



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE - FURG  
CENTRO DE CIÊNCIAS COMPUTACIONAIS  
CURSO DE ENGENHARIA DE AUTOMAÇÃO

Projeto de Graduação em Engenharia de Automação

**Avaliação de Modelos de Válvulas Solenoides de Baixo Custo para Controle de Acionamento por Modulação por Largura de Pulso (PWM) na Regulação da Vazão**

Jardel José Pomieczinski Prado Prado

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia de Automação da Universidade Federal do Rio Grande - FURG, como requisito parcial para a obtenção do grau de Engenheiro de Automação

Orientador: Prof. Dr. Paulo Lilles Jorge Drews Junior

Rio Grande, 2024

Dados de catalogação na fonte:  
colocar NOME DO BIBLIOTECÁRIO – CRB-colocar número do crb do bibliotecário  
Biblioteca Central – FURG

A999a

Prado, Jardel José Pomieczinski Prado

Avaliação de Modelos de Válvulas Solenoides de Baixo Custo para Controle de Acionamento por Modulação por Largura de Pulso (PWM) na Regulação da Vazão / Jardel José Pomieczinski Prado Prado. – Rio Grande, 2024. – 78 f: gráf. – Projeto de Graduação – Engenharia de Automação. Universidade Federal do Rio Grande - FURG. Centro de Ciências Computacionais. Rio Grande, 2024. – Orientador Paulo Lilles Jorge Drews Junior.

1. Pulverização Agrícola. 2. Agricultura de Precisão. 3. Taxa Variada. 4. Válvula Solenoide. I. Junior, Paulo Lilles Jorge Drews . II. Título.

CDD: 999.9



Projeto de Graduação em Engenharia de Automação

**Avaliação de Modelos de Válvulas Solenoides de Baixo Custo para Controle de Acionamento por Modulação por Largura de Pulso (PWM) na Regulação da Vazão**

Jardel José Pomieczinski Prado Prado

**Banca examinadora:**

---

Prof. Dr. André Oldoni

---

Prof. MSc. Fábio Pedrotti Terra

---

Prof. Dr. Rodrigo Zelir Azzolin

---

Prof. Dr. Paulo Lilles Jorge Drews Junior (Orientador)

*Dedico esse trabalho aos meus pais, Denize e Jader  
por todo esforço, dedicação e incentivo.*

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer à minha família, em especial aos meus pais, que sempre opinaram e incentivaram meu desenvolvimento, por todo esforço e dedicação prestados para que eu pudesse estar em busca do meu sonho.

Gostaria também de agradecer à minha namorada Letiane, pelo amor e companheirismo em todos os momentos, em especial pela paciência e pelos momentos inesquecíveis ao seu lado.

Gostaria de agradecer ao André Oldoni, meu primeiro orientador e mentor, no IFSul-Pelotas, pela inspiração e por ter me proporcionado a conhecer o Paulo Drews, que veio a ser meu atual orientador, e ao projeto AutoCERES.

Agradeço ao Paulo Drews Jr., meu orientador, por toda ajuda, orientação, paciência e apoio, agradeço principalmente pelos ensinamentos e dedicação para meu desenvolvimento profissional e pessoal.

Agradeço ao Fábio Terra por toda ajuda fornecida, pela inspiração e conversas, sem falar nas dicas e conhecimentos compartilhados.

Agradeço à Demetec e todos os seus membros pelo apoio e suporte, em especial ao Henrique Andrade, Matheus Caselatto, Junior Richard, Jean Dapper e Tiago Pickersgill, sem o apoio e esforço de vocês, esse trabalho não seria possível. Agradeço também ao Mauro Lilles pelas conversas e pela dedicação incessante em desenvolver a tecnologia na agricultura familiar.

Agradeço também ao projeto AutoCERES e todos os membros que por ele passaram, pois de alguma forma impactaram meu desenvolvimento, em especial ao Fábio Terra, Gabrielle Almeida, Mariana Piñeiro, Igor Voser, Felipe Weber e Gustavo Nascimento.

Gostaria de agradecer ao meu amigo Pedro Lara por toda ajuda, incentivo e pelas conversas esclarecedoras. Também a todos os membros do "harder", em especial ao Everson Flores e Cedenir da Costa.

Agradeço também aos membros e ao laboratório Nautec pela ajuda e paciência, em especial agradeço ao Pedro Pinheiro pelas excelentes dicas e conversas que me ajudaram muito no desenvolvimento do trabalho.

Gostaria de agradecer à Universidade Federal do Rio Grande - FURG pelos recursos e oportunidades fornecidos, que foram fundamentais para a realização deste trabalho. Em especial ao Centro de Ciências Computacionais - C3 e aos seus docentes, que contribuíram para minha formação.

Por fim, agradeço aos membros da banca que aceitaram o convite e pelas contribuições a este trabalho.

*Tirar o sustento do campo exige coragem,  
força de vontade, técnica e vocação.*  
— RAFAEL NOLÊTOL

## **RESUMO**

**PRADO, Jardel José Pomieczinski Prado.** **Avaliação de Modelos de Válvulas Solenoides de Baixo Custo para Controle de Acionamento por Modulação por Largura de Pulso (PWM) na Regulação da Vazão.** 2024. 78 f. Projeto de Graduação – Engenharia de Automação. Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Rio Grande.

Com a tendência ao aumento significativo da população mundial, surge a preocupação de aumentar proporcionalmente a produção de alimentos. No entanto, para que isso ocorra, é necessário o uso de tecnologias na produção agrícola. No caso do Brasil, um protagonista importante nesse objetivo, há um problema relacionado à desigualdade na distribuição de tecnologia para o setor agrícola no país. De um lado, existe uma pequena parcela do setor, que representa cerca de 23% e possui acesso a tecnologias de ponta para a pulverização. Por outro lado, há uma parcela que ocupa 77% do setor e apresenta baixo acesso a tecnologias, mesmo tendo potencial para impactar a produção e a economia do país. Diante desse cenário, este trabalho propõe a criação de um modelo para simular a eficácia de válvulas solenoides na aplicação por Modulação de Largura de Pulso. Além disso, visa realizar uma análise comparativa entre válvulas solenoides de baixo custo, comparando-as com uma válvula comercial específica para esse fim, geralmente utilizadas em equipamentos de grande porte. A fim de validar o uso de válvulas de baixo custo para aplicação à taxa variada, são realizados testes práticos. Nestes testes, são comparados os resultados obtidos com as diferentes válvulas solenoides, analisando a resposta em vazão em 5Hz, 7Hz e 10Hz em pressões de 2 bar, 2.76 bar e 3.45 bar, variando o DutyCycle.

**Palavras-chave:** Pulverização Agrícola, Agricultura de Precisão, Taxa Variada, Válvula Solenoide.

## **ABSTRACT**

PRADO, Jardel José Pomieczinski Prado. **Evaluation of Low-Cost Solenoid Valve Models for Pulse Width Modulation (PWM) Drive Control in Flow Regulation.** 2024. 78 f. Projeto de Graduação – Engenharia de Automação. Universidade Federal do Rio Grande - FURG, Rio Grande.

With the trend towards a significant increase in the world's population, there is a concern to proportionally increase food production. However, for this to happen, it is necessary to use technology in agricultural production. In the case of Brazil, an important player in this objective, there is a problem related to the inequality in the distribution of technology for the agricultural sector in the country. On the one hand, there is a small portion of the sector, which represents around 23% and has access to cutting-edge technologies for spraying. On the other hand, there is a portion that occupies 77% of the sector and has little access to technology, even though it has the potential to impact the country's production and economy. Given this scenario, this work proposes the creation of a model to simulate the effectiveness of solenoid valves in Pulse Width Modulation applications. In addition, it aims to carry out a comparative analysis of low-cost solenoid valves, comparing them with a specific commercial valve for this purpose, generally used in large equipment. In order to validate the use of low-cost valves for application at varying rates, practical tests are carried out. In these tests, the results obtained with the different solenoid valves are compared, analyzing the flow response at 5Hz, 7Hz and 10Hz at pressures of 2 bar, 2.76 bar and 3.45 bar, varying the DutyCycle.

**Keywords:** Agricultural spraying, Precision Farming, Varying Rate, Solenoid valve.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Pulverizador Costal . . . . .	20
Figura 2	Pistola de Pulverização . . . . .	20
Figura 3	Pulverizadores em Barras . . . . .	21
Figura 4	Pulverizadores aéreo . . . . .	21
Figura 5	Atomizador . . . . .	22
Figura 6	Componentes . . . . .	22
Figura 7	Funcionamento da Bomba de Diafragma . . . . .	23
Figura 8	Bicos de pulverização e seus formatos . . . . .	24
Figura 9	Ondas PWM com diferentes intervalos de tempo feitas por Kart (2001) . . . . .	25
Figura 10	Sinais PWM com DC diferentes . . . . .	25
Figura 11	Onda PWM . . . . .	26
Figura 12	Representação do sistema feito por Chaim (2006) para pulverização eletroestática . . . . .	28
Figura 13	Representação PWM na Pulverização . . . . .	29
Figura 14	Robô proposto por Ghafar et al. (2023) . . . . .	29
Figura 15	Relações entre a frequência de atuação do controlador, o DC e o fluxo resultante através do bocal de teste com Bico Leque. . . . .	30
Figura 16	Variação da vazão ao longo da barra do pulverizador. A pressão do sistema foi ajustada para 310 kPa (45 psi). Todas as válvulas solenoides foram ligadas com o mesmo ciclo de trabalho PWM. . . . .	31
Figura 17	Relação entre o ciclo de trabalho e a vazão usando controlador PWM. . . . .	31
Figura 18	Percentuais de desperdícios na pulverização em curvas . . . . .	33
Figura 19	Protótipo de pulverização . . . . .	34
Figura 20	Fluxograma Protótipo . . . . .	35
Figura 21	Caixa dos atuadores e sensores do protótipo . . . . .	36
Figura 22	Sensor de pressão modelo HK1100C . . . . .	36
Figura 23	Sensor de vazão modelo YF-S201 . . . . .	37
Figura 24	Caixa de acionamento do sistema e placas de leitura dos sensores . . . . .	37
Figura 25	Partes Porta bico . . . . .	38
Figura 26	Ponta de pulverização Magnojet MJ024 AD 100 015 . . . . .	38
Figura 27	Modelos de válvulas utilizados . . . . .	39
Figura 28	Válvulas e suas adaptações para encaixar no anti gotejo do porta bico . . . . .	40
Figura 29	Modelo desenvolvido no trabalho . . . . .	41
Figura 30	Teste do modelo em 2bar . . . . .	43
Figura 31	Relação entre DC de 0% a 100% e Vazão ao longo do tempo em 7hz e 2bar . . . . .	43

Figura 32	Relação entre DC e Vazão em 50% de DC em 7hz e 2bar . . . . .	44
Figura 33	Gráficos relação DC e Vazão(L/min) em 5Hz em 2bar, 2.76bar e 3.45bar simulado no <i>Simulink</i> . . . . .	44
Figura 34	Gráficos relação DC e Vazão(L/min) em 7Hz em 2bar, 2.76bar e 3.45bar simulado no <i>Simulink</i> . . . . .	45
Figura 35	Gráficos relação DC e Vazão(L/min) em 10Hz em 2bar, 2.76bar e 3.45bar simulado no <i>Simulink</i> . . . . .	45
Figura 36	Avaliação dados obtidos válvula NA-1 em 2 bar . . . . .	51
Figura 37	Avaliação dados obtidos válvula NA-1 em 2.76 bar . . . . .	51
Figura 38	Avaliação dados obtidos válvula NA-1 em 3.45 bar . . . . .	52
Figura 39	Avaliação dados obtidos válvula NA-2 em 2bar . . . . .	53
Figura 40	Avaliação dados obtidos válvula NA-2 em 2.76bar . . . . .	53
Figura 41	Avaliação dados obtidos válvula NA-2 em 3.45bar . . . . .	54
Figura 42	Avaliação dados obtidos válvula NF em 2 bar . . . . .	55
Figura 43	Avaliação dados obtidos válvula NF em 2.76bar . . . . .	55
Figura 44	Avaliação dados obtidos válvula NF em 3.45bar . . . . .	56
Figura 45	Êmbolo válvula solenoide NA-2 e NF . . . . .	57
Figura 46	Ângulo de abertura com bico leque usando válvula NF, quando aplicado PWM . . . . .	57
Figura 47	Avaliação dados obtidos válvula Teejet em 2 bar . . . . .	58
Figura 48	Avaliação dados obtidos válvula Teejet em 2.76bar . . . . .	58
Figura 49	Avaliação dados obtidos válvula Teejet em 3.45bar . . . . .	59
Figura 50	Válvula solenoide NA-1 com pressão em 2bar, 2.76bar e 3.45bar operando em 5Hz, 7Hz e 10Hz . . . . .	60
Figura 51	Válvula solenoide NA-2 com pressão em 2bar, 2.76bar e 3.45bar operando em 5Hz, 7Hze 10hz . . . . .	61
Figura 52	Válvula solenoide NF com pressão em 2bar, 2.76bar e 3.45bar operando em 5Hz, 7Hze 10Hz. . . . .	62
Figura 53	Válvula solenoide Teejet com pressão em 2bar, 2.76bar e 3.45bar operando em 5Hz, 7Hz e 10Hz. . . . .	62
Figura 54	Comparativo da válvula NA-1 vs NA-2 em 5Hz em 2bar, 2.67bar e 3.45bar. . . . .	63
Figura 55	Comparativo da válvula NA-1 vs NA-2 em 7Hz em 2bar, 2.67bar e 3.45bar. . . . .	63
Figura 56	Comparativo da válvula NA-1 vs NA-2 em 10Hz em 2bar, 2.67bar e 3.45bar. . . . .	64
Figura 57	Comparativo da válvula NF vs Teejet em 5Hz em 2bar, 2.67bar e 3.45bar. . . . .	64
Figura 58	Comparativo da válvula NF vs Teejet em 7Hz em 2bar, 2.67bar e 3.45bar. . . . .	65
Figura 59	Comparativo da válvula NV vs Teejet em 10Hz em 2bar, 2.67bar e 3.45bar. . . . .	65
Figura 60	Comparativo da válvula NA-1 vs NA-2 vs NF vs Teejet em 5Hz em 2bar, 2.67bar e 3.45bar. . . . .	66
Figura 61	Comparativo da válvula NA-1 vs NA-2 vs NF vs Teejet em 7Hz em 2bar, 2.67bar e 3.45bar. . . . .	66



## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1	Cenário de testes	48
----------	-------------------	----

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AP	Agricultura de precisão
CAN	Controller Area Network
DC	Duty Cycle
f	Frequência
FT	Flow Transmitter
GPS	Global Positioning System
hz	Hertz
I.A.	Ingrediente Ativo
L	Litro
min	Minuto
NA	Normal Aberta
NF	Normal Fechada
PAM	Pulse-amplitude modulation
PCV	Self-Operated Pressure Regulator
Pi	Pressure Indicator
PI	Proporcional Integral
P&ID	Piping and Instrumentation Diagram
PT	Pressure Transmitter
PWM	Pulse Width Modulation
T	Período
UAV	Unmanned Aerial Vehicle

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>16</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b>	<b>17</b>
1.1.1	Objetivo Específicos	17
<b>1.2</b>	<b>Organização do Trabalho</b>	<b>18</b>
<b>2</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b>	<b>19</b>
<b>2.1</b>	<b>Pulverizadores Agrícolas</b>	<b>19</b>
2.1.1	Pulverizadores Costais	19
2.1.2	Pistola	20
2.1.3	Pulverizadores em Barras	20
2.1.4	Pulverizadores aéreo	21
2.1.5	Atomizadores	21
<b>2.2</b>	<b>Principais componentes de um Pulverizador em Barras</b>	<b>22</b>
2.2.1	Bomba	23
2.2.2	Bicos de pulverização	23
<b>2.3</b>	<b>Modulação por Largura de Pulso (PWM)</b>	<b>25</b>
<b>2.4</b>	<b>Agricultura de Precisão</b>	<b>26</b>
2.4.1	Tecnologias na pulverização agrícola	27
<b>2.5</b>	<b>Trabalhos Relacionados</b>	<b>29</b>
<b>3</b>	<b>Desenvolvimento</b>	<b>34</b>
<b>3.1</b>	<b>Desenvolvimento do Aquário de testes</b>	<b>34</b>
3.1.1	Fluxograma de processo do protótipo	34
3.1.2	Caixa Atuadores e sensores	35
3.1.3	Conjunto de acionamento e controle	37
3.1.4	Porta Bico e Bico de pulverização	38
3.1.5	Válvulas Solenoides utilizadas	39
<b>3.2</b>	<b>Simulação do Aquário no Simulink</b>	<b>40</b>
3.2.1	Parâmetros do Sistema	41
3.2.2	Teste e verificação do modelo hidráulico	42
3.2.3	Simulação variando o DC	43
<b>3.3</b>	<b>Métodos para a realização dos experimentos no aquário de simulação</b>	<b>46</b>
<b>3.4</b>	<b>Filtragem e tratamento dos dados coletados</b>	<b>49</b>
<b>4</b>	<b>Resultados Obtidos</b>	<b>50</b>
<b>4.1</b>	<b>Valores medidos para cada válvula com pressão e frequência diferente</b>	<b>50</b>
4.1.1	Válvula NA-1	50

4.1.2	Válvula NA-2 . . . . .	52
4.1.3	Válvula NF . . . . .	54
4.1.4	Válvula Teejet . . . . .	57
<b>4.2</b>	<b>Análise da Relação da Vazão entre o DC em Válvulas sob Diferentes Pressões e Frequências . . . . .</b>	<b>59</b>
4.2.1	Válvula NA-1 . . . . .	60
4.2.2	Válvula NA-2 . . . . .	60
4.2.3	Válvula NF . . . . .	61
4.2.4	Válvula Teejet . . . . .	62
<b>4.3</b>	<b>Comparativo dos modelos de válvula . . . . .</b>	<b>62</b>
4.3.1	Válvula NA-1 vs NA-2 . . . . .	63
4.3.2	Válvula NF vs Teejet . . . . .	64
4.3.3	Comparativo de todos modelos de válvulas . . . . .	65
<b>4.4</b>	<b>Conclusão dos testes . . . . .</b>	<b>67</b>
<b>5</b>	<b>Considerações Finais</b>	<b>68</b>
<b>5.1</b>	<b>Conclusão . . . . .</b>	<b>68</b>
<b>5.2</b>	<b>Trabalhos futuros . . . . .</b>	<b>69</b>
	<b>Referências</b>	<b>70</b>
	<b>ANEXOS</b>	
<b>A</b>	<b>Anexo - leitura dos sensores Vazão, Pressão, RTC e salvamento do SD com Arduino 1</b>	<b>73</b>
<b>B</b>	<b>Anexo - Medição de Vazão com Arduino 2</b>	<b>75</b>
<b>C</b>	<b>Anexo - Dados Coletados, Tratamento e Visualização de Dados</b>	<b>76</b>
<b>D</b>	<b>Anexo - Válvula TEEJET 115880-1-12 E-CHEMSAVER</b>	<b>77</b>

# 1 INTRODUÇÃO

Estudos recentes realizados por Boareto (2009) apontam que a população mundial deve alcançar 9 bilhões de habitantes até o ano de 2050, o que demandará um considerável aumento na produção de alimentos. Nesse contexto, o Brasil desempenha um papel importante na busca por esse objetivo, dado que a agricultura familiar representa 77% dos estabelecimentos rurais no país, totalizando cerca de 3.9 milhões de estabelecimentos, também representam uma área ocupada de 80.9 milhões de ha, ou seja, 23% da área de todos os estabelecimentos do país segundo pesquisas realizada pelo IBGE (2017).

No entanto, ainda de acordo com dados do IBGE (2017), apenas 18.7% dos agricultores, cerca de 1.025.443 de um total de 16.568.205 produtores, declararam receber orientação técnica. Além disso, uma pesquisa realizada pelo instituto Emater (Cordeiro, 2016) revelou que aproximadamente 46% das aplicações de agrotóxicos são desperdiçadas devido a erros humanos.

Analizando o consumo de agrotóxico no Brasil, o consumo anual tem sido superior a 300 mil toneladas de produtos comerciais, o que representa um aumento de 700% nos últimos quarenta anos. Em termos de Ingrediente Ativo (I.A.) cerca de 130 mil toneladas são consumidas anualmente no país. Esse aumento no consumo de agrotóxicos ocorreu mesmo com um aumento de apenas 78% na área agrícola durante o mesmo período segundo estudo realizado pela EMBRAPA (2021).

Diante da situação atual, é extremamente benéfico direcionar investimentos na redução do uso de agrotóxicos na agricultura, em especial, na agricultura familiar. Já que a agricultura familiar corresponde a um valor aproximado de R\$ 107 bilhões, o que equivale a cerca de 23% de toda a produção agropecuária do país segundo IBGE (2017). Essa abordagem traz inúmeros benefícios, não apenas para o meio ambiente, mas também para a saúde humana e econômica do país e dos agricultores.

Ao adotar práticas agrícolas sustentáveis e diminuir a dependência dos agrotóxicos, a agricultura familiar pode se tornar ainda mais produtiva e resiliente. Isso pode ser alcançado através do uso de técnicas agroecológicas, que promovem a diversificação de culturas, o manejo integrado de pragas e o uso de bio-insumos naturais, entre outras abordagens.

Além dos benefícios ambientais, a diminuição do uso de agrotóxicos também traz ganhos significativos para a saúde humana. A exposição prolongada a esses produtos químicos pode ter efeitos adversos na saúde, incluindo o aumento do risco de doenças crônicas, como câncer, distúrbios endócrinos e problemas neurológicos. Portanto, investir na redução do uso de agrotóxicos contribui para proteger a saúde da população e promover uma alimentação mais segura.

Para a agricultura familiar, a redução do uso de agrotóxicos impacta diretamente no bolso do agricultor devido aos elevados custos associados. Economicamente falando, a diminuição desses produtos pode trazer vantagens a longo prazo. A agricultura sustentável apresenta potencial para reduzir os custos de produção, aumentar a eficiência dos recursos utilizados e aprimorar a qualidade dos produtos agrícolas. Além disso, há uma demanda crescente por alimentos produzidos de forma sustentável, tanto no mercado interno quanto no externo. Investir nessa transição fortalece a competitividade do setor agrícola brasileiro e cria oportunidades promissoras de negócios.

Nesse contexto, a Demetec, uma startup pré-incubada no Parque Tecnológico Oceanotec, localizado na Universidade Federal do Rio Grande (FURG), se propõe a levar tecnologia de forma acessível ao campo. Seu objetivo, em especial, é atingir a agricultura familiar que não dispõe de tecnologias de Agricultura de Precisão (AP). Assim, em parceria com a Demetec e o Projeto AutoCERES - um projeto pertencente ao laboratório Nautec, situado no Centro de Ciências Computacionais (C3) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG) - foi desenvolvido um protótipo de simulação de um pulverizador em barras para a realização de testes. Esses testes compararam diferentes modelos de válvulas solenoides de baixo custo.

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral deste estudo é avaliar o desempenho de diferentes modelos de válvulas solenoides. Utilizando estratégias de Pulse Width Modulation (PWM) para controle de vazão em válvulas solenoides de baixo custo, pretende-se analisar a resposta do sistema sob várias condições operacionais.

### 1.1.1 Objetivo Específicos

- Avaliar desempenho de válvulas solenoides de baixo custo usando acionamento via PWM;
- Criar relação entre DutyCycle (DC) e vazão;
- Avaliar desempenho de válvulas de baixo custo em relação válvulas comerciais para aplicação via PWM;
- Validar modelo criado no *Simulink*.

## 1.2 Organização do Trabalho

Esse trabalho foi estruturado em 5 capítulos, iniciando, no atual capítulo é apresentado o contexto e relevância que esse estudo entrega para academia e sociedade, passando para os objetivos do trabalho.

No Capítulo 2, aborda-se a revisão bibliográfica, contextualizando alguns termos, equipamentos ligados à agricultura e à pulverização. Também são abordados trabalhos relacionados ao tema do trabalho.

O Capítulo 3 aborda o desenvolvimento do aquário de prototipagem, a criação do modelo de simulação do aquário, e os itens utilizados. Também é apresentada a simulação do sistema. Por fim, são abordados os métodos utilizados para a realização dos testes e a filtragem de tratamento dos dados coletados.

O Capítulo 4, por sua vez, apresenta e discute os valores obtidos nos testes realizados, representados por gráficos. Inicialmente, é feita a análise individualmente de cada válvula; posteriormente, é feita a análise da relação entre Vazão-DC para cada válvula em pressões e frequências diferentes. Passando para a avaliação comparativa entre as válvulas, e por fim, é feita uma breve conclusão sobre as válvulas.

Por último, no Capítulo 5, é feita a conclusão dos testes realizados, discutindo qual a importância dos resultados e concluindo qual modelo de válvula obteve melhor resultado e se conseguiu atingir os objetivos propostos.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Para facilitar o entendimento do trabalho realizado, este capítulo tem como objetivo definir e explicar pontos importantes que envolvem o tema do estudo. Inicia-se com a apresentação de pulverizadores agrícolas e seus principais componentes. Em seguida, é apresentado o conceito de Agricultura de Precisão (AP), Modulação por Largura de Pulso (PWM) e válvulas solenoides. Por fim, são discutidos trabalhos relacionados ao tema.

### **2.1 Pulverizadores Agrícolas**

Para a Jacto (2021), pulverizar é distribuir uma substância líquida em pequenas partículas, principalmente na agricultura para a aplicação de agrotóxicos, nutrientes ou fertilizantes. O pulverizador agrícola é um equipamento essencial para combater pragas, doenças e insetos, além de ajudar na distribuição de fertilizantes. Pode ser utilizado por terra ou via aérea, sendo amplamente utilizado em propriedades extensas. A calda, que é a mistura diluída dos produtos, é pulverizada sobre as culturas para atingir os locais desejados. Contudo, o pulverizador é essencial garantir que a aplicação seja distribuída no lugar certo e na quantidade certa, quando bem utilizado.

Como existem vários modelos de pulverizadores no mercado, a seguir serão apresentados os principais modelos com referência à Jacto (2021).

#### **2.1.1 Pulverizadores Costais**

O pulverizador costal (Figura 1) é um equipamento com uma mochila que possui um reservatório nas costas e pode ser acionado manualmente, por energia elétrica ou combustível (Jacto, 2021). No entanto, é importante notar que sua utilização pode ser inviável em áreas extensas, uma vez que requer um operador para carregá-lo. Por outro lado, esse tipo de equipamento geralmente possui um preço mais acessível em comparação com outras opções disponíveis no mercado. Isso pode torná-lo uma escolha viável para aplicações em menor escala ou para aqueles que possuem um orçamento mais limitado.



Figura 1: Pulverizador Costal

### 2.1.2 Pistola

As pistolas de pulverização (Figura 2) são geralmente operadas com o uso de ar comprimido, podendo ou não ser operadas eletricamente ou manualmente (Jacto, 2021). Geralmente, as opções manuais são destinadas a hortas, pomares e jardins.



Figura 2: Pistola de Pulverização

### 2.1.3 Pulverizadores em Barras

Os Pulverizadores em Barras, são divididos em duas categorias: autopropelidos (Figura 3(a)) e tratorizados (Figura 3) (Jacto, 2021). A principal diferença entre os dois, além do valor de compra, é que os pulverizadores tratorizados são acoplados a um trator, também conhecidos de *Pulverizadores de Arrasto*. Ou seja, para utilizá-los, é necessário o uso de um trator. Por outro lado, o *Pulverizador Autopropelido* é um equipamento autônomo, que consiste apenas no pulverizador em si e em uma máquina motorizada. Além disso, os modelos autopropelidos possuem uma capacidade de armazenamento mais elevada no reservatório.



(a) Pulverizador Autopropelido.

(b) Pulverizador tratorizado.

Figura 3: Pulverizadores em Barras

#### 2.1.4 Pulverizadores aéreo

Os Pulverizadores aéreos, descritos pela Jacto (2023a), geralmente incluem aviões (Figura 4(a)), drones (Figura 4(b)) e helicópteros. Os drones são especialmente úteis para aplicações de precisão, pois podem ser manobrados com precisão em regiões de difícil acesso. Por outro lado, os helicópteros oferecem uma alternativa aos aviões, uma vez que sua menor velocidade permite uma maior proximidade das culturas, permitindo uma inspeção mais detalhada. Já os aviões se destacam pela rapidez operacional, sendo mais indicados para cobrir grandes áreas de cultivo de forma eficiente.



(a) Avião.

(b) Drone.

Figura 4: Pulverizadores aéreo

#### 2.1.5 Atomizadores

Os atomizadores (Figura 5) são equipamentos que fazem a pulverização com a dispersão do produto sobre a plantaçāo por meio de uma corrente de ar. Proporcionando ao produto a capacidade de atingir altas distâncias. É importante ressaltar que esse tipo de pulverizador é frequentemente utilizado em culturas perenes, como café e laranja (Jacto, 2023a).



Figura 5: Atomizador

## 2.2 Principais componentes de um Pulverizador em Barras

Para melhor entendimento dos experimentos realizados e do protótipo montado, será apresentado os principais componentes de um pulverizador em barras(Jacto, 2021). Será abordado componentes de um pulverizador em barras convencional, já que podem ser compartilhados entre os pulverizadores alguns componentes. Veja na Figura 6 os principais componentes.

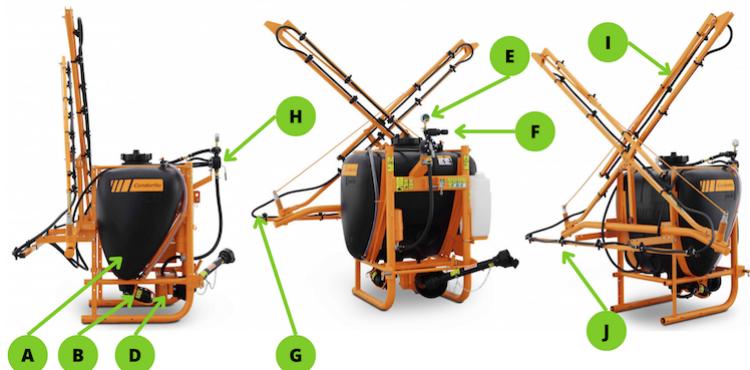


Figura 6: Componentes

- |                                     |                            |
|-------------------------------------|----------------------------|
| A) Tanque ou reservatório           | F) Regulador de Pressão    |
| B) Bomba                            | G) Mangueiras              |
| C) Agitador, mecânico ou hidráulico | H) Conjunto de Acionamento |
| D) Filtros                          | I) Barra de pulverização   |
| E) Manômetro                        | J) Bicos de pulverização   |

Sobre os componentes listados focaremos na *Bomba, Bicos de Pulverização*.

### 2.2.1 Bomba

Os pulverizadores geralmente utilizam *Bombas de Diafragma/Membrana*. Esse tipo de bomba pertence à família das bombas de deslocamento positivo, cujo funcionamento geralmente ocorre por meio de pistões. Segundo a Parker Hannifin Indústria e Comércio Ltda (1999), as bombas de pistões são equipamentos que realizam o movimento de pulsação. Cilindros, que se movimentam deslizando em um tambor, efetuam a sucção do fluido através do vácuo quando recuam e a expulsão no avanço, por meio de válvulas acionadas dependendo do movimento. Esse tipo de bomba geralmente é utilizados para sistemas que dependem de altas ou constantes pressões.

As bombas de diafragma, diferentemente das bombas de pistão, possuem uma película de borracha que separa o fluido do elemento móvel (Figura 7). Este tipo de bomba é regularmente utilizado nas indústrias alimentícia, química e agrícola. Devido ao fato de o pistão se movimentar e necessitar de lubrificação, as bombas de pistão podem contaminar o fluido que movimentam. Por esse motivo, quando se deseja ter controle de pureza e evitar interferência no fluido, utiliza-se a bomba de diafragma.

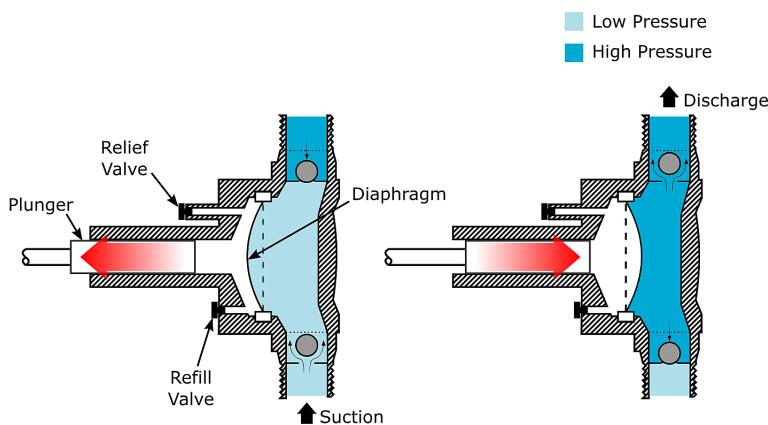


Figura 7: Funcionamento da Bomba de Diafragma

### 2.2.2 Bicos de pulverização

Bicos de pulverização, também conhecidos como pontas de pulverização, são elementos responsáveis pela aplicação uniforme de agrotóxicos ao longo da barra. Conforme indicado por Chain (1999), inicialmente, os bicos de pulverização consistiam em um tubo com um orifício fino que produzia um jato fino e gotas grandes e que de acordo com Akesson (1979), já em 1896, haviam sido identificadas três categorias de bicos, que são utilizadas até hoje na aplicação de agrotóxicos:

- 1) Bicos com orifícios de forma elíptica com jatos que se pareciam com um leque;
- 2) Bicos também com forma de leque mas com orifício colocados à frente (como bicos de impacto);

- 3) Bicos que geravam um movimento de rotação do líquido gerando uma calda em forma de cone vazio, onde não há gotas de pulverização no interior do cone.

(Chain, 1999) ressalta que, desde 1986, houve uma significativa evolução na síntese química, e, com o surgimento de novos produtos, a eficácia dos agrotóxicos aumentou, compensando a má disposição do produto na aplicação com pulverizadores. Porém, ainda na época de Chaim, e até hoje na agricultura familiar, são utilizados os mesmos bicos de pulverização com o objetivo de estabelecer uma barreira tóxica na superfície da planta, impedindo o ataque de pragas e doenças.

Atualmente existem vários tipos de bicos de pulverização as principais são (Jacto, 2023b):

- **Leque:** Os bicos tipo leques produzem jatos planos no formato de leque (Figura 8), muito utilizados em pulverizadores em barras, trabalhando em uma faixa de pressão de 2 a 4 bar em áreas extensas.
- **De impacto:** Os bicos de impacto geram formatos de leque (Figura 8) também, são bicos para trabalhar em ampla escala de pressão (de 15 a 90 psi), podendo ser usado para herbicidas, fungicidas e inseticidas.
- **Cone vazio:** São bicos que produzem um formato circular com poucas gotas no centro (Figura 8), muito utilizado em culturas com grande massa foliar. Trabalham na faixa de 2 a 10 bar.
- **Cone cheio:** Assim como cone vazio, esse produz um formato circular mas todo preenchido geralmente em ângulos menores de abertura (Figura 8), muito utilizados para alta densidade foliar. Trabalham na faixa de 1 a 3 bar.

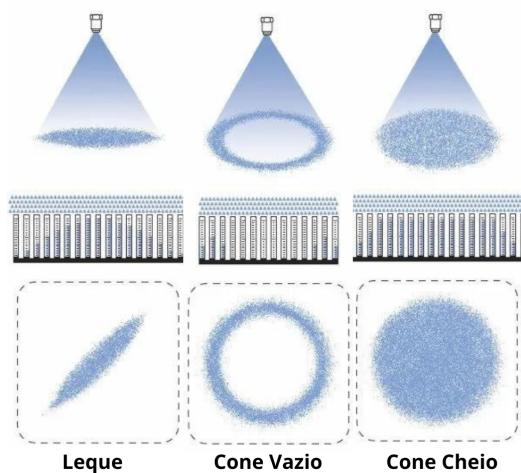


Figura 8: Bicos de pulverização e seus formatos

## 2.3 Modulação por Largura de Pulso (PWM)

Kart (2001) descreve a modulação por largura de pulso (PWM) como um esquema de modulação analógica, onde a duração, largura ou o tempo de pulso varia proporcionalmente à amplitude instantânea do sinal (Figura 9). O autor esclarece que o PWM é mais imune a ruídos do que a Pulse-amplitude modulation (PAM), já que as variações de amplitude introduzidas pelo ruído podem ser facilmente reduzidas em circuitos limitadores.

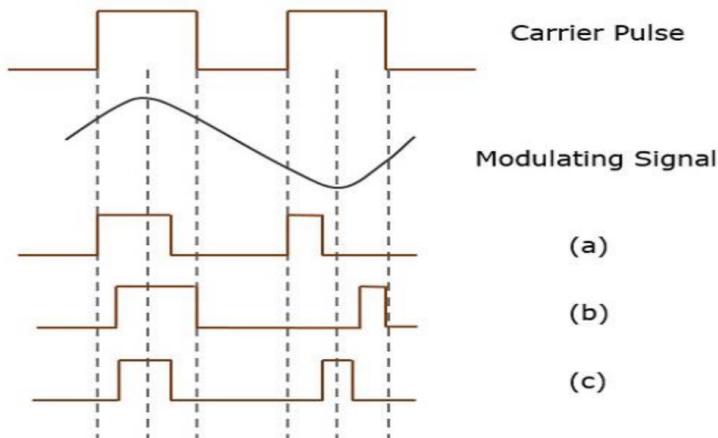


Figura 9: Ondas PWM com diferentes intervalos de tempo feitas por Kart (2001)

Silveira (2016) explica que PWM trabalha com a modulação do ciclo de trabalho de um sinal digital, alternando rapidamente entre o estado ligado e desligado. O ciclo de trabalho (DC) representa a proporção do tempo em que o sinal está ativo durante um período completo. Por exemplo, um ciclo de trabalho de 50% indica que o sinal está ligado durante metade do período e desligado durante a outra metade (Figura 10). Ao variar o ciclo de trabalho, é possível simular tensões ou correntes analógicas. A técnica do PWM oferece diversas vantagens, como a facilidade de implementação em microcontroladores modernos, redução de custos e consumo de energia, maior imunidade a ruídos e a possibilidade de controle preciso de dispositivos.

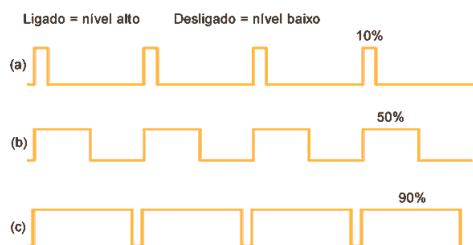


Figura 10: Sinais PWM com DC diferentes

Analizando a Figura 11 podemos ver o que foi falado a cima, exemplificando,  $P$  é o *Pulso* de tensão e o  $T$  é o *Período* ou o *Ciclo* que se repete ao longo do tempo, assim o

*Período/Ciclo* é que o intervalo de tempo entre cada subida do *Pulso*.

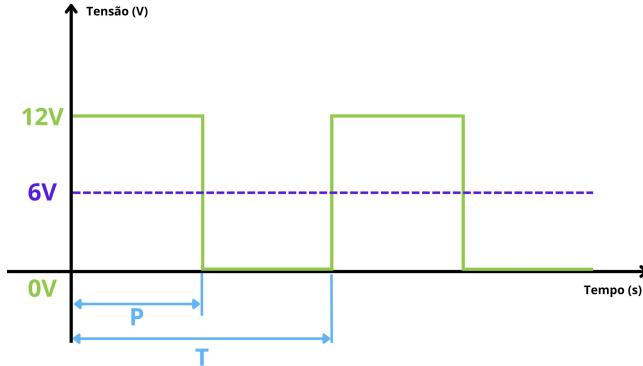


Figura 11: Onda PWM

A frequência ( $f$ ) é dada em hertz (hz) e calculada a partir de (1). Já o período ( $T$ ) é dado em segundos (s) e calculada a partir de (2), ou seja, inversamente proporcional a frequência.

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{f} \quad (2)$$

## 2.4 Agricultura de Precisão

Para Molin (2004), a AP é definida como uma abordagem de gestão ou gerenciamento da produção agrícola, sendo caracterizada por um conjunto de tecnologias e procedimentos que otimizam as lavouras e os sistemas de produção. Para o autor, a AP possibilita realizar em áreas extensas aquilo que os pequenos agricultores fazem em menor escala, como o tratamento detalhado considerando as variações existentes dentro de um talhão. Para tornar isso possível, o autor esclarece que a automatização é essencial, a qual depende de tecnologias recentemente adaptadas para o setor agrícola, como posicionamento por satélite, sistemas de informação geográfica, informática, sensores e controladores. Por fim, a AP é descrita como um sistema de gerenciamento que contém uma grande quantidade de informações, sendo necessária a utilização de tecnologia da informação, a qual gera uma base de dados de alto valor gerencial para a agricultura.

Inamasu, Bernardi (2014) abordam que o registro mais antigo da Agricultura de Precisão (AP) surge em 1929, em Illinois. Linsley e Bauer recomendaram que os produtores desenhassem mapas contendo testes de acidez do solo em grade para a aplicação de calcário. Com a influência do uso de eletrônica embarcada em veículos na década de 1980, houve um desenvolvimento significativo em maquinários agrícolas. O desen-

volvimento do Global Positioning System (GPS) iniciou-se em 1978, mas sua operação efetiva começou apenas em 1995. Então em 1996, surgiram as colheitadeiras equipadas com tecnologia de mapeamento de produção, possibilitando um mapeamento detalhado da produção e a aplicação de insumos à taxa variada. No Brasil a AP só chega em meados de 1990 com a abertura do mercado tendo uma incorporação de tecnologias no setor agrícola. Para Inamasu, Bernardi (2014), a AP é uma abordagem gerencial que considera a variabilidade espacial da lavoura, com o objetivo de obter retorno econômico e benefícios ambientais. Esta abordagem reforça a ideia de uma cadeia de conhecimentos, na qual máquinas, aplicativos e equipamentos servem como ferramentas de suporte à gestão. Os autores concluem que há ainda muitos desafios da AP na implementação de tecnologias avançadas na agricultura, onde inicialmente o domínio da integração de receptores de GPS em máquinas agrícolas para aprimorar a gestão operacional. Esse desafio era amplificado pelo salto tecnológico que a agricultura brasileira enfrentava, considerando a natureza emergente ou até mesmo a inexistência das tecnologias.

Para Bassoi et al. (2019), a AP é um sistema que visa ao uso de procedimentos e de equipamentos, implementos e sensores para avaliar a variabilidade espacial e temporal de atributos do solo, planta, animal ou clima. Tem como objetivo principal fornecer informações para o auxílio da tomada de decisões pelo produtor, possibilitando a realização de práticas ou de manejo agrícolas de maneira diferenciada ou variada. Para o autor, a AP é caracterizada pela coleta, armazenamento, análise e transmissão de dados ou informações. Portanto, a AP é uma abordagem tecnológica para gestão agrícola, que busca otimizar práticas visando aumentar a eficiência, produtividade e sustentabilidade na agricultura.

#### **2.4.1 Tecnologias na pulverização agrícola**

Ess et al. (2001) aborda em seu trabalho desafios e estratégias na aplicação de agrotóxicos, dando importância para o controle da taxa de aplicação para a máxima eficácia e diminuição dos impactos ambientais. Os autores levantam algumas tecnologias usadas, como sistemas de aplicação à taxa variada, um sistema com potencial de melhorar a eficiência e eficácia da aplicação, já que esse tipo de sistema corresponde a um mapa de aplicação onde cada local tem um tratamento específico. Isto é, na aplicação de herbicidas, podem variar significativamente a dosagem de aplicação, já que dependem da matéria orgânica no local, pH do solo e capacidade de troca catiônica. Eles trazem também tecnologias como a *Injeção Química*, que varia as proporções da calda de pulverização, sendo uma alternativa ao método convencional, onde não é possível variar as proporções dependendo da área que está sendo pulverizada. Por fim, é discutido sistemas de controle, que são sistemas de controle da taxa de aplicação que variam a pressão com sensores que monitoram a velocidade do pulverizador e ajustam a pressão para impactar a vazão, resultando na mesma aplicação por metro quadrado.

Ganzelmeier et al. (2000) traz a problemática da deriva, que nada mais é do que o deslocamento físico das partículas de pulverização, podendo ou não alcançar os alvos da pulverização. Os autores explicam que esse fator é crítico, já que podem também afetar organismos que não são alvo da pulverização. Pensando nisso, os autores estudam tecnologias em pulverizadores, cujo foco é reduzir a deriva durante a pulverização, definindo parâmetros para avaliação de risco ecotoxicológico aquático. Para isso, foram realizados testes ao ar livre para coletar dados sobre a deriva em várias condições diferentes, e usando uma função potencial para estimar a deriva em distâncias onde não é possível fazer a medição direta. Os autores apresentam pulverizadores com tecnologias como pulverizadores de taxa variada, que reduzem a pressão de trabalho para manter a mesma aplicação por metro quadrado; pulverizadores de túnel de spray, que encapsulam a área de pulverização para evitar a dispersão de partículas, muito utilizados em vinhedos; e pulverizadores com detectores de verde, que, com sensores, identificam o verde da planta e, se houver, ligam os bicos de pulverização. Por fim, conclui-se que há pulverizadores capazes de reduzir a deriva de 50% a mais de 90%, dependendo da técnica utilizada.

No trabalho de Chaim (2006), ele propõe um sistema para melhorar a eficácia da aplicação de agrotóxicos por meio da geração de gotas com carga eletrostática (Figura 12). O autor obteve resultados nos seus experimentos que comprovam que essa tecnologia permite a redução significativa de I.A. quando comparado com métodos convencionais. Além disso, destaca que houve redução na contaminação do solo com o uso da pulverização eletrostática.

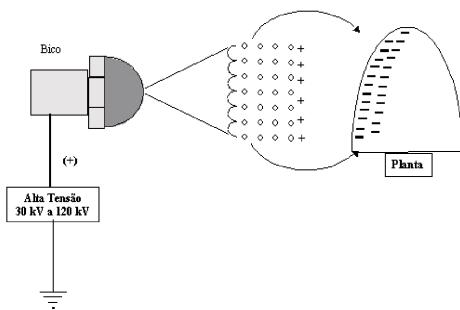


Figura 12: Representação do sistema feito por Chaim (2006) para pulverização eletrostática

Rosa (2018) desenvolve um sistema com equipamentos de baixo custo para avaliação de pressão de barra de pulverização com bicos em série, utilizando a tecnologia de bico a bico (liga e desliga). É realizado neste trabalho a modelagem do sistema e um projeto de válvula para controle da pressão com controle proporcional-integral (PI).

Terra et al. (2021) propôs um sistema robótico acoplável e modular de baixo custo para pulverizadores agrícolas convencionais, que utiliza um sistema de visão computacional e controle individualizado de bicos com a finalidade de reduzir o uso de agrotóxicos,

fazendo a aplicação localizada.

Wolf (2021) explica que na pulverização o PWM é um sistema que controla taxa de fluxo de líquido através de cada bico por meio de breves e intermitentes desligamentos do fluxo do bico, ativado por solenoides elétricas que substituem as válvulas de retenção acionadas por mola. Ainda, os sistemas típicos de pulverização PWM trabalham em uma frequência de 10 a 15Hz, ou seja, a solenoide desliga ou o bocal a cada 10 ou 15 vezes por segundo. O tempo em que a solenoide fica energizada é chamada de (DC) ou ciclo de trabalho. Como podemos ver na Figura 13 o DC pode variar de 100% (totalmente aberto) a 20% (solenoide aberta 20% do tempo), impactando na média do fluxo do bico de pulverização ao longo do tempo.

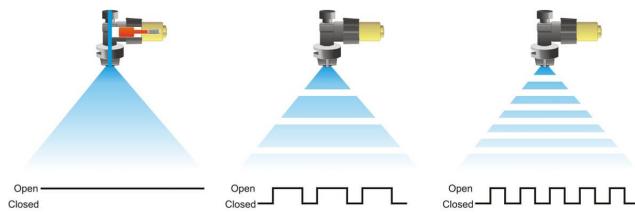


Figura 13: Representação PWM na Pulverização

No trabalho de Ghafar et al. (2023), é desenvolvido um robô agrícola de baixo custo (Figura 14) para aplicação de agrotóxicos e monitoramento de culturas. Utilizando um robô diferencial de duas rodas, uma câmera e um sistema de acionamento para pulverização, é criado um robô que pode operar de forma autônoma, fazendo a transmissão das imagens capturadas.



Figura 14: Robô proposto por Ghafar et al. (2023)

## 2.5 Trabalhos Relacionados

Giles, Comino (1989) realizou um estudo com os objetivos de determinar o uso de

uma válvula solenoide para controle de fluxo, caracterizar as relações entre a frequência e o DC na válvula e a taxa de fluxo resultante. Por fim, avaliar a resposta transitória da válvula e determinar um controle de feedback. O autor utilizou uma válvula Normalmente Fechada (NF) de baixa massa. A válvula foi alimentada com uma onda quadrada de 0-12 Vdc, variando a frequência e o DC. Nos testes realizados, o autor estabeleceu uma relação linear entre a vazão do bico de pulverização e o DC no sinal de alimentação da válvula, que se repetiu em todas as frequências testadas. Na imagem 15, é possível ver um dos resultados dos testes.

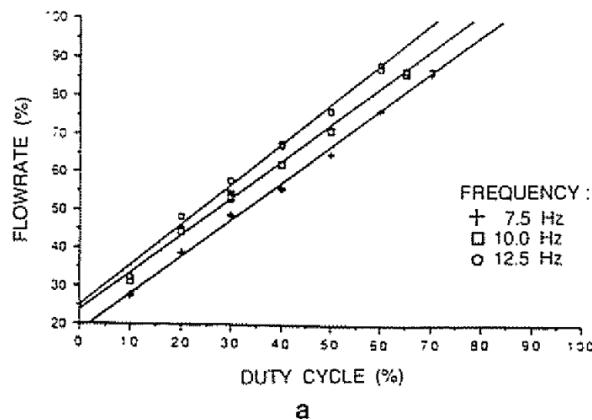


Figura 15: Relações entre a frequência de atuação do controlador, o DC e o fluxo resultante através do bocal de teste com Bico Leque.

No trabalho realizado por Han et al. (2001), os autores modificaram um pulverizador comercial com barra de 18,3m e 25 bicos, utilizando o sistema PWM. Foram realizados testes para avaliar a precisão volumétrica de aplicação do pulverizador de taxa variável. As alterações na taxa de fluxo devido à imprecisão do controlador de pressão variaram de 0,5% a 2,2% nos testes. No entanto, foi observado um atraso de 20 ms no desenvolvimento da pressão do bico durante cada ciclo, sendo esse atraso constante independentemente do número de bicos ativados. Além disso, após desenergizar o solenoide, o bico continuou pulverizando na pressão do sistema por 10 ms. Embora o sistema PWM tenha fornecido a quantidade desejada de produto por pulso, a uniformidade da cobertura de pulverização ainda pode ser aprimorada durante mudanças na velocidade de deslocamento e largura da faixa de pulverização. Veja os resultados do experimento na Figura (16).

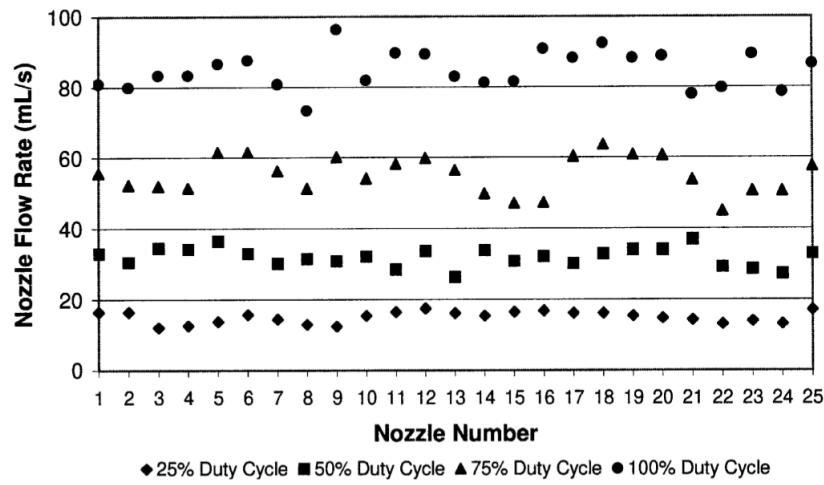


Figura 16: Variação da vazão ao longo da barra do pulverizador. A pressão do sistema foi ajustada para 310 kPa (45 psi). Todas as válvulas solenoides foram ligadas com o mesmo ciclo de trabalho PWM.

(Taghizadeh et al., 2009) tem como objetivo desenvolver um modelo dinâmico não linear de uma válvula de comutação pneumática, além de identificar os parâmetros desconhecidos do modelo usando otimização de busca direta e validar o modelo por meio de experimentos. Como resultado, o modelo da válvula entre a entrada do ciclo de trabalho e a posição média do êmbolo é representado por uma curva estática não linear correspondente a uma determinada frequência de PWM e pressão de alimentação.

O trabalho de Zhu et al. (2010) propõe desenvolver um controlador PWM para um pulverizador de precisão UAV (Unmanned Aerial Vehicle) para agricultura. Os resultados do trabalho mostrou uma forte relação linear entre a vazão e a modulação de largura de pulso como podemos analisar no gráfico gerado pelo autor na Figura 17.

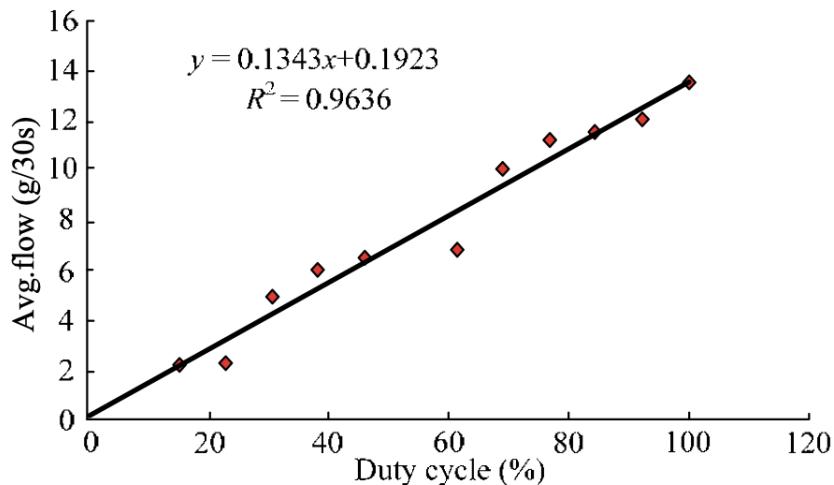


Figura 17: Relação entre o ciclo de trabalho e a vazão usando controlador PWM.

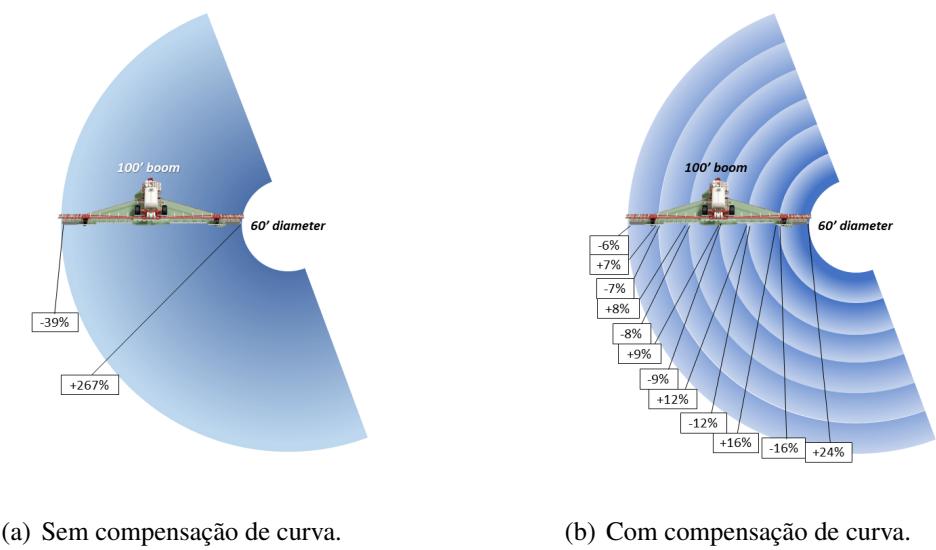
No trabalho de Liu et al. (2014), os autores desenvolveram um sistema de controle de fluxo que produz sinais de PWM com larguras de pulsos variadas alcançando taxas de fluxos diferentes para diferentes bicos. Os autores afirmam que a taxa de fluxo aumenta linearmente com o DC controlado por PWM, com DC variados de 10% a 90% e pressões de 138 a 345KPa. Além disso a vida útil das válvulas aumentou de 350 para 2.426 horas com o sistema de controle de fluxo e com o circuito de proteção.

Hall (2016) realizou em seu trabalho o objetivo de reduzir os impactos das mudanças de velocidade durante a aplicação, utilizando a tecnologia *Tow and Fert*, um sistema de controle de fluxo global, que controla o fluxo geral das barras de pulverização. O autor aplicou PWM para um controle preciso, ajustando a vazão aplicada; porém, foi observado que a distribuição não foi uniforme, sendo necessário um aprimoramento do design.

No estudo de Wei et al. (2021), foi realizada a pesquisa dos efeitos do DC quando se utiliza PWM para o acionamento de duas válvulas solenoides, visando a aplicação de produtos agrotóxicos com válvulas de fabricantes diferentes. Nos experimentos, foram utilizados bicos leques e 10 faixas de DC, avaliando a pressão e o tamanho das gotas. Os resultados obtidos pelo autor indicam que o tamanho das gotas varia conforme o DC, e que as pressões de ativação diminuem conforme o DC diminui, ou seja, à medida que o DC diminui, a pressão necessária para operar o bico também diminui.

Um estudo realizado pela CapstanAG Wolf (2019), empresa que introduziu a técnica de PWM na pulverização agrícola, revelou que um pulverizador com uma barra de 30m, ao fazer uma curva com um diâmetro de 18m, no centro, apresentaria uma sobredosagem de agrotóxicos de +267% e uma subdosagem de -39% na extremidade da barra de pulverização representado na Figura 18(a).

Utilizando o mesmo cenário de aplicação, mas agora com a compensação por PWM em curvas obtiveram que o bocal final da seção externa apresenta uma diferença de 6% em relação ao ideal, enquanto o bocal mais interno dessa mesma seção tem uma diferença de 7%. Na próxima seção, as variações são de 7% abaixo e 8% acima, seguidas por 8% abaixo e 9% acima. À medida que se move do centro do pulverizador em direção à asa interna, as variações são de 9% abaixo e 12% acima, seguidas por 12% abaixo e 16% acima, e, por fim, 16% abaixo e 24% acima, Figura 18(b).



(a) Sem compensação de curva.

(b) Com compensação de curva.

Figura 18: Percentuais de desperdícios na pulverização em curvas

## 3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo, será abordada a metodologia utilizada para os experimentos. Foram empregados estudos e a infraestrutura do Projeto AutoCERES e da Demetec. Produziu-se um Aquário de Simulação para a realização e simulação de um pulverizador real.

### 3.1 Desenvolvimento do Aquário de testes

O desenvolvimento do Aquário foi inspirado no protótipo de pulverização produzido por Terra (2020). O aquário de simulação (Figura 19) tem a finalidade de simular um sistema de pulverização real, possibilitando a realização de testes em ambiente controlado, onde anteriormente seria necessário montar uma série de equipamentos para realizar testes práticos.

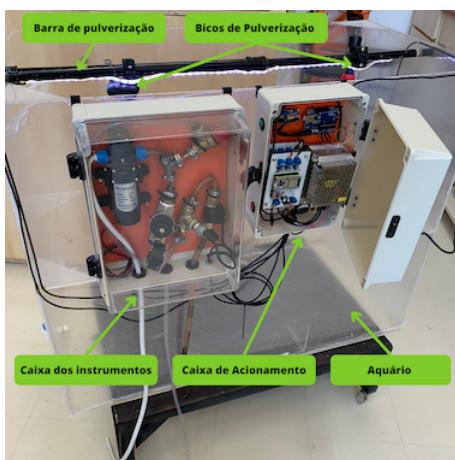


Figura 19: Protótipo de pulverização

#### 3.1.1 Fluxograma de processo do protótipo

Utilizando fluxograma de processo P&ID (*Piping and Instrumentation Diagram*), podemos representar graficamente as interações entre componentes, equipamentos e sistemas em um processo. Todos os instrumentos utilizados são identificados e dispostos em ordem de processo. Os sensores são identificados com simbologias seguindo a norma ISA (2009) (Figura 20).

No fluxograma, temos os seguintes símbolos: PCV (*Self-Operated Pressure Regulator*), uma válvula mecânica auto-operada que libera a passagem do fluido para o reservatório quando a pressão atinge 6 bar na linha. Logo depois, temos o PI (*Pressure Indicator*), um indicador de pressão da válvula reguladora de pressão. Também temos o FT (*Flow Transmitter*), o sensor de vazão. Por fim, temos o PT (*Pressure Transmitter*), o sensor de pressão.

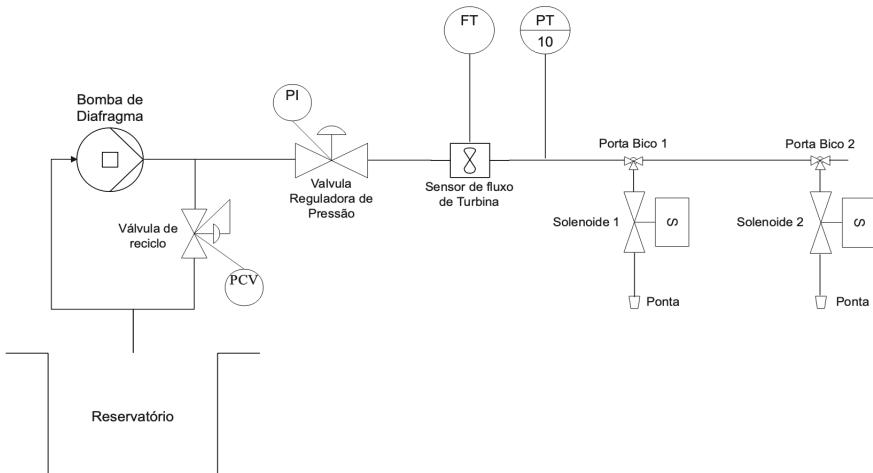


Figura 20: Fluxograma Protótipo

### 3.1.2 Caixa Atuadores e sensores

Analizando a Figura 21, observamos a caixa dos instrumentos mostrada na Figura 19 e no fluxograma de processo (Figura 20). Podemos constatar que temos uma *Bomba de Diafragma* com tensão de operação de 12V, potência de 80W, trabalhando a uma pressão de 0,9 MPa (aproximadamente 9 bar) e uma vazão de 5,5 L/min. Em seguida, temos a *Válvula de Reciclo* auto-operada, que mantém a pressão da linha em 6 bar. Essa válvula atua como uma medida de segurança para evitar que a pressão exceda o limite estabelecido quando não há fluxo, uma vez que estamos utilizando uma bomba de deslocamento positivo. Em seguida, temos o *Regulador de Pressão*, que serve para ajustar a pressão da linha. Neste caso, podemos variar a pressão de 0 a 6 bar, uma vez que nosso limite é determinado pela válvula de reciclo. Nos testes, trabalhamos com pressões determinadas pelo catálogo das pontas de pulverização, sobre as quais falaremos mais adiante.

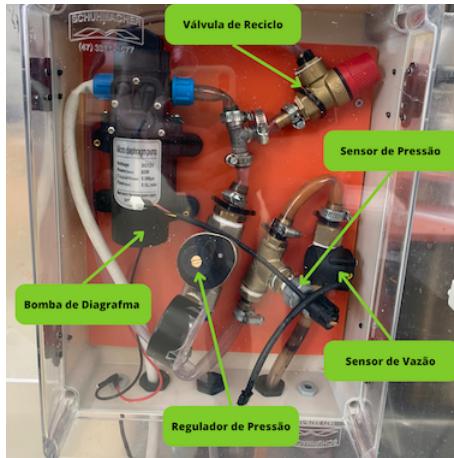


Figura 21: Caixa dos atuadores e sensores do protótipo

Por fim, temos o *Sensor de Pressão* (Figura 22), modelo HK1100C do tipo Piezo-resistivo onde possui 3 condutores:

- Alimentação: 5Vdc
- GND
- Sinal



Figura 22: Sensor de pressão modelo HK1100C

Para medir o sinal do sensor em *bar* utiliza-se a seguinte equação:

$$P = 3.0 \cdot (V_{\text{out}} - 0.5) \quad (3)$$

Já o *Sensor de Vazão* utilizado foi o YF-S201 (Figura 22), que realiza a medição por meio da contagem de pulsos com a função 4. Esse sensor também possui 3 condutores, sendo eles:

- Alimentação: 5Vdc

- GND
- Sinal



Figura 23: Sensor de vazão modelo YF-S201

Para medir o sinal do sensor em  $L/min$  utiliza-se a seguinte equação:

$$Q = \frac{f}{7,5} \quad (4)$$

### 3.1.3 Conjunto de acionamento e controle

O conjunto de acionamento (Figura 24) para operar as válvulas solenoides e coletar dados dos sensores foi inspirado no protótipo desenvolvido por Terra (2020).

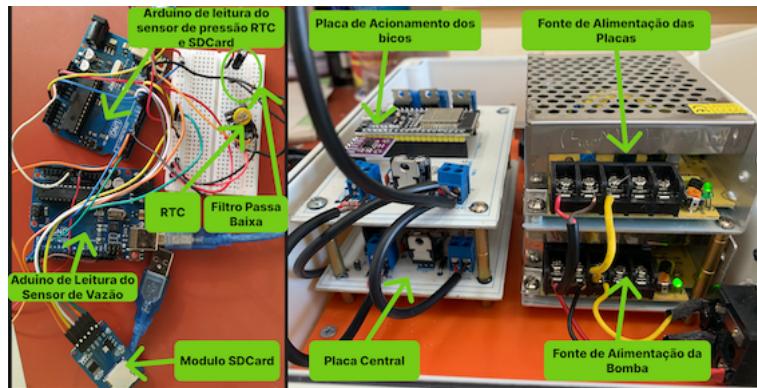


Figura 24: Caixa de acionamento do sistema e placas de leitura dos sensores

As placas foram desenvolvidas pela *Demetec*, e o conjunto de acionamento é composto por duas placas: uma central e uma de acionamento. A *Placa Central* realiza a comunicação e controle da *Placa de Acionamento* através do barramento *CAN (Controller Area Network)*. Neste cenário, para os testes realizados em um ambiente reduzido, foi utilizada apenas uma placa de acionamento. No entanto, dependendo da quantidade de bicos de pulverização, é possível adicionar mais placas de acionamento.

Para realizar a leitura dos sensores, da frequência e do DC, foi realizado externamente à caixa de acionamento do sistema e salvo em *.txt*. Foi necessário a utilização de 2 Arduinos, pois o sensor de vazão trabalha com interrupção do microcontrolador; logo, se fossem realizadas as leituras em apenas um microcontrolador, haveria perda de dados e erros na compilação. O Arduino, responsável por ler os dados de pressão, registrar a data e a hora, receber dados de outro Arduino e salvá-los no SDCard, opera de acordo com a lógica no Anexo A. Já o Arduino designado para ler os dados de vazão e, em seguida, enviá-los para o Arduino 1, opera conforme descrito no Anexo B.

### 3.1.4 Porta Bico e Bico de pulverização

Segundo a Magnojet (2019) um porta bico de pulverização é composto por um *Anti-gotejo* que tem como função impedir que a calda de pulverização fique gotejando quando não há vazão na barra de pulverização, por exemplo, em alguma manobra de pulverizador. Também é composto por uma *Capa Curta* que abriga a ponta de pulverização (Figura 25).

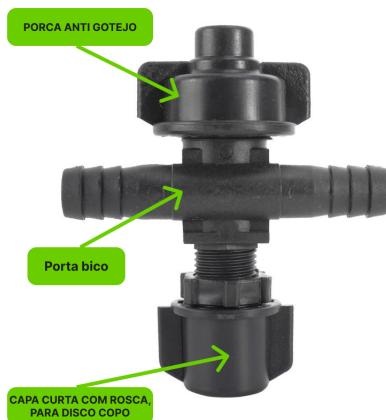


Figura 25: Partes Porta bico

A ponta de pulverização escolhida foi o modelo *MAGNOJET MJ024 AD 110 015* (MAGNOJET, 2023), que tem um ângulo de abertura de 110° e, quando a pressão for de 4.14 ]Bar, a vazão será de 0.70 L/min, conforme mostrado na Figura (26).

CÓDIGO PONTAS	DMV	LITROS POR HECTARE												
		4 km/h	5 km/h	6 km/h	7 km/h	8 km/h	9 km/h	10 km/h	12 km/h	14 km/h	16 km/h	18 km/h	20 km/h	25 km/h
<b>MJ024 AD 015</b>	F	1,03	15	103	0,23	70	56	47	40	35	31	28	23	20
	F	1,38	20	138	0,27	81	65	54	46	41	36	33	27	23
	F	2,07	30	207	0,50	149	120	100	85	75	66	60	50	43
	F	2,76	40	276	0,58	173	138	115	99	86	77	69	58	49
	F	3,45	50	345	0,64	193	154	129	110	96	86	77	64	55
	F	4,14	60	414	0,70	211	169	141	121	106	94	85	70	60

Figura 26: Ponta de pulverização Magnojet MJ024 AD 100 015

### 3.1.5 Válvulas Solenoides utilizadas

Com o objetivo de realizar testes com válvulas de baixo custo, os experimentos foram feitos com 4 tipos de válvulas diferentes, sendo elas 2 *Normal Aberta (NA)* e 2 *Normal Fechada (NF)*(27) tais como Piñeiro (2022) e Terra (2020) utilizaram em seus trabalhos. Dentre elas, 3 modelos são de máquinas de lavar roupas (Figura 27(a), Figura 27(b), Figura 27(c)) e 1 é comercial da *Teejet*© (Figura 27(d)).

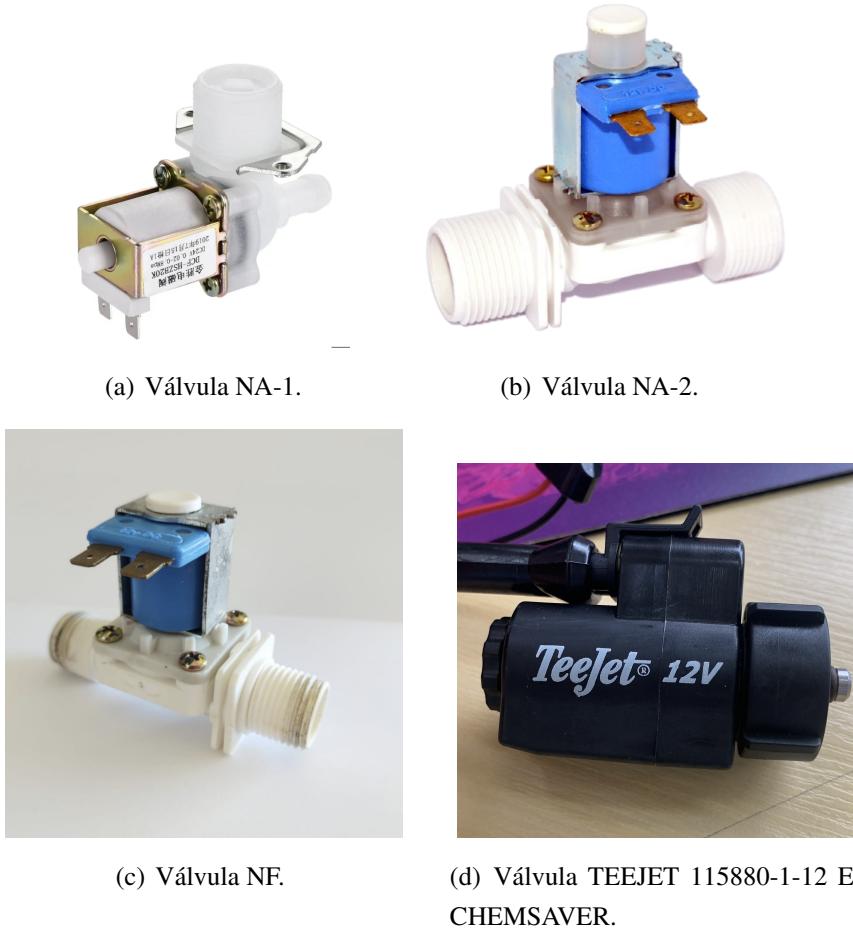


Figura 27: Modelos de válvulas utilizados

Para os modelos de máquina de lavar (Figura 27(a), Figura 27(b), Figura 27(c)), foi necessário fazer uma adaptação(28), ou seja, desenhar uma peça que substitui o corpo da válvula para acoplar no anti gotejo do porta bico e imprimir em resina. Como a válvula da TEEJET 115880-1-12 E-CHEMSAVER (Figura 27(d)) é comercialmente vendida para fazer o PWM na aplicação de agrotóxicos, não foi necessário fazer adaptação . Porém, só é possível usá-la em porta-bicos da marca.



Figura 28: Válvulas e suas adaptações para encaixar no anti gotejo do porta bico

### 3.2 Simulação do Aquário no *Simulink*

Foi desenvolvido um modelo no *Simulink* (Figura 29) usando a biblioteca *Simscape* e a Toolbox *Isothermal Liquid Systems* com o objetivo de simular o protótipo de pulverização mencionado anteriormente. Esse modelo foi baseado no *Fluxograma de Processo* representado na Figura 20 e no modelo criado por Terra (2020).

O modelo permite simular o comportamento do sistema de pulverização. No entanto, é necessário validar sua precisão e confiabilidade por meio de testes práticos. Esses testes desempenham um papel fundamental ao fornecer uma análise mais precisa e eficiente do desempenho do sistema, possibilitando assim a otimização dos parâmetros do controlador.

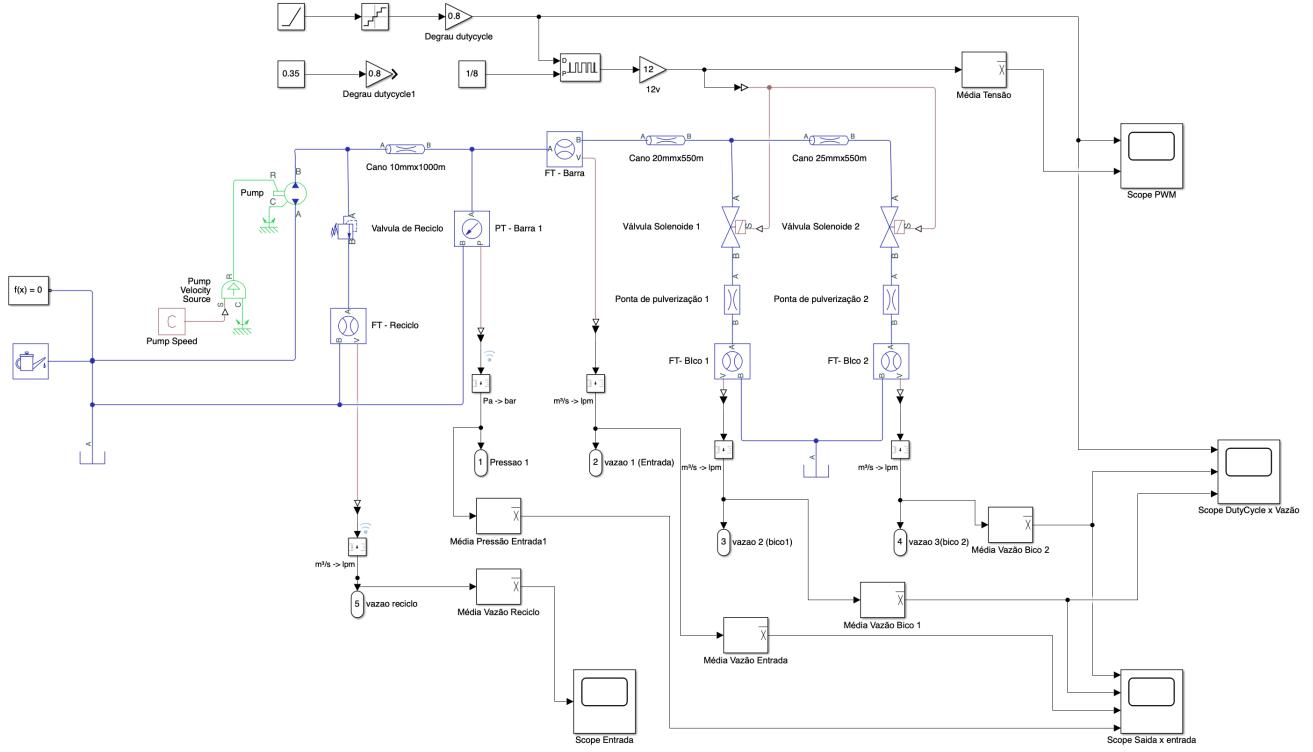


Figura 29: Modelo desenvolvido no trabalho

### 3.2.1 Parâmetros do Sistema

Para o desenvolvimento do modelo de pulverização no *Simulik*, primeiramente, realizou-se a configuração da válvula solenoide, tendo como inspiração a modelagem e os testes realizados no trabalho de Piñeiro (2022) e Terra (2020).

A seguir, uma lista dos principais blocos do modelo:

- Pressure Relief Valve (IL):

Também foi utilizado uma válvula de alívio para simular a válvula de recirculação e o regulador de pressão. A função dessa válvula é liberar para o reservatório o excesso de pressão proveniente da bomba.

- Solenoid Valve (IL):

O bloco utilizado para simular a válvula solenoide foi o *Solenoid Valve (IL)* da biblioteca *Simscape*. Em relação ao tipo de válvula, é importante destacar se ela é normalmente aberta ou normalmente fechada. Para configurar a válvula foi usado os parâmetros os parâmetros dos experimentos de Terra (2020) e Piñeiro (2022), como: tempo de abertura, tempo de fechamento, orifício de saída do fluido e numero de Reynolds.

Em seguida, é necessário especificar o tempo de abertura e fechamento da válvula. Com base no trabalho de Piñeiro (2022), definiu-se o valor de *49.5 ms* para a aber-

tura e  $15.5\text{ ms}$  para o fechamento. Quanto à *Área máxima de abertura*, estabeleceu-se o valor de  $72\text{mm}^2$  Piñeiro (2022). Também defini-se o *Coeficiente de Descarga* de 0.64 e *Número crítico de Reynolds* de 12 com base no trabalho de Terra (2020).

Por último, definiu-se a *Área de vazamento*, que é de  $1e^{-4}\text{mm}^2$ , e a *Área transversal nas portas A e B*, que é de  $506\text{mm}^2$ .

- **Orifice (IL):**

Posteriormente, foi realizada a configuração do bloco *Orifice (IL)* da biblioteca *Simscape* para simular a ponta de pulverização. Para isso, foram utilizados os métodos propostos por Terra (2020) para estimar a área do orifício de saída. Que nesse caso é  $0.5794\text{mm}^2$  com um *Coeficiente de Descarga* de 0.7 e *Número crítico de Reynolds* de 12.

- **Variable Pulse Generator:**

Este bloco desempenha a função de gerar uma onda PWM. Recebe duas variáveis como entrada: o *Período*, que para os testes, definimos uma frequência de  $5\text{Hz}$ ,  $7\text{Hz}$  e  $10\text{Hz}$ , embora para o modelo, usando uma frequência de  $7\text{Hz}$ , se aproxime mais dos testes reais, e o valor do *DC*, expresso em uma escala de 0 a 1. O valor 0 representa 0% de DC (ciclo desligado), enquanto o valor 1 representa 100% de DC (ciclo totalmente ligado).

### 3.2.2 Teste e verificação do modelo hidráulico

Para garantir a verificação do modelo, especialmente no sistema hidráulico, realizamos um teste com base na relação entre a vazão e a pressão da ponta de pulverização mencionada anteriormente (subseção 3.1.4). Nesse teste, definimos a pressão em  $2\text{ bar}$  e o *DC* em 100%, esperando assim uma vazão média de  $0.5\text{ L/min}$ .

Na Figura 30, apresentamos os resultados da simulação, onde são exibidos quatro gráficos. O primeiro gráfico mostra a média da vazão do *Bico de Pulverização 1*, o segundo gráfico é a média da vazão do *Bico de Pulverização 2*, o terceiro gráfico representa a *Média da Vazão de Entrada*, que é a soma das vazões de saída. Então, quando dois bicos estiverem ativados, cada um com vazão de  $0.5\text{ L/min}$ , a *Média da Vazão de Entrada* será aproximadamente  $1\text{ L/min}$ , como representado na imagem, pois a vazão da entrada é a soma das vazões de todos os bicos. Por fim, temos o gráfico da *Média da Pressão de Entrada*, que é a pressão limitada pelo regulador de pressão, ela delimita a média da vazão do bico, segundo a Figura 26.



Figura 30: Teste do modelo em 2bar

### 3.2.3 Simulação variando o DC

Também foi realizado o teste da relação entre o DC e a vazão. Para isso, iremos criar um degrau no DC que varia de 0% a 100% e avaliar o comportamento resultante. No entanto, para essa simulação, vamos incluir um ganho de 0.8 no DC, com base no trabalho de Piñeiro (2022). Isso se deve ao fato de que a válvula solenoide apresenta um atraso mecânico devido a constante de tempo da válvula. Variando o DC de 0% a 100% ao longo de 10 segundos, mantendo uma pressão de entrada de 2 bar, obtivemos a resposta ilustrada no gráfico da Figura 31.

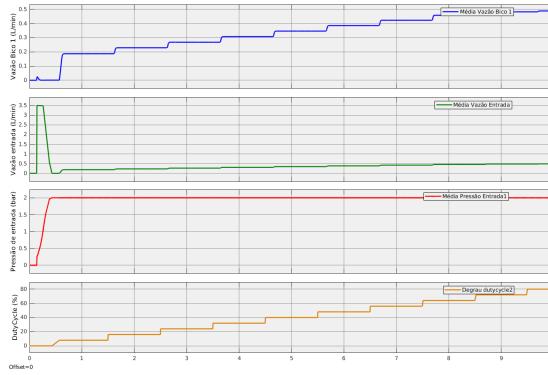


Figura 31: Relação entre DC de 0% a 100% e Vazão ao longo do tempo em 7hz e 2bar

Com base no gráfico, podemos concluir que a variação do DC implica em uma variação na vazão. Observamos também que, quando o DC está em 100%, a vazão também é de 0.5 L/min, levando em consideração o ganho de 0.8 definido anteriormente. No entanto, é importante ressaltar que a variação da vazão não é proporcional ao DC. Ao analisar a Figura 32, em que o DC foi definido como 50%, espera-se uma vazão média em torno de 0.25 L/min, mas é obtida uma vazão média de **0.346 L/min**. Isso pode ser atribuído ao modelo da válvula utilizada, que é de baixo custo e possui uma construção menos robusta, resultando em tempos de acionamento mais lentos.

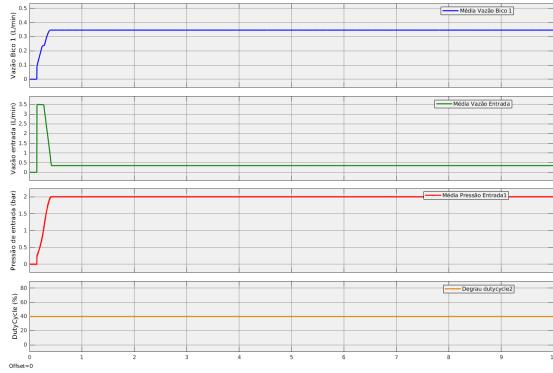
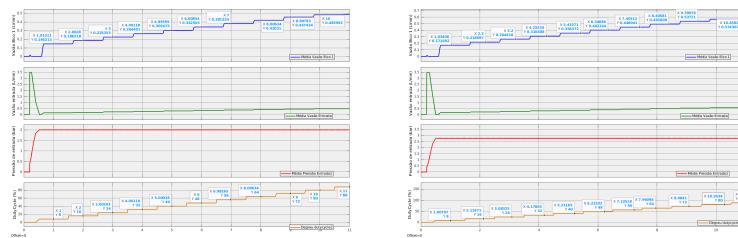
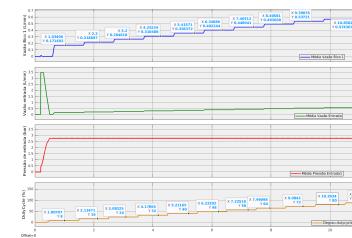


Figura 32: Relação entre DC e Vazão em 50% de DC em 7hz e 2bar

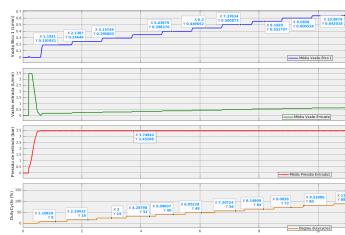
Nos gráficos a seguir, é apresentado a simulação no *Simulink* da variação do DC ao longo do tempo, considerando diferentes pressões e frequências de trabalho.



(a) Teste Variando DC em 5Hz e 2bar.



(b) Teste Variando DC em 5Hz e 2.76bar.



(c) Teste Variando DC em 5Hz e 3.45bar.

Figura 33: Gráficos relação DC e Vazão(L/min) em 5Hz em 2bar, 2.76bar e 3.45bar simulado no *Simulink*

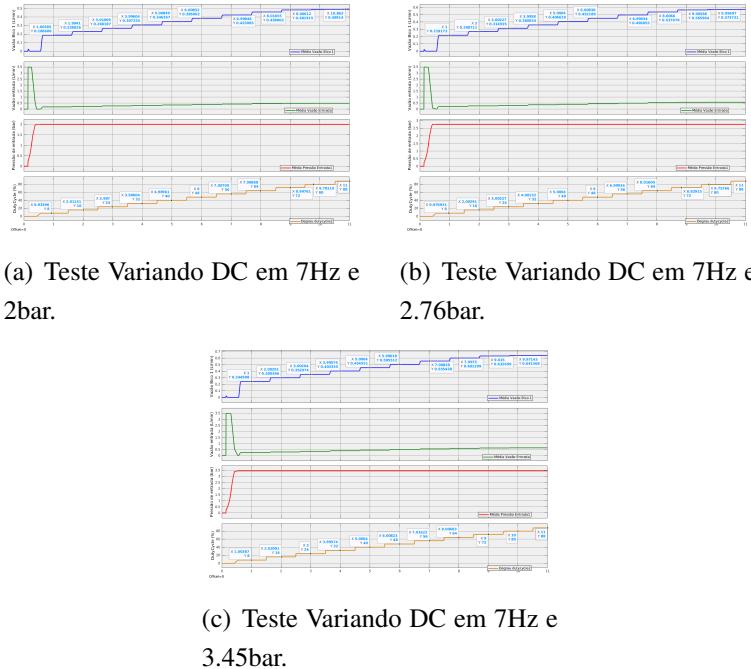


Figura 34: Gráficos relação DC e Vazão(L/min) em 7Hz em 2bar, 2.76bar e 3.45bar simulado no *Simulink*

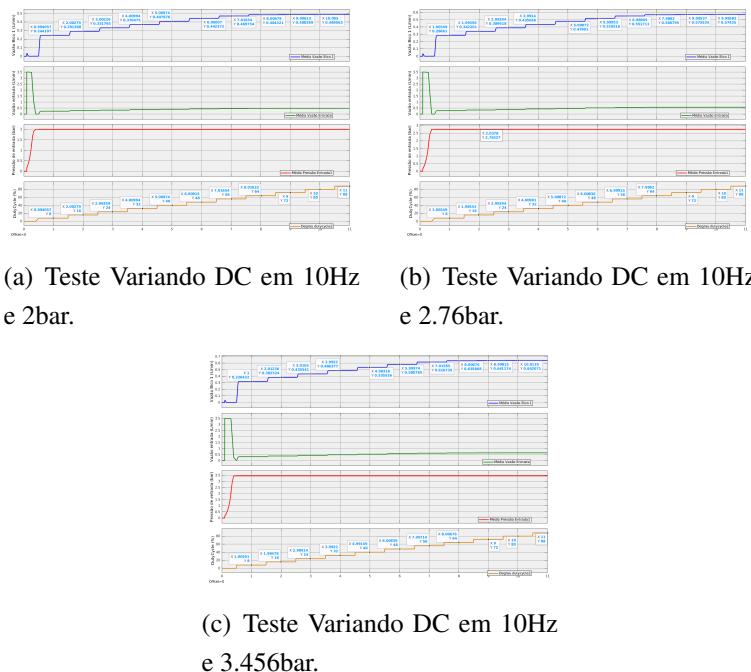


Figura 35: Gráficos relação DC e Vazão(L/min) em 10Hz em 2bar, 2.76bar e 3.45bar simulado no *Simulink*

Analizando a Figura 33, é possível concluir que existe uma relação entre o *DC* e a *Vazão (L/min)* nas três faixas de pressão: 2bar (Figura 33(a)), 2.76bar (Figura 33(b)) e

*3.45 bar* (Figura 33(c)). Com os gráficos, também é possível concluir que, nas três faixas de pressão, quando o *DC* está em 100% (aproximadamente 80% do *DC*, devido ao atraso mecânico), a vazão é a vazão total com base na especificação da ponta de pulverização (Figura 26).

Já na Figura 34, usando uma frequência de *7Hz*, o comportamento da *Vazão (L/min)* em função do tempo comparado com *DC* em função do tempo, a *Vazão (L/min)* a partir de 80% *DC* (aproximadamente 72%) tem pouca variação de vazão, se mantendo para as demais pressões neste mesmo cenário (*7hz* em *2bar* (Figura 34(a)), *2.76bar* (Figura 34(b)) e *3.45bar* (Figura 34(c))).

Por último, na Figura 35, foi utilizada uma frequência de *10Hz* e é possível analisar, primeiramente, que a vazão em 10% de *DC* é maior do que em *5Hz* e *7Hz*, devido à resposta da solenoide. Analisando a Figura 35(a), por exemplo, a vazão a partir de 80% de *DC* varia muito pouco. Isso se mantém para as outras pressões (*2.76bar* (Figura 35(b)) e *3.45bar* (Figura 35(c))).

É possível concluir que a simulação da válvula solenoide nas 3 frequências e nas 3 pressões de trabalho comportou-se bem, sendo possível a atualização para PWM e controle de fluxo, sugerido por Piñeiro (2022) e Terra (2020).

### 3.3 Métodos para a realização dos experimentos no aquário de simulação

Para os experimentos no aquário de simulação, foram utilizados quatro modelos de válvulas solenoides mencionados anteriormente: as válvulas solenoides de modelo on/off, sendo três delas de baixo custo e uma que serviria de referência, pois é usada para acionamento via PWM em pulverizadores compatíveis.

Inicialmente, realizou-se a calibração dos sensores de pressão e vazão com o método de comparação. O sensor de pressão foi calibrado em uma bancada de calibração, sendo necessário compensar 0,10 bar a cada medição.

Quanto ao sensor de vazão, que opera em vazões de 1 a 30 L/min, foi necessário analisá-lo pelo princípio de conservação da massa, considerando que, se a massa específica ( $\rho$ ) é uniforme, as vazões nas saídas são iguais (equação 5 e 6)(Kwong, 2017). Como foram utilizadas pontas de pulverização idênticas para os dois bicos do aquário, para determinar a vazão de um sob o regime de PWM, mantinha-se o outro sempre aberto. Assim, foi possível identificar a vazão do bico que operava por PWM.

$$Q_T = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n \quad (5)$$

$$Q_2 = Q_T - Q_1 \quad (6)$$

Com isso ajustado os testes realizados foram feitos em todas as válvulas(Figura27) da mesma maneira em vários cenários, descritos na Tabela 1.

Tabela 1: Cenário de testes

<b>Válvula</b>	<b>Frequência (Hz)</b>	<b>DutyCycle(%)</b>	<b>Pressão(bar)</b>	<b>Vazão(L/min)</b>
NA1	5	0-100%	2	Vazão medida
NA1	5	0-100%	2.76	Vazão medida
NA1	5	0-100%	3.45	Vazão medida
NA1	7	0-100%	2	Vazão medida
NA1	7	0-100%	2.76	Vazão medida
NA1	7	0-100%	3.45	Vazão medida
NA1	10	0-100%	2	Vazão medida
NA1	10	0-100%	2.76	Vazão medida
NA1	10	0-100%	3.45	Vazão medida
NA2	5	0-100%	2	Vazão medida
NA2	5	0-100%	2.76	Vazão medida
NA2	5	0-100%	3.45	Vazão medida
NA2	7	0-100%	2	Vazão medida
NA2	7	0-100%	2.76	Vazão medida
NA2	7	0-100%	3.45	Vazão medida
NA2	10	0-100%	2	Vazão medida
NA2	10	0-100%	2.76	Vazão medida
NA2	10	0-100%	3.45	Vazão medida
NF	5	0-100%	2	Vazão medida
NF	5	0-100%	2.76	Vazão medida
NF	5	0-100%	3.45	Vazão medida
NF	7	0-100%	2	Vazão medida
NF	7	0-100%	2.76	Vazão medida
NF	7	0-100%	3.45	Vazão medida
NF	10	0-100%	2	Vazão medida
NF	10	0-100%	2.76	Vazão medida
NF	10	0-100%	3.45	Vazão medida
Teejet	5	0-100%	2	Vazão medida
Teejet	5	0-100%	2.76	Vazão medida
Teejet	5	0-100%	3.45	Vazão medida
Teejet	7	0-100%	2	Vazão medida
Teejet	7	0-100%	2.76	Vazão medida
Teejet	7	0-100%	3.45	Vazão medida
Teejet	10	0-100%	2	Vazão medida
Teejet	10	0-100%	2.76	Vazão medida
Teejet	10	0-100%	3.45	Vazão medida

### **3.4 Filtragem e tratamento dos dados coletados**

Os dados coletados pelos sensores possuem muitos ruídos, devido à utilização das fontes de colmeia e da bomba de diafragma, e também pelo sensor de vazão captar leituras de quando o sinal do PWM na válvula estava em nível baixo. Logo, a vazão lida era 0L/min. Os arquivos dos dados coletados, para filtragem e criação dos gráficos de análise, estão no Anexo C.

## **4 RESULTADOS OBTIDOS**

Com os testes realizados conforme descrito na Seção 3.3, primeiramente será feita a análise individual de cada válvula nas três pressões e três frequências, comparando a vazão em relação ao DC em cada cenário.

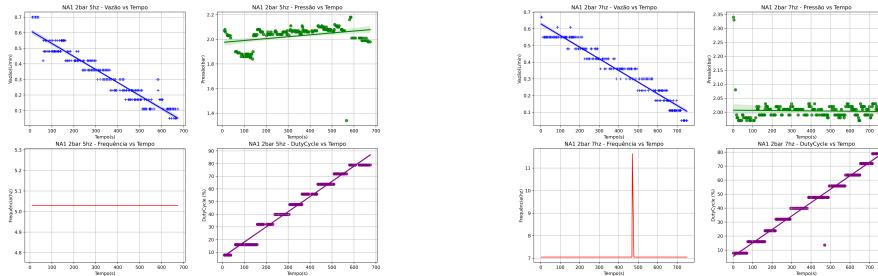
### **4.1 Valores medidos para cada válvula com pressão e frequência diferente**

Nesta seção, será discutido e observado, individualmente, o comportamento de cada válvula em pressão e frequência diferentes. As válvulas de modelo NA, por serem dessa configuração, têm a peculiaridade de a variação da vazão em relação ao DC não seguir na mesma direção, ou seja, à medida que o DC aumenta, a vazão diminui, por serem válvulas NA. Já as válvulas NF, a vazão acompanha o DC, aumentando ou diminuindo na mesma direção.

#### **4.1.1 Válvula NA-1**

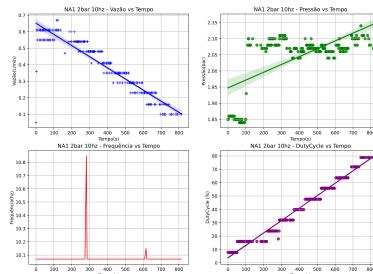
A seguir serão apresentados dados obtidos nas variáveis (Pressão, vazão e DC) em relação ao tempo em 2bar, 2.76bar e 3.45bar usando frequências de 5Hz, 7Hz e 10Hz da válvula *NA-1*.

- Válvula NA-1 em 2bar e 5Hz, 7Hz e 10Hz(Figura 36):



(a) Válvula NA-1 em 2bar 5Hz.

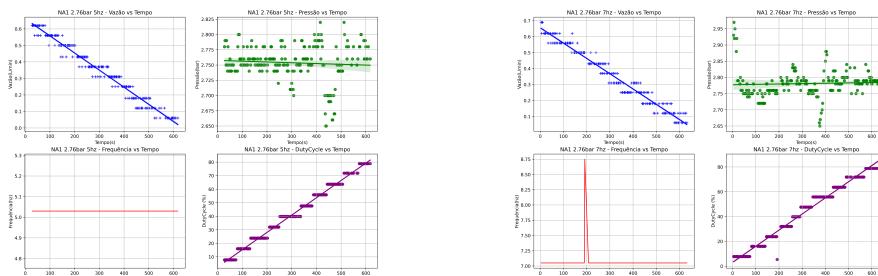
(b) Válvula NA-1 em 2bar 7Hz.



(c) Válvula NA-1 em 2bar 10Hz.

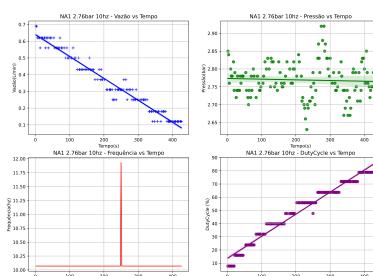
Figura 36: Avaliação dados obtidos válvula NA-1 em 2 bar

- Válvula NA-1 em 2.76bar e 5Hz, 7Hz e 10Hz(Figura 37):



(a) Válvula NA-1 em 2.76bar 5Hz.

(b) Válvula NA-1 em 2.76bar 7Hz.



(c) Válvula NA-1 em 2.76bar 10Hz.

Figura 37: Avaliação dados obtidos válvula NA-1 em 2.76 bar

- Válvula NA-1 em 3.45bar e 5Hz, 7Hz e 10Hz(Figura 38):

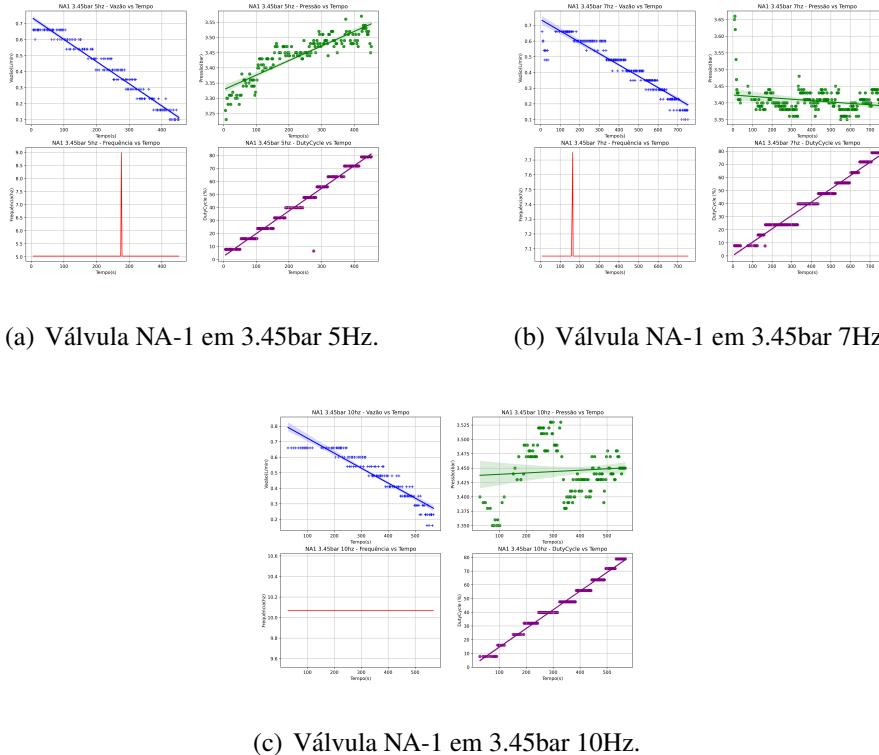


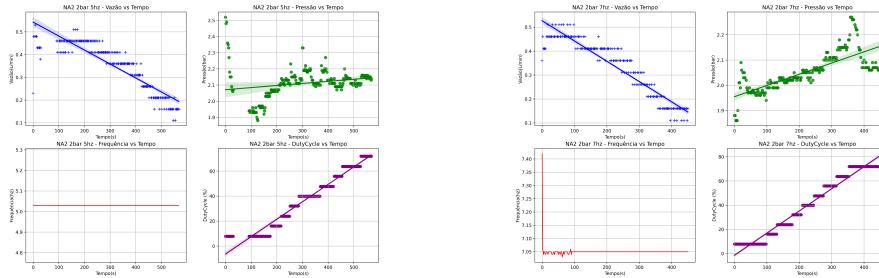
Figura 38: Avaliação dados obtidos válvula NA-1 em 3.45 bar

Por fim, é possível analisar que a vazão tem um comportamento linear decrescente à medida que o DC aumenta. Nas próximas seções, será feita a relação entre DC e a vazão em cada válvula, pressão e frequência.

#### 4.1.2 Válvula NA-2

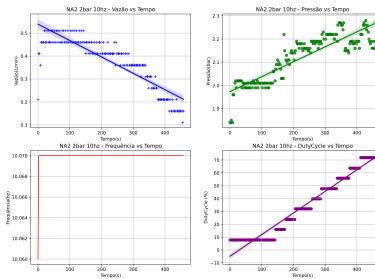
Nesta subseção, será apresentado dados obtidos da válvula NA-2, foi usado os mesmos critérios e cenários desenvolvido para válvula NA-1.

- Válvula NA-2 em 2 bar e 5Hz, 7Hz e 10Hz(Figura 39):



(a) Válvula NA-2 em 2bar 5Hz.

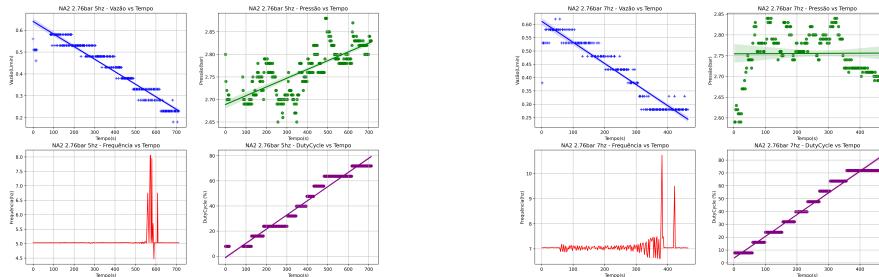
(b) Válvula NA-2 em 2bar 7Hz.



(c) Válvula NA-2 em 2bar 10Hz.

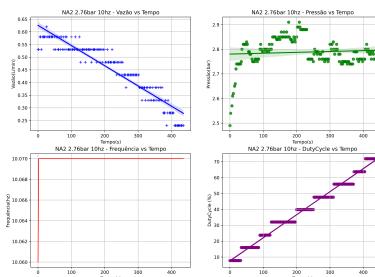
Figura 39: Avaliação dados obtidos válvula NA-2 em 2bar

- Válvula NA-2 em 2.76bar e 5Hz, 7Hz e 10Hz(Figura 40):



(a) Válvula NA-2 em 2.76bar 5Hz.

(b) Válvula NA-2 em 2.76bar 7Hz.



(c) Válvula NA-2 em 2.76bar 10Hz.

Figura 40: Avaliação dados obtidos válvula NA-2 em 2.76bar

- Válvula NA-2 em 3.45bar e 5Hz, 7Hz e 10Hz(Figura 41):

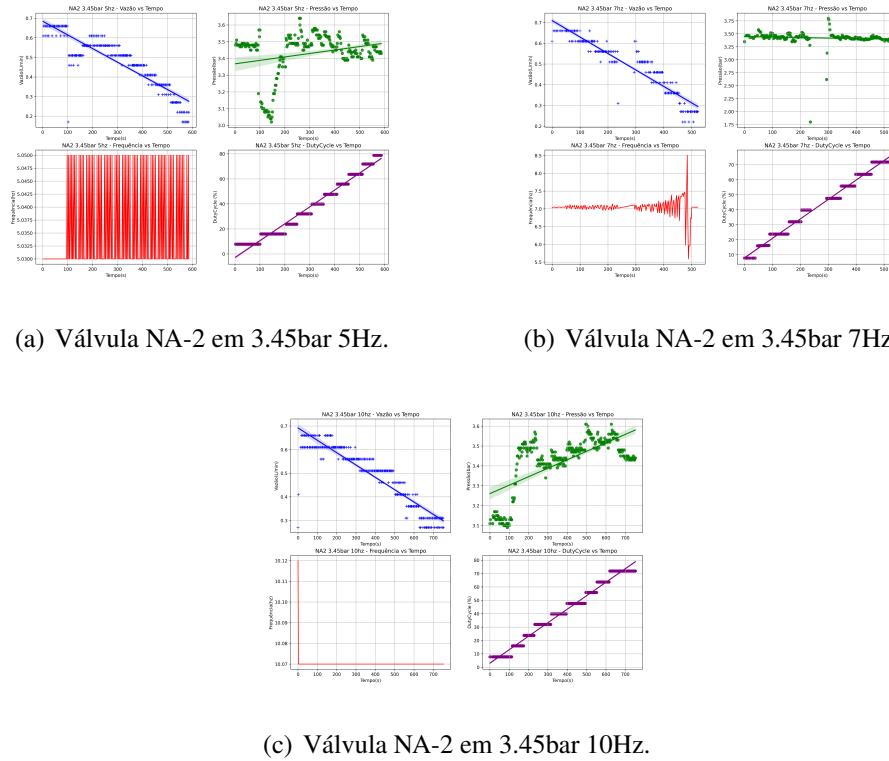


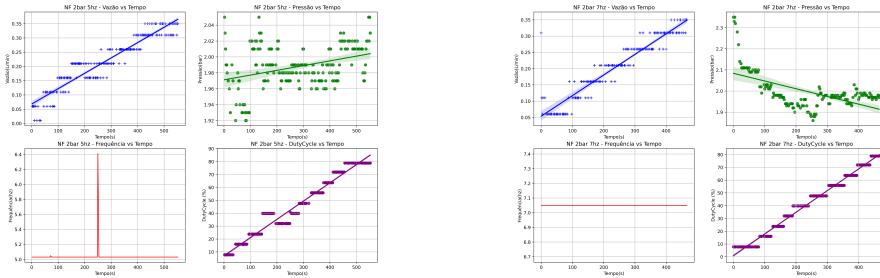
Figura 41: Avaliação dados obtidos válvula NA-2 em 3.45bar

Embora neste modelo de válvula sofra com mais ruído na frequência, a válvula apresentou resultados parecidos com a válvula NA-1, vazão ser linear decrescente em relação ao DC. Chegando bem perto dos máximos de vazão determinada pela ponda de pulverização a cada pressão.

#### 4.1.3 Válvula NF

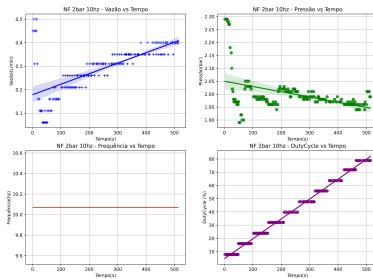
Nesta subseção, será apresentado dados obtidos da válvula NF, foi usado os mesmos critérios e cenários desenvolvido para válvula NA-1 e NA2.

- Válvula NF em 2bar e 5Hz, 7Hz e 10Hz(Figura 42):



(a) Válvula NF em 2bar 5Hz.

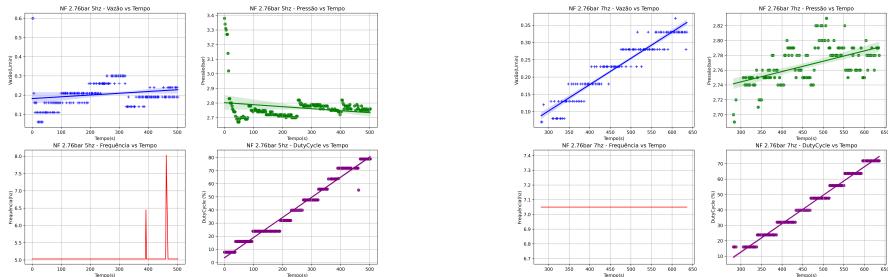
(b) Válvula NF em 2bar 7Hz.



(c) Válvula NF em 2bar 10Hz.

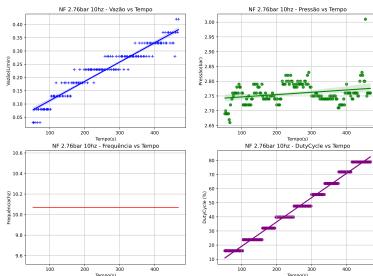
Figura 42: Avaliação dados obtidos válvula NF em 2 bar

- Válvula NF em 2.76bar e 5Hz, 7Hz e 10Hz(Figura 43):



(a) Válvula NF em 2.76bar 5Hz.

(b) Válvula NF em 2.76bar 7Hz.



(c) Válvula NF em 2.76bar 10Hz.

Figura 43: Avaliação dados obtidos válvula NF em 2.76bar

- Válvula NF em 3.45bar e 5Hz, 7Hz e 10Hz(Figura 44):

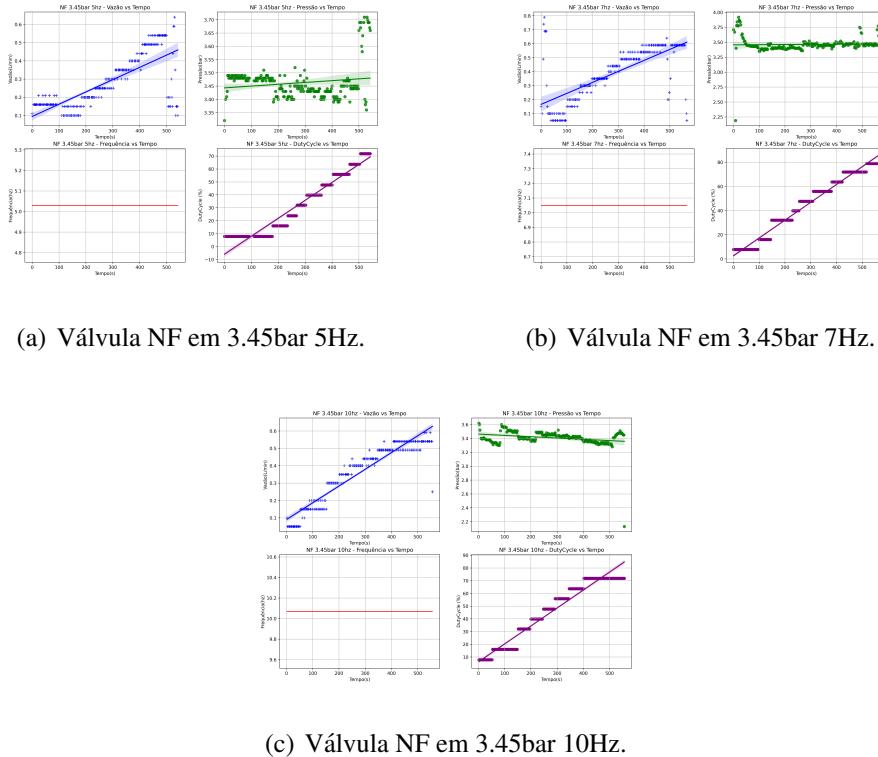


Figura 44: Avaliação dados obtidos válvula NF em 3.45bar

A válvula NF apresentou um comportamento diferente dos outros modelos, não chegando próximos aos valores estabelecidos pela ponta de pulverização, como é possível avaliar nas Figuras 42 e 43. Porém, quando a pressão é maior, como na Figura 44, o comportamento da válvula melhora, chegando próximo aos valores definidos pela ponta de pulverização quando esta está próxima a 100% de DC.

Este comportamento da válvula NF se dá devido à sua construção. Assim como os outros modelos de baixo custo utilizados neste trabalho (NA-1 e NA-2), ela é operada por uma solenoide e mola, possuindo um êmbolo que é uma membrana que equilibra a pressão dos dois lados do êmbolo por meio de um orifício localizado no êmbolo (Figura45)<sup>1</sup>.Sendo assim, quando mais alta a pressão mais rápido é o acionamento da válvula.

---

<sup>1</sup>Embora o embolo da válvula NA-1 não seja igual ao das válvulas NA-2 e NF, possui também esse orifício, sendo característico desse modelo de válvula.

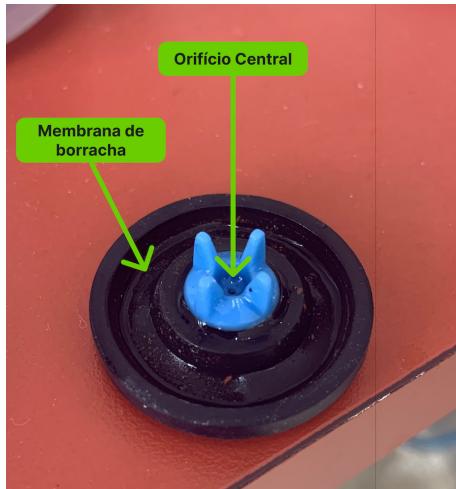


Figura 45: Êmbolo válvula solenoide NA-2 e NF

Outro ponto a ser levantado da válvula NF é como fica o ângulo de abertura da ponta de pulverização quando aplicado PWM. Como é possível observar na Figura 46, o ângulo está significativamente abaixo de 110°, aproximadamente 84.32°. Isso representa uma diferença de quase 25%, ou seja, impossibilitando o uso dela para esse fim<sup>2</sup>.

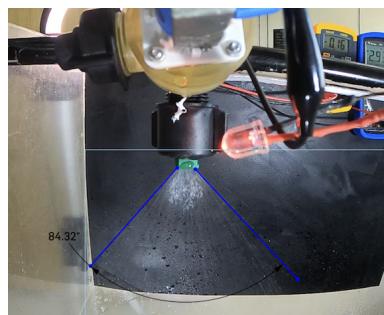


Figura 46: Ângulo de abertura com bico leque usando válvula NF, quando aplicado PWM

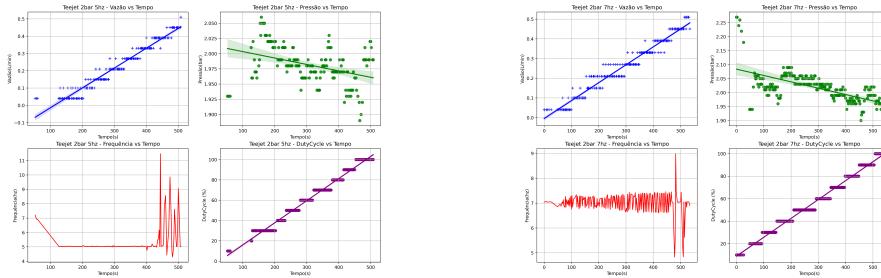
#### 4.1.4 Válvula Teejet

Por ultimo foi testado o modelo da Teejet, testado no mesmos cenários dos outros modelos.

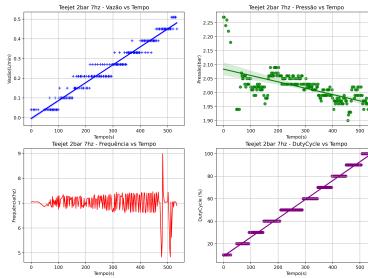
- Válvula Teejet em 2bar e 5Hz, 7Hz e 10Hz(Figura 47):

---

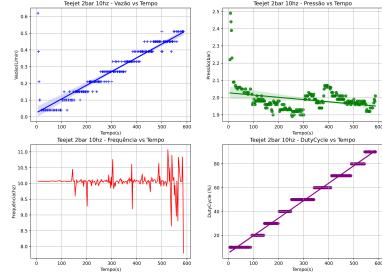
<sup>2</sup>Não houve alteração no ângulo de abertura dos outros modelos testados



(a) Válvula Teejet em 2bar 5Hz.



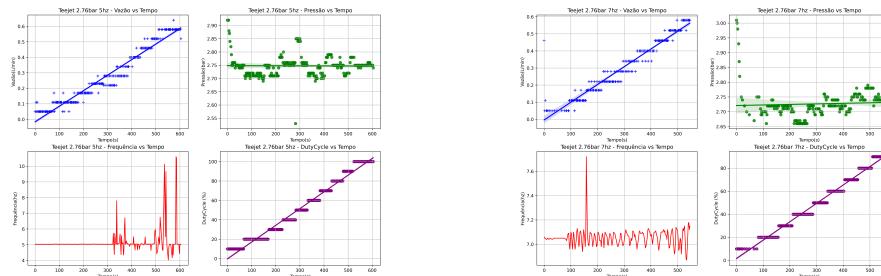
(b) Válvula Teejet em 2bar 7Hz.



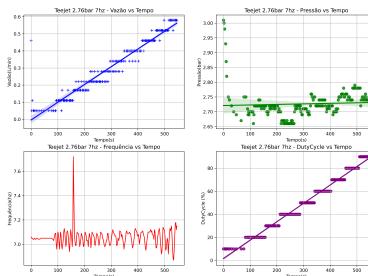
(c) Válvula Teejet em 2bar 10Hz.

Figura 47: Avaliação dados obtidos válvula Teejet em 2 bar

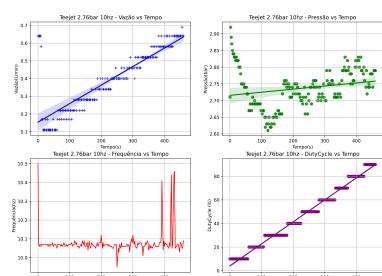
- Válvula Teejet em 2.76bar e 5Hz, 7Hz e 10Hz(Figura 48):



(a) Válvula Teejet em 2.76bar 5Hz.



(b) Válvula Teejet em 2.76bar 7Hz.



(c) Válvula Teejet em 2.76bar 10Hz.

Figura 48: Avaliação dados obtidos válvula Teejet em 2.76bar

- Válvula Teejet em 3.45bar e 5Hz, 7Hz e 10Hz(Figura 49):

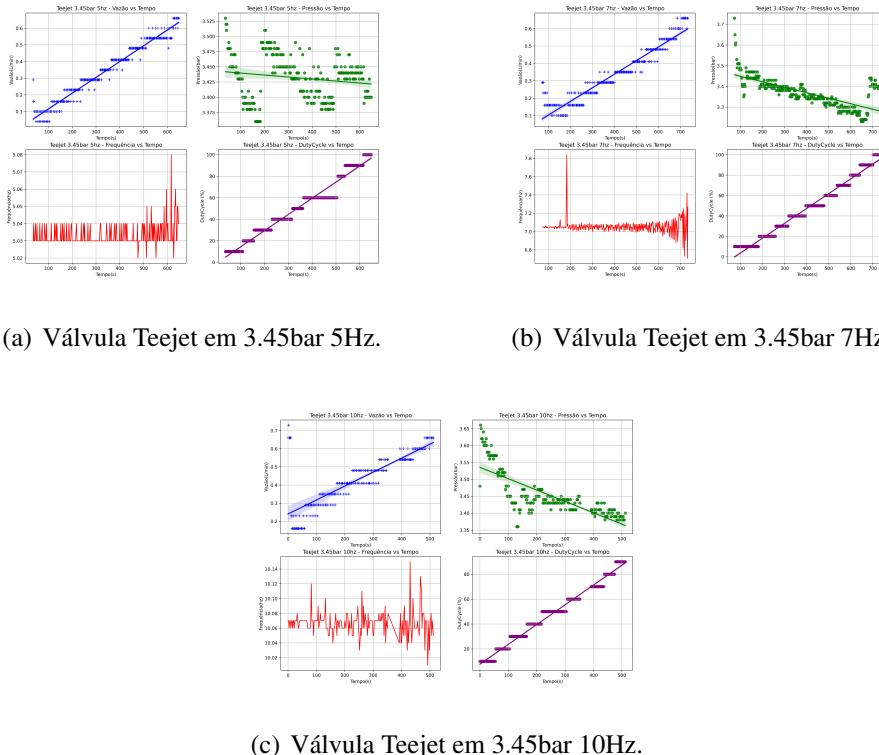


Figura 49: Avaliação dados obtidos válvula Teejet em 3.45bar

É possível analisar que a válvula Teejet, por ser comercial e não ser de Diafragma, se comporta melhor no controle da vazão; porém, devido à sua bobina, acaba causando muita interferência. Podemos ver também nas imagens que a válvula tem um comportamento linear.

## 4.2 Análise da Relação da Vazão entre o DC em Válvulas sob Diferentes Pressões e Frequências

Nesta seção, será discutida a relação entre a vazão e o DC em frequências e pressões diferentes. O foco será em discutir se a frequência utilizada em cada válvula faz diferença no controle da vazão.

Para cada válvula, são apresentados três subgráficos que ilustram a relação entre a Vazão e o DC, operando nas pressões de 2bar, 2,76bar e 3,45bar. Em cada subgráfico, é representada a *Referência* (linha preta tracejada), correspondendo ao valor fornecido pelo fabricante da ponta de pulverização na respectiva faixa de pressão, quando o bico está 100% aberto. Além disso, em cada subgráfico, são representadas as três frequências: 5Hz (em azul), 7Hz (em verde) e 10Hz (em vermelho)

#### 4.2.1 Válvula NA-1

Na Figura 50, podemos ver que, em 2 bar, o uso das três frequências não faz muita diferença no resultado da vazão, gerando médias parecidas.

Já na pressão de 2.76 bar, temos uma resposta diferente. Em 10 Hz, mediram-se valores de vazão maiores que os determinados pelo fornecedor, também não chegando a valores muito baixos de vazão. Em 5 Hz e 7 Hz, as linhas de regressão são parecidas; porém, em 5 Hz, neste caso, funcionou melhor.

Por fim, em 3.45bar, ficou mais evidente que, em 10Hz, para esta válvula, o funcionamento não é muito eficaz, alcançando valores acima do máximo e não conseguindo atingir vazões menores. Por outro lado, em 5Hz e 7Hz, a válvula conseguiu desempenhar um trabalho satisfatório, gerando uma linha de regressão aceitável, alcançando valores baixos de vazão e próximos à vazão recomendada máxima.

Por fim, podemos concluir também que, em pressões mais altas, é necessário mais DC para a ativação da válvula de modo eficaz. Como podemos ver nos gráficos, a vazão começa a alterar significativamente acima de 20% de DC, antes disso, a vazão fica muito próxima da referência. Outro ponto importante é que em frequências maiores, a válvula é eficaz em relação a outras faixas de frequência. Isso se dá ao atraso mecânico da válvula, que quanto maior a frequência, mais significativo será o atraso, impactando diretamente a operação por PWM e a vazão.

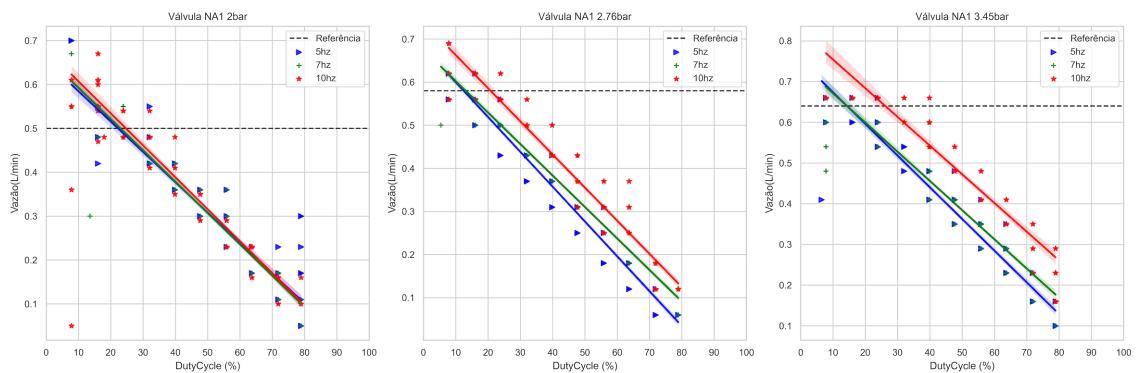


Figura 50: Válvula solenoide NA-1 com pressão em 2bar, 2.76bar e 3.45bar operando em 5Hz, 7Hz e 10Hz

#### 4.2.2 Válvula NA-2

Com base na Figura 51, observamos que algumas características da válvula NA-1 se mantêm. Porém, como são válvulas diferentes, existem algumas diferenças. Por exemplo, não há muitos valores acima da referência, e a válvula começa a variar a vazão em DC menores. Mas a válvula NA-1 consegue alcançar abaixo de 0.1 L/min.

Observando a válvula em 2bar, o uso das três frequências não altera significativamente

a vazão. Por outro lado, em 2.76 bar, o uso de frequências diferentes começa a resultar em linhas de regressão distintas. Por fim, em 3.45bar, há diferença entre as frequências; porém, agora a válvula em 7Hz e em 10Hz apresenta resultados parecidos, entregando uma vazão melhor em 5Hz

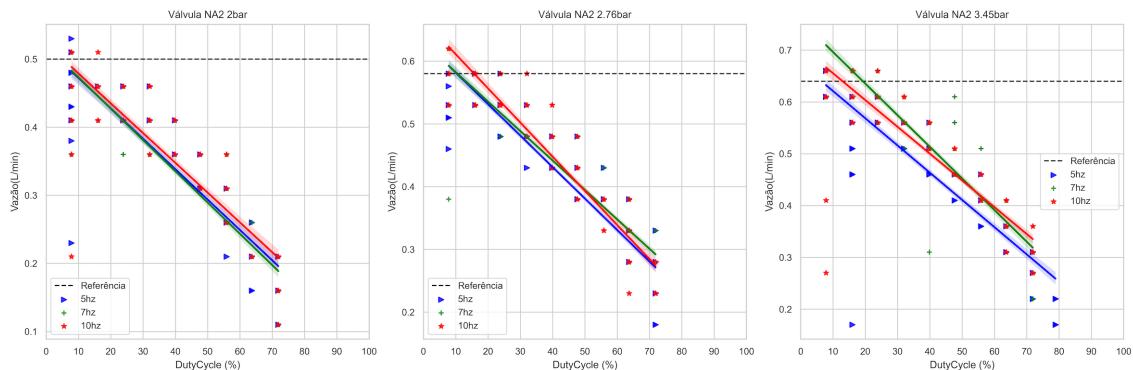


Figura 51: Válvula solenoide NA-2 com pressão em 2bar, 2.76bar e 3.45bar operando em 5Hz, 7Hz e 10hz

#### 4.2.3 Válvula NF

Analizando o gráfico da válvula NF (Figura 52), como já observado na seção 4.1.3, o seu desempenho é pouco eficaz, já que não consegue alcançar as vazões indicadas pela ponta de pulverização. É possível observar que em 2bar, usando uma frequência de 10 Hz, consegue alcançar valores maiores de vazão. E em 5Hz e em 7Hz, as medições são praticamente as mesmas.

Em 2,76 bar, usando uma frequência de 5Hz, a válvula se comportou atípicamente, reduzindo a vazão média acima de 50% de DC. Porém, em outras frequências, se manteve linear e crescente, porém não chegando acima de 0,45 L/min. Por fim, em 3,45 bar, a válvula obteve resultados melhores, onde em 10 Hz conseguiu chegar a vazões menores e chegando próximo da referência. Já em 5Hz, teve resultados pouco eficazes, variando a vazão próximo a 70%. E em 7Hz, a válvula chegou a valores aceitáveis, ficando na média entre 5Hz e 10Hz.

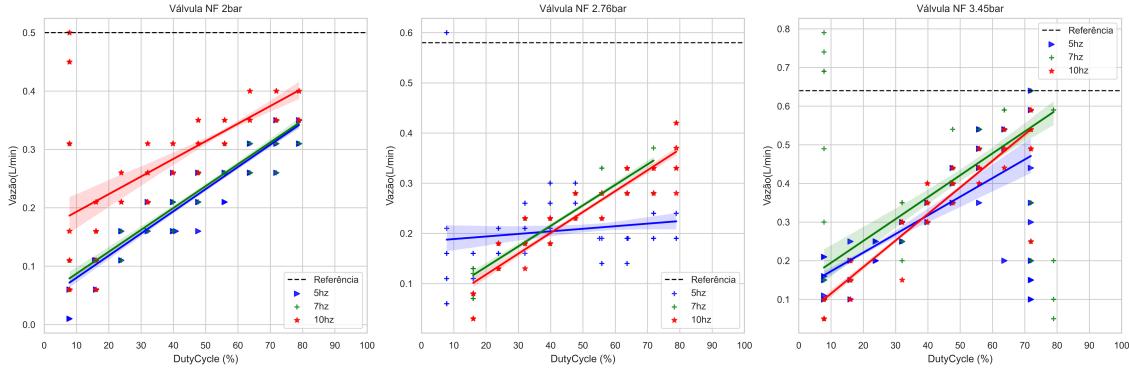


Figura 52: Válvula solenoide NF com pressão em 2bar, 2.76bar e 3.45bar operando em 5Hz, 7Hz e 10Hz.

#### 4.2.4 Válvula Teejet

Por fim, a válvula Teejet (Figura 53) apresenta um comportamento muito satisfatório, por se tratar de uma válvula de núcleo flutuante, muito indicada para acionamentos mais rápidos. Observando as imagens, podemos concluir que a válvula consegue entregar faixas de vazão pequenas em baixas frequências e, em todas as frequências, a válvula consegue alcançar as vazões máximas determinadas pela ponta de pulverização.

É possível observar também que as linhas de regressão, em 2bar, estão relativamente afastadas. À medida que a pressão aumenta, o comportamento nas frequências de 5Hz e 7Hz são similares, se afastando da linha de 10Hz, tendo um desempenho melhor.

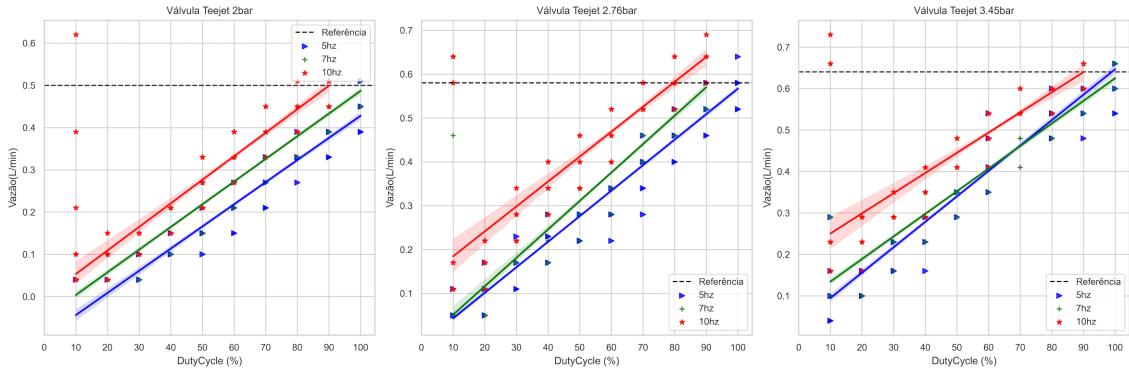


Figura 53: Válvula solenoide Teejet com pressão em 2bar, 2.76bar e 3.45bar operando em 5Hz, 7Hz e 10Hz.

### 4.3 Comparativo dos modelos de válvula

Nesta seção, será feita a análise comparativa entre os modelos de válvula solenoide. Primeiramente, é realizada a análise entre válvulas com o mesmo princípio de aciona-

mento: *NF* (*NF*) e *NA* (*NA*). Os gráficos, assim como os anteriores, possuem a linha de referência da vazão, determinada pela ponta de pulverização, e a pressão.

#### 4.3.1 Válvula NA-1 vs NA-2

Nas Figuras a seguir serão apresentadas o comparativo dentre os modelos de válvula *NA-1* e *NA-2*.

- 5hz:

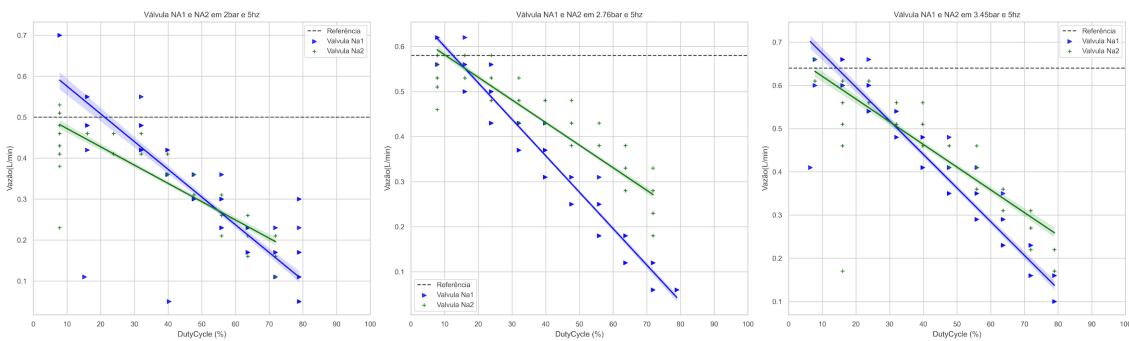


Figura 54: Comparativo da válvula *NA-1* vs *NA-2* em 5Hz em 2bar, 2.67bar e 3.45bar.

Com base na Figura 54, podemos observar que, em 5Hz e com pressões de 2 bar, 2,76 bar e 3,45 bar, a válvula *NA-1* se comporta melhor do que a *NA-2*, apresentando um maior range na vazão.

- 7hz:

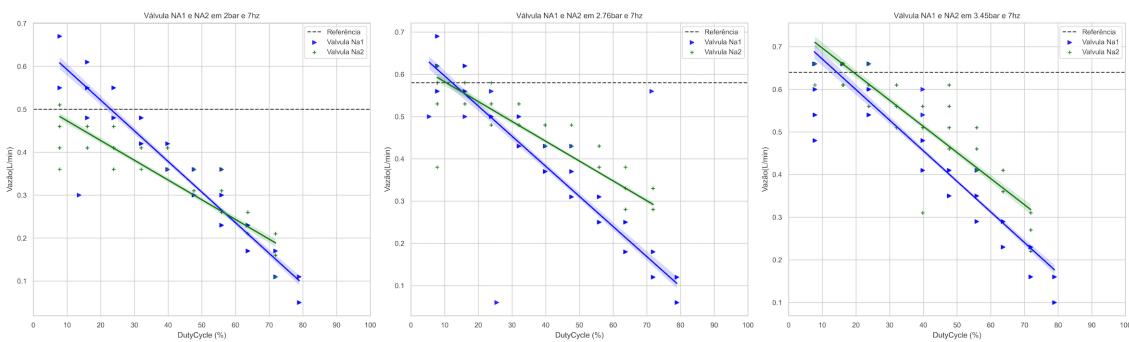


Figura 55: Comparativo da válvula *NA-1* vs *NA-2* em 7Hz em 2bar, 2.67bar e 3.45bar.

Na Figura 55, agora em 7Hz, observamos que o comportamento da válvula *NA-1* e *NA-2* em 2 bar e em 2,76 bar tem um comportamento similar ao submetido a 5Hz, com exceção de 3,45 bar, que se diferencia por apresentar resultados diferentes de 5Hz.

- 10hz:

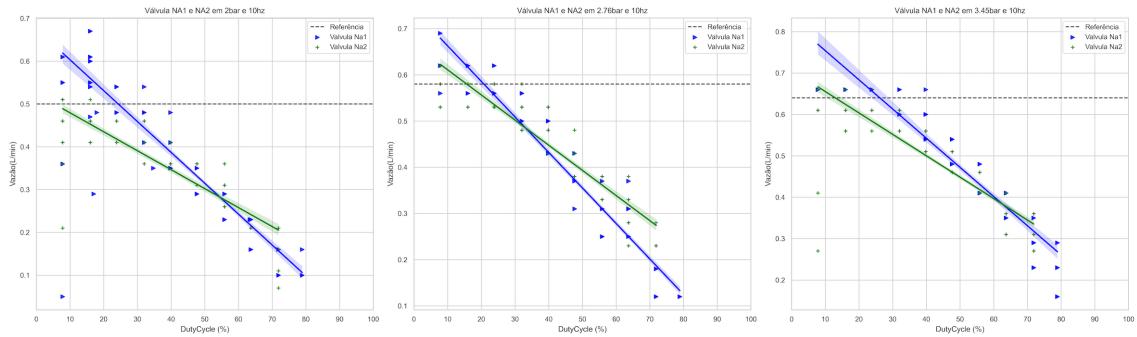


Figura 56: Comparativo da válvula NA-1 vs NA-2 em 10Hz em 2bar, 2.67bar e 3.45bar.

Já na Figura 56, o comportamento das válvulas em 10Hz segue padrões similares nas outras faixas de frequência.

#### 4.3.2 Válvula NF vs Teejet

Embora já tenha sido apresentado que a válvula NF tem um desempenho muito inferior às outras válvulas, nesta subseção, será feita a análise entre a válvula NF e a válvula Teejet.

- 5hz:

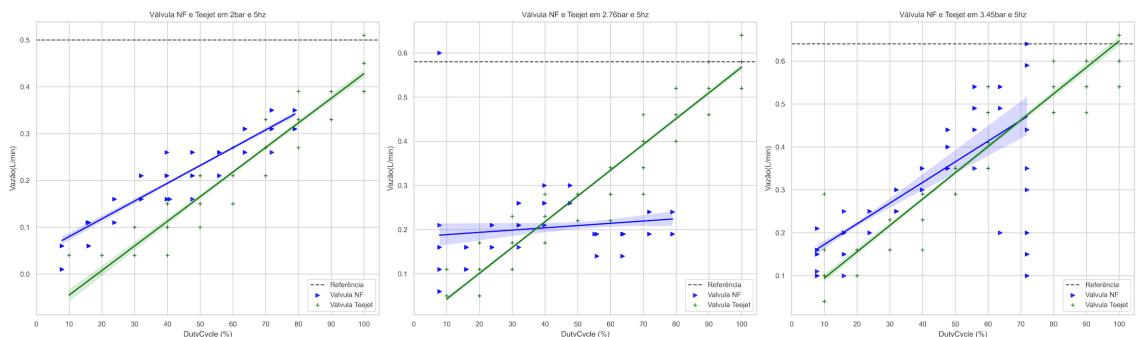


Figura 57: Comparativo da válvula NF vs Teejet em 5Hz em 2bar, 2.67bar e 3.45bar.

Na Figura 57, é possível observar que a vazão na válvula NF, embora tenha um desempenho muito abaixo da válvula Teejet, consegue variar a vazão.

- 7hz:

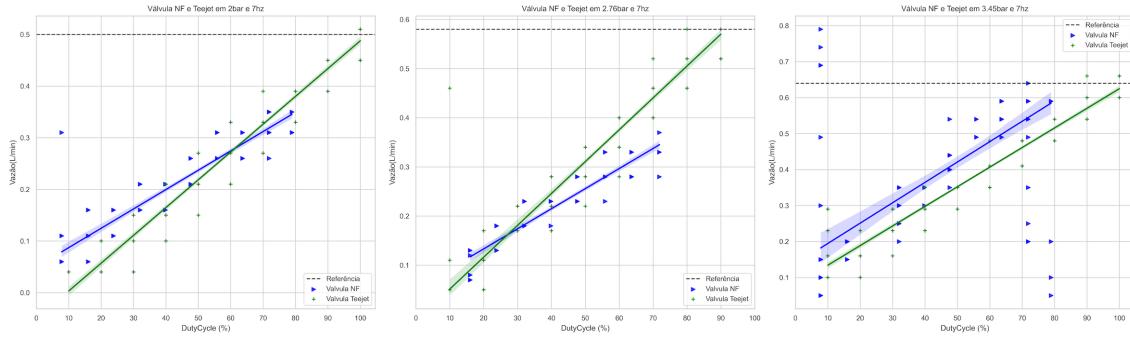


Figura 58: Comparativo da válvula NF vs Teejet em 7Hz em 2bar, 2.67bar e 3.45bar.

Agora em 7Hz, podemos observar que houve uma significativa melhora na vazão da válvula NF, obtendo um comportamento melhor em 3.45bar. Em frequências mais baixas, é possível observar que a válvula não consegue chegar na vazão de referência dada pela ponta de pulverização.

- 10hz:

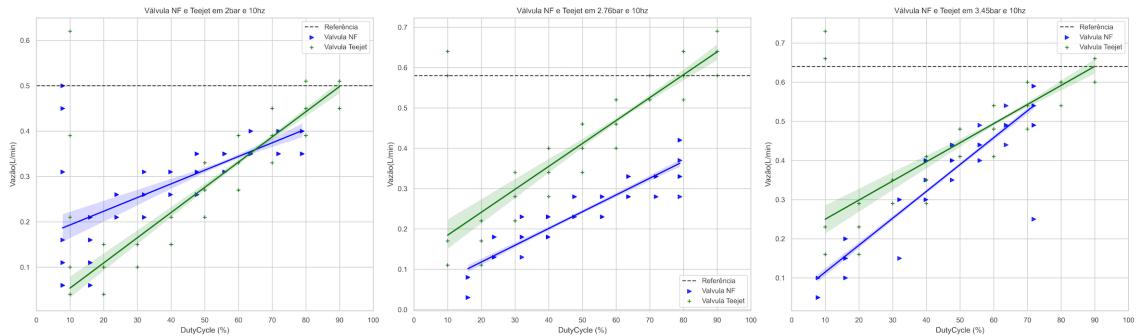


Figura 59: Comparativo da válvula NV vs Teejet em 10Hz em 2bar, 2.67bar e 3.45bar.

Já em 10 Hz, a válvula NF não obteve um comportamento melhor em relação a 7Hz, obtendo valores muito distantes da válvula Teejet.

#### 4.3.3 Comparativo de todos modelos de válvulas

Por fim, nesta subseção, será feita a análise de todos os modelos de válvulas solenoides em 5Hz com 2 bar, 2.67 bar e 3.45 bar, repetindo-se para 7Hz e 10Hz. Vale ressaltar que, como são modelos de válvulas solenoides diferentes (*NF* e *NA*), a representação no gráfico se mostra de maneira diferente, conforme já explicado anteriormente.

- 5Hz:

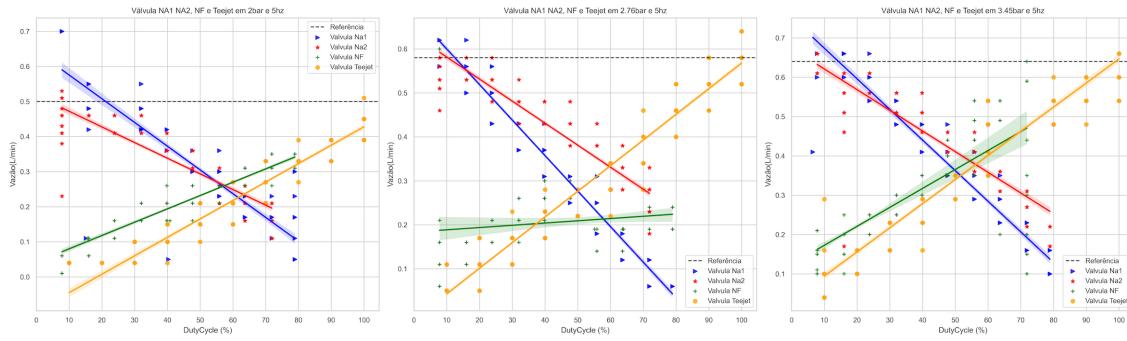


Figura 60: Comparativo da válvula NA-1 vs NA-2 vs NF vs Teejet em 5Hz em 2bar, 2.67bar e 3.45bar.

Na Figura 60, podemos observar a linha de regressão. As válvulas com a configuração NA apresentam melhor comportamento, mesmo à medida que a pressão aumenta, quando comparadas com a válvula Teejet.

- 7hz:

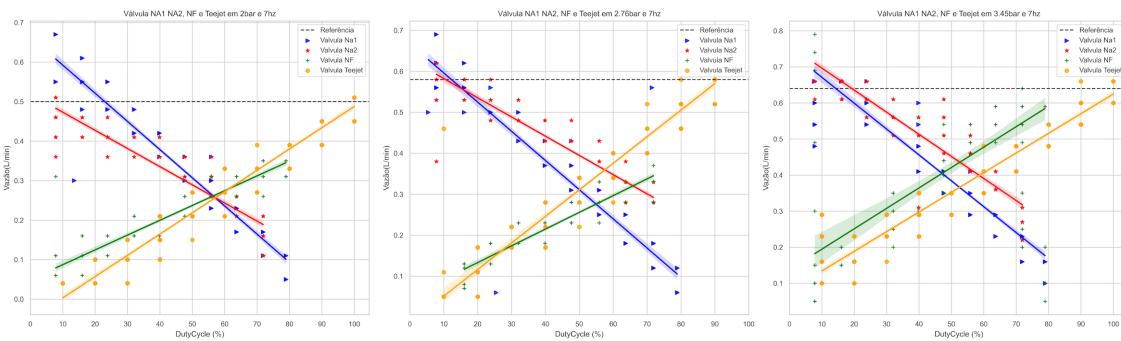


Figura 61: Comparativo da válvula NA-1 vs NA-2 vs NF vs Teejet em 7Hz em 2bar, 2.67bar e 3.45bar.

Agora, na Figura 61 o comportamento dentre as válvulas se mantém em certo grau em relação à 5hz.

- 10hz:

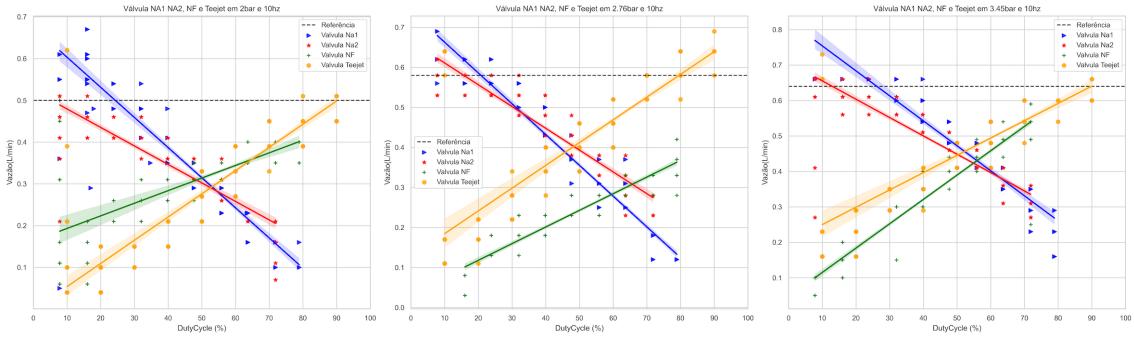


Figura 62: Comparativo da válvula NA-1 vs NA-2 vs NF vs Teejet em 10Hz em 2bar, 2.67bar e 3.45bar.

Em 10 Hz, é possível observar que os resultados variam mais quando comparados à diferença entre 5 Hz e 7 Hz, devido à constante de tempo da válvula.

#### 4.4 Conclusão dos testes

Finalmente, é possível concluir que as válvulas NA se comportaram melhor quando comparadas aos resultados do modelo Teejet, já que esse modelo tem a configuração de acionamento mais rápida, devido à sua configuração. Ou seja, o retorno na válvula é dado por mola, e o avanço ou fechamento é realizado pela bobina que é acionada. Portanto, a válvula consegue operar com menos tensão média aplicada sobre ela com PWM. Já o modelo NF depende de pressões maiores para conseguir fazer o retorno do êmbolo, ou a abertura feita pela bobina.

Também é possível concluir que as válvulas NA1 e NA2 apresentam diferenças significativas no que se refere à faixa de vazão que conseguem atingir, sendo a válvula NA-1 mais eficiente que a NA-2. Embora ambas consigam operar com PWM e alterar a vazão, com a válvula NA-2 é possível atingir um espectro mais amplo de faixas de vazão.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo, serão apresentadas as conclusões dos experimentos realizados no trabalho, levando em conta o desempenho das válvulas de baixo custo para aplicação de PWM para controle de vazão em pulverizadores agrícolas, e serão levantados os trabalhos futuros.

### **5.1 Conclusão**

Com esse estudo, foi possível compreender o funcionamento de válvulas para a modulação de largura de pulso para controle de vazão e sua eficiência. Uma vez que modelos de válvulas comerciais, indicados para fazer essa operação, chegam a custar cerca de R\$1.500,00 e são muito difíceis de serem encontrados em lojas agrícolas, dificultando o acesso. Além disso, se formos para o lado da agricultura familiar, se uma válvula solenoide custa R\$ 1.500,00 e, na média, pulverizadores de pequeno porte contêm em média 20 bicos, para equipar um pulverizador com essas válvulas (sem pensarmos no controle das válvulas) o agricultor precisaria investir aproximadamente R\$30.000,00. Sendo que um pulverizador de baixo custo chega a custar cerca de R\$15.000,00, ou seja, o agricultor teria que investir mais que o dobro do valor de seu equipamento para equipá-lo com funcionalidades de aplicação à taxa variada, pensando no investimento das válvulas mais o sistema de controle delas, inviabilizando o uso desse tipo de tecnologia para a agricultura familiar. Por outro lado, usando válvulas de baixo custo, que custam cerca de R\$100,00, com o sistema de acoplamento no porta-bico para fazer o acionamento, no mesmo cenário o agricultor precisaria investir cerca de R\$ 2.000,00, uma grande diferença para o bolso do agricultor familiar.

Sobre o desempenho das válvulas, como levantado por (Piñeiro, 2022) em sua simulação, as válvulas solenóide do tipo NA apresentam um desempenho melhor em comparação com NF devido ao seu tempo de resposta quando acionadas eletricamente, embora as válvulas NA não tenham um comportamento tão satisfatório quanto à válvula da Teejet, por se tratar de uma válvula comercial destinada a esse fim. Outro ponto importante é sobre a relação da vazão e a frequência; foi possível analisar que a frequência

influencia a operação da válvula, e nos modelos testados, houve um melhor desempenho da válvula em 5 Hz e em 7 Hz. Para sua faixa de preço, o desempenho dela se justifica, ficando bem acima do esperado. E quando avaliamos a simulação no *Simulink*, é possível afirmar que os resultados obtidos na simulação estão bem próximos aos valores obtidos nos modelos NA.

Em resumo, a válvula que melhor desempenhou foi a válvula NA-1, pois conseguiu chegar bem próximo às vazões máximas para cada pressão e também atingir valores menores de vazão, obtendo um range de trabalho maior em relação à válvula NA-2 e NF. Não se descarta o uso do modelo NA-2, contudo, em comparação com o modelo NA-1, seu resultado não foi melhor, mas ficou bem próximo. Já o modelo NF não é indicado, além de apresentar problemas no acionamento quando está sendo operado por PWM, não conseguindo manter a abertura da calda de pulverização perto do valor indicado pela ponta de pulverização, resultando em uma calda que não consegue fazer a cobertura de aplicação adequada. No entanto, esse modelo pode ser utilizado para aplicação on/off, considerando seu tempo de atraso.

## 5.2 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros é proposto:

- Realizar teste de velocidade de acionamento com o uso de pressão no sistema para ajustar o modelo criado.
- Realizar mais testes e levantar o desvio padrão e curvas de histerese dos modelos de válvula.
- Fazer testes de estresse em válvulas para avaliar a vida útil e desgaste.
- Realizar testes com outros modelos de válvulas.
- Analisar o comportamento do acionamento por PWM em um sistema de pulverização real.
- Realizar acionamento à taxa variada ao longo da barra, ou seja, obter dados de velocidade e ângulo de curva do pulverizador e variáveis ao longo da barra de pulverização, a média da vazão, obtendo uma taxa de aplicação uniforme por metro quadrado.
- Realizar estudo do tamanho de gota para cada faixa de frequência e DC.

## REFERÊNCIAS

- Akesson WE NB & Yates.* Pesticide application equipment and techniques. 1979.
- Bassoi Luís Henrique, Inamasu Ricardo Yassushi, Campos Bernardi Alberto Carlos de, Vaz Carlos Manoel Pedro, Speranza Eduardo Antonio, Cruvinel Paulo Estevão.* Agricultura de precisão e agricultura digital // TECCOGS: Revista Digital de Tecnologias Cognitivas. 2019. 20.
- Boaretto Antonio Enedi.* A evolução da população mundial, da oferta de alimentos e das ciências agrárias // Revista Ceres. 2009. 56, 4. 513–526.
- Chaim Aldemir.* Pulverização Eletrostática: principais processos utilizados para eletrificação de gotas // Embrapa Meio Ambiente Jaguariúna. 2006.
- Chain A.* História da pulverização // Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente. 1999.
- Cordeiro Luciane.* Quase metade das aplicações de agrotóxicos é desperdiçada por erros — g1.globo.com. 2016. [Accessed 13-Jun-2023].
- EMBRAPA . Agrotóxicos no Brasil.* 2021. [Accessed 14-Jun-2023].
- Ess Daniel R, Parsons Samuel D, Medlin Case R.* Implementing Site-Specific Management: Sprayer Technology—Controlling Application // PURDUE UNIVERSITY. 2001.
- Ganzelmeier Heinz, Rautmann Dirk, others .* Drift, drift reducing sprayers and sprayer testing // Aspects of Applied Biology. 2000. 57. 1–10.
- Ghafar Afif Shazwan Abdul, Hajjaj Sami Salama Hussen, Gsangaya Kisheen Rao, Sultan Mohamed Thariq Hameed, Mail Mohd Fazly, Hua Lee Seng.* Design and development of a robot for spraying fertilizers and pesticides for agriculture // Materials Today: Proceedings. 2023. 81. 242–248.
- Giles Durham K, Comino John A.* Variable flow control for pressure atomization nozzles // SAE transactions. 1989. 237–249.

*Hall Tobin.* Flow control of agricultural spraying machines: a thesis in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Engineering in Mechatronics, Massey University, Palmerston North, New Zealand. 2016.

*Han Shufeng, Hendrickson Larry L, Ni Bingcheng, Zhang Qin.* Modification and testing of a commercial sprayer with PWM solenoids for precision spraying // Applied Engineering in Agriculture. 2001. 17, 5. 591.

*IBGE Censo Agropecuário 2017.* IBGE - Censo Agro 2017 — censoagro2017.ibge.gov.br. 2017. [Accessed 13-Jun-2023].

*ISA ANSI.* ISA-5.1-2009 Instrumentation Symbols and Identification Standard // International Society of Automation. 2009.

*Inamasu Ricardo Y, Bernardi AC de C.* Agricultura de precisão // BERNARDI, ACC; NAIME, JM; RESENDE, AV; BASSOI, LH. 2014. 21–33.

*Jacto . Pulverizador agrícola: tudo o que você precisa saber.* apr 2021.

*Jacto . Confira os principais tipos de pulverizadores do mercado.* may 2023a.

*Jacto . Pontas de pulverização: saiba como escolher.* jun 2023b.

*Kart Diagram Source Brain.* Pulse width modulation // ROHINI COLLEGE OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY. 2001.

*Kwong Wu Hong.* Fenômenos de transportes: mecânica dos fluidos // Livros publicados na coleção UAB-UFSCar. 2017.

*Liu Hui, Zhu Heping, Shen Yue, Chen Yu, Ozkan H Erdal.* Development of digital flow control system for multi-channel variable-rate sprayers // Transactions of the ASABE. 2014. 57, 1. 273–281.

*MAGNOJET . Catálogo 2023.* jun 2023.

*Magnojet . Pontas Magnojet.* 2019.

*Molin José Paulo.* Tendências da agricultura de precisão no Brasil // CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, Piracicaba. 2004.

*Parker Hannifin Indústria e Comércio Ltda .* Tecnologia Hidráulica Industrial: Apostila M2001-2 BR. Jacareí, SP, Brasil, 1999. Informações técnicas.

*Piñeiro Mariana Obiedo.* Modelagem e Simulação de uma Válvula Solenoide para um pulverizador agrícola com tratamento localizado dosbicos. Rio Grande, 2022. 2022. 64.

*Rosa Gabrielle R. A.* Controle de pressão em sistemas de pulverização em barras com bicos em serie. Rio Grande, 2018. 2018. 64.

*Silveira Cristiano Bertulucci.* O que é PWM e Para que Serve? nov 2016.

*Taghizadeh M, Ghaffari A, Najafi F.* Modeling and identification of a solenoid valve for PWM control applications // Comptes Rendus Mecanique. 2009. 337, 3. 131–140.

*Terra Fábio P, Nascimento Gustavo H do, Duarte Gabrielle A, Drews-Jr Paulo LJ.* Autonomous agricultural sprayer using machine vision and nozzle control // Journal of Intelligent & Robotic Systems. 2021. 102, 2. 38.

*Terra Fábio Pedrotti.* Desenvolvimento de um Protótipo de Baixo Custo para Automação de Pulverizadores Agrícolas. Rio Grande, 2020.

*Wei Zhiming, Zhu Heping, Zhang Zhihong, Salcedo Ramón, Duan Degang.* Droplet size spectrum, activation pressure, and flow rate discharged from PWM flat-fan nozzles // Transactions of the ASABE. 2021. 64, 1. 313–325.

*Wolf Tom.* The Capstan EVO. PWM for the masses. apr 2019. [Accessed 16-Jun-2023].

*Wolf Tom.* Variable rate spraying. Mar 2021. [Accessed 15-Jun-2023].

*Zhu Hang, Lan Yubin, Wu Wenfu, Hoffmann W Clint, Huang Yanbo, Xue Xinyu, Liang Jian, Fritz Brad.* Development of a PWM precision spraying controller for unmanned aerial vehicles // Journal of Bionic Engineering. 2010. 7, 3. 276–283.

**A ANEXO - LEITURA DOS SENSORES VAZÃO,  
PRESSÃO, RTC E SALVAMENTO DO SD COM ARDUINO**

**1**

---

**Algorithm 1** Monitoramento de Vazão, Pressão, RTC e salvamento do SD com Arduino

---

```

1 Inicializar comunicação Serial
Configurar pinos do sensor, PWM e SD
function SETUP
    Inicializar SD
    Inicializar RTC
end function
function LOOP
    Obter data e hora atual
    vazao ← LERVAZAOSERIAL
    Calcular pressao_MPa
    Calcular pressao_Bar
    MEDIRPWM
    Exibir dados na Serial
    SALVARDADOSSD(data, hora, vazao, pressao_Bar, freq, duty)
    Aguardar 2 segundos
end function
function LERVAZAOSERIAL
    if dados disponíveis na Serial then
        Ler e converter vazão para float
        return vazão
    else
        return 0
    end if
end function
function MEDIRPWM
    Medir tempo do sinal alto e baixo
    Calcular frequência e duty cycle
    if tempo total = 0 then
        Definir frequência e duty cycle como 0
    end if
end function
function SALVARDADOSSD(dt, vazao, pressao, freq, duty)
    Abrir arquivo no SD
    if arquivo acessível then
        Escrever dados formatados no arquivo
        Fechar arquivo
    else
        Exibir mensagem de erro
    end if
end function
function PRINTTWODIGITS(number)
    if number < 10 then
        Exibir zero antes do número
    end if
    Exibir número
end function

```

---

## B ANEXO - MEDIÇÃO DE VAZÃO COM ARDUINO 2

---

### **Algorithm 2** Medição de Vazão com Arduino 2

---

**Require:** Sensor de fluxo conectado ao Arduino

**Ensure:** Medição e exibição da vazão ajustada

Iniciarizar comunicação Serial

Configurar pino do sensor de fluxo

**function** INCREMENTO\_PULSOS

    Incrementar contagem de pulsos

**end function**

**function** SETUP

    Definir pino do sensor como entrada com resistor de pull-up

    Anexar interrupção ao pino do sensor

**end function**

**function** LOOP

    Zerar contagem de pulsos

    Habilitar interrupções

    Aguardar 3 segundos

    Desabilitar interrupções

    Calcular vazão baseada na contagem de pulsos

    Ajustar vazão para compensar imprecisões

    Exibir vazão ajustada na Serial

    Aguardar 3 segundos antes da próxima medição

**end function**

---

## **C ANEXO - DADOS COLETADOS, TRATAMENTO E VISUALIZAÇÃO DE DADOS**

Repositório com os dados coletados, e códigos de tratamento e análise dos dados desenvolvida em Python:

Link: <https://github.com/jardelprad0/Tcc.git>

**D ANEXO - VÁLVULA TEEJET 115880-1-12 E-CHEMSAVER**

**FEATURES:**

- ELECTRIC SOLENOID SHUT-OFF VALVE
- VALVE IS NORMALLY CLOSED FOR SAFETY
- MAXIMUM 100 PSI (7 BAR) SPRAYING PRESSURE AT MINIMUM VOLTAGE (12V)
- 0.6 GPM (2.27 LPM) AT 5 PSI (0.34 BAR) PRESSURE DROP
- 0.8 GPM (3.18 LPM) AT 10 PSI (0.69 BAR) PRESSURE DROP
- ALL WETTABLE PARTS ARE STAINLESS STEEL OR VITON® EQUIVALENT
- CURRENT DRAW OF 0.9 AMPS (10 WATTS) AT 12 VOLTS
- VOLTAGE ENERGIZES THE SOLENOID COIL TO OPEN THE VALVE
- REMOVAL OF POWER ALLOWS A SPRING TO CLOSE THE VALVE
- REQUIRES 98552 CABLE w/2-PIN FEMALE SUPERSEAL 1.5 CONNECTOR

**WIRING CHART**

PIN TERMINAL	WIRING
1	(+) POSITIVE
2	(-) NEGATIVE

NOTE: (+) & (-) TERMINALS CAN BE INTERCHANGED.

The diagram shows the TeeJet e-ChemSaver solenoid valve assembly. It consists of a black nozzle body with a spray tip, a black solenoid unit attached to the side, and a black cable connector at the bottom. Dimensions are indicated: the total width is 2.73" (69.3 MM), and the height from the base to the center of the spray tip is 1.85" (47 MM).

**APPLICATION CHART**

TEEJET NOZZLE BODY	e-CHEMSAVER P/N
QJ8360, QJT8360, 8360	115880-1-12
QJ17560A	115880-1-12
QJP19011	115880-1-12
QJ200 SERIES	115880-1-12
QJ300 SERIES	115880-1-12
QJ360E	115880-1-12
QJ39685	115880-1-12
13431	115880-1-12
24216A, 24230A, 24231A	115880-1-12
PUSH-TO-CONNECT SERIES	115880-1-12
QJ360C, QJ360F	115880-2-12
QJ370	115880-2-12
QJ22187	115880-2-12
QJ8355, 8355	115880-2-12
QJS SERIES	115880-4-12

VITON® IS A TRADEMARK OF THE CHEMOURS COMPANY

**HOW TO ORDER: 115880-12-**

TYPE (SEE APPLICATION CHART)

VOLTAGE

CABLE LENGTH CODE

- BLANK = NO CABLE
- 05 = 0.5 METER (20")
- 15 = 1.5 METER (60")
- 30 = 3.0 METER (120")
- 60 = 6.0 METER (240")
- 200 = 20.0 METER (800")

98552-2-

CABLE (SEE DATA SHEET DS98552)  
CP116231-NYB: MAINTENANCE TOOL (DS116231)

**DESCRIPTION:**  
115880-12 e-CHEMSAVER  
SOLENOID OPERATED  
ELECTRIC SHUT-OFF VALVE

REVISION NO.	12	Data Sheet No.	DS115880-12
REFERENCE:	01/26/21	SHEET:	1 OF 1
DWG SIZE: A			

©Spraying Systems Co.