a aquisição de dados de pressão de injeção de 500 ciclos foi medida em uma balança externa (*Figura 38*). Foi considerado uma regulagem de débito padrão (posição da cremalheira 40 mm), por conta disso, permitiu-se a comparação entre o desempenho dos conjuntos nesse quesito. Assim, obtiveram-se os seguintes resultados para as configurações de componentes testadas (Tabela 5).

Figura 38 - Massa de fluido de teste pesada em balança externa



Fonte: O próprio autor (2022).

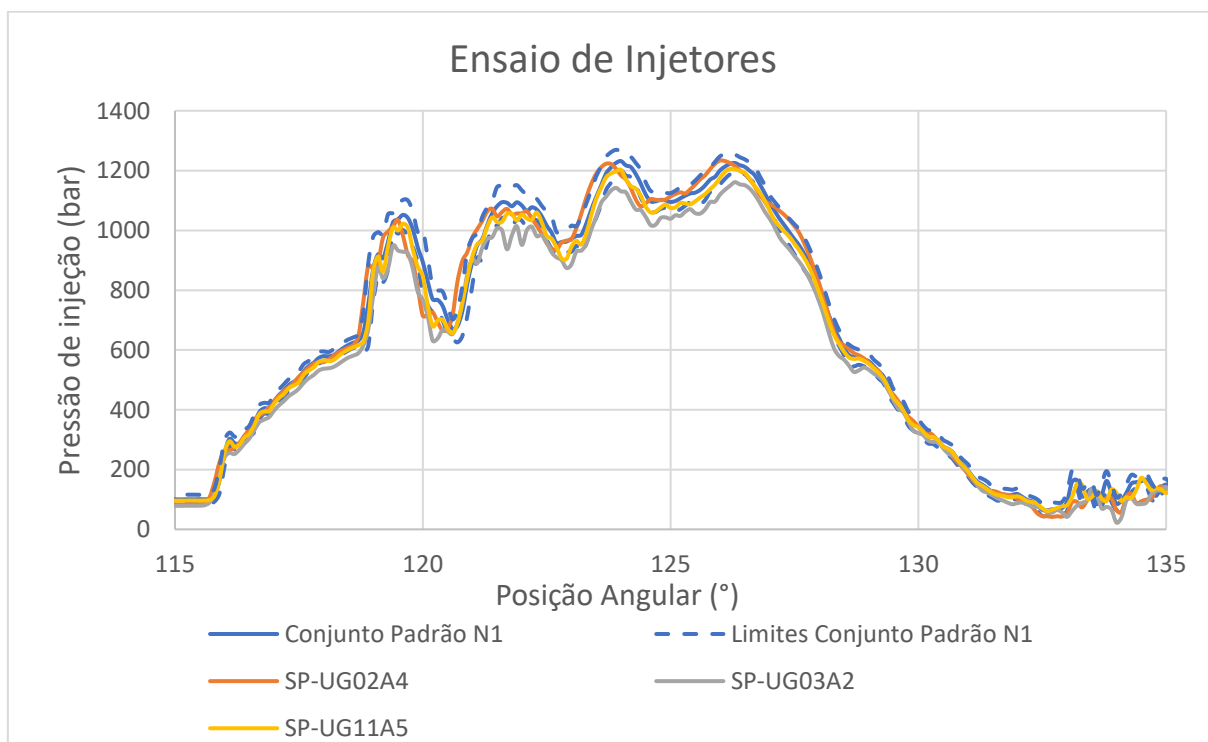
Tabela 5 - Resultados de massa de injetada

Bomba	Injetor	Massa injetada (kg)
Padrão	Padrão	$3,1431 \pm 0,0434$
Padrão	UG02A4	$3,2495 \pm 0,0672$
Padrão	UG03A2	$3,1865 \pm 0,0413$
Padrão	UG11A5	$3,1355 \pm 0,0356$
UG02A4	Padrão	$2,5115 \pm 0,0198$
UG03A2	Padrão	$2,8504 \pm 0,0404$
UG11A5	Padrão	$2,6784 \pm 0,0232$
UG02A4	UG02A4	$2,6510 \pm 0,0103$
UG03A2	UG03A2	$2,9606 \pm 0,0322$
UG11A5	UG11A5	$2,7802 \pm 0,0489$

Fonte: O próprio autor (2022).

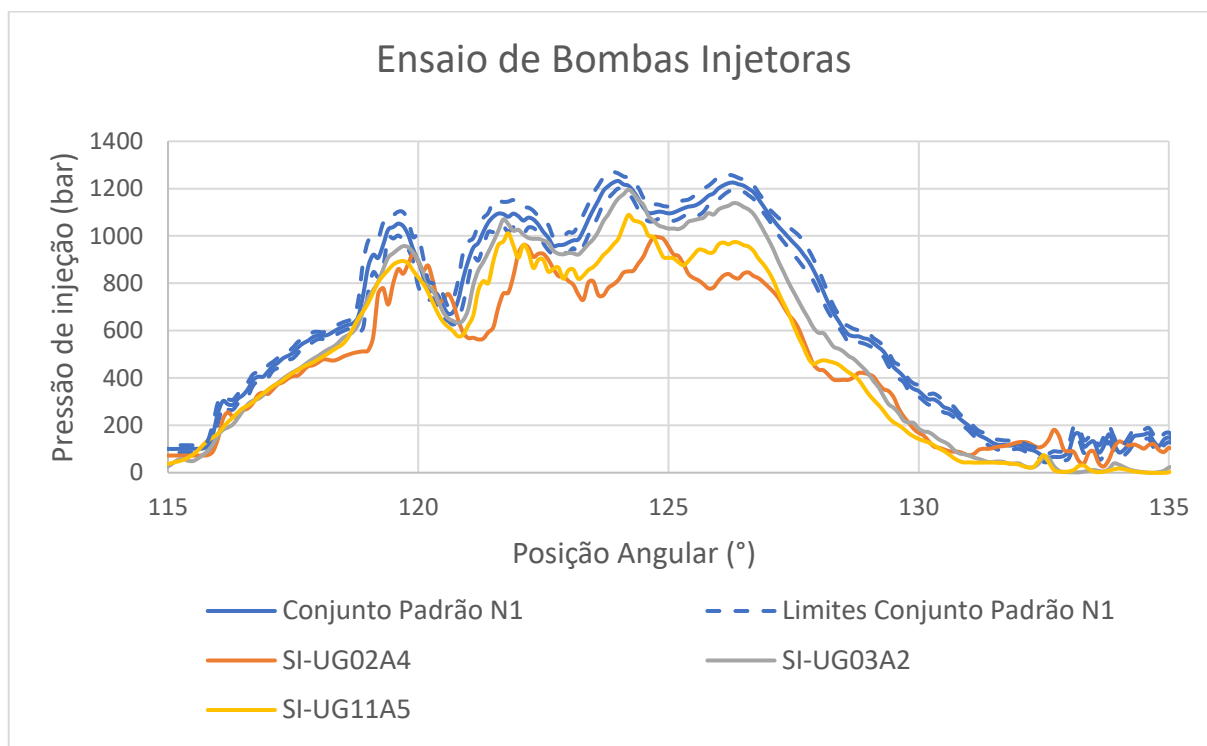
A seguir, as Figura 39, Figura 40 e Figura 41 mostram as curvas de pressão de injeção medidas dos componentes dos conjuntos selecionados já comparando ao resultado obtido com o conjunto padrão (composto por bomba e injetor). Durante os testes de ensaios de injetores e das bombas de alta pressão, objetivou-se a avaliação isolada da contribuição de cada componente do sistema de injeção (bomba ou injetor) em caso de mal desempenho no diagnóstico pela medição da curva de pressão de injeção.

Figura 39 – Ensaio de injetores (bomba injetora padrão)



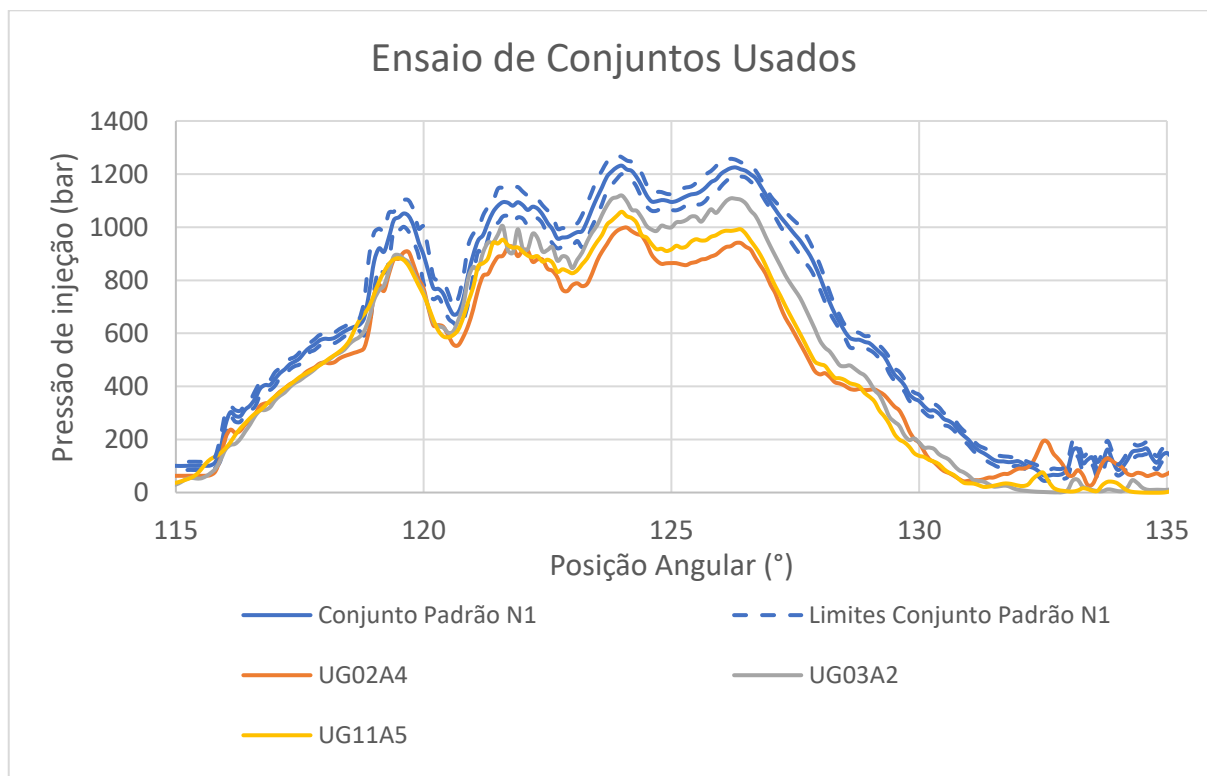
Fonte: O próprio autor (2022).

Figura 40 – Ensaio de bombas injetoras com o injetor padrão (SI)



Fonte: O próprio autor (2022).

Figura 41 – Ensaio dos conjuntos de bomba e injetores oriundos dos moto-geradores



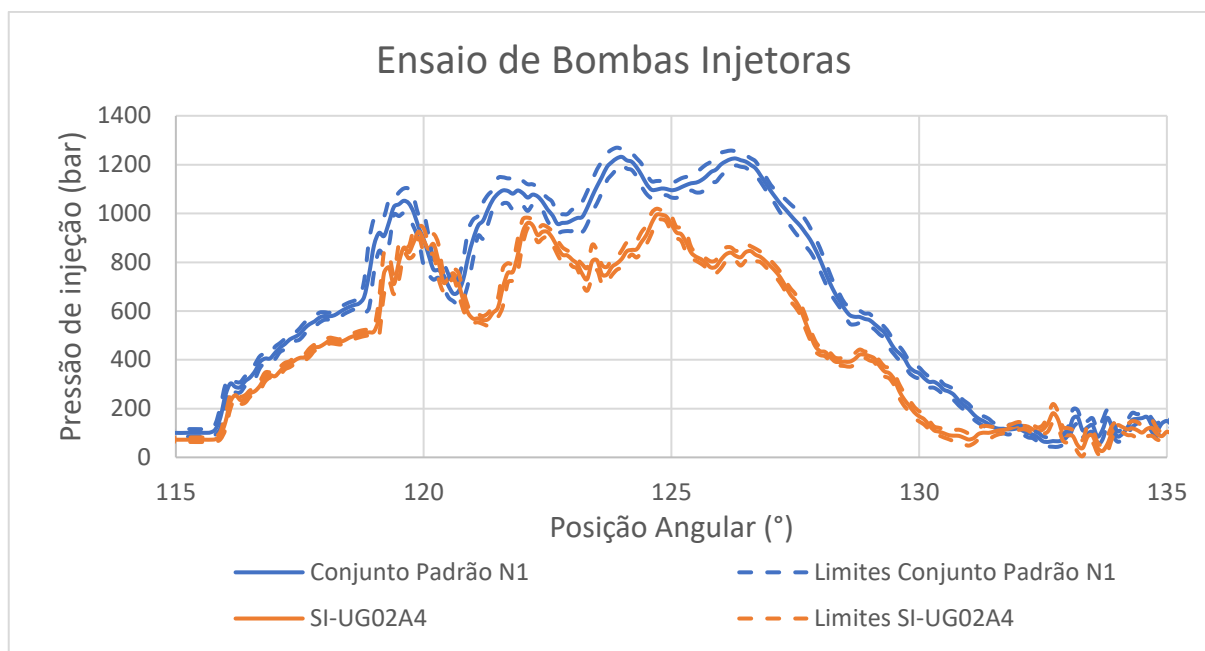
Fonte: O próprio autor (2022).

Após análise dos gráficos mostrados, observa-se a existência de discrepâncias nos dados de pressões obtidos nos ensaios de injetores quando a bomba padrão foi utilizada (Figura 39). Entretanto, quando o injetor padrão foi utilizado para o ensaio das bombas de alta pressão, as diferenças nos dados de pressão obtidos foram expressivamente maiores (Figura 40) em comparação com as pequenas diferenças vistas nos ensaios de injetores. Ao testar-se os conjuntos bomba e injetor da mesma maneira como estavam montados em seus respectivos moto-geradores, os dados das medições das curvas de pressão de injeção foram armazenados e apresentados na Figura 41. Nota-se que, no caso do sistema de injeção que estava montado no moto-gerador UG02, cilindro A04, tanto os valores de pressão de injeção quanto a duração dos eventos de pressurização do fluido de teste foram significativamente menores se comparados aos dados obtidos com a bomba e injetor padrão, utilizados como referência. Portanto, verificou-se que a evolução da curva de pressurização é dominada por desgastes e/ou efeitos anômalos oriundos das bombas injetoras e observou-se pouca influência das condições de uso dos injetores.

A Figura 42 mostra relevante diferença nas curvas de pressão medidas de bombas desgastadas e a comparação com a bomba padrão (referência). Avaliando-se o pior resultado (bomba UG02A4), os picos da curva de pressão medidos nos ensaios de bombas indicam reduções de aproximadamente 14 a 19% em relação à referência, além dos intervalos de incerteza das medições estarem majoritariamente distantes. Dessa forma, verifica-se expressiva redução de pressão que também causa redução na quantidade de fluido injetado, pois sabe-se que a vazão de fluido injetado é proporcional a raiz quadrada da diferença entre a pressão de injeção e da pressão do gás no interior do cilindro do motor ou qualquer outro ambiente onde o fluido seja injetado (Heywood, 2018).

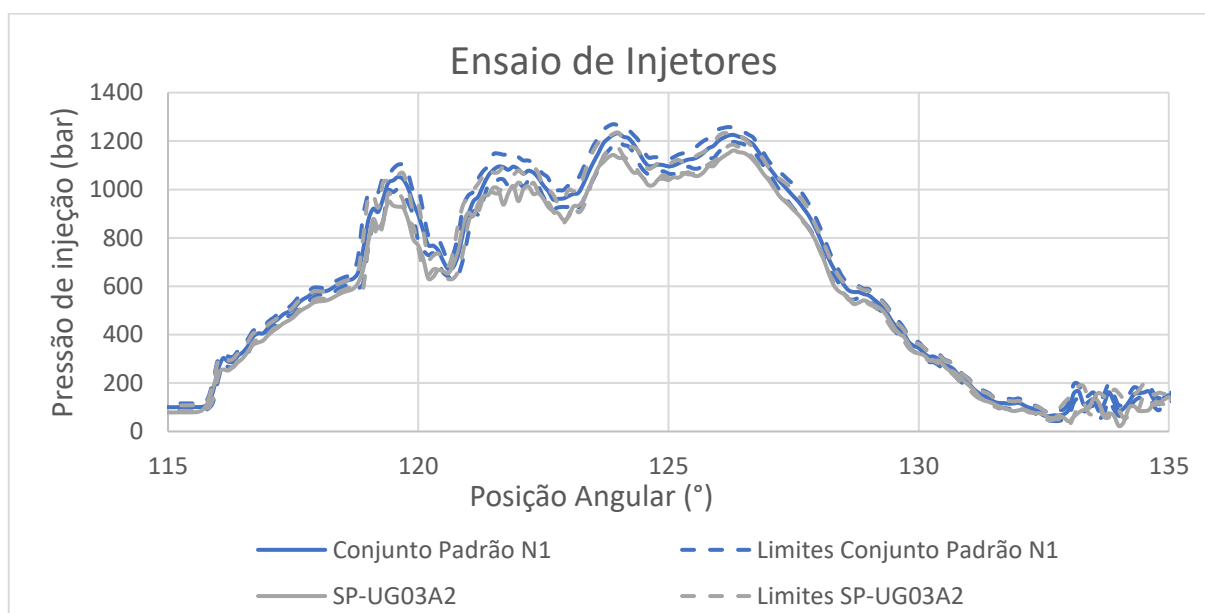
A Figura 43 mostra as curvas de pressão para os ensaios dos injetores utilizando a bomba padrão no qual observou-se que os níveis de pressão média atingidos pelo SP-UG03A2 estão dentro do intervalo de incerteza de medição do conjunto padrão, portanto não é possível garantir diferença relevante. Também, notou-se que, no caso extremo, a redução de pressão observada entre os valores médios é da ordem de 7 a 10% em relação ao injetor padrão.

Figura 42 – Maior diferença no ensaio das bombas injetoras



Fonte: O próprio autor (2022).

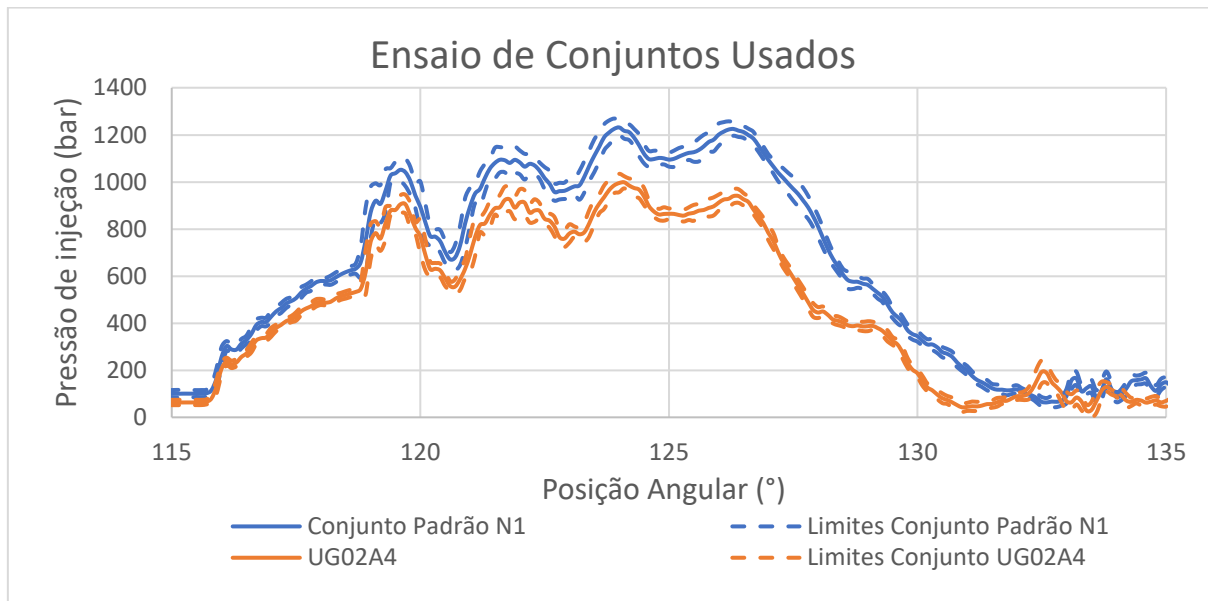
Figura 43 – Maior diferença no ensaio dos injetores



Fonte: O próprio autor (2022).

Como consequência da dominância do desempenho da bomba injetora na evolução de pressão de injeção, o conjunto usado com maior degradação dos componentes foi o UG02A4 (Figura 44) cujos níveis de pressão média variaram entre 13 e 23%.

Figura 44 – Maior diferença no ensaio dos conjuntos com respectivos componentes (bomba e injetor)



Fonte: O próprio autor (2022).

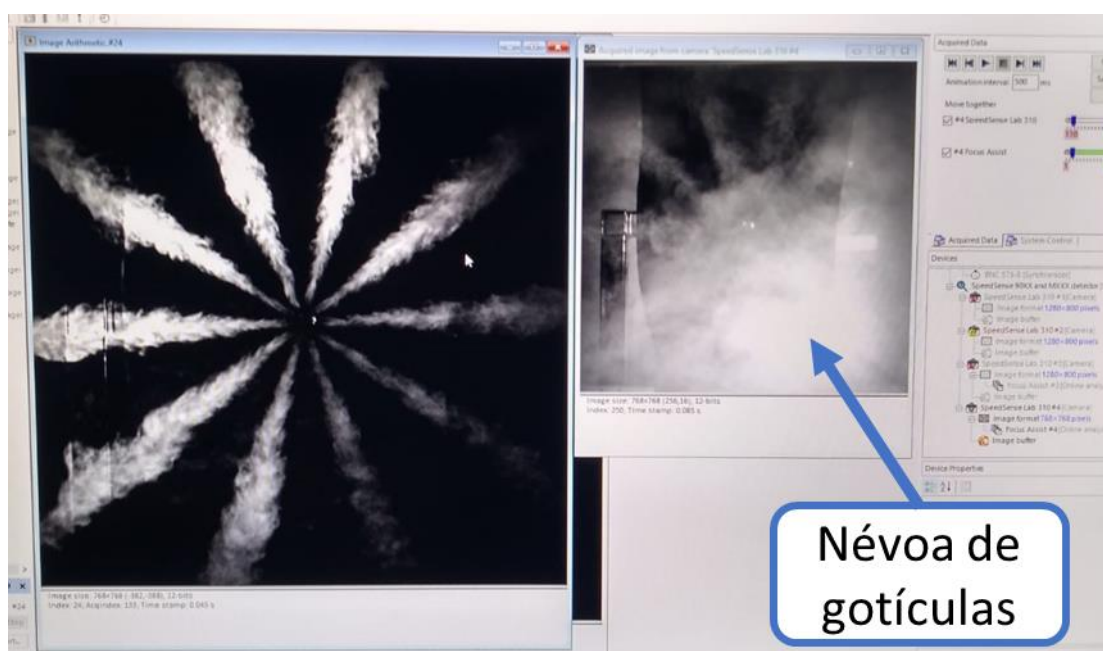
5.2 COMPARAÇÃO DA MACRO GEOMETRIA DOS *SPRAYS* FORMADOS

5.2.1 Problemas na captura das imagens de alta velocidade

Durante a execução do experimento, algumas dificuldades relacionadas à obtenção das imagens foram experienciadas. Nos primeiros testes preliminares, as imagens capturadas possuíam muito ruído proveniente da névoa formada por gotículas micrométricas do fluido injetado que circundavam o ar em frente a câmera, dificultando a clara visualização do *spray* e pós-processamento da imagem em algumas regiões importantes para observação da evolução das plumas. Como exemplo do problema observado, a Figura 45 exibe uma fotografia adquirida pela câmera de alta velocidade com o ruído descrito no qual observa-se a presença da névoa impedindo a avaliação das plumas na parte inferior direita da imagem. No entanto, tal problema foi atenuado com a utilização de exaustores na região, melhorando o acúmulo de gotículas no campo de visão da câmera.

Embora a utilização dos exaustores tenha melhorado a observação do *spray* (Figura 46), inda houve dificuldade na segmentação da imagem para delimitar a região do *spray* após subtração do plano de fundo. Nesse caso, ao se utilizar um nível de limiar (*threshold*) de intensidade do pixel que permitia identificar as três plumas no canto inferior das imagens obtidas no experimento, perdia-se muita informação sobre as demais plumas do *spray*.

Figura 45 – Ruído gerado pela névoa do fluido de teste



Fonte: O próprio autor (2022).

Figura 46 – Imagem obtida pela câmera sem processamento

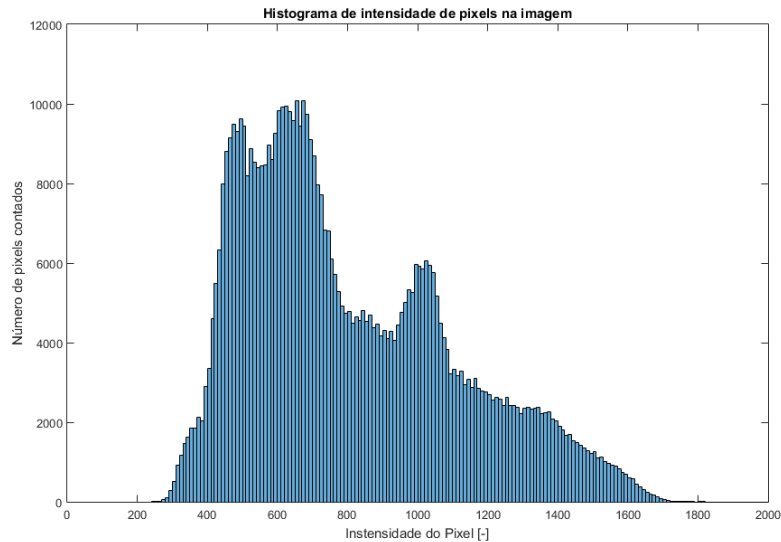


Fonte: O próprio autor (2022).

Essa dificuldade poderia ser contornada se as imagens obtidas tivessem um plano de fundo (*background*) bem definido, o que não aconteceu, como pode ser verificado no histograma da imagem em questão (Figura 47). Se o *spray* se destacasse de seu plano de fundo, o histograma da Figura 47 teria duas regiões bem definidas, uma relativa ao plano de fundo com acúmulo de pixels de baixa intensidade e outra com pixels

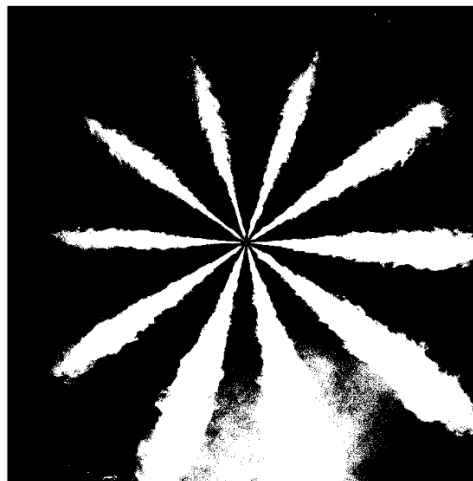
de alta intensidade relativos ao *spray*. Portanto, para este tipo de caso foi necessário realizar considerar um compromisso entre ganhar informação em uma determinada região da imagem, em detrimento de informação em outra região. Dessa forma, para uma análise inicial, utilizou-se um nível de limiar próximo dos 800 para tentar separar o *spray* do plano e a imagem segmentada obtida é mostrada na Figura 48.

Figura 47 – Histograma da imagem analisada antes do pós-processamento



Fonte: O próprio autor (2022).

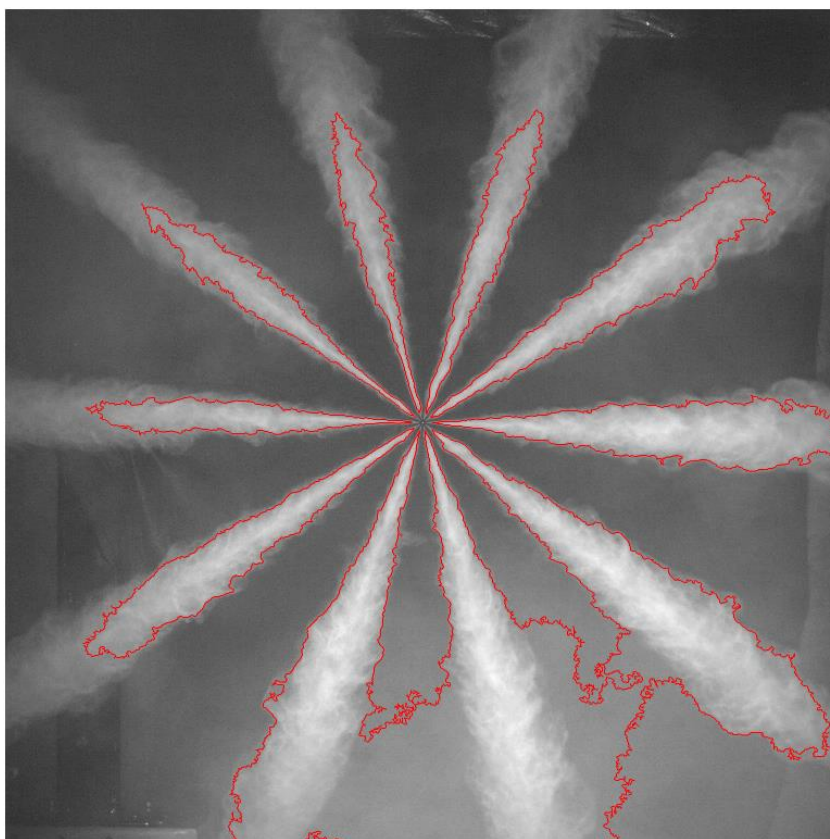
Figura 48 – Imagem segmentada destacando as regiões do *spray* afetadas



Fonte: O próprio autor (2022).

Uma vez que a imagem obtida da câmera foi segmentada, tornou-se possível determinar as regiões do *spray*. E, como pode-se verificar na Figura 49, houve perda de informação sobre as plumas do *spray* fora da região afetada pela névoa de fluido de teste.

Figura 49 – Resultado parcial dos pós processamentos do spray para avaliação de sua macro geometria



Fonte: O próprio autor (2022).

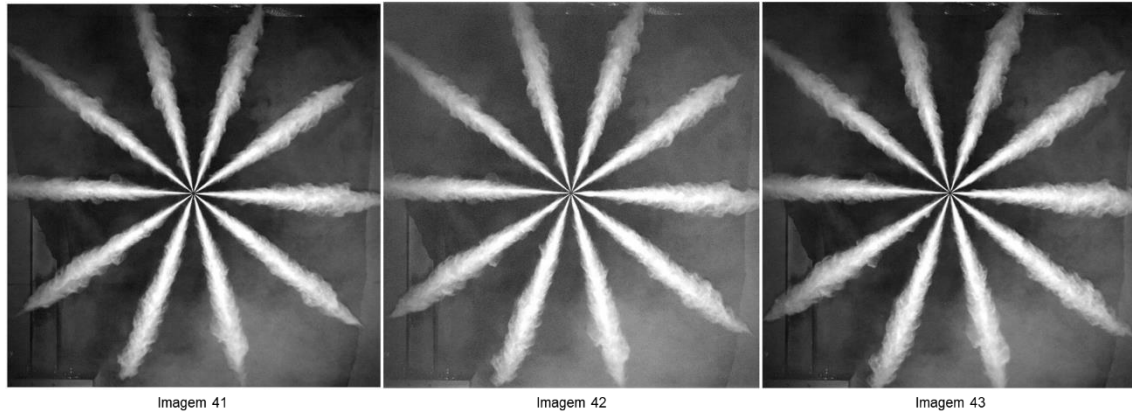
A fim de solucionar este problema, optou-se por utilizar a última imagem antes do início do evento de injeção como plano de fundo para realizar o processo de segmentação de cada evolução de *spray* medida. Tal procedimento permitiu reduzir o *threshold* para 200, melhorando a qualidade do pós-processamento e definição das plumas. Este número de *threshold* foi estabelecido empiricamente baseado nos testes com bomba e injetor do conjunto padrão e utilizado para as demais configurações testadas para avaliação da macro geometria de seus respectivos *sprays*.

Outro problema observado que impactava significativamente o pós-processamento das imagens foi a variação de intensidade dos pixels na 7ª imagem obtida do trem de pulsos enviado pelo gerador de pulsos, após cada pulso enviado pelo sistema de sincronização feito com a placa eletrônica, instalado na bancada (Figura 50 e Figura 51).

Assim, para cada pulso enviado pelo dispositivo sincronizador da bancada, descartou-se a 7ª imagem obtida a partir do trem de pulsos criado pelo dispositivo de sincronização das câmeras (gerador de pulsos) para pós-processamento e avaliação da

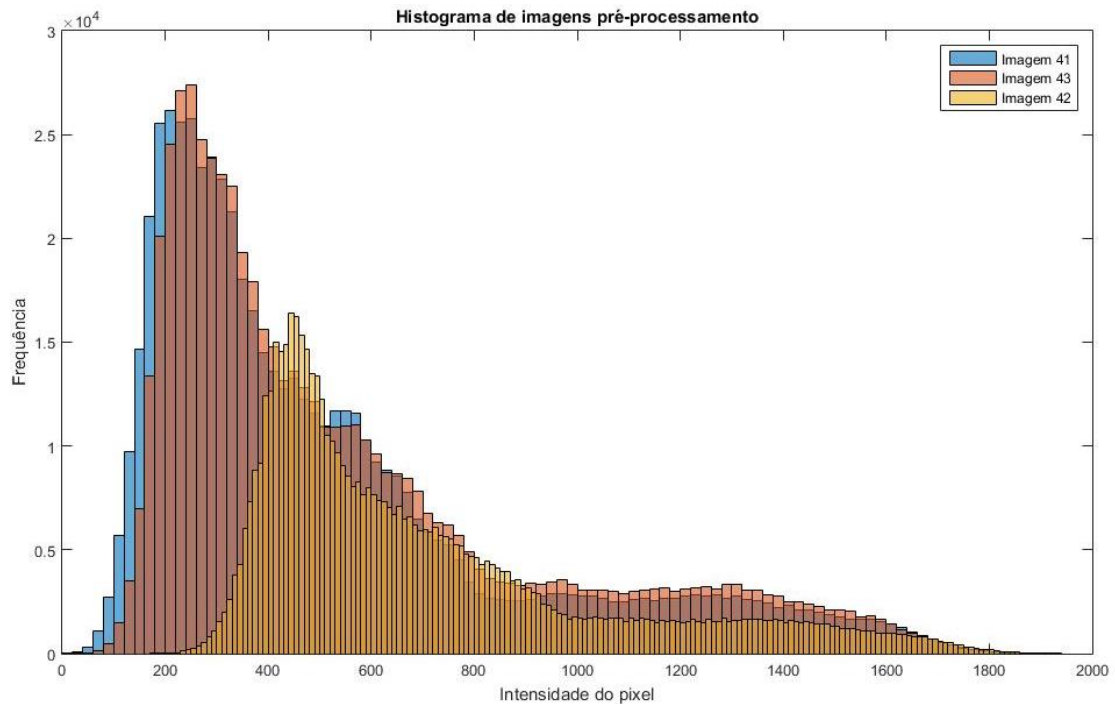
macro geometria. Esta medida não influenciou a proposta da análise da macro geometria, porém impactou positivamente o processamento das imagens.

Figura 50 – Exemplo de variação de intensidade dos pixels nas imagens pré-processadas



Fonte: O próprio autor (2022).

Figura 51 – Histograma de imagens pré-processamento mostrando variação da intensidade dos pixels.

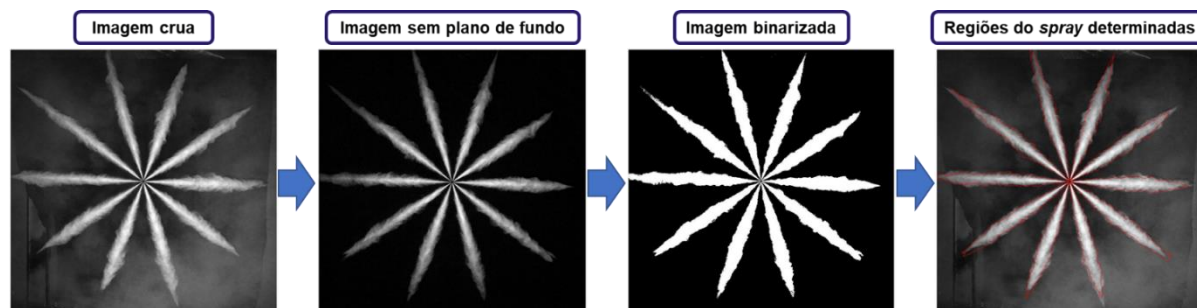


Fonte: O próprio autor (2022).

Após tratamento estes problemas, adotaram-se as técnicas de subtração do plano de fundo utilizando como referência as imagens 23, 86 e 149, ou seja, duas imagens anteriores ao início de cada evento de injeção dos três eventos de injeção observados e cujas imagens foram obtidas. Assim, pôde-se seguir com a segmentação das imagens e determinação das regiões do *spray*. O fluxograma da Figura 52 mostra os processos, desenvolvidos no *software* MATLAB, desde a imagem crua captada pela

câmera até a obtenção da região determinada pelo *spray* que é necessária para avaliação do *spray*.

Figura 52 – Fluxograma de processamento das imagens para determinação da macro geometria.

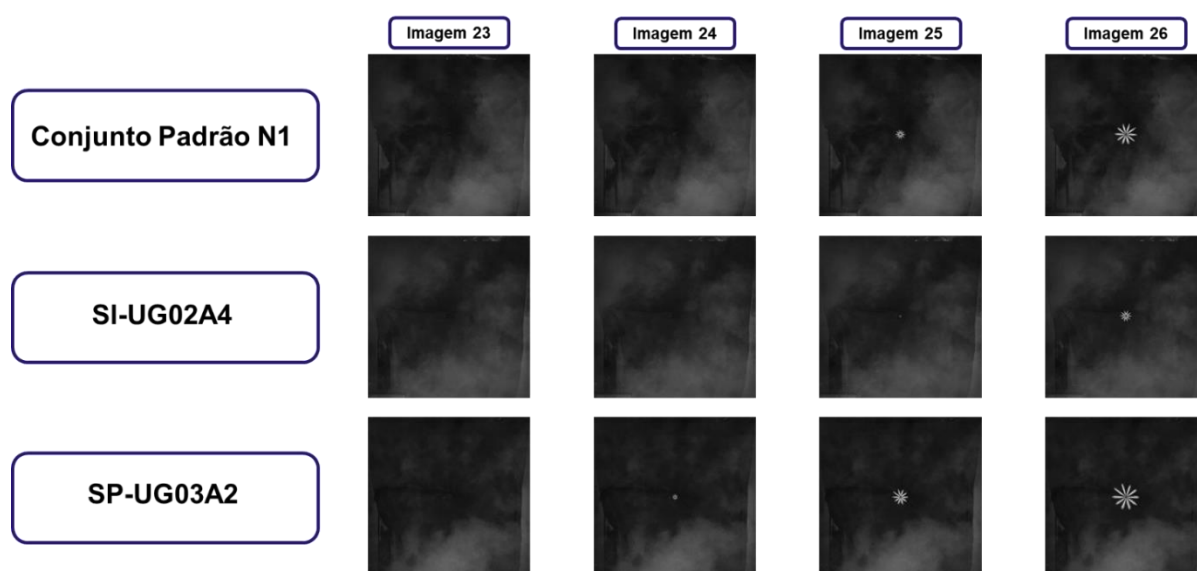


Fonte: O próprio autor (2022).

5.2.2 Resultados de imagens para avaliação da macro geometria do *spray*

Antes de se realizar o pós-processamento para comparação entre as geometrias, analisou-se, qualitativamente, a diferença entre as imagens obtidas para os ensaios com algumas das variadas configurações de bombas e injetores novos e usados cujas pressões de injeção foram medidas. Rapidamente, observaram-se variações no instante de início da injeção entre componentes usados (Figura 53), casos da bomba com maior déficit de pressão (SI-UG02A4) e do injetor com maior déficit pressão (SP-UG03A2).

Figura 53 – Variação do instante de início do evento de injeção.



Fonte: O próprio autor (2022).

Na Figura 53 nota-se que a injeção de fluido se iniciou mais adiantada para o ensaio com o injetor usado e mais atrasada para o caso da bomba usada quando

comparados ao desempenho do conjunto padrão utilizado como referência de comparação. Este atraso e avanço de uma imagem com relação ao conjunto referência representa um atraso/ avanço de aproximadamente $0,8^\circ$ na posição angular do ciclo do motor. Portanto, o processo de combustão e o aumento de pressão no interior do cilindro podem ser impactados, causando mudanças na eficiência, consumo e emissões do motor.

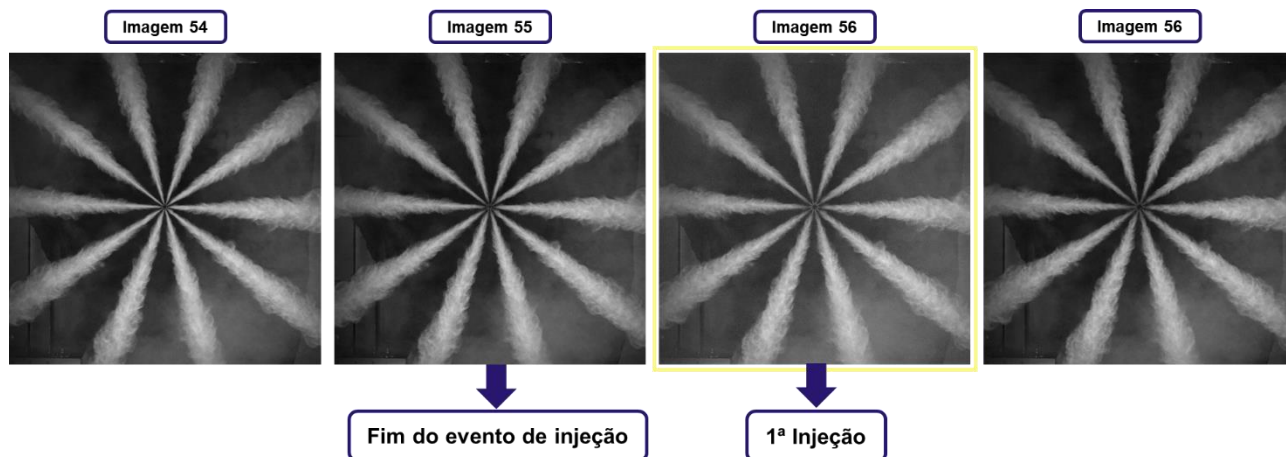
Para o caso da bomba injetora usada (SI-UG02A4), o atraso ocorreu devido aos desgastes de seus componentes internos que causam uma tardia pressurização do fluido. Assim, atingindo o nível de pressão necessário para abertura do injetor padrão com certo atraso. No caso do injetor usado (SP-UG03A2), a hipótese é que a força da mola do injetor desgastado é menor do que a força da mola do conjunto padrão. Portanto, quando a bomba injetora padrão atingiu o nível de pressão compatível com a força da mola do injetor usado, iniciou-se o evento de injeção prematuramente. É importante ressaltar que a variação na força da mola em injetores usados, pode ser decorrente do desgaste no assento da agulha do injetor ou fadiga da mola, conforme relato da literatura por Luoma (2020).

Também foram observados comportamentos inesperados no fim do evento de injeção, pois houve ocorrência de eventos de injeção curtos subsequentes ao evento principal de maior duração. Estes acontecimentos apareceram nas imagens do conjunto padrão N1 (Figura 54 e Figura 55).

Nestas imagens, observou-se que após o evento de injeção principal, houve uma injeção adicional de pouco fluido em um evento de curtíssima duração. A provável causa está relacionada à dinâmica de contato entre a agulha do injetor e sua sede que também é influenciada pela força da mola que atua sobre o componente.

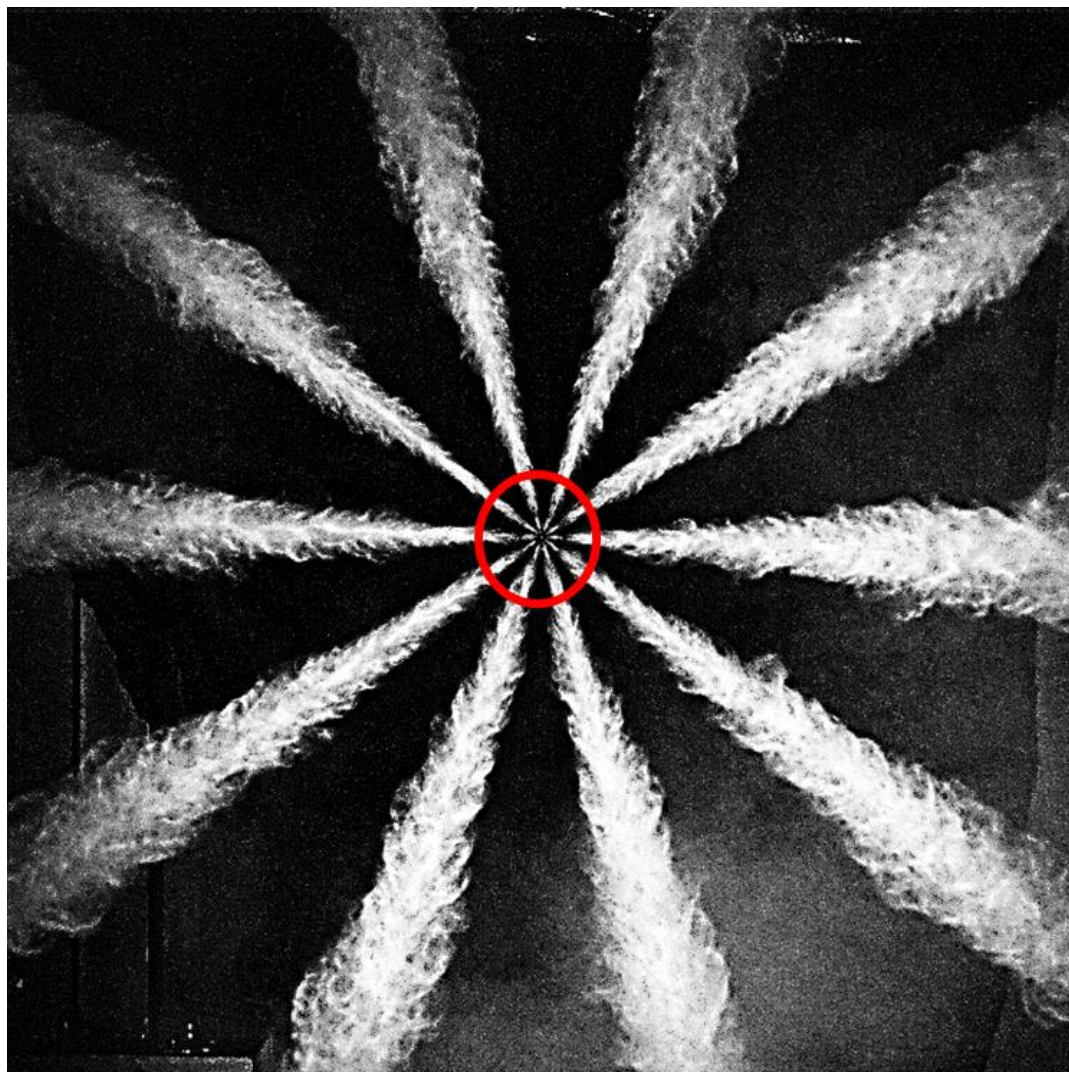
A ocorrência destes eventos de injeção subsequentes ao principal também foi constatada nos ensaios do *spray* do injetor usado cujo desempenho de curva de pressão foi o mais baixo (SP-UG03A2). Contudo, estas ocorrências (Figura 56 e Figura 57) corroboram o que já havia sido diagnosticado sobre o início do evento de injeção estar avançado devido a variações na força da mola decorrentes de prováveis desgastes do assento da agulha e/ou fadiga da mola.

Figura 54 – Evento de injeção indesejado após evento de injeção principal.



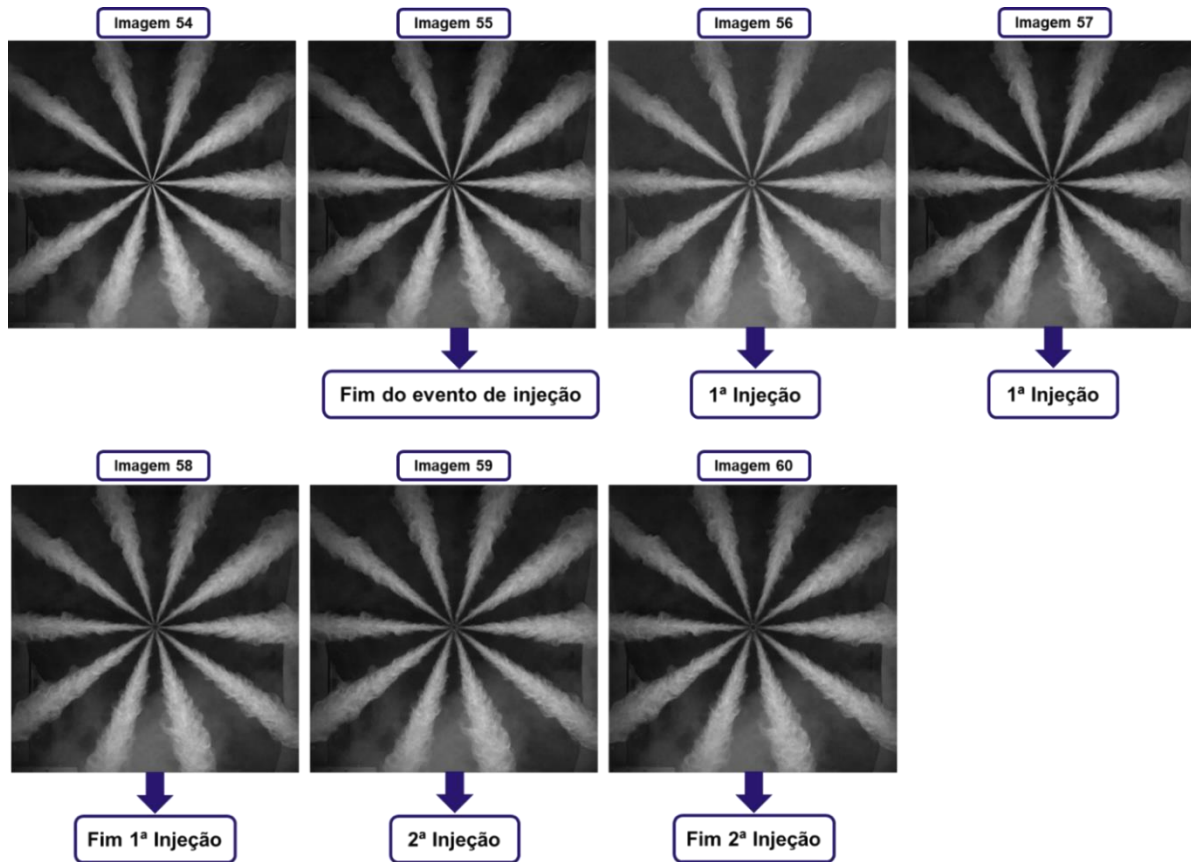
Fonte: O próprio autor (2022).

Figura 55 – Detalhe na imagem 56 do spray (pós-processamento) mostrando a presença de fluido de teste durante evento de injeção indesejado.



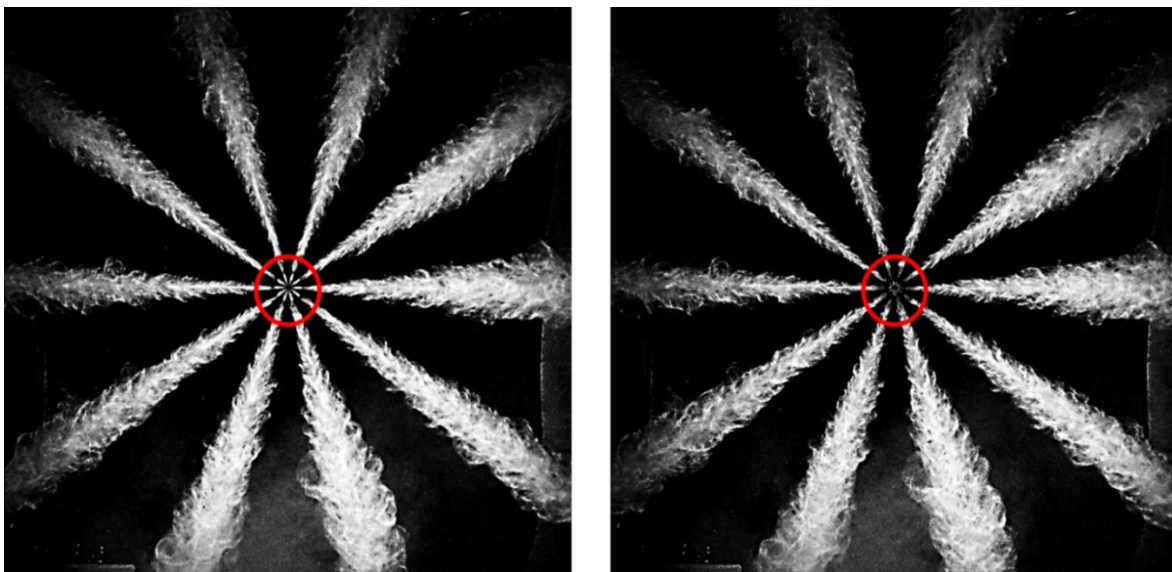
Fonte: O próprio autor (2022).

Figura 56 – Eventos de injeção de curta duração subsequentes ao evento de injeção principal (imagens pré-processamento)



Fonte: O próprio autor (2022).

Figura 57 – Detalhes das imagens pré-processadas (Esq. – Imagem 57 e Dir. – Imagem 59) do spray mostrando a presença de fluido de teste durante os eventos de injeção subsequentes



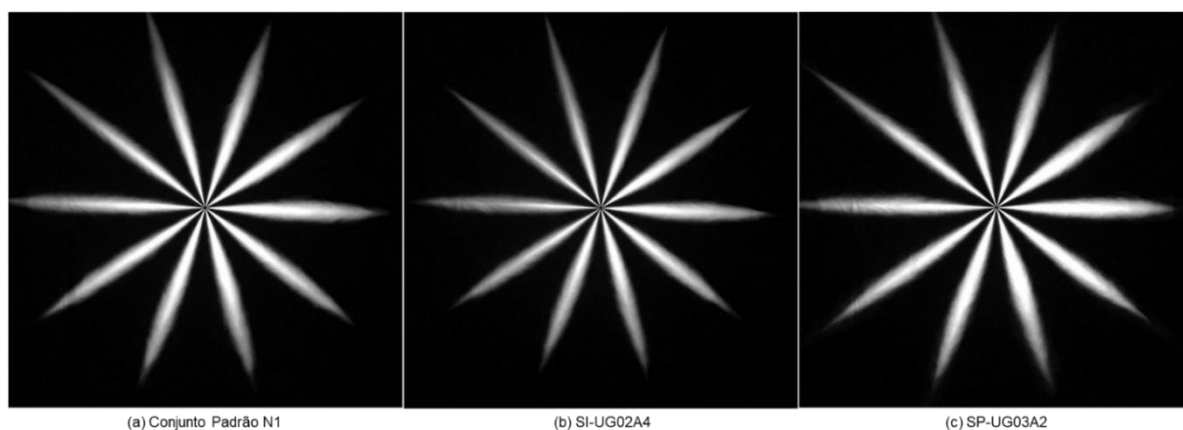
Fonte: O próprio autor (2022).

Após a análise qualitativa dos eventos de início e término da injeção, observando-se as imagens captadas pela câmera e utilizando uma metodologia para

segmentação a partir da imagem de plano de fundo instantes antes do início de cada evento de injeção, iniciou-se a análise quantitativa que possibilitou calcular uma média de conjunto para os quinze ensaios realizados, lembrando que durante cada ensaio realizou-se a aquisição de 189 imagens referentes a três eventos de injeção consecutivos.

Para as configurações testadas, a Figura 58 mostra imagens desta média de conjunto referente a um determinado instante de tempo do evento de injeção. Este instante de tempo foi escolhido baseado no comprimento dos *sprays* a fim de evitar uma imagem na qual o *spray* desenvolvido tivesse seu comprimento excedendo a janela de visualização da imagem. Na Figura 58, notam-se pequenas diferenças entre os *sprays* gerados pelo conjunto padrão e a configuração de teste SP-UG03A2 e relevantes diferenças destes para o SI-UG02A4.

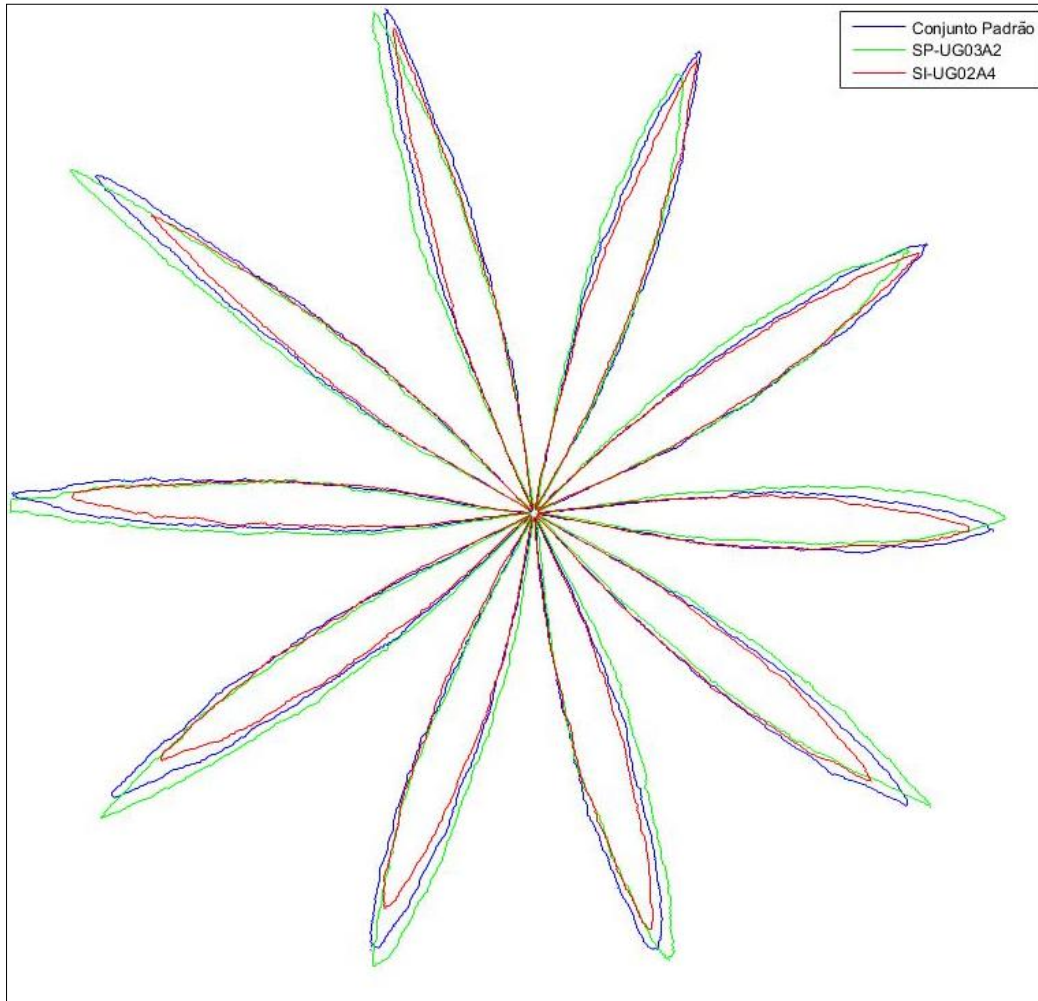
Figura 58 – Imagens média num determinado instante mostrando diferenças na geometria dos *sprays* formados de acordo com os ensaios de bomba e injetor



Fonte: O próprio autor (2022).

Para evidenciar melhor essas diferenças, as regiões dos *sprays* apresentados na imagem anterior foram determinadas pelo procedimento de segmentação de imagens, explicado anteriormente, e são mostradas na Figura 59. Observando esta figura, claramente, verifica-se diferenças entre os contornos limites das regiões dos *sprays*. Na região do centro e canto superior direito da figura, verifica-se bastante similaridade entre as plumas de todos os *sprays* analisados. No entanto, nas demais plumas, há variações significativas no comprimento de penetração da configuração SI-UG02A4 que são consequência de seu déficit pressurização do fluido de teste nos ensaios de medição de pressão que ocasionou uma evolução tardia na evolução temporal do *spray*.

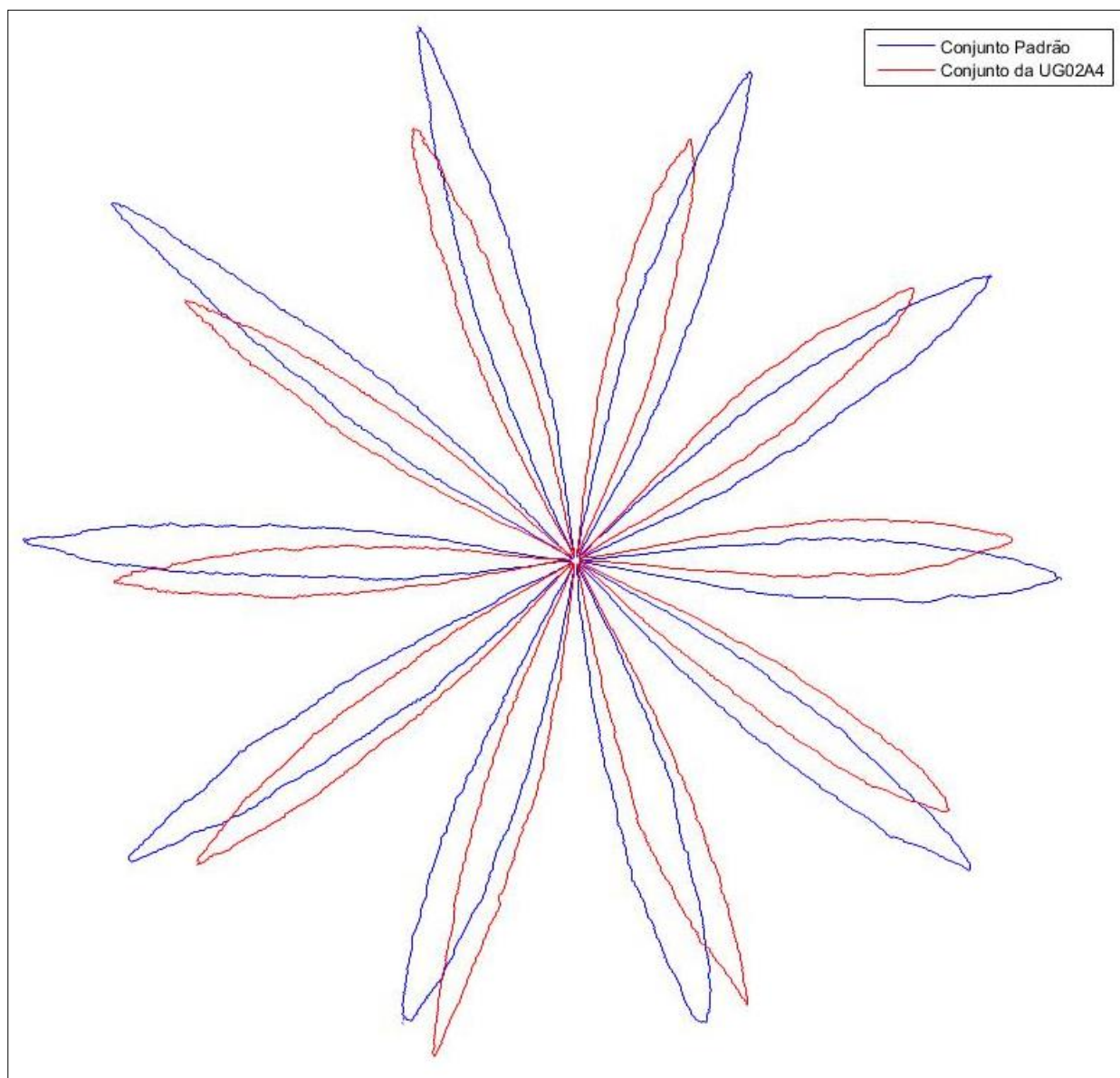
Figura 59 – Resultado de pós-processamento das imagens: Determinação de regiões do spray



Fonte: O próprio autor (2022).

Uma vez determinada as regiões do *spray*, tornou-se possível calcular o comprimento de penetração de cada pluma a partir das imagens. Conforme numeração das plumas mostrados na Figura 61, os resultados obtidos dos comprimentos de penetração para as configurações de componentes dos sistemas de injeção testados no instante da Figura 59 são mostrados na Figura 59, apesar de dificuldades na determinação dos orifícios de saída do injetor por causa de baixa resolução e qualidade de imagem na região do atomizador.

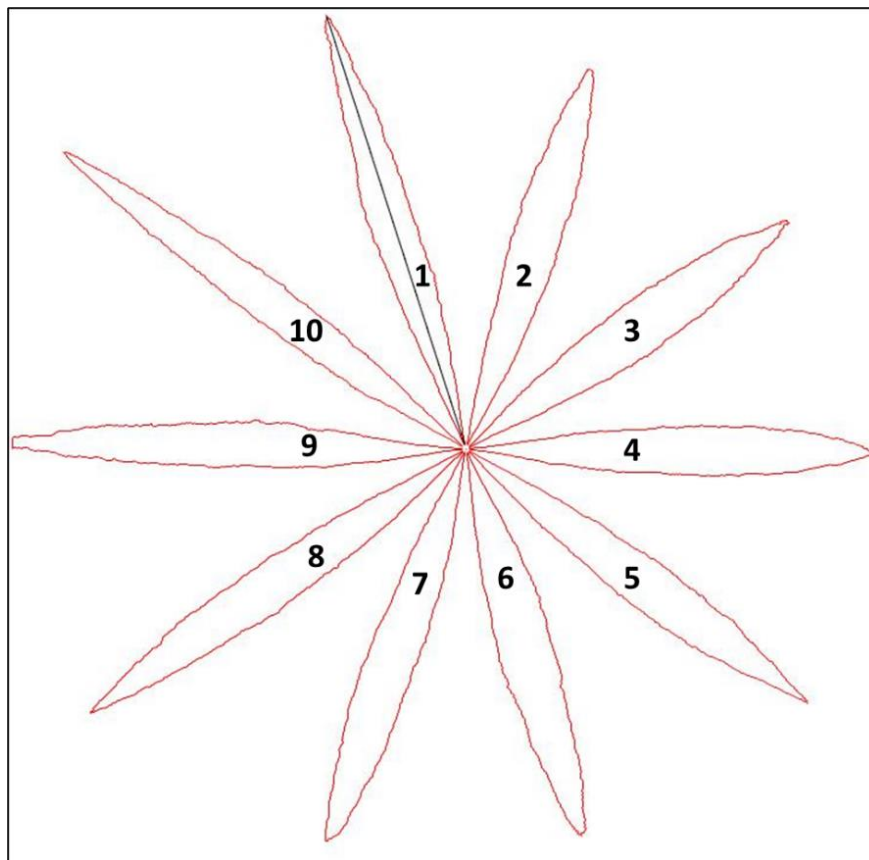
Figura 60 – Determinação de regiões do spray para uma configuração de componentes usados



Fonte: O próprio autor (2022).

Após quantificação dos comprimentos de penetração das plumas dos *sprays* apresentada, verificou-se que há relativas variações entre as plumas de um mesmo *spray*. Isto ocorre por causa da geometria de cada orifício e a distribuição de pressão no interior do *sac volume* (volume determinado na região entre a agulha do injetor e a parede onde os orifícios estão localizados). Sabe-se que essa geometria pode ser diferente em cada orifício por causa das variações no processo de manufatura, ou desgaste e formação de depósitos decorrentes do uso. Porém, sem outras informações adicionais é difícil obter quaisquer conclusões específicas sobre este assunto.

Figura 61 – Numeração das plumas do spray, respectivas regiões (em vermelho) e exemplo do comprimento de penetração (em preto) na pluma 1.



Fonte: O próprio autor (2022).

Tabela 6 – Comprimento de penetração em milímetros (mm) para cada pluma dos *sprays* analisados

Nº Pluma	Conjunto Padrão N1	SP-UG03A2	SI-UG02A4	UG02A4
1	513,708 ± 2,710	518,232 ± 2,718	493,589 ± 2,712	429,418 ± 2,725
2	483,445 ± 2,710	454,620 ± 2,718	469,800 ± 2,712	404,238 ± 2,725
3	467,567 ± 2,710	449,073 ± 2,718	455,773 ± 2,712	403,201 ± 2,725
4	447,398 ± 2,710	463,383 ± 2,718	438,548 ± 2,712	407,742 ± 2,725
5	464,314 ± 2,710	482,650 ± 2,718	421,264 ± 2,712	419,427 ± 2,725
6	444,838 ± 2,710	457,746 ± 2,718	424,348 ± 2,712	443,006 ± 2,725
7	453,575 ± 2,710	474,929 ± 2,718	411,399 ± 2,712	481,698 ± 2,725
8	499,076 ± 2,710	523,639 ± 2,718	437,781 ± 2,712	452,565 ± 2,725
9	513,947 ± 2,710	517,747 ± 2,718	447,607 ± 2,712	425,560 ± 2,725
10	544,771 ± 2,710	568,260 ± 2,718	472,799 ± 2,712	435,297 ± 2,725

Fonte: O próprio autor (2022).

O que se pode afirmar, a partir desta comparação realizada, é que a variação de pressão medida na linha de alta pressão dos conjuntos testados tem correspondência com diferenças observadas nos comprimentos de penetração quantificados. Tal afirmação já havia sido verificada pela visualização comparativa da macro geometria (Figura 59). Portanto, uma bomba com déficit de pressurização de fluido pode apresentar comprimentos de penetração com valores médios menores de aproximadamente 7,3% no instante de tempo observado por causa de atraso no início do evento de injeção. No caso de um injetor com avanço no início da injeção, este pode apresentar comprimentos de penetração com valores médios maiores de aproximadamente 1,6% no instante de tempo observado por causa de avanço no início do evento de injeção. No caso de um conjunto completamente usado (bomba + injetor), a variação no comprimento de penetração em uma determinada pluma pode ultrapassar o nível de 20% devido ao desgaste dos componentes, além da significativa mudança na macro geometria do *spray* (Figura 60) por causa de sua dinâmica de pressurização do fluido. A média de variação do comprimento de penetração foi de 10,6% para as 10 plumas observadas do *spray*.

Estes valores são válidos para o determinado instante de tempo apresentado neste estudo comparativo no qual o ambiente de injeção é quiescente a pressão atmosférica. Os valores obtidos não são válidos para análises no interior do cilindro do motor onde o ambiente não é quiescente, além de ser pressurizado. E, não são válidos como comparação com outros tipos de injetores com diferentes acionamentos, pois a dinâmica de pressurização do fluido influencia diretamente a evolução do comprimento de penetração. Também, devido às limitações do arranjo experimental proposto, nunca foi possível observar com as imagens o máximo comprimento de penetração dos jatos porque estes excediam a janela de visualização.

Os resultados demonstram que existe correlação entre os déficits de pressão medidos na bancada de testes e os ensaios realizados para comparação da macro geometria do *spray*. Portanto, a bomba injetora usada no cilindro do motor da UG02A4, que apresentara baixos níveis de pressão durante o evento de pressurização nos testes em bancada (Figura 42) gerou plumas com comprimentos de penetração expressivamente menores no momento observado devido ao atraso no início do evento de injeção, assim como a utilização de ambos os componentes usados, bomba e injetor (Figura 44). Já o injetor usado no cilindro do motor da UG03A2, quando submetido a uma pressurização gerada pela bomba padrão (nova), gerou pequena diferença na média de

pressão (Figura 43) e diferença no comprimento de penetração de baixa significância se comparado ao conjunto padrão.

5.3 COMPARAÇÃO DA MICRO GEOMETRIA DO *SPRAYS* FORMADOS

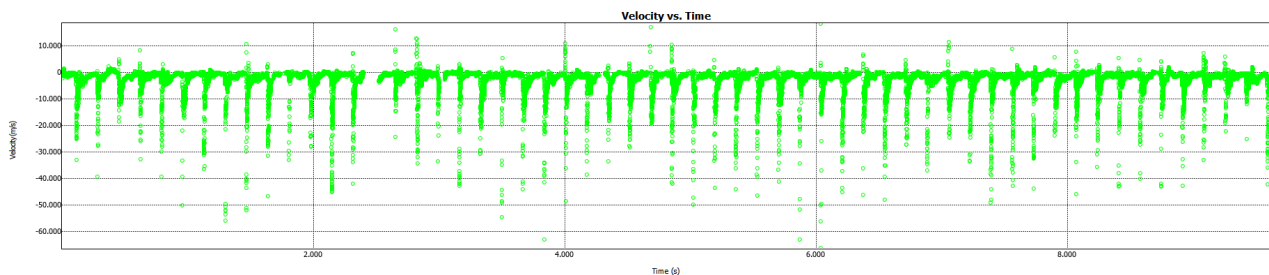
5.3.1 Problemas na sincronização para obtenção de dados dos eventos de injeção

Embora houve aplicação do mesmo dispositivo de sincronização de imagens na configuração de um filtro temporal para aquisição das velocidades e diâmetros das gotículas do *spray*, sua implementação no equipamento da Artium não foi eficaz. Assim, os dados obtidos durante os ensaios do conjunto referência N1 e o conjunto UG02A4 foram medidos diâmetros e velocidades das gotículas em uma base temporal assíncrona, após serem selecionados para este experimento por apresentarem maior diferença de pressão de injeção entre si.

Outra dificuldade encontrada foi o comprimento da região densa, onde a quebra das gotículas ocorre e estas se acumulam no volume de medição ocorrendo o fenômeno da multi-ocupação mencionado. Realizou-se uma varredura na direção Z iniciada a 250 mm do centro do atomizador do injetor com variações de 50 mm até encontrar uma região passível de medição com a técnica PDI. Esta região definida como propícia para a medição do *spray* tinha coordenada de 450 mm na direção Z.

Uma vez determinada uma região para varredura do *spray*, obtiveram-se as distribuições de velocidade e diâmetro para alguns pontos do espaço nesta região. Lembrando que por problemas de sincronismo, a aquisição dos dados foi feita de forma temporal e assíncrona. Portanto, para contornar esse problema, criou-se um filtro a partir da observação das medições realizadas, pois, claramente, verificou-se no gráfico do histórico de velocidades (Figura 62 – ampliada no APÊNDICE A) um pico de velocidade referente às primeiras gotículas produzidas após o início do evento de injeção.

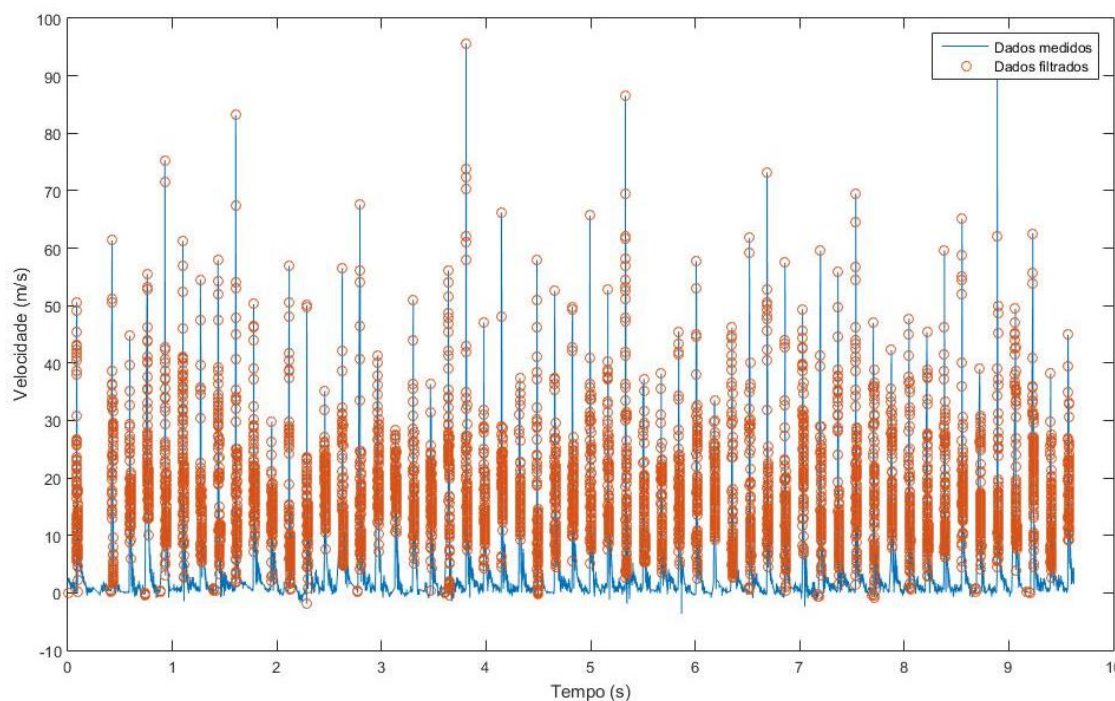
Figura 62 - Histórico de velocidade de uma medição com técnica PDI - Equipamento da Artium



Fonte: O próprio autor (2022).

A fim de se solucionar o problema do filtro temporal e avaliar apenas as gotículas do evento de injeção do *spray*, de forma a se evitar a medição de gotículas de eventos anteriores presentes no ambiente, implementou-se um filtro na rotina de pós-processamentos dos dados que identificava a gota de maior velocidade e extraía, a partir de tal ponto, 5 gotículas medidas anteriormente e 95 gotículas posteriormente a gotícula de alta velocidade. Assim, obtiveram-se dados de velocidade apenas na direção Z (conforme sistema de coordenadas – Figura 32) e diâmetro referentes somente às gotículas presentes no evento de injeção e excluíram-se gotículas do ambiente que poderiam estar no volume de medição por efeitos de recirculação decorrentes da dinâmica de escoamento entre o *spray* e o ambiente viciado com diversas gotículas dos eventos de injeção anteriores ao medido no momento. Um exemplo da aplicação deste filtro de velocidades pode ser visto na Figura 63.

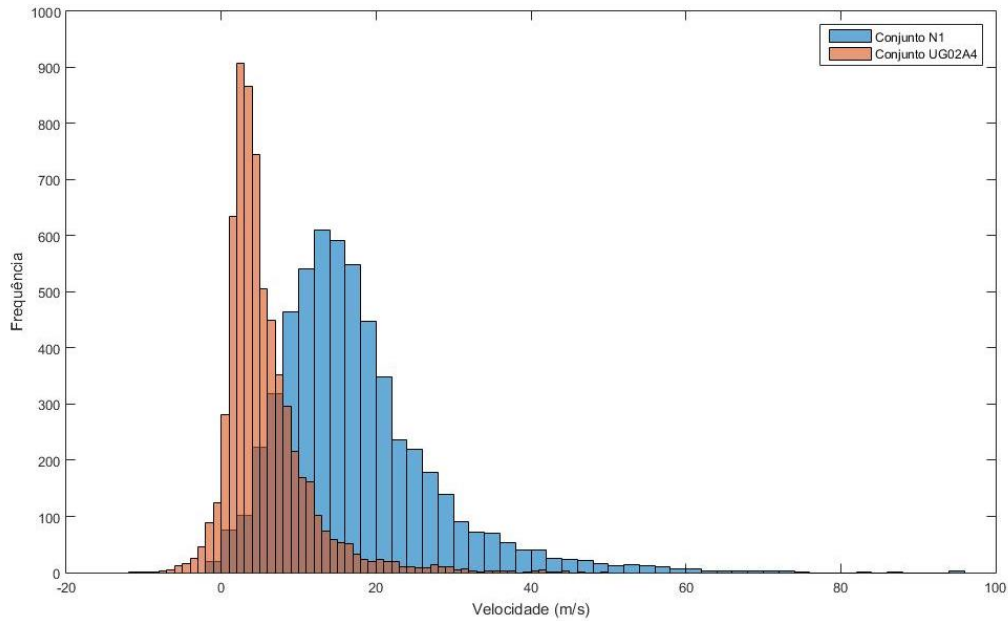
Figura 63 – Filtro de velocidade aplicado aos dados obtidos para o conjunto N1.



Fonte: O próprio autor (2022).

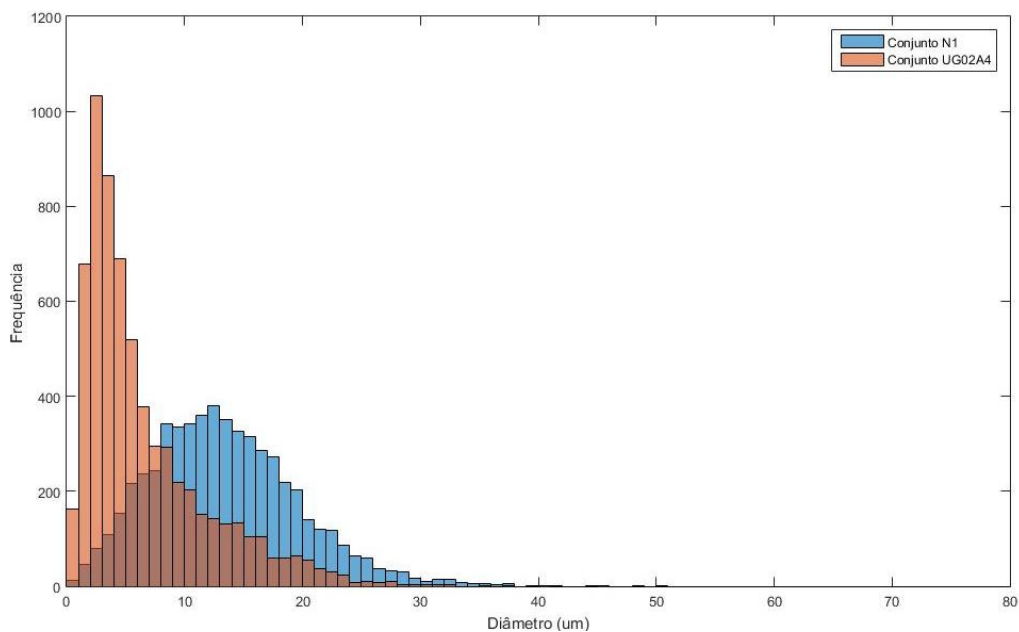
Uma vez aplicado o filtro de velocidades, as gotículas selecionadas também tiveram seus respectivos diâmetros filtrados. Portanto, foi possível obter as características micro geométricas relativas aos eventos de injeção dos vários pontos dos *sprays* medidos para os dois conjuntos testados. Exemplo, das distribuições obtidas são mostradas nas figuras a seguir.

Figura 64 – Exemplo de distribuições de velocidade de gotículas dos *sprays* obtidas após aplicação de filtro



Fonte: O próprio autor (2022).

Figura 65 – Exemplo de distribuições de diâmetro de gotículas dos *sprays* obtidas após aplicação do filtro



Fonte: O próprio autor (2022).

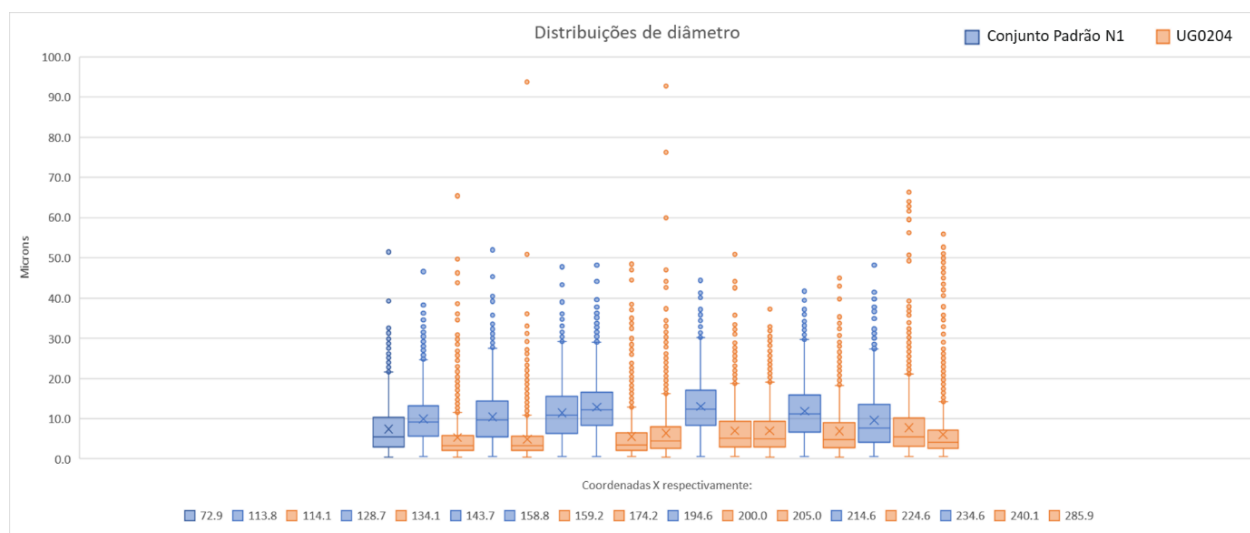
5.3.2 Resultados da técnica PDI para avaliação da micro geometria do *spray*

Para fins de comparação entre conjuntos testados que poderiam vir a ser montados no motor visando uma correlação com os ensaios realizados, utilizou-se o sistema de injeção que estava no cilindro do motor UG02A4 (bomba + injetor) por causa de seu mal desempenho apresentado nas medições de pressão realizadas em bancada

e por maior probabilidade de apresentar diferenças nos ensaios com PDI já que a variação de macro geometria também foi significativa (Figura 60).

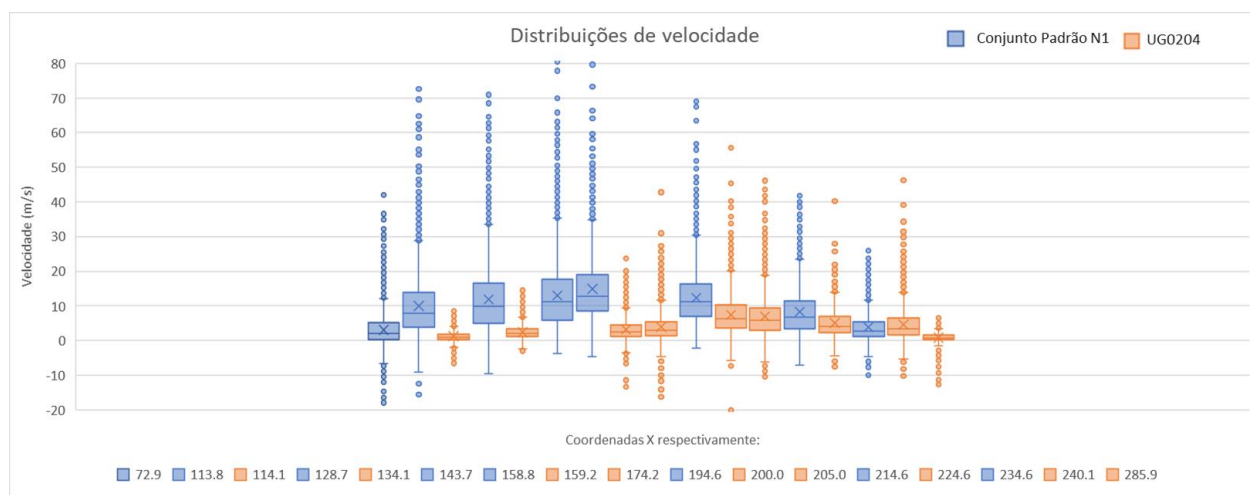
Como cada ponto no espaço medido representa uma distribuição de diâmetros e outra de velocidades das gotículas do *spray*, as Figura 66 e Figura 67 mostram as diversas distribuições medidas com técnica PDI em formato de diagramas de caixa (Hines *et. al.*, 2006), sinalizando as diferenças encontradas nas distribuições decorrente de varredura da coordenada X no mesmo plano Y-Z do sistema de coordenadas (Figura 32). Optou-se por realizar a comparação das distribuições em tal formato, pois este mostra de maneira resumida gráficos de distribuições, como exemplo os mostrados nas Figura 64 e Figura 65.

Figura 66 – Distribuições de diâmetros pós-processadas para coordenadas $y = -63,3 \text{ mm} \mid z = 450 \text{ mm}$



Fonte: O próprio autor (2022).

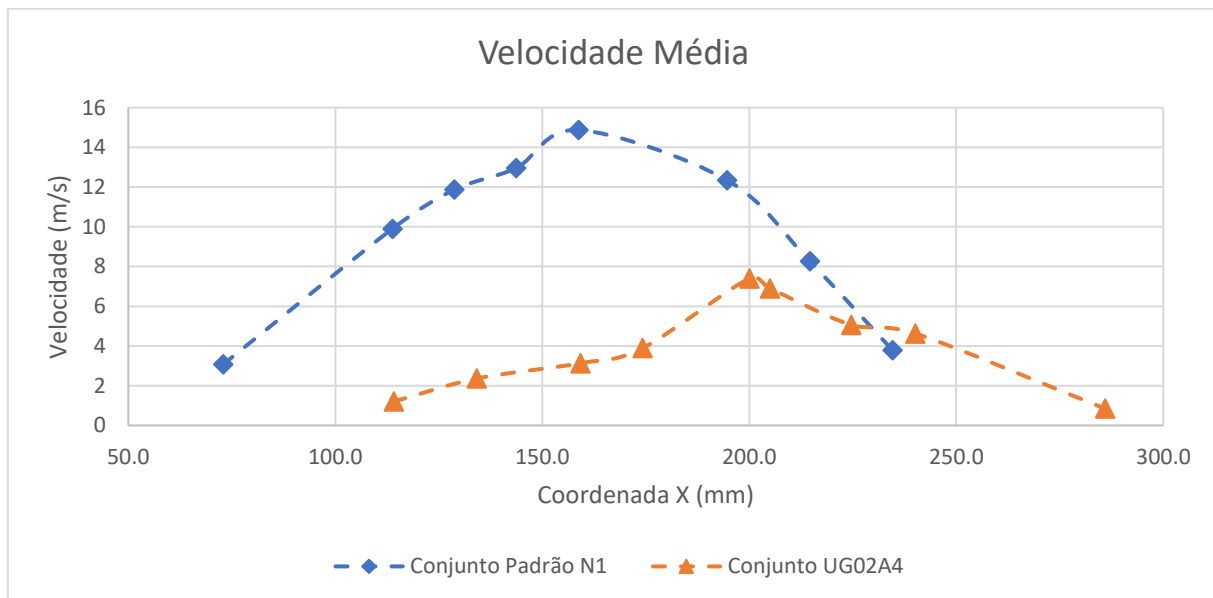
Figura 67 – Distribuições de velocidades pós-processadas para coordenadas $y = -63,3 \text{ mm} \mid z = 450 \text{ mm}$



Fonte: O próprio autor (2022).

As distribuições de velocidade das gotículas mostradas na Figura 67 (ampliada no APÊNDICE B) corroboram um fato já esperado: a distribuição de velocidade do conjunto UG02A4 apresentou valores menores do que os valores médios das distribuições de velocidades obtidas com conjunto padrão N1, como mostra a Figura 68. Estes resultados têm correlação com o desempenho de pressão dos conjuntos observados, pois a velocidade do jato de *spray* é proporcional a raiz quadrada da diferença entre a pressão de injeção e a pressão do gás ambiente. Dessa forma, como o conjunto UG02A4 apresentou níveis de pressão inferiores ao conjunto padrão N1, também se esperava que as velocidades das gotículas de seu *spray* tivessem velocidades inferiores às gotículas geradas pelo conjunto padrão N1.

Figura 68 – Velocidade média das gotículas do *spray* para coordenadas $y = -63,3 \text{ mm} \mid z = 450 \text{ mm}$

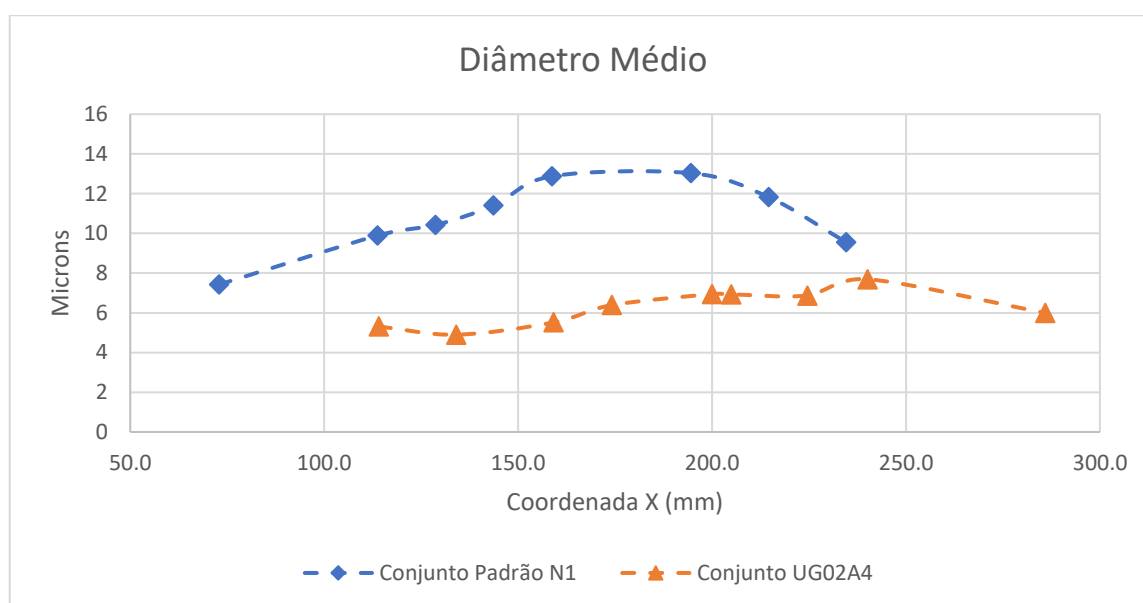


Fonte: O próprio autor (2022).

Já para as distribuições dos diâmetros de gotículas, o resultado encontrado foi inesperado porque *sprays* gerados por jatos oriundos de injetores idênticos com níveis de pressão de injeção inferiores deveriam produzir gotículas maiores por causa do mecanismo de quebra secundário. Este mecanismo é dominado pela interação gás ambiente-líquido cuja quebra do líquido irregular em gotículas esféricas ocorre pelo impacto das forças aerodinâmicas na tensão superficial do líquido. Assim, pressões de injeção menores ocasionam gotículas com velocidades e forças aerodinâmicas menores, reduzindo a relevância do mecanismo de quebra secundário se comparado a um jato com velocidades maiores para o mesmo tipo de injetor. O motivo do comportamento inesperado para as distribuições de diâmetros da Figura 66 (ampliada no APÊNDICE B),

no qual um jato da UG02A4 com menores velocidades médias das gotículas do que o produzido pelo conjunto padrão N1 gerou menores tamanhos médios de gotículas, pode ser atribuído à diferença de local onde as quebras secundárias de cada jato acontecem: possivelmente a região de quebra secundária do *spray* formado pelo conjunto UG02A4 tenha ocorrido num local mais próximo ao orifício do atomizador e suas gotículas continuaram quebrando-se em tamanhos menores até o volume de medição do PDI, como consequência de um entranhamento do gás ambiente nas regiões internas do *spray*.

Figura 69 – Diâmetro médio das gotículas do *spray* para coordenadas $y = -63,3 \text{ mm}$ | $z = 450 \text{ mm}$



Fonte: O próprio autor (2022).

Avaliando-se o caso do conjunto padrão N1, é provável que a pressão de injeção mais elevada possa ter causado uma zona maior do mecanismo de quebra primário na saída do orifício, região densa do *spray* onde os ligamentos instáveis do fluido se quebram em corpos líquidos irregulares que, posteriormente, são cisalhados formando as gotículas esféricas pela ação mecanismo de quebra secundário. Então, o jato de *spray* produzido pelo conjunto padrão N1 possivelmente iniciou a formação de gotículas esféricas tardiamente, em comparação ao jato produzido pelo conjunto UG02A4, resultando em distribuições com diâmetros médio maiores.

Para explorar melhor esta discussão, um novo arranjo experimental pode ser proposto a fim de realizar medições em outras regiões do *spray* ao redor da zona densa buscando avaliar diferenças nos regimes de atomização e interação do fluido injetado com o gás ambiente.

6 CONCLUSÕES

Os experimentos apresentados no decorrer deste estudo buscaram avaliar comparativamente os impactos de déficit de desempenho em sistemas de injeção mecânicos de alta pressão no *spray*. Para isso, foi necessário diagnosticar bombas de alta pressão e injetores novos e usados a partir de suas respectivas dinâmicas de pressão de injeção, concluindo-se os principais pontos relatados a seguir:

- O diagnóstico pela medição de pressão mostrou que o desgaste/ mal funcionamento da bomba injetora pode resultar em déficit de pressão de injeção de até 19% que impacta proporcionalmente na quantidade de combustível entregue pelo sistema, além dos impactos no *spray*;
- Embora um injetor usado não tenha impacto relevante na diminuição de pressão ou quantidade de combustível injetado diretamente, sua utilização em combinação com uma bomba injetora em condições severas de desgaste pode apresentar redução de até 23% nos níveis de pressão de injeção;
- O ensaio na bancada de testes para medição de pressão permitiu identificar possíveis avanço e atraso no início do evento de injeção que, posteriormente, foram identificados pela aquisição de imagens em alta velocidade, estimando variações no tempo de injeção de aproximadamente $0,8^\circ$ de ângulo de virabrequim. Também, observaram-se eventos de injeção espúrios subsequentes ao evento principal que podem ter impacto na formação de poluentes no motor;
- Outro ponto importante dos experimentos com aquisição de imagens foi o entendimento de variações significantes na macro geometria e, quantitativamente, variações no comprimento de penetração para um determinado instante de tempo decorrente dos avanços/ atrasos no início do evento de injeção. Assim, um injetor usado pode causar um aumento médio de 1,6% no comprimento de penetração decorrente de um avanço no tempo de injeção, enquanto uma bomba injetora com componentes desgastados pode ter uma diminuição média de aproximadamente 7% por causa de atrasos influenciados pelo mal desempenho de pressurização do fluido.
- A variação no comprimento de penetração pode ser ainda mais significativa ao utilizar bomba e injetores usados, no qual observou-se diminuição média de

10% e em uma das plumas, na ordem de 20%. Estas variações foram por causa da pressurização tardia e redução dos níveis de pressão de injeção medidos em bancada.

- Conforme esperado, a redução de pressão causada também impactou a quantidade de movimento do *spray* evidenciada pelas baixas velocidades médias encontradas nos testes comparativos com técnica PDI. A velocidade média máxima observada em um determinado ponto do *spray* produzido por um conjunto usado é aproximadamente a metade do que foi verificado no conjunto novo utilizado como referência dos testes, 7,4 m/s e 14,9 m/s respectivamente.
- Em posição aos resultados de velocidade, o diâmetro médio das gotículas do conjunto usado UG02A4 mantiveram-se quase constantes ao longo da varredura realizada no *spray* com valor de aproximadamente 7 micron, enquanto o conjunto padrão N1 apresentou variações e média máxima de 13 micron, aproximadamente.

Embora este estudo propôs uma metodologia e arranjos experimentais com certas limitações, ambiente quiescente a pressão atmosférica para avaliação de impactos no *spray* formado, as conclusões apresentadas mostraram a realidade de sistemas de injeção mecânicos cujo desempenho é diretamente dependente do desgaste de seus componentes. Tais sistemas utilizados em aplicações de geração de energia ou transporte marítimo, necessitam de manutenção constante para evitar mal funcionamento que acarrete o aumento do consumo de combustível e emissões de poluentes, conseqüentemente.

Como trabalhos futuros, sugere-se explorar os regimes de atomização do *spray* para validação do que foi apresentado e correlação dos resultados obtidos com ensaio em motores, partindo da medição de pressão no interior do cilindro e correlacionando com a pressão de injeção e quantidade de combustível injetado em bancada.

7 REFERÊNCIAS

Araneo, L., Tropea, C. **Improving phase Doppler measurements in a Diesel spray**. Paper ID 200-01-2047. SAE Technical Paper, 2000.

Artium. **3D- PDI Phase Doppler interferometer – Droplet size and velocity measurements**. User Manual, Artium Technologies Inc. California, USA, 2019.

Challen, B., Baranescu, R. **Diesel Engine Reference Book**. Ed. Butterworth & Heinemann, 2ª Edição, 1999.

Costa, A. G., Zabeu, C. B., Berti, R. B. C., Krieger, G. C. ENCIT-2020-0437 **Diagnostic of mechanical fuel injection systems of heavy duty Diesel engines based on measurement of fuel injection pressure**.

Duran, V., Uriondo, Z., Moreno-Gutiérrez, J. **The impact of marine engine operation and maintenance on emissions**. Transportation Research Part D 17, pp. 54-60, 2012.

Fink, C., Buchholz, B., Niendorf, M., Harndorf, H. **Injection spray analyses from medium speed engines using marine fuels**. ILASS 2008, Paper ID ILASS08-6-9, 2008.

Grados, C. V. D., Uriondo, Z., Clemente, M., Espadafor, F. J. J., Moreno-Gutiérrez, J. **Correcting injection pressure maladjustments to reduce NOX emissions by marine diesel engines**. Transportation Research Part D 14, pp. 61-66, 2009.

Hardalupas, Y., Taylor, A. M. K. P., Whitelaw, J. H. **Characteristics of the spray from a diesel injector**. International journal of multiphase flow, v. 18, n. 2, p. 159-179, 1992.

Heywood, J.B., **Internal combustion engine fundamentals**. McGraw-Hill, New York, 1ª Edição, 1988.

Heywood, J.B., **Internal combustion engine fundamentals**. McGraw-Hill, New York, 2ª Edição, 2018.

Hines, W. W., Montgomery, D. C., Goldsman, D. M., Borrer, C. M., **Probabilidade e estatística na engenharia**. LTC, Rio de Janeiro, 4ª Edição, 2006.

Hoang, A. T., Le, A. T., Pham, V. V. **A core correlation of spray characteristics, deposit formation, and combustion of a high-speed Diesel engine fueled with Jatropha oil and Diesel fuel.** Fuel, v. 244, p. 159-175, 2019.

Hung, D. L. S., Harrington, D. L., Gandhi, A. H., Markle, L. E., Parrish, S. E., Shakal, J. S., Sayar, H., Cummings, S. D., Kramer, J. L. **Gasoline fuel injector spray measurement and characterization—a new SAE J2715 recommended practice.** SAE International Journal of Fuels and Lubricants, v. 1, n. 1, p. 534-548, 2008.

Kaarakainen, M. **Spare part optimization for W32 fuel injection equipment.** Research thesis, Vasaan Ammattikorkeakoulu University of Applied Sciences. Vaasa, Finland, 2015.

Kowalski, J. **An experimental study of emission and combustion characteristics of marine diesel engine with fuel pump malfunctions.** Applied Thermal Engineering 65 pp. 469 – 476, 2014.

Kuiken, K., **Diesel engines: for ship propulsion and power plants from 0 to 100,000 kW.,** Part 1. Target Global Energy Training, 2008.

Luoma, A., **Nozzle opening pressure decrease in fuel injection valve.** Bachelor thesis, Novia University of Applied Sciences. Vaasa, Finland, 2020.

Park, J., Jang, J. H., Park, S. **Effect of fuel temperature on heavy fuel oil spray characteristics in a common-rail fuel injection system for marine engines.** Ocean Engineering 104, pp. 580-589, 2015.

Patel, C., Agarwal, A. K., Tiwari, N., Lee, S., Lee, C. S. **Combustion, noise, vibrations and spray characterization for Karanja biodiesel fuelled engine.** Applied Thermal Engineering, v. 106, p. 506-517, 2016.

Pacífico, A. L., Santos, F. D. T., Yanagihara, J. I., Santos, L., R., Barreta, I. G., Sbampato, M. E., Fukumasu, N. K., Rodrigues, N. A. S., Lacava, P. T. **Curso técnicas avançadas de diagnóstico em combustão V Escola de combustão: 2015 International Combustion Institute Summer School on Combustion.** Brasil, 2015.

Pielecha I, Skowron M, Mazanek A. **Evaluation of the injectors operational wear process based on optical fuel spray analysis.** Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 20 (1) pp. 83–89, 2018.

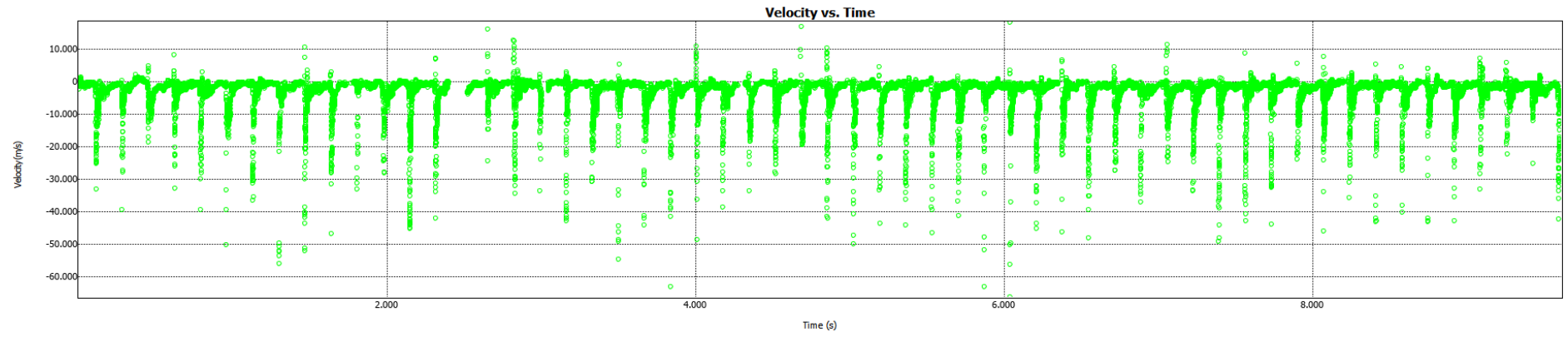
Ruiz-Rodriguez, I. C., Pos, R., Ganippa, L. C. **Evaluation of different methodologies used for Diesel spray angle detection.** ICLASS 2018, Paper: 84, 2018.

Wärtsilä. **W20V32 Engine operation & maintenance manual.** Instruction Manual, Wärtsilä. Vaasa, Finland, 2014.

Zabeu, C. B., Berti, R. C. R., Costa, A. G., Gonçalves, V. F., Polizio, Y. **Projeto de P&D ANEEL – Desenvolvimento de metodologia para avaliação e diagnósticos de sistema de injeção de combustível para motores pesados aplicados em motores geradores.** Relatório Final do Projeto de P&D No. 0718-000025 da ANEEL: 144, 2022

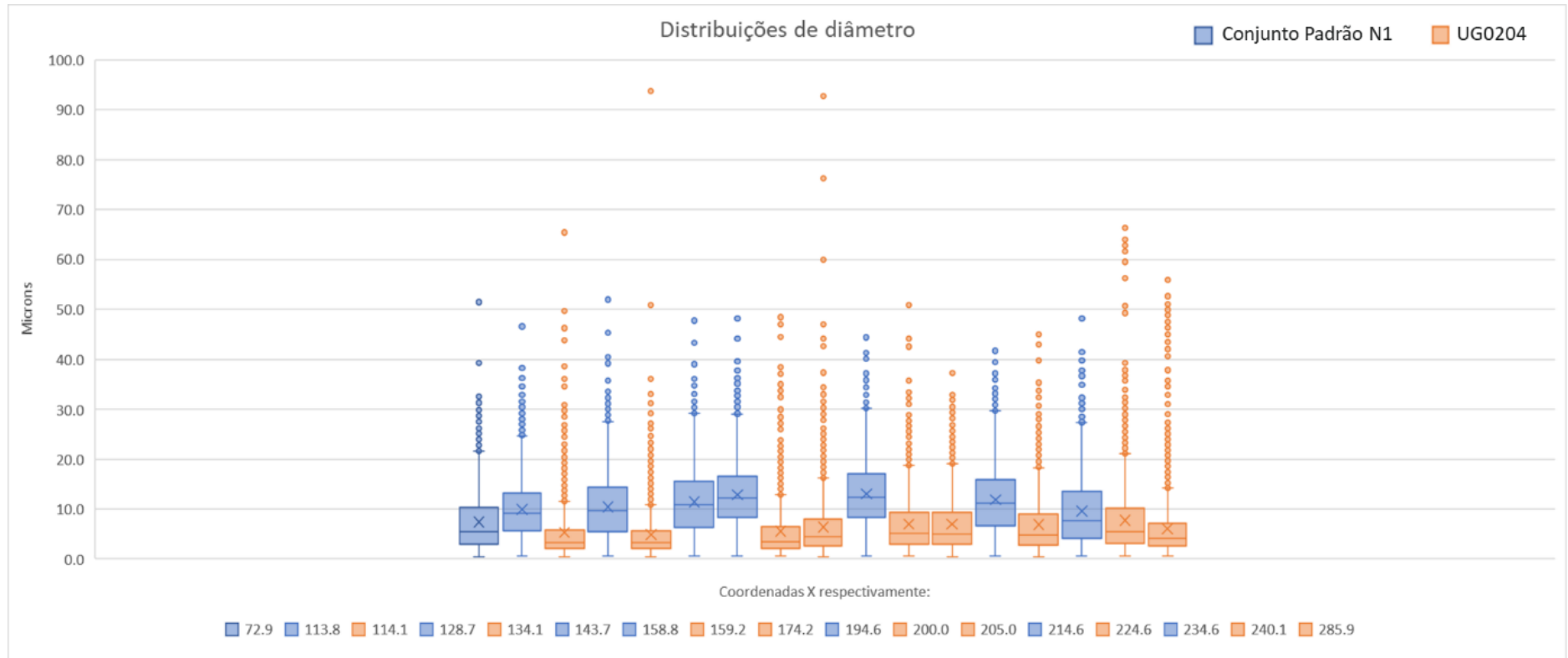
APÊNDICE A

Histórico de velocidade de uma medição com técnica PDI - Equipamento da Artium



APÊNDICE B

Distribuições de diâmetros pós-processadas para coordenadas $y = -63,3 \text{ mm} \mid z = 450 \text{ mm}$



Distribuições de velocidades pós-processadas para coordenadas $y = -63,3 \text{ mm} | z = 450 \text{ mm}$

