

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS COMPUTACIONAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

Dissertação de Mestrado

**Desenvolvimento de um Protótipo de Baixo Custo para
Automação de Pulverizadores Agrícolas**

Fábio Pedrotti Terra

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação da Universidade Federal do Rio Grande, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Computação

Orientador: Prof. Dr. Paulo Lilles Jorge Drews-Jr

Rio Grande, 2020

Ficha Catalográfica

T323d Terra, Fábio Pedrotti.
Desenvolvimento de um protótipo de baixo custo para automação
de pulverizadores agrícolas / Fábio Pedrotti Terra. – 2020.
109 f.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande –
FURG, Programa de Pós-Graduação em Computação, Rio
Grande/RS, 2020.
Orientador: Dr. Paulo Lilles Jorge Drews-Jr.

1. Agricultura de Precisão 2. Pulverizador Tratorizado de Barras
3. Automação Agrícola 4. Tratamento Localizado 5. Controle Bico-a-
Bico I. Drews-Jr, Paulo Lilles Jorge II. Título.

CDU 631:681.5

Catálogo na Fonte: Bibliotecário José Paulo dos Santos CRB 10/2344

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Desenvolvimento de um Protótipo de Baixo Custo para Automação de
Pulverizadores Agrícolas**

Fábio Pedrotti Terra

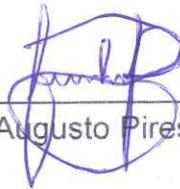
Banca examinadora:



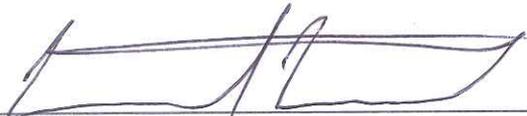
Prof.^a Dr.^a Vilma Alves de Oliveira (EESC / USP)



Prof. Dr. José Paulo Molin (ESALQ / USP)



Prof. Dr. Fábio Augusto Pires Borges (EE / FURG)



Prof. Dr. Emanuel da Silva Diaz Estrada (C3 / FURG)



Prof. Dr. Paulo Lilles Jorge Drews-Jr. (C3 / FURG)
Orientador

Dedico este trabalho a minha amada família. Especialmente, à memória: da minha querida tia, Valéria Terra; e também do Schmidtão, que, por muitos anos, foi um segundo pai pra mim.

Também o dedico a todos que acreditam num mundo melhor; sobretudo, àqueles que trabalham para tal, seja por meio das pequenas ações cotidianas ou pelo esforço incansável dos muitos profissionais que o fazem no campo, nas empresas ou nas instituições de ensino deste rico país.

AGRADECIMENTOS

Início agradecendo aos idealizadores do projeto AutoCERES: Paulo Drews-Jr, Felipe Weber e André Oldoni. Em seguida, aos colegas de projeto que participaram ativamente da construção da bancada de testes de laboratório e dos aperfeiçoamentos realizados, culminando na instrumentação do pulverizador real e viabilizando a criação do protótipo apresentado neste trabalho: Gabrielle Almeida, Felipe Weber, Jardel Prado e Igor Voser.

Agradeço também aos demais membros da equipe, atuais ou anteriores, que contribuíram de alguma forma com o desenvolvimento das inúmeras frentes de trabalho: Eduarda Torres, Nathan Nyland, Gustavo Nascimento, Oscar Arrua, Guilherme Castro, Eduardo Leivas, Mauro Lilles, Cristofer Herreira, Anniely Lemos, entre outros.

Gostaria de agradecer também ao Bryan Galani e ao Cristiano Steffens, pelo apoio na realização dos testes com a câmera de alta velocidade. E estender o agradecimento aos demais colegas do NAUTEC, Pedro Pinheiro, Alexandre Horn, Machado, Matheus Conceição, Lucas Caetano, dentre outros, pelos momentos de aprendizado e até mesmo pelo frequente ajuda na movimentação do pulverizador.

Ao Sr. Gilney Martins, agricultor do distrito do Povo Novo, Rio Grande, e a sua família, pela receptividade, sabedoria e pelos valiosos ensinamentos durante esta pesquisa.

Ao seu Vanderlei e ao seu Antônio, servidores da FURG, operadores de máquina, pelo apoio e paciência durante os testes de campo com o trator da FURG.

Aos professores Mauro Cunha e Cláudio Machado (Claudinho), do IFSul, pelas orientações e auxílio com a modelagem matemática da barra.

Aos colegas de trabalho no curso de Eletrotécnica do IFSul, *campus* Pelotas, pelo suporte e por permitirem adequações de horário de forma a viabilizar minhas idas ao Rio Grande para frequentar as aulas do mestrado e desenvolver a pesquisa, sem prejuízo às minhas atividades laborais.

Aos membros da banca, pelas valiosas contribuições que deram desde a qualificação deste mestrado, professores Vilma, Molin, Fábio e Emanuel. Agradeço também ao Sr. Heitor Mercaldi pelas sugestões e contribuições realizadas na qualificação do trabalho.

Ao amigo Mário Canever, pelas conversas produtivas, informações valiosas e esclarecimento de diversas dúvidas técnicas.

À minha esposa Liara Terra, pelo companheirismo, amor, suporte afetivo e paciência em todos os momentos. Por me mostrar “outras verdades” e me incentivar a ser uma pessoa melhor.

Aos meus pais, pelo exemplo que são, pelo apoio incondicional ao desenvolvimento dos filhos e por incentivarem nosso compromisso com a educação desde muito cedo.

Aos meus familiares e amigos pela compreensão nos momentos de ausência e pelos bons momentos de convívio e descontração.

Por fim, um agradecimento mais que especial ao meu orientador e amigo, Prof. Paulo Drews-Jr., pelo incentivo, acolhimento e pela dedicação incansável ao progresso nacional e regional, aos seus projetos de pesquisa e orientandos.

O campo é a mesa do povo.
— XIRÚ ANTUNES

RESUMO

TERRA, Fábio Pedrotti. **Desenvolvimento de um Protótipo de Baixo Custo para Automação de Pulverizadores Agrícolas**. 2020. 109 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.

O crescimento populacional das últimas décadas demandou grande aumento na produção agrícola, especialmente nos gêneros alimentícios. Com isso, visando reduzir perdas e garantir produtividade, os agricultores tornam-se cada vez mais dependentes da aplicação de agrotóxicos em suas lavouras, por meio dos pulverizadores. Esse uso massivo dos defensivos agrícolas representa alto custo para o produtor, além de trazer riscos a sua saúde, ao meio ambiente e à própria segurança alimentar da população. Nesse contexto, novas tecnologias têm sido desenvolvidas para tentar tornar mais efetiva a pulverização agrícola, reduzindo a quantidade de produto aplicado e dosando seu uso conforme necessidade da cultura. O reconhecimento dessa variabilidade espacial e temporal da lavoura é tratado pela Agricultura de Precisão e a adequação da pulverização pode ser feita por gestão localizada, com aplicação a taxa variada ou acionamento liga/desliga. Neste trabalho, então, é proposto um protótipo de baixo custo que, por meio de soluções de automação, permite que um pulverizador trabalhe com aplicação do tipo liga/desliga. Com essa solução, a partir dos comandos enviados pelo operador do trator, via *smartphone*, pode-se controlar a abertura dos bicos de pulverização de forma individualizada, que é o chamado controle bico-a-bico. Para isso, o protótipo conta com um módulo de controle, implementado em plataforma Arduino, além de monitoramento da pressão e da vazão ao longo da barra de pulverização. O protótipo conta também com funcionalidade de registrador de eventos (*data logger*), armazenando os estados de todos os bicos e os valores dos sensores nos mesmos instantes de tempo, viabilizando futuras análises e relatórios de aplicação.

Palavras-chave: Agricultura de Precisão, Pulverizador Tratorizado de Barras, Automação Agrícola, Tratamento Localizado, Controle Bico-a-Bico.

ABSTRACT

TERRA, Fábio Pedrotti. **Development of a Low-Cost Prototype for Automation of Agricultural Boom Sprayers**. 2020. 109 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Computação. Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande.

The world's population growth in the last decades demanded a great increase in agricultural production, especially in food. Therefore, in order to reduce possible losses and guarantee productivity, farmers depend more and more on the application of agrochemicals in their crops. This massive use of pesticides represents not only a high cost to the farmers but also a risk to their health, to the environment, and even to the safety of the food consumed by the population. In this context, new technologies have been developed to make agricultural spraying more effective, reducing the amount of pesticides applied and dosing their use according to the need of the crop. The recognition of its spatial and temporal variability is treated by Precision Agriculture. In the case of pest management it can be done using variable-rate sprayers or using on/off application with individual nozzle control. Thus, this thesis proposes a low-cost prototype in a modular solution to automate existent agricultural sprayers. The solution allows individual nozzle opening and uses on/off solenoid valves, pressure and flow sensors, Arduino boards, and smartphone. Additionally, the prototype has a data logger function to store nozzle status and sensor values, allowing future analysis and application reports.

Keywords: precision agriculture, tractor-mounted boom sprayer, agricultural automation, site-specific weed management, individual nozzle control.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Comparativo sistema convencional vs controle bico-a-bico.	22
Figura 2	Visão geral do projeto AutoCERES.	23
Figura 3	Pulverizador costal manual.	27
Figura 4	Pulverizador atomizador com turbina.	27
Figura 5	Pulverizador de barras tratorizado, montado no engate de três pontos.	28
Figura 6	Pulverizador de barras de arrasto.	29
Figura 7	Pulverizador autopropelido Jacto Uniport.	29
Figura 8	Pulverização aérea.	30
Figura 9	Método típico de pulverização.	31
Figura 10	Tratamento localizado em pulverização.	35
Figura 11	Protótipo do pulverizador.	42
Figura 12	Ponta de pulverização.	42
Figura 13	Exemplo de instalação das válvulas solenoides.	44
Figura 14	Exemplo de instalação dos sensores de pressão e de vazão.	45
Figura 15	Fluxograma de processo/tubulação e instrumentação (P&ID).	46
Figura 16	Arquitetura de automação.	47
Figura 17	Painel de controle e caixa de junção.	48
Figura 18	Esquema de interligação dos componentes.	49
Figura 19	Visão geral do protótipo.	50
Figura 20	Volume de controle fixo em trecho da mangueira.	56
Figura 21	Volume de controle fixo na mangueira com as dez derivações.	57
Figura 22	Escoamento através da ponta de pulverização.	59
Figura 23	Esquema interno da válvula de reciclo (PCV-00).	61
Figura 24	Circuito hidráulico simulado no FluidSIM.	63
Figura 25	Execução da simulação no FluidSIM.	64
Figura 26	Processo modelado e simulado no Simulink.	67
Figura 27	Curvas de pressão e vazão variando com o fechamento sequencial dos bicos.	68
Figura 28	Testes do protótipo, acionamento via motor elétrico.	69
Figura 29	Curvas para ajuste de 2 bar no regulador da barra.	71
Figura 30	Curva de pressão (PT-12 e PT-13).	72
Figura 31	Curva de vazão (FT-11).	72
Figura 32	Curvas para ajuste de 3,1 bar no regulador da barra.	73
Figura 33	Curvas para ajuste de 4,1 bar no regulador da barra.	74
Figura 34	Testes do protótipo, acoplado ao trator.	74

Figura 35	Curvas para ajuste de 2, 4 <i>bar</i> , com acoplamento ao trator.	75
Figura 36	Pressão na barra em função do número de bicos abertos, para um conjunto de experimentos, com ajuste inicial de 2 <i>bar</i>	76
Figura 37	Vazão de reciclo da PCV em função da pressão na barra, para um conjunto de experimentos, com ajuste inicial de 2 <i>bar</i>	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Pinagem das interligações nos controladores e instrumentos.	49
Tabela 2	Procedimento para coleta de dados - ordem crescente.	52
Tabela 3	Procedimento para coleta de dados - ordem decrescente.	53
Tabela 4	Número de Reynolds e regimes de escoamento.	56
Tabela 5	Valores obtidos com a simulação no FluidSIM.	64
Tabela 6	Valores obtidos com a simulação no Simulink.	66
Tabela 7	Dados coletados durante experimento: 4, 1 <i>bar</i>	70
Tabela 8	Dados coletados durante experimento: 2 <i>bar</i>	70
Tabela 9	Dados coletados durante experimento com o trator: 2, 4 <i>bar</i>	75
Tabela 10	Resultados experimentais em cenários típicos.	79
Tabela 11	Custo aproximado do <i>hardware</i> do protótipo.	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AP	Agricultura de Precisão
CBAP	Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão
CCD	<i>Charge-Coupled Device</i> (dispositivo de carga acoplada)
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> (fluidodinâmica computacional)
DIS	<i>Direct Injection System</i> (Sistema de Injeção Direta)
DMV	Diâmetro Mediano Volumétrico
E/S	Entrada/Saída
FPS	<i>Frames per Second</i> (quadros por segundo)
FT	<i>Flow Transmitter</i> (transmissor de vazão)
GIS	<i>Geographic Information System</i> (sistema de informação geográfica)
GND	<i>Ground</i> (referência de tensão: 0 Volts)
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i> (sistema global de navegação por satélite)
GPS	<i>Global Positioning System</i> (sistema de posicionamento global)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INCA	Instituto Nacional do Câncer
ISA	<i>International Society of Automation</i> (sociedade internacional de automação)
LED	<i>Light-Emitting Diode</i> (diodo emissor de luz)
LG	<i>Level Gauge</i> (visor de nível)
LIDAR	<i>Light Detection And Ranging</i> (sistema de varredura a laser)
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MV	<i>Manipulated Variable</i> (variável manipulada)
NA	Normalmente Aberta
NF	Normalmente Fechada
NPT	<i>National Pipe Thread</i> (padrão americano de roscas cônicas para tubos)
ONU	Organização das Nações Unidas
OPP	<i>Operation planner in the process</i> (planejador operacional do processo)

PCV	<i>Self-Operated Pressure Regulator</i> (válvula mecânica auto-operada)
P&ID	<i>Process/Piping and Instrumentation Diagram</i> (fluxograma de processo, tubulação e instrumentação)
PG	<i>Pressure Gauge</i> (manômetro)
PIB	Produto Interno Bruto
PPQV	<i>Predictor of process quality variables</i> (preditor das variáveis de qualidade do processo)
PV	<i>Process Variable</i> (variável controlada do processo)
PT	<i>Pressure Transmitter</i> (transmissor de pressão)
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (modulação por largura de pulso)
RPA	<i>Remotely Piloted Aircraft</i> (aeronave remotamente pilotada)
RTC	<i>Real-Time Clock</i> (relógio de tempo real)
SC	Superfície de Controle
SD Card	<i>Secure Digital Card</i> (cartão de memória não volátil)
SI	<i>Système international [d'unités]</i> (sistema internacional de unidades)
SP	<i>Set Point</i> (ponto de ajuste, referência)
TDP	Tomada de Potência. Também chamada de TDF (tomada de força) ou PTO (<i>Power Take-Off</i>)
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
VC	Volume de Controle
VMD	<i>Volume Median Diameter</i> (vide DMV)
VRA	<i>Variable Rate Application</i> (aplicação em taxa variada)
VRT	<i>Variable Rate Technology</i> (tecnologia e equipamentos para realizar a VRA)
XV	<i>Unclassified Valve</i> (válvula <i>on/off</i> acionada por solenoide)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Problema	20
1.2	Objetivos	20
1.3	Justificativa	21
1.4	O Projeto AutoCERES	21
1.5	Contribuições	22
1.6	Organização do Documento	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	Pulverizadores Agrícolas	25
2.1.1	Pulverizador costal	26
2.1.2	Pulverizador atomizador com turbina	26
2.1.3	Pulverizador tratorizado de barras	27
2.1.4	Pulverizador autopropelido	28
2.1.5	Pulverização aérea	29
2.1.6	Pulverizador utilizado no trabalho	30
2.2	Agricultura de Precisão	30
2.2.1	Tratamento localizado em pulverização	33
2.3	Trabalhos Relacionados	35
2.3.1	Trabalhos Acadêmicos	36
2.3.2	Soluções de Mercado	38
2.3.3	Patentes	39
2.3.4	Considerações	40
3	MATERIAL E MÉTODOS	41
3.1	Desenvolvimento do Protótipo	41
3.1.1	Válvulas Solenoides	43
3.1.2	Sensores de Vazão	44
3.1.3	Sensores de Pressão	45
3.1.4	Fluxograma de Processo, Tubulação e Instrumentação	46
3.1.5	Controladores	47
3.1.6	Interligações	48
3.1.7	Software	50
3.2	Procedimento para Experimentos Práticos	52
3.3	Modelagem Matemática	53
3.3.1	Número de Reynolds	54
3.3.2	Vazão na Barra	56

3.3.3	Pressão e Vazão nos Bicos	58
3.3.4	Pressão na Barra e Funcionamento da PCV	61
3.4	Simulação Computacional	63
3.4.1	FESTO FluidSIM Hydraulics	63
3.4.2	Matlab Simulink	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
4.1	Acionamento via Motor Elétrico	69
4.2	Acionamento via TDP do Trator	74
4.3	Análise	76
4.4	Custo do Protótipo	80
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS	82
	REFERÊNCIAS	85
	APÊNDICE A PERDA DE CARGA NA MANGUEIRA	92
	APÊNDICE B PLANILHAS PARA EXPERIMENTOS	94
	APÊNDICE C RUÍDO NA MEDIÇÃO DE PRESSÃO	97
C.1	Ruído no Sinal de Pressão	97
C.2	Filtro Passa-Baixas	98
C.3	Ruído da Bomba de Membrana	99
	APÊNDICE D GRÁFICOS DE PRESSÃO NA BARRA	100
	APÊNDICE E GRÁFICOS DA PCV: PRESSÃO VS VAZÃO	101
	APÊNDICE F EXPERIMENTOS COM CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE	102
	ANEXO A DESENHO DE FABRICAÇÃO DAS CONEXÕES	104
	ANEXO B FOLHAS DE DADOS DOS SENSORES	108
B.1	Sensor de Vazão YSF-S201	108
B.2	Sensor de Pressão HK1100C	109

1 INTRODUÇÃO

No decorrer da segunda metade do século XX, a revolução agrícola contemporânea proporcionou elevada motorização-mecanização dos equipamentos utilizados no campo, seleção de variedades de plantas e de raças de animais com forte potencial de rendimento, ampla utilização dos fertilizantes, dos alimentos concentrados para o gado, além de produtos de tratamento para plantas e animais, possibilitando vigoroso progresso nos países desenvolvidos e em alguns setores dos países em desenvolvimento (MAZOYER; ROUDART, 2010).

Em seguida, a partir da revolução verde, foram inseridas novas tecnologias e variedades de sementes (EVENSON; GOLLIN, 2003). Paralelamente, novas técnicas de gestão de pragas também provocaram grandes mudanças na agricultura, especialmente a partir da década de 1950, com a crescente aplicação de agrotóxicos (WHEELER, 2002).

Os avanços na produção de alimentos ajudaram nos índices de longevidade e, consequentemente, no acréscimo demográfico. De acordo com o último relatório da Organização das Nações Unidas (ONU), a população mundial em setembro de 2019 era de 7,7 bilhões de pessoas, com previsão de chegar a 8,5 bilhões em 2030 e 9,7 bilhões em 2050 (UNITED NATIONS, 2019).

O rápido crescimento populacional trouxe, porém, novos desafios e muitos prognósticos levam a crer que, salvo na ocorrência de saltos tecnológicos, a produção alimentar não acompanhará o crescimento populacional (OLIVEIRA, 2017). Nos cenários mais pessimistas, como nas previsões de Malthus¹, a falta de alimentos resultaria em miséria, doenças, fome, guerra e calamidade (KAGAN, 2019).

Nos últimos anos, foram feitos altos investimentos na modernização da agricultura, o que provocou grande sucesso nos países desenvolvidos utilizando muito capital e pouca mão de obra. No entanto, conforme discutido em Mazoyer e Roudart (2010), estes avanços tiveram pouca penetração nos países em desenvolvimento, onde a maioria dos agricultores de pequeno porte é pobre e, portanto, não consegue adquirir maquinário pe-

¹No modelo de crescimento populacional de Thomas Malthus, de 1798, a população cresce em progressão geométrica (com razão $\alpha > 1$). Portanto, sempre com tendência a superar a produção de alimentos, que, segundo ele, aumenta apenas em progressão aritmética. Por anos, essa ideia (absurda!) foi usada para justificar a inutilidade de reformas sociais e econômicas (MONTEIRO, 2006).

sado tampouco grandes quantidades de insumos.

Aproximadamente 80% dos agricultores da África; e 40% a 60% dos da América Latina e da Ásia continuam a trabalhar predominantemente com equipamentos manuais. Apenas de 15% a 30% deles dispõem de tração animal. Portanto, a agricultura moderna ainda está muito longe de ter conquistado o mundo (MAZOYER; ROUDART, 2010).

Como discutido acima, a introdução de novas tecnologias para a produção de *commodities* agrícolas a partir da década de 1950, acarretou em um aumento expressivo da carga de agroquímicos utilizada no controle de pragas nas plantações. De acordo com o Instituto Nacional do Câncer (INCA), o uso médio de agrotóxicos na produção agrícola do Brasil equivale a aproximadamente cinco litros por ano por habitante (MILHORANCE, 2015).

Outra consequência relevante é a poluição ambiental e o desequilíbrio do agrossistema (GRÜTZMACHER et al., 2008). Prova disso é que, em alguns casos extremos, mais de 90% do produto aplicado é perdido e acaba não tendo ação na lavoura, podendo escoar, e contaminar águas superficiais, ou penetrar no solo, atingindo águas subterrâneas (RIBEIRO et al., 2007).

Parte significativa das perdas de agrotóxicos se dá pelo efeito da deriva, que é o movimento do produto no ar, durante ou depois da aplicação, desviando-se de seu alvo planejado (DEXTER, 1993). Esse efeito é indesejável porque resulta em aplicação ineficiente, podendo levar tanto à superdosagem do produto, causando desperdício e risco à cultura, quanto à subdosagem, causando controle ineficaz do problema, e exigindo aplicações adicionais. Além dos possíveis impactos na água e no solo, a deriva pode também causar danos a culturas sensíveis adjacentes com contaminação não intencional de produtos comestíveis por resíduos dos defensivos.

Conforme Gil e Sinfort (2005), a deriva é uma das principais causas da poluição ambiental decorrente da aplicação de agrotóxicos na agricultura e sua eliminação completa é utópica. No entanto, os problemas dela decorrentes podem ser reduzidos se a aplicação for realizada sob condições climáticas adequadas, com o receituário agrônomo correto e com os equipamentos bem regulados.

Outro aspecto relevante é o aumento da resistência de algumas espécies de plantas daninhas, que aparecem espontaneamente nas lavouras (OWEN; ZELAYA, 2005). Essas plantas são indesejadas, pois competem e enfraquecem a cultura que está sendo implantada. De acordo com Machado et al. (2005), a difusão no uso de herbicidas e outros produtos químicos favorece o surgimento de espécies cada vez mais resistentes, o que demanda o uso de agrotóxicos com taxas de toxicidade cada vez mais altas, além de um maior número de aplicações. Isso representa custos cada vez maiores aos produtores, além dos aspectos ambientais e de saúde já discutidos.

Por outro lado, nos últimos anos, houve significativa evolução no maquinário agrícola. Vive-se na era da chamada Agricultura de Precisão. E as máquinas já contam com ele-

vada tecnologia embarcada, abrangendo desde sistemas de posicionamento global (GPS: *Global Positioning System*) para rastrear sua operação, passando por piloto automático, telemetria e sistemas de monitoramento da produtividade. Até se chegar às máquinas conceituais com movimentação e operação totalmente autônomas (CASE, 2020; FARM-EQUIPMENT, 2020).

Afortunadamente, esse avanço tecnológico também chegou para os pulverizadores agrícolas. Os modelos autopropelidos mais sofisticados contam com GPS e muita eletrônica embarcada. São capazes de fazer a abertura e o fechamento automático dos bicos de pulverização, por exemplo, evitando a sobreposição de produto, além de ajustar a vazão do agrotóxico em trajetórias curvilíneas, para manter estável a taxa de aplicação (litros por hectare), dentre diversas outras funções (JACTO, 2019; JOHN DEERE, 2019b; RAVEN, 2019; SMART SENSING BRASIL, 2019; BLUE RIVER, 2020). Tudo isso permite melhorar sobremaneira a eficiência da agricultura, proporcionando economia de insumos, redução dos impactos ambientais, além de aumentar a segurança alimentar para a população.

Essas tecnologias de ponta ainda são muito caras e, portanto, inacessíveis às propriedades produtivas de pequeno porte, que representam justamente a maioria dos estabelecimentos agropecuários no Brasil. Basta observar que, de acordo com o último Censo Agro, em torno de 40% dos estabelecimentos agropecuários no país possuem área menor que dez hectares; e 70%, são menores que 50 ha. Isso, num total de 5.072.152 estabelecimentos, espalhados em uma área total de 350.253.329 ha (IBGE, 2018).

Já no censo anterior, foram explicitados os estabelecimentos enquadrados no contexto da Agricultura Familiar, conforme Lei nº 11.326, de 24 de julho de 2006. Onde observa-se que a agricultura familiar representava, em valores aproximados, 85% dos estabelecimentos brasileiros, ocupando 25% da área agrícola produtiva e respondendo por 80% da produção vegetal e 50% dos alimentos consumidos no país. Tendo contribuído com 35% do produto interno bruto (PIB) nacional; e respondido pelo resultado econômico de 90% dos municípios brasileiros com até 20 mil habitantes (IBGE, 2009).

Notadamente, as pequenas propriedades produtivas e a agricultura familiar têm um importante papel na produção de alimentos. Especialmente aqueles que vão direto para a mesa da população. Mesmo assim, como visto, esses agricultores ainda têm pouco acesso aos equipamentos da chamada agricultura de precisão, devido principalmente aos seus elevados custos de aquisição e manutenção. Logo, têm maior dificuldade para otimizar seu processo produtivo e também para mitigar o desperdício de insumos, principalmente fitossanitários, o que pode gerar grande impacto financeiro, além dos riscos de contaminação discutidos acima.

Por outro lado, o crescente desenvolvimento de sistemas computacionais e de sensoriamento nos últimos anos permitiu a popularização de equipamentos com bastante tecnologia embarcada, como os *smartphones*.

No entanto, apesar dos progressos na popularização da tecnologia, com aplicação nas mais diversas áreas, ainda se percebe pouca oferta de soluções tecnológicas modulares e de baixo custo, adaptáveis aos equipamentos utilizados na agricultura familiar.

Observam-se também poucos registros de documentação técnico-científica a respeito do desenvolvimento de sistemas de automação aplicados aos pequenos pulverizadores agrícolas existentes, com foco na possibilidade de controlar individualmente a abertura e o fechamento dos bicos aspersores.

Assim, entende-se que se trata de um tema relevante, caracterizando um nicho de pesquisa com interesse não só para a academia, como também para a sociedade.

1.1 Problema

O problema discutido neste trabalho refere-se à automação de pulverizadores agrícolas, por meio de uma solução de custo reduzido, com controle bico-a-bico e gestão localizada do tipo aplicação liga/desliga.

Nesse contexto, a automação deve se preocupar com os aspectos tanto teóricos, abrangendo a modelagem do sistema utilizado, quanto práticos, com sua implementação e validação.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é discutir e validar, em termos conceituais e práticos, a possibilidade de prototipação de uma solução embarcada para automatizar pulverizadores agrícolas, fazendo uso de tecnologias correntes, como plataforma embarcada Arduino, *smartphones* e sistemas de controle e percepção. Com isso, proporcionar que a abertura e o fechamento individual dos bicos sejam realizados remotamente, permitindo economia de agrotóxicos.

Para atender ao objetivo geral, são estipulados os seguintes objetivos específicos:

- Projetar arquitetura de automação para o protótipo, abrangendo controladores, sensores e atuadores.
- Propor esquema simplificado, do tipo fluxograma de processo, para representar os equipamentos e componentes do pulverizador instrumentado.
- Confeccionar e instalar a solução de automação no pulverizador de barras, utilizando componentes, instrumentos e equipamentos de baixo custo.
- Desenvolver e implantar os códigos nos controladores.
- Modelar matematicamente a barra pulverizadora e compreender o comportamento da pressão e da vazão a partir do fechamento sequencial dos bicos.

- Fazer testes práticos e experimentos para verificar o correto funcionamento da solução.
- Analisar os dados coletados durante os experimentos práticos e avaliar o comportamento da pressão hidráulica na barra pulverizadora, para diversos cenários de abertura e fechamento das pontas aspersoras. Com isso, verificar a necessidade de implementar alguma estratégia adicional para regular a pressão na barra.

1.3 Justificativa

A justificativa para o desenvolvimento deste trabalho é a necessidade de redução no emprego de agrotóxicos nas lavouras. Com o uso da tecnologia, propõe-se adicionar alguns automatismos à pulverização, permitindo mais efetividade no controle de pragas e de plantas resistentes, com menor quantidade de agroquímicos aplicados. Como consequência, redução de custos ao agricultor, menor impacto ambiental e maior segurança alimentar à população.

Sabe-se da existência de soluções tecnológicas comerciais com características equivalentes - e mesmo superiores - ao proposto neste trabalho. Muitas delas, comercializadas pelos grandes fabricantes de máquinas e implementos agrícolas. No entanto, como discutido anteriormente, essas soluções são economicamente inacessíveis aos agricultores familiares. Assim, até mesmo em função de sua responsabilidade social, entende-se que cabe à academia a missão de buscar formas de tornar mais acessível a aplicação dessas novas tecnologias, focando justamente em quem não as consegue comprar.

1.4 O Projeto AutoCERES

O presente trabalho é desenvolvido no contexto do projeto AutoCERES, pelo Grupo de Automação e Robótica Inteligentes (NAUTEC), do Centro de Ciências Computacionais (C3), da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), com apoio do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-rio-grandense (IFSul), *campus* Pelotas.

A investigação contou com suporte financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), sob projeto de número 17/2551-0000896-0.

O projeto AutoCERES visa o desenvolvimento tecnológico e científico de sistemas de automação e instrumentação para a Agricultura Familiar, focado em miniaturização e baixo custo, com grande potencial de inovação.

Reúne a estrutura de um pulverizador de barras, instrumentado com câmeras, sensores, válvulas atuadoras e eletrônica embarcada. Conta ainda com peças e conexões projetadas e fabricadas pela equipe, algumas usinadas em Tecnil (Nylon) e outras feitas com manufatura aditiva, em impressora 3D.

O AutoCERES trata de desenvolver soluções tecnológicas de baixo custo, acessíveis

às pequenas propriedades rurais. Atualmente, os esforços estão concentrados em viabilizar a automação de um pulverizador de barras acoplado tratorizado. A solução trata de implantar o controle bico-a-bico, permitindo que cada ponta aspersora possa ser aberta ou fechada individualmente, conforme necessidade da lavoura. Logo, aplicando o produto apenas quando e onde necessário.

Pretende-se que o controle da aplicação possa ocorrer em modo manual, via comando do operador do trator (“tratorista”); ou em modo automático, a partir da detecção das linhas de plantio. O projeto também prevê o registro das áreas já pulverizadas, via rastreamento com fusão sensorial e GPS, de forma a evitar a sobreposição.

Na Figura 1, mostra-se um comparativo entre o funcionamento dos sistemas convencionais, puramente mecânicos, e da automação proposta. Destacando-se a possibilidade de fechar individualmente os bicos quando não houver plantas.

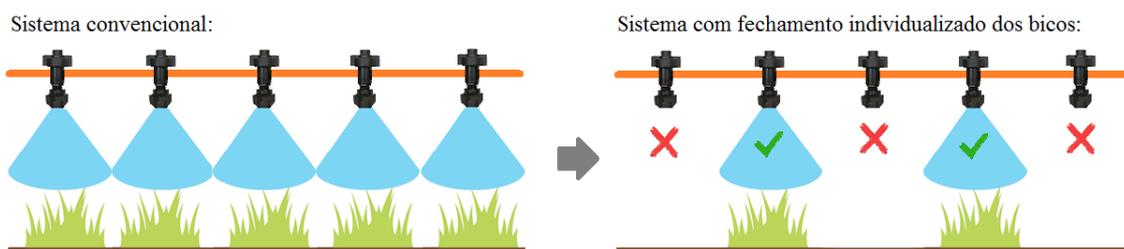


Figura 1: Comparativo sistema convencional vs controle bico-a-bico.

Como requisitos restritivos, a solução projetada deve ser tal que tenha baixo custo e que possa ser facilmente adaptada aos pequenos pulverizadores existentes no mercado. Com isso, que seja adequada às necessidades da agricultura familiar, tanto nos aspectos técnicos quanto econômicos.

O projeto é interdisciplinar e envolve áreas complementares, abrangendo: Eletrônica, Instrumentação, Automação, Modelagem, Identificação e Controle; *Machine Vision* e Processamento de Imagem; Localização e Rastreamento; *Cockpit* com simulador; Eletrização da calda; Acoplamentos e montagens mecânicas; além de estudos específicos na área agrícola, conforme esquema apresentado na Figura 2.

O escopo deste trabalho de mestrado, dentro do projeto AutoCERES, está destacado com pontilhado vermelho na Figura 2. Portanto, abrange, prioritariamente, atividades das áreas identificadas como *Control CERES*, Mecânica e Integração. O foco do trabalho se dá no desenvolvimento e na implantação do *hardware* e do *software* necessários para viabilizar a automatização dos bicos do pulverizador.

1.5 Contribuições

As principais contribuições deste trabalho de mestrado tratam da apresentação de uma solução prática, viável e de baixo custo para permitir a automação de pulverizadores

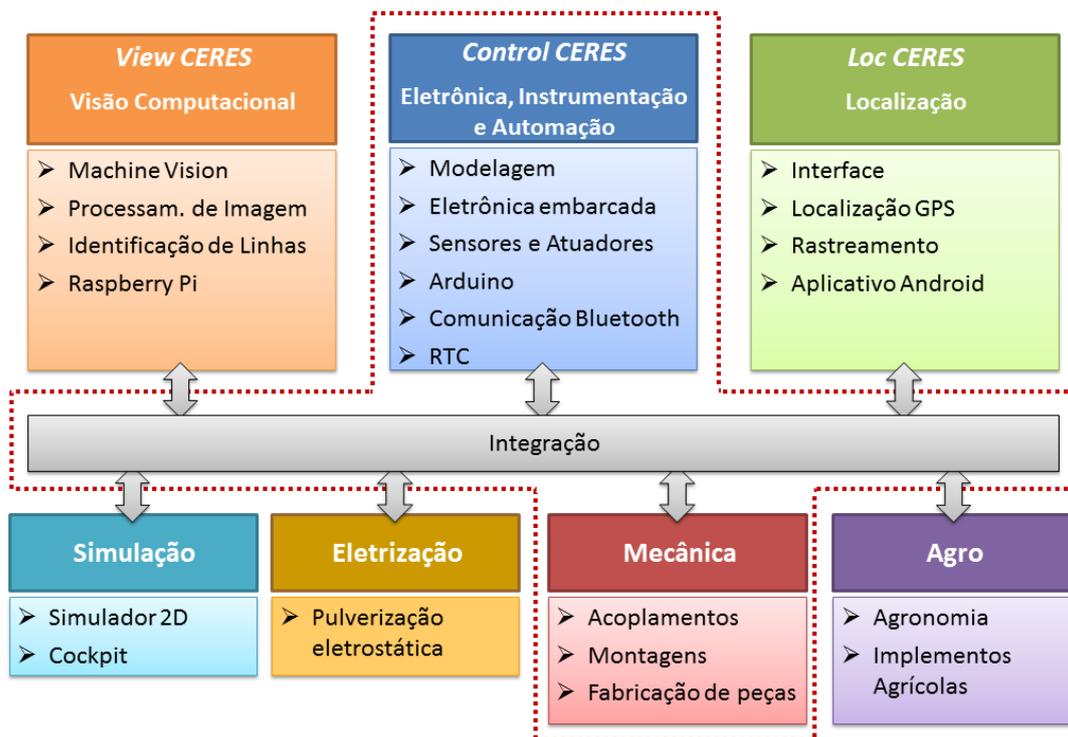


Figura 2: Visão geral do projeto AutoCERES.

agrícolas, com controle bico-a-bico e aplicação liga/desliga, no contexto da agricultura familiar.

Como contribuições específicas relevantes tem-se a documentação da arquitetura de automação adotada; e a modelagem matemática da barra pulverizadora, com foco no escoamento da calda. Esta última, não encontrada em outras publicações dentro das pesquisas realizadas.

Adicionalmente, vale salientar que os resultados deste trabalho foram parcialmente publicados em:

- TERRA, F.; ROSA, G.; PRADO, J.; DREWS-JR, P. A Low-Cost Prototype to Automate Agricultural Sprayers. 21st IFAC - International Federation of Automatic Control's Conference, 2020.
- TERRA, F. P.; ROSA, G. R. A. da; DREWS-JR, P. L. J. Pressure-flow relationship in a boom of an autonomous robotic agricultural sprayer. IEEE Latin American Robotics Symposium (LARS), 2019. Nessa publicação, a principal contribuição foi a modelagem matemática do comportamento da pressão e da vazão ao longo da barra, para diversos cenários de abertura e fechamento dos bicos. Esse artigo foi selecionado entre os 15 melhores do simpósio para ser submetido em versão estendida no Journal of Intelligent & Robotic Systems (JINT).
- NASCIMENTO, G. do; WEBER, F.; ROSA, G.; TERRA, F.; DREWS-JR, P. A per-

ception system for an autonomous pesticide boom sprayer. IEEE Latin American Robotics Symposium (LARS), 2019.

- ROSA, G. R. A. da; TERRA, F. P.; DREWS-JR, P. L. J. Pulverizador agrícola em barras com aplicação a taxa variada: Modelagem física. 14^o Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI), 2019.
- WEBER, F.; ROSA, G.; TERRA, F.; OLDONI, A.; DREWS, P. A low cost system to optimize pesticide application based on mobile technologies and computer vision. IEEE Latin American Robotic Symposium (LARS), 2018.

1.6 Organização do Documento

Para facilitar a leitura e o detalhamento dos assuntos discutidos, o texto está organizado em cinco capítulos, além desse primeiro, de cunho introdutório. Assim, no Capítulo 2, é realizada uma fundamentação teórica, onde são apresentados conceitos importantes para o entendimento do contexto da aplicação. Define-se agricultura de precisão, apresentam-se alguns tipos de pulverizadores utilizados na agricultura e contextualiza-se este trabalho dentro do escopo maior do projeto AutoCERES.

Em seguida, no Capítulo 2.3, são analisados alguns trabalhos de pesquisa, produtos comerciais e patentes correlatos ao escopo deste projeto. São apresentadas as principais contribuições dos autores estudados, bem como algumas das vantagens e desvantagens das soluções por eles propostas.

No Capítulo 3, apresenta-se e discute-se a metodologia adotada no trabalho. Apresenta-se o protótipo desenvolvido, detalhando-se o projeto eletrônico e a arquitetura de automação. Apresenta-se, ainda, a modelagem matemática da barra pulverizadora, as simulações computacionais, além dos procedimentos adotados para a realização dos experimentos práticos com as respectivas coletas de dados.

A seguir, no Capítulo 4, são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Avaliam-se as principais contribuições do trabalho e são feitas análises comparativas.

Por fim, no Capítulo 5, são apresentadas algumas considerações finais. Avalia-se se os objetivos estão alcançados e apresentam-se sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentados alguns conceitos importantes para o entendimento do trabalho no âmbito da sua aplicação. Inicia-se com a apresentação dos pulverizadores agrícolas e com algumas definições referentes à agricultura de precisão. Em seguida, são apresentados e discutidos trabalhos de outros autores, soluções de mercado e patentes correlacionados a esta dissertação de mestrado.

2.1 Pulverizadores Agrícolas

O pulverizador agrícola é o equipamento utilizado para fazer a aplicação de agroquímicos, nutrientes ou fertilizantes, visando promover a proteção das culturas e a disponibilização de nutrientes para as plantas. Os agroquímicos são também chamados de defensivos agrícolas ou agrotóxicos e englobam herbicidas, inseticidas, acaricidas, fungicidas, dentre outros (JACTO, 2017; AGROLINK, 2018).

Conforme Machado et al. (2005), para que se possa colocar a quantidade certa de produto defensivo agrícola no alvo, é necessário ter-se conhecimento de três fatores: alvo biológico que será combatido; produto de controle para combater o alvo; e equipamento que será utilizado para a aplicação do produto.

A aplicação dos defensivos é necessária mesmo quando o solo é preparado adequadamente e a semeadura feita de forma correta, pois há fatores de ordem tanto biológica quanto física que competem com a cultura que se está implantando. Isso se dá pela concorrência por nutrientes, iluminação e umidade entre a espécie cultivada e os outros organismos presentes no local. Como, atualmente, o uso de herbicidas, inseticidas e outros produtos químicos encontra-se bastante difundido, percebe-se uma necessidade crescente de agrotóxicos com altas taxas de toxicidade e de um maior número de aplicações, pois algumas espécies estão se tornando cada vez mais resistentes (MACHADO et al., 2005).

Os defensivos agrícolas podem ser aplicados na forma de gás, sólido ou líquido. A forma líquida é a mais utilizada na agricultura e os métodos mais comuns de aplicação dos defensivos líquidos são: nebulização, atomização, pulverização, injeção, imersão ou pincelamento (MACHADO et al., 2005).

Um aspecto relevante é o volume de aplicação, que representa a quantidade de calda¹ distribuída por unidade de área, geralmente expresso em litros por hectare (*L/ha*). O volume de aplicação é definido no receituário agrônomo e está relacionado ao equipamento utilizado, produto químico, cultura, sistema de cultivo, estágio de desenvolvimento e condições climáticas.

Nas operações por via líquida, o produto é levado até a planta na forma de um grande número de gotas no intuito de permitir boa cobertura da aplicação. O tamanho da gota está diretamente relacionado a: penetração, habilidade de transporte, eficiência de contágio, uniformidade de distribuição e efetividade de deposição (MACHADO et al., 2005).

O tamanho da gota também pode impactar na deriva, que, como já visto, consiste no arrastamento das partículas produzidas para longe do alvo da aplicação. Quanto menor for o diâmetro da gota, mais facilmente ela poderá ser arrastada pelo ar e, portanto, maior tenderá a ser a deriva. Por outro lado, quanto maior a gota, menor tende a ser sua aderência nas folhas, tanto na parte superior quanto inferior, o que poderá representar baixa eficiência na aplicação.

Os bicos hidráulicos são os responsáveis pela formação do espectro de gotas. Quando todas as gotas têm tamanho aproximado, diz-se que o espectro é homogêneo. Geralmente, o espectro heterogêneo é indesejado, pois implica em grande risco das gotas grandes se perderem por escorrimento e as pequenas, por deriva (MACHADO et al., 2005).

Pulverizar, portanto, é a distribuição de uma substância líquida em pequenas partículas. Segundo Machado et al. (2005), as máquinas para aplicação de defensivos podem ser manuais, de tração animal, motorizadas, tratorizadas, autopropelidas ou aéreas.

Há vários tipos e modelos de pulverizadores no mercado e todos eles visam permitir que o produto seja distribuído em quantidade correta e nos locais desejados. A seguir, são apresentados os seguintes tipos: costal manual; atomizador com turbina; tratorizado de barras; autopropelido; e aéreo (ANDEF, 2010; RPA, 2018).

2.1.1 Pulverizador costal

O pulverizador costal manual é utilizado para aplicação em áreas pequenas, geralmente nas lavouras das pequenas propriedades, e também em locais de difícil acesso ao trator, como terrenos muito irregulares ou estufas. Na Figura 3, é apresentado esse tipo de pulverizador.

2.1.2 Pulverizador atomizador com turbina

O pulverizador atomizador com turbina (*air-blast sprayer*) se utiliza dos princípios de subdivisão da atomização gasosa ou centrífuga, ou de uma combinação dos dois. É indicado para locais de culturas que não permitem a aplicação de cima para baixo, via sistema de barras, como pomares de árvores frutíferas, parreirais, cafezais, etc. O atomi-

¹Calda é o produto químico (agrotóxico) diluído em água.

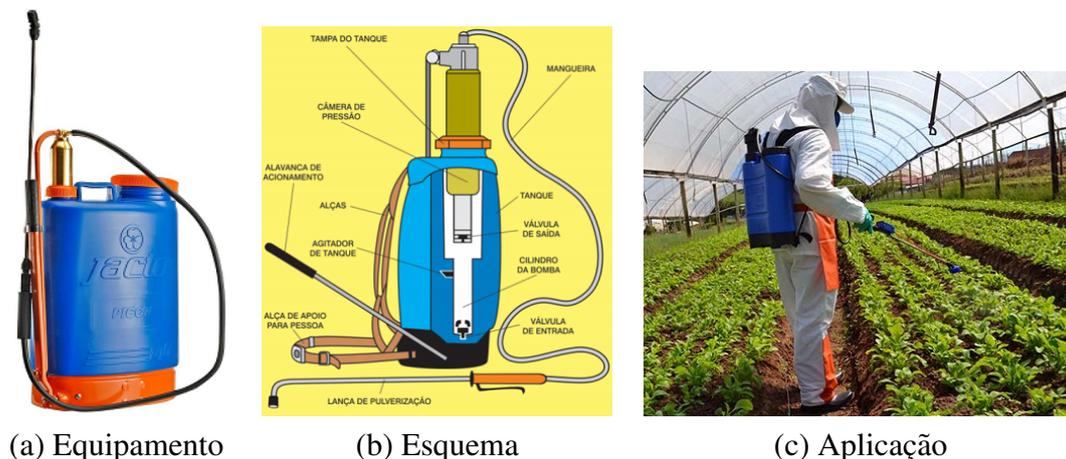


Figura 3: Pulverizador costal manual.
(JACTO, 2018a), (ANDEF, 2010), (EMBRAPA, 2018)

zador turbina possui construção relativamente estreita de forma que pode ser puxado pelo trator por entre as árvores, fazendo a aplicação do agrotóxico tanto lateralmente, quanto de baixo para cima, conforme Figura 4.

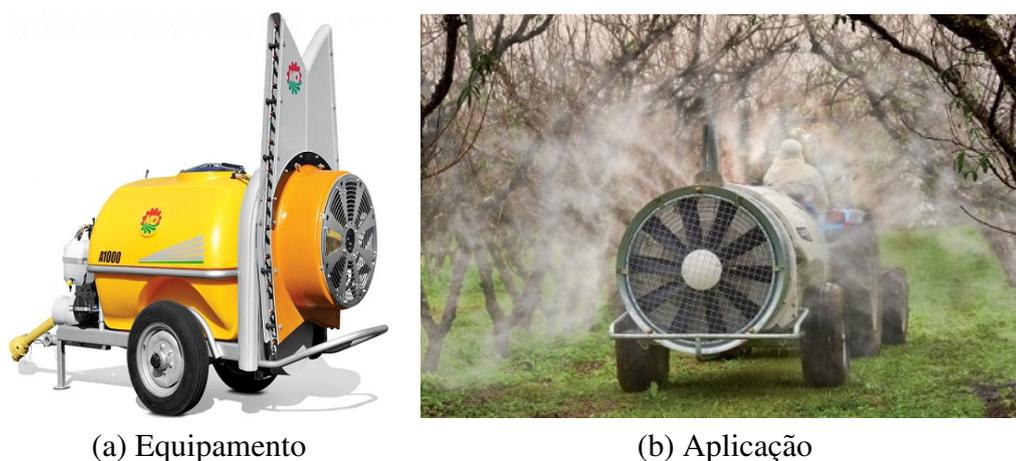


Figura 4: Pulverizador atomizador com turbina.
(KO, 2019), (AGRICONET, 2018)

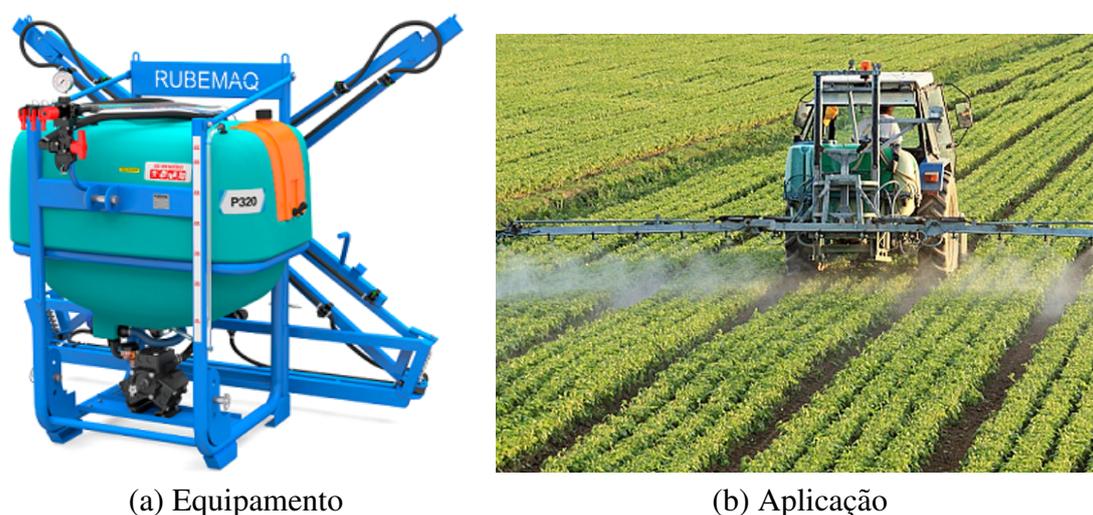
2.1.3 Pulverizador tratorizado de barras

Os pulverizadores tratorizados são os equipamentos mais utilizados. Podem ser acoplados ao sistema de engate de três pontos do trator; ou de arrasto, acoplados à barra de tração do trator.

Nos modelos que utilizam o engate de três pontos, todo o conjunto (reservatório, bomba, barras, *etc.*) é montado em um chassi, com a bomba acionada, via cardã, pela Tomada de Potência (TDP) do trator. Esses pulverizadores são os mais utilizados pelos pequenos e médios produtores, especialmente no cultivo de culturas rasteiras. Funcionam

acoplados a um trator e são dotados de: um reservatório para armazenamento da calda (mistura de água e produtos químicos), uma bomba de pressurização e duas barras, uma para cada lado do reservatório, portanto, transversais ao movimento do trator. Fixo às barras, há um conjunto de pontas de pulverização, também chamadas de bicos aspersores (*spray tips* ou *spray nozzles*), além de uma mangueira especial (ou tubo rígido), que transporta a calda pressurizada até os bicos.

É também comum a existência de dispositivo anti-gotejo na parte superior dos bicos, tipicamente composto de conjunto mola-diafragma, de forma a impedir que o líquido saia pelas pontas aspersoras quando o sistema está despressurizado, *i.e.*, com a bomba desligada. Na Figura 5, há o exemplo de um pulverizador de barras, bem como de seu uso, acoplado ao engate de três pontos do trator.



(a) Equipamento

(b) Aplicação

Figura 5: Pulverizador de barras tratorizado, montado no engate de três pontos. (RUBEMAQ, 2018), (NEW LANDS, 2019)

Os pulverizadores de barras de arrasto são semelhantes ao descrito acima, com a diferença de que sua estrutura é montada em um chassi com rodas, que é acoplado à barra de tração do trator. Na Figura 6, há um exemplo de pulverizador de arrasto.

2.1.4 Pulverizador autopropelido

O pulverizador autopropelido (ou automotriz) é um equipamento de grande porte, usado principalmente em propriedades rurais de grandes extensões (latifúndios). Em algumas regiões, é chamado popularmente de “pulverizador gafanhoto” e dispensa o uso do trator, já que é autopropelido. Muitos modelos contam com alta tecnologia, abrangendo controle bico-a-bico, e georreferenciamento. Entretanto, são equipamentos tecnológicos de alto custo e, portanto, incompatíveis com as áreas cultivadas nas pequenas propriedades. Um exemplo desses pulverizadores é apresentado na Figura 7.



Figura 6: Pulverizador de barras de arrasto.
(JOHN DEERE, 2019a)



Figura 7: Pulverizador autopropelido Jacto Uniport.
(JACTO, 2018b)

2.1.5 Pulverização aérea

A pulverização aérea é feita por meio de aeronaves agrícolas adaptadas, no contexto da chamada aviação agrícola. Esses aviões são dotados de reservatório para o transporte da calda e bicos de pulverização. São usados em grandes propriedades e tem melhor eficiência em áreas com poucos obstáculos (árvores, reserva legal, torres e linhas de transmissão, *etc.*). Seu uso também conta com restrições referentes à altura de voo, intensidade e direção do vento, *etc.* Um exemplo de pulverização aérea com avião agrícola pode ser visto na Figura 8.

Mais recentemente, há também situações em que estão sendo usados “drones”, *i.e.*, Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) para fazer a aplicação pontual de produtos fitossanitários ou mesmo no controle biológico de pragas. Geralmente, esses VANTs são aeronaves remotamente pilotadas, chamadas de RPA (*Remotely Piloted Aircraft*).



Figura 8: Pulverização aérea.
(BRASQUIMICA, 2018)

2.1.6 Pulverizador utilizado no trabalho

No presente trabalho, como o foco é a agricultura familiar, tem-se por objeto de estudo os pulverizadores de barras tratorizados, de pequeno porte.

Para o sucesso da aplicação, e a efetiva proteção da lavoura contra pragas, doenças e insetos, bem como a disponibilização de nutrientes para as plantas, é necessário garantir boa cobertura das folhas e plantas. Para isso, diversos aspectos devem ser considerados, como vento, umidade relativa e temperatura. Além disso, deve-se fazer a correta seleção do tipo de ponta aspersora, e o adequado ajuste na pressão de trabalho da barra, visando obter um tamanho de gota capaz de reduzir a deriva e proporcionar a cobertura desejada (JACTO, 2017; CRUVINEL et al., 2016).

No método convencional de pulverização, exemplificado na Figura 9, os equipamentos não possuem nenhum tipo de automação ou controle. Logo, geralmente, o trator se desloca com velocidade constante (por exemplo, de 6 km/h)² e os bicos são todos acionados ao chegar na lavoura e ficam pulverizando o tempo todo, o que pode provocar alguns inconvenientes, tais como: sobreposição (produto aplicado mais de uma vez no mesmo lugar); desperdício nas extremidades (produto aplicado onde não há mais cultura de plantas); “falhas na lavoura” (produto aplicado em pontos onde as sementes ou mudas não vingaram); e perda nas manobras de retorno. Justamente esses são alguns dos problemas que o projeto AutoCERES e este trabalho de mestrado se propõem a minimizar, a partir da possibilidade de fechamento individual dos bicos.

2.2 Agricultura de Precisão

De acordo com Zhang e Pierce (2016), a agricultura de precisão (AP) é uma nova prática agrícola que vem se desenvolvendo desde o final dos anos 1980. Começou com

²Para uma velocidade de 6 km/h , se o operador enviar o comando 1 m antes do ponto exato de abertura ou fechamento do bico, o tempo de resposta do sistema deve ser de $0,6 \text{ s}$. Se o comando for enviado mais próximo, a resposta precisa ser mais rápida.

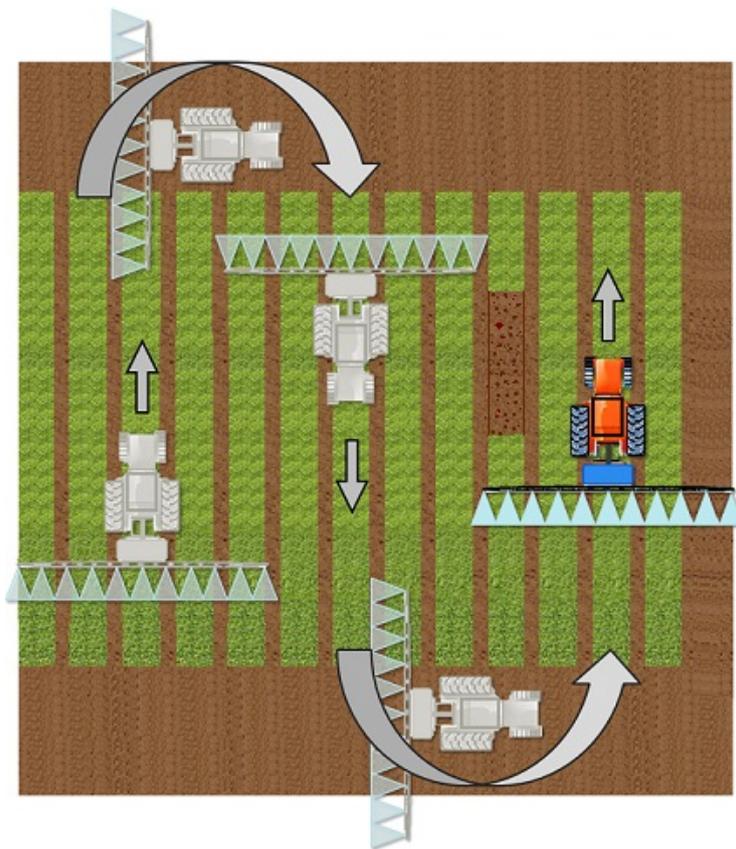


Figura 9: Método típico de pulverização.

os monitores de rendimento, amostragem de solo, sensores de solo, sistemas de posicionamento e tecnologia de taxa variável (VRT: *Variable Rate Technology*). E cresceu com os avanços nos sistemas de posicionamento global (GPS: *Global Positioning System*), sistemas de informação geográfica (GIS: *Geographic Information System*), sensoriamento remoto e tecnologia de sensores.

Zhang (2015) relembra que, tradicionalmente, os agrotóxicos são aplicados uniformemente em toda a plantação. No entanto, insetos, doenças e vegetações espontâneas tendem a se apresentar com variabilidade espacial. Shiratsuchi, Christoffoleti e Fontes (2003) também alertam que o manejo de plantas daninhas em sistemas de produção agrícolas é fundamentado no tipo e grau de infestação da área no momento da aplicação das medidas de controle, ou no histórico da incidência de plantas daninhas. Sendo assim, é levada em consideração a infestação média da área, considerando-se que há uma distribuição uniforme no talhão³. No entanto, as plantas daninhas não se distribuem nas áreas agrícolas uniformemente, mas sim de forma contagiosa e em diferentes graus de contagiosidade, com grande variabilidade espacial. Assim, a aplicação uniforme dos defensivos resulta na sua deposição em ambientes onde não são necessários. Com o uso da agricultura de precisão, objetiva-se poder aplicar os agrotóxicos apenas onde e quando necessário.

³Talhão é a unidade mínima de cultivo de uma propriedade. É construído com base na capacidade das máquinas usadas, no tipo de cultura e no relevo do terreno.

No Brasil, em 2012, o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), ao instituir a Comissão Brasileira de Agricultura de Precisão (CBAP), definiu a Agricultura de Precisão como “um sistema de gerenciamento agrícola baseada na variação espacial e temporal da unidade produtiva e visa ao aumento de retorno econômico, à sustentabilidade e à minimização do efeito ao ambiente”. Estipulou, então, que os objetivos da AP são “detectar, monitorar e manejar a variabilidade espacial e temporal dos sistemas de produção agropecuários buscando a sua otimização”. Observa que a variabilidade espacial se refere aos atributos relacionados à textura do solo, fertilidade, controle de pragas e produtividade, *etc.*, que apresentam valores diferentes nos diversos pontos da lavoura (MAPA, 2017).

Bernardi et al. (2014) resumem bem os conceitos supracitados e definem a AP como um sistema de gestão que leva em conta a variabilidade espacial do campo com o objetivo de obter um resultado sustentável social, econômico e ambiental. Ora, uma vez reconhecido que a terra de cultivo não é uniforme, precisa-se atuar em cada porção conforme sua necessidade específica. A isso chama-se de Aplicação a Taxa Variada (VRA: *Variable Rate Application*) ou Tratamento Localizado. Nesse contexto, considera-se a variabilidade espacial dos atributos de interesse e prescreve-se a taxa de insumos de acordo com a necessidade específica de cada subárea. O princípio é reduzir a gleba⁴ a subáreas que apresentem homogeneidade aceitável (LIND; PEDERSEN, 2017; ZHANG, 2015).

Percebe-se, então, que a implementação da AP envolve necessariamente a capacidade de identificar a variabilidade espacial da lavoura, como também a disponibilidade de máquinas com recursos de automação tais que permitam uma atuação variável na lavoura.

Segundo Bernardi et al. (2014), uma máquina para agricultura de precisão é aquela que apoia na gestão da variabilidade espacial da lavoura, permitindo, por exemplo, a aplicação de insumos a taxa variada. A implementação da AP se dá a partir da execução cíclica de três etapas, quais sejam: Leitura; Interpretação/Planejamento; e Atuação. Na primeira etapa, a partir de mapeamento, via sensores ou câmeras, é identificada a condição da lavoura. Na segunda, interpretam-se os dados coletados e faz-se o planejamento da atuação por meio de análises agronômicas. Por fim, na terceira, atua-se na lavoura, por exemplo, aplicando os insumos necessários, na perspectiva de obter o resultado esperado.

Vale observar que essas etapas são análogas aos preceitos da teoria básica de controle realimentado, em malha fechada, abrangendo ações para: Medir; Comparar; e Atuar. Onde, mede-se os valores de interesse do processo (PV: *process variable*), compara-se com os valores desejados (SP: *set point*) e, por fim, atua-se no processo, através da variável manipulada (MV: *Manipulated Variable*), na perspectiva de anular o erro entre os valores medido e desejado.

De acordo com Molin, Amaral e Colaço (2015), os produtos fitossanitários, em ge-

⁴Gleba: “Terreno apropriado para cultivos.” Michaelis. Dicionário Brasileiro da Língua Portuguesa. Web. Disponível em: <michaelis.uol.com.br>. Acesso em 17/09/2019.

ral, são mais agressivos e nocivos ao ambiente do que os fertilizantes. Quando aplicados em excesso, podem contaminar o produto final, além de aumentarem os custos e serem danosos ao ambiente. Logo, a adoção de técnicas de aplicação localizada de herbicidas, inseticidas e fungicidas tem maior potencial de fazer jus ao argumento incontestável do benefício ambiental. Além disso, por serem produtos normalmente caros, responsáveis por uma porção significativa dos custos de produção das mais diversas culturas, as economias também são sensíveis.

Shiratsuchi, Christoffoleti e Fontes (2003) afirmam que a necessidade de racionalizar o uso de insumos é um desafio constante. Levando-se em consideração que em áreas agrícolas altamente tecnificadas, os herbicidas podem contribuir em até 25% do custo de produção de soja em plantio direto, a preocupação em racionalizar o seu uso é muito relevante. Nos trabalhos em que se quantifica a economicidade da aplicação localizada, observa-se diminuição da contaminação do ambiente por insumos agrícolas, além de maior eficiência na utilização dos herbicidas. Já em Nuspl, Rudolph e Guthland (1996), os autores identificam ser possível uma economia de herbicida na ordem de 30 a 80% quando se utiliza o controle das plantas daninhas pela aplicação localizada de herbicidas em áreas infestadas e mapeadas, em relação à aplicação em área total.

Heege (2013) discute várias formas de identificar e mapear vegetações espontâneas (“ervas daninhas”), tanto com abordagem *off-line* quanto de tempo real. Mostra que os investimentos em agricultura de precisão devem ser avaliados a partir do retorno em termos de economia e produtividade. Apenas com o uso de mapas espaciais e temporais, afirma ser possível, por exemplo, identificar maiores zonas de manejo homogêneas, facilitando a gestão. No caso dos fungicidas, apresenta formas de fazer a detecção em estágios iniciais, aumentando o sucesso do tratamento. No caso dos herbicidas, afirma que as economias são significativas, variando de 20 a 70%, quando se utilizam técnicas de tratamento localizado.

2.2.1 Tratamento localizado em pulverização

Shiratsuchi, Christoffoleti e Fontes (2003) discutem que a aplicação localizada de herbicidas pode ser feita: por mapas de infestações; ou por detecção em tempo real. Na aplicação baseada em mapas, necessita-se de um mapeamento prévio das plantas daninhas na área de produção. A partir daí, confeccionam-se mapas de tratamentos, que podem ser usados para orientar pulverizadores e controlar o sistema de aplicação, nos equipamentos automatizados, dotados de GPS e *softwares* específicos.

Já na aplicação governada por sensores em tempo real, o mapeamento prévio da área infestada deixa de ser necessário, pois a pulverização baseia-se em sensores acoplados ao pulverizador que detectam a planta daninha, controlando a pulverização.

Todavia, observa-se que a utilização do GPS com o auxílio de sensores de detecção em tempo real fornece orientação ao operador para caminhar em linhas paralelas (espe-

cialmente, na dessecação ou quando não se tem a cultura emergida). Também é útil para fins de relatórios de aplicação e registro de dados de operação, com georreferenciamento das áreas pulverizadas, podendo, inclusive, servir de base para uma melhoria no tratamento herbicida de futuras safras. No entanto, é importante observar que na aplicação governada por sensores em tempo real, a quantidade de produto demandada para uma dada lavoura não é previamente conhecida, pois depende do diagnóstico realizado no ato da operação (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015).

O tratamento localizado da pulverização, tanto no caso baseado em mapas, quanto na detecção em tempo real, pode ser implementado via sistema de taxa variada (VRA) ou por aplicação liga/desliga.

2.2.1.1 Taxa variada (VRA)

Conforme Molin, Amaral e Colaço (2015), existem basicamente duas formas de variar taxas de aplicações em pulverizações:

- (a) VRA por variação do volume da calda; ou
- (b) VRA por variação da dose de princípio ativo, com volume de calda constante.

A variação do volume da calda (a) pode ser feita de três formas distintas: (i) via variação na pressão de aplicação; (ii) via variação no número e vazão dos bicos, usando-se um conjunto de pontas com diferentes vazões cada, controladas por um sistema de válvulas para selecionar a combinação correta de pontas; ou (iii) por um sistema de controle de vazão modulada por largura de pulsos (PWM: *Pulse Width Modulation*), no qual os bicos operam com válvulas solenoides de alta velocidade, permitindo determinar sua vazão a partir da abertura e fechamento dos bicos por um curto intervalo de tempo e com alta frequência.

Já a variação da dose de princípio ativo, com volume de calda constante (b) é obtida a partir do uso de uma bomba para variar a taxa de injeção do produto químico na corrente de água advinda do reservatório. Esse método é também chamado de sistema de injeção direta (DIS: *Direct Injection System*).

2.2.1.2 Aplicação liga/desliga (on/off)

Além dessas duas aplicações, por variação contínua de taxas (VRA), Molin, Amaral e Colaço (2015) apresentam também um tipo mais simplificado de tratamento localizado conhecido com aplicação liga/desliga (*on/off*). Nesse caso, válvulas de controle atuam desligando ou ligando o sistema de aplicação, mantendo, porém, taxa constante durante os momentos de aplicação. A ação de ligar ou desligar pode ser comandada por sensores, mapas de contorno, ou mesmo por intervenção humana do operador da máquina.

Um exemplo comum é em pulverização de pomares, em que sensores de distância indicam a presença de uma planta e ativam o sistema. Ao passar por um espaço entre

plantas ou por uma falha, esse sistema é desligado automaticamente. Outro exemplo é no controle de plantas daninhas. Nesse caso, os bicos de pulverização são acionados apenas quando sensores reconhecem a presença do alvo no campo.

De acordo com Molin, Amaral e Colaço (2015), esse tipo de aplicação liga/desliga, embora relativamente simples, é responsável por economias significativas de produtos químicos. Muitas vezes, esse sistema é agregado aos anteriores para promover aplicações em taxas variadas com interrupções automáticas guiadas por sensores ou mapas.

Cumprir destacar que nos casos de aplicação liga/desliga, “aplica ou não aplica”, não há efetivamente uma variação contínua de taxas ou doses e, portanto, os termos variada ou variável não parecem ideais. Daí, os termos “tratamento localizado” e “gestão localizada” se mostram abrangentes o suficiente para se referir às mais diversas aplicações (MOLIN; AMARAL; COLAÇO, 2015).

Os métodos de tratamento localizado podem ser resumidos conforme esquema apresentado na Figura 10, na qual se explicita a segregação entre as ações de identificação e atuação.

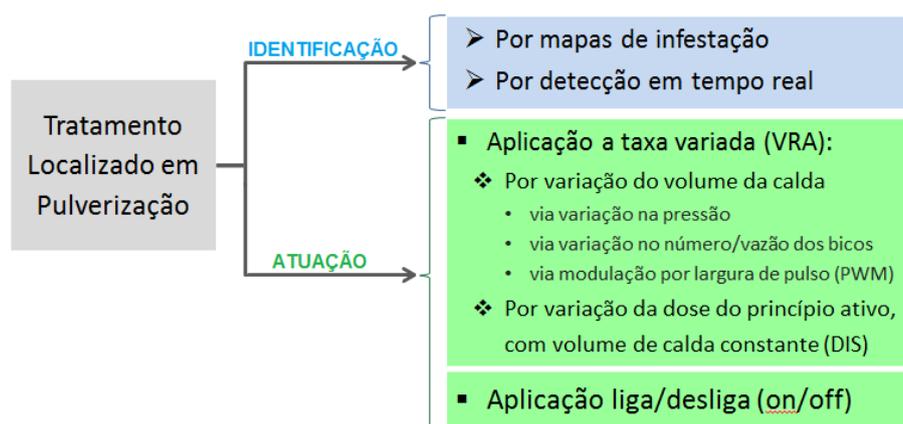


Figura 10: Tratamento localizado em pulverização.

2.3 Trabalhos Relacionados

Não é de hoje que a área agrícola demanda novos produtos, seja em relação ao desenvolvimento de novas sementes e princípios ativos, nos laboratórios químicos e biológicos, seja por parte das empresas fabricantes de máquinas e implementos, ou mesmo da academia, especialmente nas áreas de engenharia agrícola. Todavia, nos últimos anos, o campo tem despertado grande interesse de grupos de pesquisa envolvendo também outras engenharias, nas áreas de computação, automação, instrumentação e eletrônica, que até recentemente pouco exploravam esse objeto de estudo. Isso demonstra que ainda há muita ciência e tecnologia a serem desenvolvidas para os problemas da agricultura.

Nesse contexto, muitos autores abordam, nos seus trabalhos, o tema da gestão localizada. Conforme discutido no capítulo anterior, viabilizar o tratamento localizado é funda-

mental, tanto para o sucesso da AP, quanto para a redução da quantidade de agrotóxicos utilizados nas lavouras.

Há mais de uma forma de solucionar esse problema, o que pode ser percebido a partir das diferentes abordagens propostas pelos diferentes autores estudados. A seguir, são apresentadas algumas pesquisas e publicações correlatas, subdivididas em trabalhos acadêmicos; soluções de mercado; e patentes. São discutidas suas contribuições, além dos aspectos positivos e negativos no contexto da aplicação estudada.

2.3.1 Trabalhos Acadêmicos

Tanto Felizardo, Oliveira e Cruvinel (2010) quanto Cruvinel et al. (2011) descrevem o protótipo de uma bancada didática, do tipo estática, para avaliação de sistemas de injeção direta de herbicidas. O protótipo conta com reservatórios, bombas, controlador, sensores, além de três seções independentes: duas com dez pontas; e uma com três. Com o sistema, simulam diversas situações de campo para aplicação a taxa variada.

Em Felizardo et al. (2016), os autores desenvolvem um modelo matemático para uma bancada de pulverização. Em seguida, fazem experimentos em laboratório para validar o modelo obtido. Concluem que o desempenho do sistema de pulverização pode ser adequadamente estimado a partir do modelo; e que, portanto, os modelos são úteis para projetar controladores apropriados, capazes, por exemplo, de variar a taxa de aplicação a partir de um mapa prévio.

Então, em Mercaldi et al. (2017), os autores apresentam um modelo correlacionando pressão e vazão num sistema de pulverização. Analisam a variação da velocidade linear de cada bico para deslocamentos do trator-pulverizador em trajetórias curvilíneas. Apresentam um sistema com uma válvula proporcional para cada seção de bicos, de forma a variar a resistência fluídica na seção, podendo controlar indiretamente a vazão nos bicos. Utilizam uma bancada experimental com vários componentes hidráulicos. Uma unidade de controle eletrônico (ECU) para cada válvula, contendo microcontrolador, responsável por armazenar e executar os algoritmos de controle; e controlador e transcritor CAN (*Controller Area Network*), responsáveis por interpretar as mensagens recebidas via CAN bus.

Ferreira et al. (2018) propõem a variação da taxa de pulverização por meio do controle da velocidade de rotação da bomba de pulverização. Na estratégia discutida pelos autores, utiliza-se um inversor de frequência para controlar a rotação de um motor trifásico acoplado à bomba, o que é bastante interessante academicamente, especialmente do ponto de vista de eficiência energética. Todavia, pouco prático para implementação no campo, visto que os sistemas de pulverização tradicionais são acoplados aos tratores e acionados por meio da energia mecânica que recebem da TDP do trator.

Já em Penalosa, Oliveira e Cruvinel (2018), é proposto o uso de um sensor virtual (*soft-sensor*) para “medir” a qualidade da aplicação de agroquímicos no efetivo controle

de pragas. Na verdade, com base na modelagem realizada, utilizam o sensor virtual para prever a qualidade das variáveis de processo (PPQV: *predictor of process quality variables*) a partir da medição da pressão e da vazão na barra. Em seguida, utilizam esse resultado no controle do processo, para planejar sua operação (OPP: *operation planner in the process*). Para isso, recebem os descritores de qualidade desejados e informam quais as condições de operação necessárias, como diâmetro dos bicos e velocidade de aplicação, para que os referidos resultados possam ser de fato obtidos. Novamente, os testes são realizados em laboratório. Dessa vez, em uma planta experimental da Embrapa, chamada de ASDS (*Agricultural Sprayer Development System*), que utiliza um sistema de controle embarcado da National Instruments, chamado de NI-cRIO.

Rosa (2018) e Rosa, Terra e Drews-Jr (2019) também apresentam uma bancada de laboratório desenvolvida para a realização de testes com bicos pulverizadores. Utilizam vários equipamentos hidráulicos e elétricos. Discutem algumas tecnologias existentes para automatizar o fechamento dos bicos e propõem o uso de solenoides de baixo custo. Apresentam o modelo matemático das resistências fluídicas da bancada de testes. Avaliam o comportamento relativo da pressão e da vazão. Por fim, propõem uma estratégia de controle para manter a pressão estável na barra.

No contexto dessa mesma solução, tanto em Nascimento et al. (2019) quanto em Weber (2019) e Weber et al. (2018), os autores apresentam estratégias para a visão computacional, no intuito de viabilizar o reconhecimento das linhas de plantio. Por meio desse reconhecimento, afirmam que será possível realizar a abertura e o fechamento dos bicos de forma autônoma, a partir da integração das soluções. E, assim, proporcionar aplicação a taxa variada.

Ainda na área de visão computacional, Zhang et al. (2018) fazem um estudo de várias técnicas de detecção de folhagem lateral, para pulverização via atomizador (*air-blast sprayer*), no cultivo de árvores e pomares. Para isso, comparam resultados do uso de sensores infravermelho, ultrassônico, varredura laser (LIDAR: *Light Detection And Ranging*) e câmera de visão estéreo, apresentando vantagens e desvantagens de cada um deles. Avaliam também aplicações que fazem fusão de dados, combinando diferentes sensores. Concluem que ainda há muito trabalho a ser feito na área, tanto para melhorar os sistemas de detecção, desenvolver *softwares* de pós-processamento e aumentar a velocidade na tomada de decisão, como também para reduzir seus custos. Os autores focam seu trabalho nas técnicas de detecção, não detalhando as estratégias e tecnologias de *hardware* (eletrônica e automação) dos equipamentos estudados.

Outro trabalho correlato foi feito em Gil et al. (2013), no qual os autores descrevem o desenvolvimento de um protótipo para aplicação de pesticidas a taxa variada num vinhedo, novamente utilizando atomizador de turbina. A identificação das plantas é feita sempre no sentido lateral, por meio de sensores ultrassônicos instalados no pulverizador. A distância informada pelo sensor é, então, convertida em volume e, em seguida, calcu-

lada a abertura da válvula que libera o agrotóxico. Para isso, os autores utilizam várias premissas e admitem que pode haver erros na execução. Mesmo assim, trata-se de uma solução muito interessante. Os autores concluem ainda sobre a necessidade urgente de uma solução de baixo custo e de fácil utilização, que possa ser adotada pelos agricultores sem grandes dificuldades. Outra contribuição dos autores é a apresentação de uma análise matemática a partir da qual conseguem estimar em 21,9% a economia potencial de agrotóxicos com o protótipo desenvolvido. Infelizmente, tanto o protótipo quanto o método de cálculo são bastante específicos para culturas verticais, que é o caso dos vinhedos. Portanto, são de difícil implementação para culturas rasteiras. Além disso, para implementar a infraestrutura de eletrônica e automação os autores utilizam arquitetura da National Instruments com Controlador Compact Field Point (cFP-2120) e módulos dedicados para as entradas e saídas, tanto analógicas quanto digitais. Já os algoritmos de controle e supervisão são executados em LabView, por meio de um laptop instalado na cabine do trator.

Pouco antes, em Chang et al. (2012), os autores desenvolvem um conjunto de algoritmos de visão de máquina para aplicar em campos de mirtilo selvagem. Comparam diferentes métodos e mostram ser possível identificar e diferenciar na imagem: pontos descampados, mirtilo selvagem e plantas espontâneas (“ervas daninhas”). Assim, com bom resultados computacionais, e com aceitável discriminação em tempo real, afirmam que a solução pode ser usada para pulverização de pontos de interesse nas culturas de mirtilo.

2.3.2 Soluções de Mercado

Em nível de produtos comerciais, conforme discutido no Capítulo 1, há algumas soluções de automação do fechamento dos bicos disponíveis no mercado. Uma é a da Raven (2019). Esse fabricante oferece vários tipos de soluções modulares para máquinas e implementos existentes. Um dos produtos é composto por um controlador central, sensores de pressão e vazão, além de válvulas para abertura individual dos bicos de pulverização. O fabricante afirma conseguir manter a pressão e o tamanho de gota estáveis, independente da velocidade da máquina ou das condições da lavoura. Utiliza sistema de modulação por largura de pulso (PWM) para controlar a taxa de aplicação de cada bico. Com isso, afirma conseguir compensar trajetórias curvilíneas. A decisão de abertura ou fechamento dos bicos pode ser tomada manualmente pelo operador, ou a partir da integração com mapas e sistemas de outros fabricantes, acompanhando as referências da plantadeira, por exemplo.

Outra solução comercial, um pouco mais sofisticada, é a da WEED-IT (2019), comercializada no Brasil pela Smart Sensing Brasil (2019). Esse sistema é útil especialmente na aplicação de herbicidas (dessecantes). Utiliza um conjunto de LEDs azuis de alta intensidade, gerando um feixe de luz, apontado para o solo. Fixo à barra de pulverização, há um conjunto de sensores que detectam a reflexão da luz nas plantas. O fabricante afirma

que a reflexão se dá em maior intensidade devido à presença da clorofila das plantas. A partir dessa informação, o sistema de controle processa o sinal e decide pela abertura ou fechamento de cada bico individualmente. O produto oferece ainda diferentes modos de operação, permitindo, por exemplo, variar a taxa de aplicação por meio de acionamento das válvulas de abertura dos bicos via PWM.

A empresa BLUE RIVER (2020) tem uma solução semelhante, batizada de tecnologia *See & Spray*, que visa trazer a gestão da lavoura ao nível de cada planta, individualmente. Utiliza visão computacional para identificar os pontos onde deve ocorrer a aplicação do agrotóxico; além de inteligência artificial, aprendizado de máquina e (*deep learning*) para poder diferenciar entre plantas de cultura, vegetação espontânea e solo.

2.3.3 Patentes

Muitos dos produtos existentes têm funcionalidades e características protegidas por registros de patentes. É o caso da empresa Raven, que possui centenas de patentes depositadas. Um delas é a WO2014201008A1 (MICHAEL, 2014), que apresenta um sistema de injeção localizada de produto para pulverizadores agrícolas. Basicamente, os autores descrevem vários possíveis usos de um pulverizador utilizando um sistema composto por controlador, sensores e válvulas. O sistema permite a distribuição de produtos agrícolas, como herbicidas, fertilizantes, inseticidas, e fungicidas, em concentrações diferentes, conforme receita carregada no controlador.

Outra patente semelhante, da mesma empresa, é a US20170348718A1 (PREHEIM et al., 2017). Nesse documento, é descrito um sistema para controle da vazão dos bicos, incluindo um nó principal com a vazão total esperada para gerar o volume de produto conforme as características do pulverizador. Um módulo de ajustes configurado para gerar a correção do erro, com base na diferença entre a vazão esperada de produto total e a vazão medida. Vários bicos inteligentes comunicando-se com o nó principal. Cada um contendo uma unidade de controle eletrônico em comunicação com uma ou mais válvulas de controle e também com uma ou mais montagens de bicos. Cada bico inteligente inclui um módulo de vazão alvo do produto com base nas características do pulverizador. A vazão alvo do bico é ajustada de acordo com a correção do erro.

A empresa John Deere também possui várias patentes depositadas. Um exemplo é a EP2995382A1 (FUNSETH; HUMPAL; BULLOCK, 2016). Nessa patente, é descrito um sistema de bicos. Cada sistema é acoplado a um ponto, substituindo um bico típico, numa barra de pulverização. O corpo do sistema abrange uma entrada de fluido e duas saídas. Cada saída é controlada por uma válvula acionada por atuador via sinal PWM, permitindo vários modos de operação: fluido expelido pelas duas válvulas do; ou por apenas uma; ou pela outra. A patente descreve ainda um sistema de controle central que usa *backbone* de comunicação CAN-bus para coordenar as atividades de cada controlador do sistema de bico.

Outra patente da John Deere é a BR102015023131A2 (HUMPAL; FUNSETH, 2016). Nela, é descrito um dispositivo de bico de pulverização, bico individual e método para operar um bico de pulverização. Parte da solução descrita é bastante similar ao apresentado na patente anterior (EP2995382A1). O bico descrito contém duas ou mais válvulas que são atuadas por sinais modulados por frequência ou tempo. Os sinais PWM são intercalados para abrir e fechar cada uma das respectivas válvulas que permitem que o fluido escoe de uma entrada para uma saída combinada. As posições de abertura e fechamento das válvulas são intercaladas para aumentar a frequência de fluxo do fluido.

2.3.4 Considerações

Como visto, há muita pesquisa sendo feita na área de pulverização agrícola. No entanto, observa-se pouca documentação específica sobre soluções modulares de baixo custo, adaptáveis aos pequenos pulverizadores agrícolas existentes, no contexto da agricultura familiar. Caracteriza-se, portanto, uma boa oportunidade de trabalho.

Além disso, os sistemas e soluções apresentados nos trabalhos correlatos são bastante específicos e até mesmo difíceis de serem comparados e generalizados. Dessa forma, acredita-se que uma solução modular e genérica pode abrir novas oportunidades de desenvolvimento científico e tecnológico na área.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, descreve-se a metodologia utilizada para o desenvolvimento da solução proposta. Inicialmente, apresentam-se as etapas necessárias para a confecção do protótipo, passando por projeto, desenvolvimento, construção e instalação da solução de automação no pulverizador. Descrevem-se as partes mecânicas que compõem o pulverizador e as modificações eletromecânicas realizadas, tanto em nível de *hardware*, abrangendo instrumentação (sensores e válvulas) e eletrônica (microcontroladores, circuitos e interligações), quanto em nível de *software*, abrangendo os algoritmos desenvolvidos para os controladores.

Logo a seguir, apresentam-se os modelos matemáticos que descrevem o comportamento fluídico da barra pulverizadora; seguidos de algumas simulações computacionais realizadas para o sistema; e, por fim, os experimentos práticos realizados com o protótipo.

3.1 Desenvolvimento do Protótipo

O protótipo desenvolvido parte de um pulverizador agrícola P320X fabricado pela empresa Rubemaq (RUBEMAQ, 2018), composto por: reservatório de calda de 320 L, com visor de nível tipo flutuador; bomba de deslocamento positivo, tipo membrana (diáfragma), modelo KAPPA-43-1C da empresa Udor, com vazão nominal de 43 L/min a 540 rpm; barras com fechamento em X e comprimento total de 10 m; 20 bicos, com ponta do tipo leque e sistema anti-gotejo, instalados na barra com espaçamento de 0,5 m, e alimentados por mangueira agrícola de 1/2"; filtros de particulado; e bloco com válvula de alívio ajustável, manômetro e triplo comando manual (abre/fecha) para barra direita, esquerda e misturador.

Esse pulverizador, na sua forma original, foi apresentado na Figura 5. Já as modificações realizadas no contexto deste trabalho podem ser vistas na Figura 11. Os itens adicionados pelo projeto estão identificados em vermelho, com asterisco.

As pontas de pulverização utilizadas são do tipo leque MAGNO MF 015 110°, cor verde, classe Fina, com DMV (Diâmetro Mediano Volumétrico) na faixa de 150 a 250 μm. Fornecem vazão média de 0,5 L/min para pressões na barra na faixa de 2 bar. Vazão

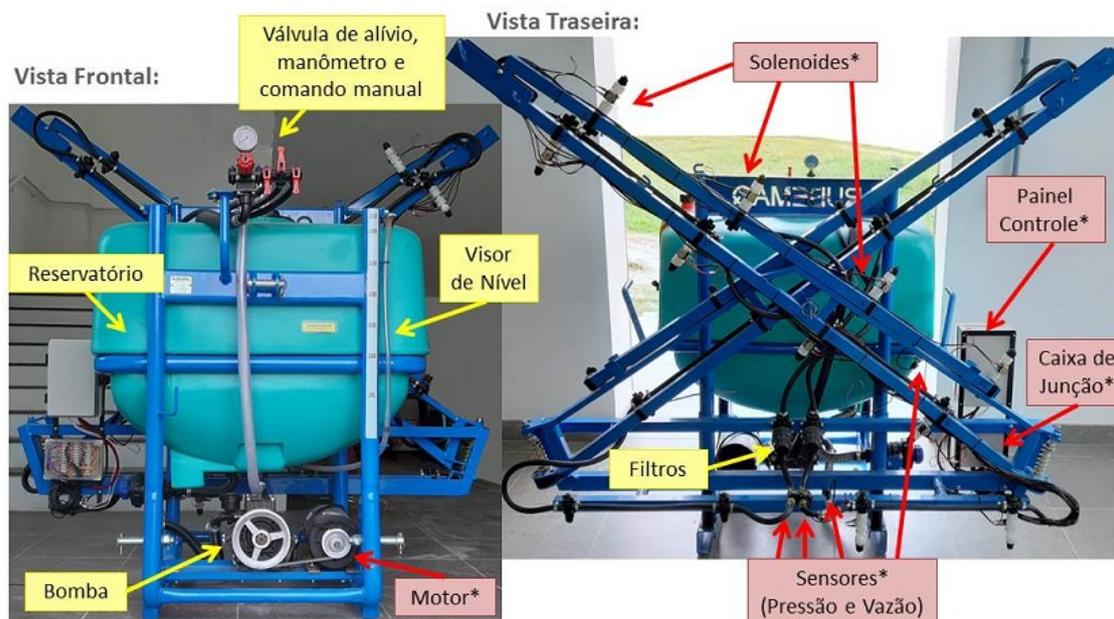


Figura 11: Protótipo do pulverizador.

de $0,61 \text{ L/min}$ para pressão de $3,1 \text{ bar}$; e $0,7 \text{ L/min}$ para $4,1 \text{ bar}$. Na Figura 12, é apresentada uma foto da ponta utilizada, bem como a tabela de referência do fabricante.

CÓDIGO CÓDICE CÓDIGO	PONTAS NOZZLES BOQUILLAS	bar	lb/ft ² pop ²	DMV VMD l/min	0,5 m													
					4	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20	25	
M 301/1B	MF 015 MALHA / MESH / MALLA 100	2	30	F	0,50	150	120	100	86	75	67	60	50	43	37	33	30	24
		3,1	45	F	0,61	183	146	122	105	92	81	73	61	52	46	40	36	29
		4,1	60	F	0,70	210	168	140	120	105	93	84	70	60	52	46	42	34

Figura 12: Ponta de pulverização.
(MAGNOJET, 2019)

Os experimentos são realizados no Centro de Ciências Computacionais (C3), da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). Para viabilizar os testes sem o trator, é necessário utilizar um motor elétrico para fornecer torque à bomba, via acoplamento por meio de um conjunto de polias e correia. Usa-se um motor de indução trifásico de gaiola com 1 cv de potência, do fabricante Nova, acionado por conversor de frequência¹ Schneider ATV11HU41M2A. A frequência do conversor é ajustada em 37 Hz tal que a bomba fica com rotação de 540 rpm , que é justamente a rotação nominal fornecida pela TDP do trator².

Em seguida, fez-se estudo, projeto, aquisição e instalação dos instrumentos ne-

¹O inversor de frequência é necessário devido à inexistência de tomada trifásica no local de teste.

²Conferiu-se a rotação no eixo da bomba por meio de medição com tacômetro digital.

cessários para automatizar a barra de pulverização. Para fins de comparação, instrumentou-se apenas um lado da barra, com válvulas *on/off* para cada bico aspersor, sensores de pressão e de vazão. Na outra barra, instalou-se um único instrumento, um sensor de vazão, no intuito de permitir futuras comparações entre os volumes aplicados por cada uma das barras, da direita e da esquerda.

Entende-se por instrumento todo aquele dispositivo utilizado para medição, indicação e/ou controle. Instrumentação, portanto, é o conjunto desses instrumentos no contexto de uma aplicação. É também chamada de instrumentação a área de conhecimento que estuda esses instrumentos (BEGA et al., 2006; LIPTÁK, 2003a).

Da teoria de controle clássico, vale lembrar que, para controlar um processo, é preciso medir os parâmetros de interesse (PV: *process variable*), verificar se estão adequados, a partir de sua comparação com os valores desejados (SP: *set point*), e, por fim, se necessário, atuar sobre a variável manipulada do processo (MV: *manipulated variable*), visando modificá-lo, na perspectiva de anular o erro (*offset*) entre o valor medido (PV) e o desejado (SP). Os sistemas de controle, portanto, trabalham para manter a variável controlada no valor especificado, sem a necessidade de intervenção do operador (OGATA, 2003; BOLTON, 1995).

Os instrumentos de medição são comumente chamados de transmissores e seu papel é medir uma variável do processo (PV), convertê-la a um valor mensurável de forma inteligível e transmiti-la à distância, geralmente via sinal elétrico padronizado. Já os instrumentos de atuação são chamados de elementos finais de controle e são os responsáveis por receber o sinal de correção do controlador e, em função dele, atuar no processo modificando diretamente a variável manipulada (MV). Geralmente, a atuação nos processos industriais se dá por meio das válvulas de controle (BEGA et al., 2006; LIPTÁK, 2003a, 2003b).

3.1.1 Válvulas Solenoides

As válvulas utilizadas no protótipo são do tipo *on/off*, normalmente aberta (NA), acionamento por solenoide, com bobina de 12 V_{cc} , conexão rosca macho de 1/2" NPT, e pressão de trabalho de até 8 *bar*. Sua instalação é feita individualmente, nos dez bicos, entre o sistema anti-gotejo e a ponta de pulverização, mediante uso de conexões específicas³.

Na Figura 13, apresenta-se um exemplo de como é feita a instalação dessas válvulas, destacando-se as conexões utilizadas. Os detalhes de fabricação das conexões, bem como sua montagem junto às solenoides e aos bicos, são apresentados no Anexo A.

Como se trata de um protótipo, a escolha por essa válvula se dá basicamente pelo

³A instalação das solenoides demandou projeto e fabricação de conexões em Tecnil. Na parte superior, usa-se uma luva de redução roscada 11/16"16f x 1/2"NPT 14f. Já na parte inferior, um niple adaptador macho/fêmea de 1/2"NPT 14f x 11/16"16f.

critério custo. Trata-se do modelo mais barato encontrado. Seu preço, com frete, fica na faixa dos R\$ 70,00. É uma válvula com construção bastante simples, geralmente usada em lavadoras de roupa. Mesmo assim, apresenta características interessantes para o projeto, como dimensões compatíveis com a mangueira pulverizadora e nível de tensão adequado, já que sua bobina pode ser acionada com $12 V_{cc}$.

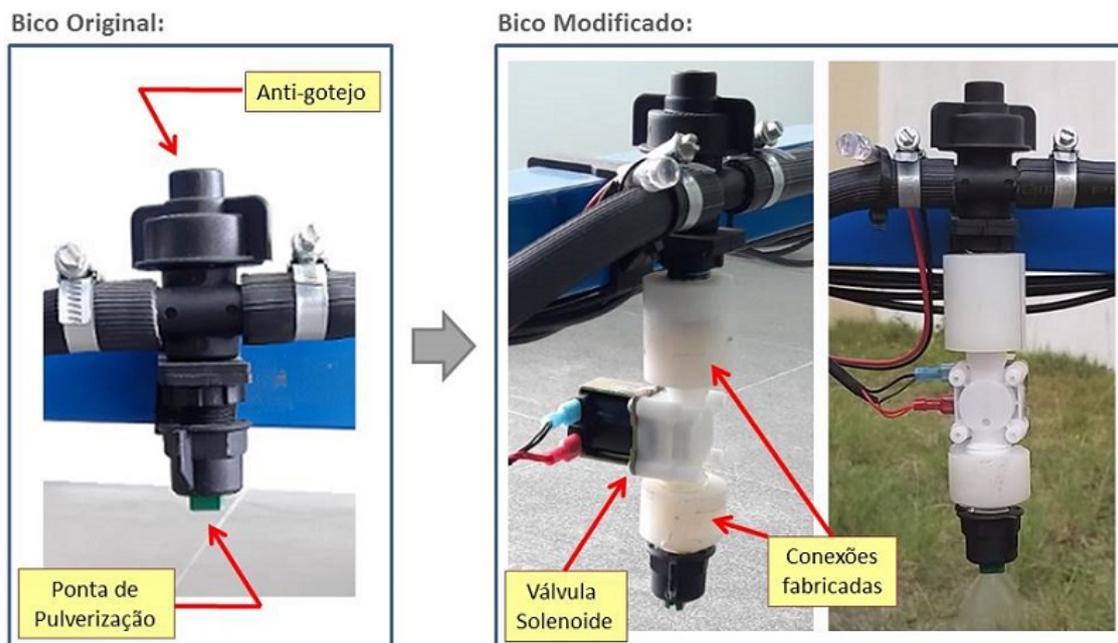


Figura 13: Exemplo de instalação das válvulas solenoides.

3.1.2 Sensores de Vazão

Para avaliar o consumo instantâneo e acumulado de produto, utilizam-se dois sensores de vazão volumétrica, modelo YSF-S201, um para cada barra lateral do pulverizador. Esse sensor possui conexões roscadas $G1/2''$. É ligado com três fios: um de sinal; e dois de alimentação: $5 V_{cc}$ e GND . Sua folha de dados (*datasheet*) está disponível no Anexo B. E a forma como é instalado no pulverizador é apresentada na Figura 14.

O princípio de funcionamento desse sensor se dá a partir da contagem dos pulsos, tal que, conforme dados do fabricante, cada $7,5$ pulsos correspondem a $1 L/min$. Assim, o valor da vazão (Q), em L/min , é calculado por:

$$Q = \frac{f}{7,5}, \quad (1)$$

em que f representa a quantidade de pulsos lidos num intervalo de 1 *segundo*.

Novamente, o critério de seleção desse modelo de sensor se dá pelo custo. Seu preço, com frete, fica na faixa de R\$ 25,00. Além disso, seu range de medição é aceitável para a aplicação, pois pode medir vazões até $30 L/min$.

3.1.3 Sensores de Pressão

A abertura e o fechamento automático dos bicos provoca variação no consumo direto da barra, o que pode causar variações na pressão. Essas variações, por sua vez, podem impactar no tamanho de gota⁴, o que, conforme discutido anteriormente, pode comprometer a efetividade da aplicação e aumentar a deriva. Logo, para identificar essa situação, é necessário medir a pressão na barra. Para isso, instalam-se dois sensores de pressão hidráulica: um próximo à descarga da bomba; e outro na extremidade oposta da barra.

Para monitorar a pressão, apenas um sensor seria suficiente. No entanto, por se tratar de um protótipo, opta-se por usar dois sensores, até mesmo para se poder verificar experimentalmente se há diferença entre a pressão nos pontos extremos da barra, para os distintos cenários de operação avaliados.

Os sensores de pressão são do tipo piezo-resistivos, modelo HK1100C, com conexão roscada $G1/4"$. Também são ligados com três fios: sendo dois para alimentação $5 V_{cc}$ e GND ; e o terceiro para sinal. Sua faixa de medição é de 0 a 12 *bar*, com saída de 0,5 a 4,5 *V*. Sua folha de dados está disponível no Anexo B.

O valor da pressão medida (P) é obtido em *bar* pelo seguinte fator de conversão⁵:

$$P = 3,0 \cdot (V_{out} - 0,5) , \quad (2)$$

em que V_{out} é o sinal de tensão fornecido pelo sensor.

Na Figura 14, apresenta-se um exemplo de como é feita a instalação dos sensores de pressão e vazão, com destaque para as conexões e adaptadores utilizados.

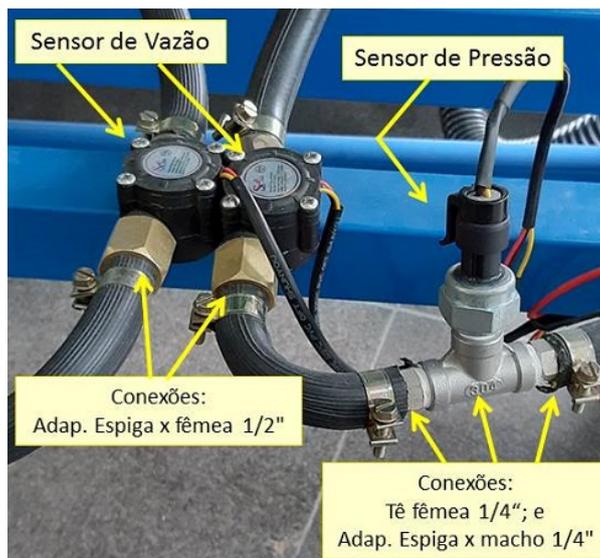


Figura 14: Exemplo de instalação dos sensores de pressão e de vazão.

⁴No Apêndice F, são apresentados alguns experimentos realizados com uma câmera de alta velocidade no intuito de identificar variações no tamanho da gota decorrentes de mudanças na pressão da barra.

⁵O fator de conversão dos sensores de pressão foi conferido em laboratório por meio de uma mesa de calibração com bomba hidráulica manual e manômetro padrão.

A escolha desse sensor de pressão se dá principalmente pelo aspecto custo, visto que esse modelo foi o mais barato encontrado. Seu preço, com frete, fica na faixa de R\$ 100,00. Além disso, apresenta características interessantes ao projeto, como invólucro robusto em aço inox, alimentação com tensão de $5 V_{cc}$ e capacidade de medir pressões até 12 bar.

3.1.4 Fluxograma de Processo, Tubulação e Instrumentação

O resultado da instrumentação do pulverizador pode ser visto no diagrama esquemático da Figura 15. Destacam-se em amarelo, com asterisco vermelho, os sensores e válvulas instalados no contexto deste trabalho. Essa representação é comumente chamada de Fluxograma de Processo, Tubulação e Instrumentação (P&ID: *Process/Piping and Instrumentation Diagram*).

Os instrumentos (sensores e válvulas) são identificados (“tagueados”) com base na norma ISA 5.1 (ISA, 2009). Cada símbolo PT (*Pressure Transmitter*) representa um sensor de pressão; FT (*Flow Transmitter*), um sensor de vazão; XV (*Unclassified Valve*), uma válvula solenoide do tipo *on/off*; LG (*Level Gauge*), um visor de nível; PG (*Pressure Gauge*), um manômetro; e PCV (*Self-Operated Pressure Regulator*), uma válvula mecânica auto-operada.

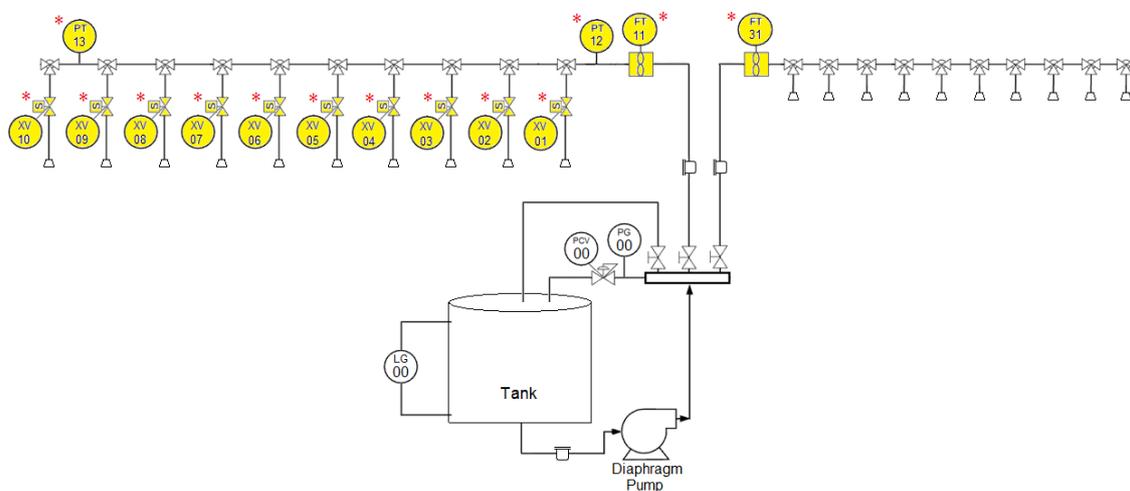


Figura 15: Fluxograma de processo/tubulação e instrumentação (P&ID).

Cumprir observar que o LG-00, o PG-00 e a PCV-00 fazem parte do pulverizador original. Logo, não foram adicionados pelo projeto. São necessários para o agricultor poder verificar a quantidade de calda ainda disponível no reservatório (LG); e também para verificar (PG) e ajustar (PCV) a pressão de trabalho da pulverização. A PCV atua como válvula regulador da pressão na barra e também como válvula de alívio, protegendo o sistema contra sobrepessão, por meio da recirculação do excedente de vazão da bomba volumétrica de volta para o reservatório.

3.1.5 Controladores

O controle da barra, abrangendo os comandos de abertura e fechamento das válvulas, a aquisição e o processamento dos sinais dos sensores, além de outras funções, é realizado em plataforma Arduino.

O controle principal é feito por um microcontrolador ATmega2560 (Arduino MEGA). Esse controlador lê os sinais dos sensores de pressão, via entradas analógicas. Solicita as leituras de vazão, via barramento I2C, do microcontrolador escravo ATmega328P (Arduino UNO). Envia comandos de abertura e fechamento para as válvulas solenoides, via saídas digitais, passando por um módulo de potência.

O controlador principal mantém registro atualizado de tempo, por meio de comunicação, via barramento I2C, com um módulo RTC (*Real-Time Clock*, Relógio de tempo real). Escreve num cartão de memória não volátil (SD Card) os eventos percebidos. Também realiza comunicação Bluetooth com o aplicativo Android, via módulo HC-05, por meio do qual recebe os comandos de abertura e fechamento das válvulas.

Um resumo da arquitetura de automação utilizada é apresentado na Figura 16.

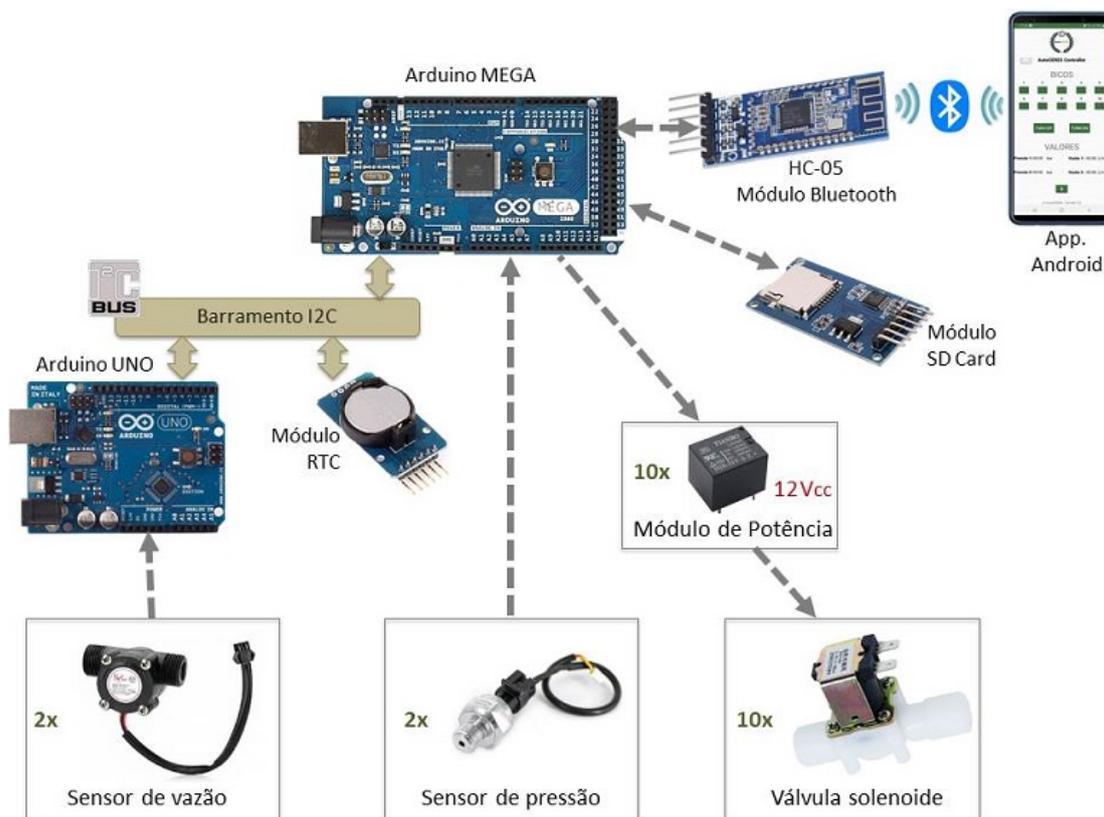


Figura 16: Arquitetura de automação.

Na arquitetura adotada, utiliza-se um controlador dedicado para realizar a leitura dos sensores de vazão. Para essa tarefa, usa-se um Arduino UNO. Esse controlador faz a leitura dos pulsos, calcula a vazão correspondente, conforme (1), e envia os dados via barramento I2C, sempre que solicitado pelo MEGA, que é o mestre da comunicação.

Essa segregação é necessária pelo fato da leitura de vazão ser feita a partir da contagem de pulsos, via interrupção, durante um intervalo de um segundo⁶, preterindo, portanto, o restante do processamento. Inicialmente, implementou-se a leitura da vazão também pelo MEGA, o que causou grande lentidão, inviabilizando a comunicação Bluetooth.

O critério de escolha para o uso da plataforma Arduino se dá principalmente por sua disponibilidade no laboratório e facilidade de rápida prototipação. Além disso, seu custo é relativamente baixo. O preço do Arduino MEGA, com frete, fica na faixa de R\$ 80,00; e, do Arduino UNO, R\$ 30,00.

A montagem dos controladores e de todos os módulos auxiliares é feita dentro de uma caixa acrílica à prova d'água (Grau IP 65)⁷, chamada de painel de controle. Já as interligações dos cabos que vem dos sensores e solenoides são feitas por meio de borneiras instaladas em outra caixa acrílica, também à prova d'água (Grau IP 65), chamada de caixa de junção. As duas caixas e seus internos podem ser vistas na Figura 17.

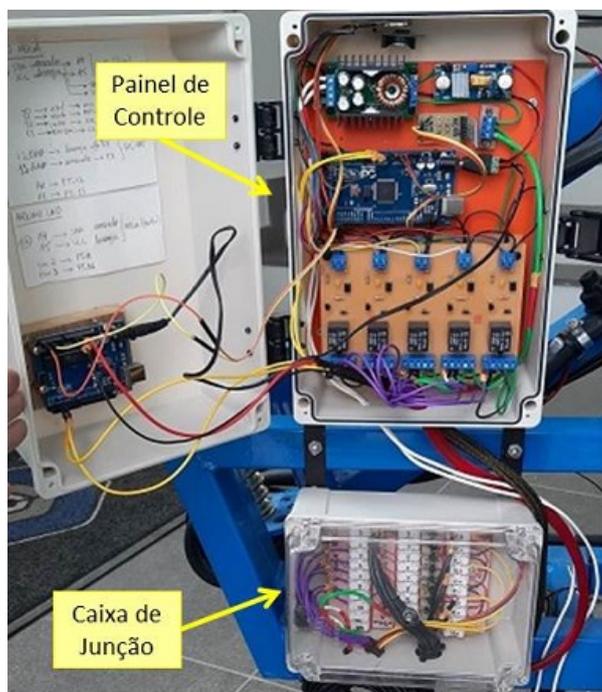


Figura 17: Painel de controle e caixa de junção.

3.1.6 Interligações

Na Figura 18, apresenta-se o projeto das interligações elétricas dos componentes utilizados. Já as portas e pinos utilizados nos controladores, para as comunicações com os componentes e módulos, pode ser vista na Tabela 1.

⁶Para vazões baixas, quanto menor o intervalo adotado para a leitura de pulsos, maior o erro de medição.

⁷O Grau de Proteção IP (*International Protection Marking*) é definido pela norma ABNT NBR IEC 60529: Graus de proteção providos por invólucros (Códigos IP). O primeiro dígito representa o nível de proteção contra ingresso de poeira; e o segundo, contra água. Assim, IP65 é dado para invólucros totalmente protegidos contra poeira e protegidos contra jatos d'água (IEC, 2013).

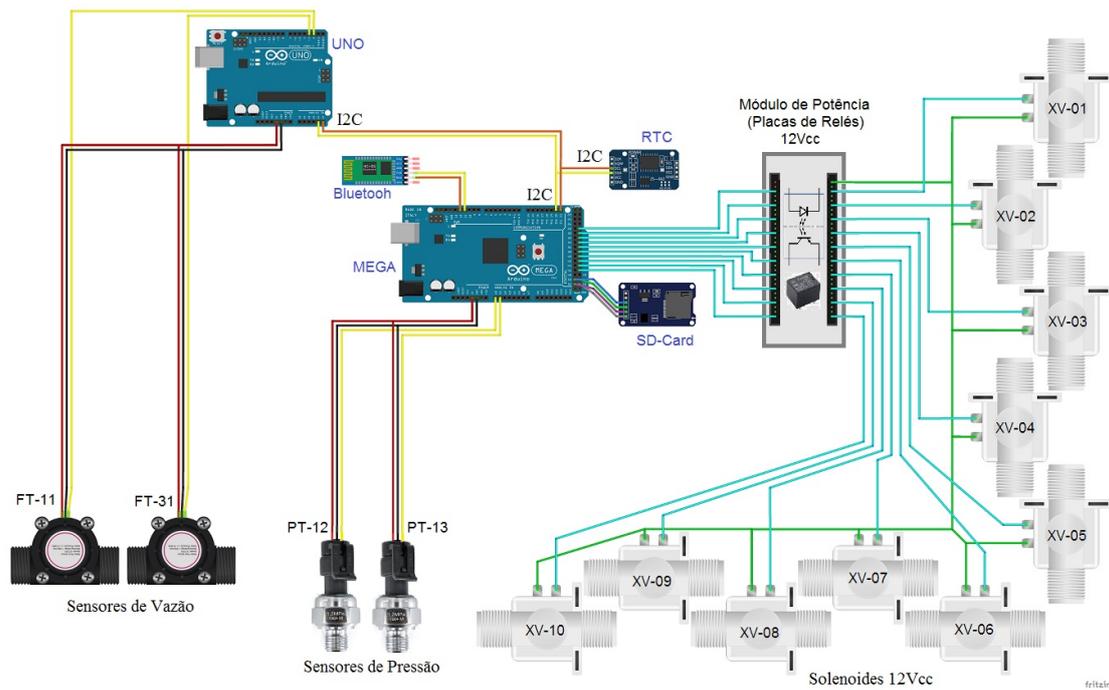


Figura 18: Esquema de interligação dos componentes.

ORIGEM		PINO	PINO/Instr.	DESTINO			
Arduino MEGA	Entradas Analógicas		A0	-	PT-12	Sensores de Pressão	
			A1	-	PT-13		
	E/S Digital		29	-	XV-01	Válvulas Solenoide On/Off via: Módulo de Potência 12Vcc (c/ Optos + Relés)	
			31	-	XV-02		
			33	-	XV-03		
			35	-	XV-04		
			37	-	XV-05		
			39	-	XV-06		
			41	-	XV-07		
			43	-	XV-08		
			45	-	XV-09		
			47	-	XV-10		
	E/S Digital		50	-	MISO	Módulo SD-Card	
			51	-	MOSI		
			52	-	SCK		
			53	-	CS		
E/S Digital (PWM)		11	-	TXD	Módulo Bluetooth HC-05		
		12	-	RXD			
Comunicação	I2C Master	SDA 20	-	SDA	I2C Slave	Módulo RTC	
		SCL 21	-	SCL			
Comunicação	I2C Master	SDA 20	-	A4	I2C Slave	Arduino UNO	
		SCL 21	-	A5			
Ard. UNO	E/S Digital (PWM)		2	-	FT-11	Sensores de Vazão	
			3	-	FT-31		
	Comunicação	I2C Slave	A4	-	SDA 20	I2C Master	Arduino MEGA
			A5	-	SCL 21		

Tabela 1: Pinagem das interligações nos controladores e instrumentos.

No esquema, estão suprimidos os detalhes internos do módulo de potência, que contém relés e circuitos de isolamento galvânica com optoacopladores. Esse módulo é responsável por receber sinais em $5 V_{cc}$ do Arduino e convertê-los para $12 V_{cc}$. Os sinais em $12 V_{cc}$ é que fazem o acionamento das bobinas das válvulas solenoides. Utilizam-se diodos de roda livre em antiparalelo com cada uma das bobinas, para mitigar o aparecimento de sobretensão reversa (força contra-eletromotriz) decorrente da desenergização das solenoides.

No esquema das interligações, opta-se, também, por não representar a caixa de junção com as borneiras. Essa caixa é usada apenas para fazer a interligação entre os multicabos que vão para a barra (sensores e válvulas) e os cabos que vão para as portas dos microcontroladores, além de distribuir os níveis de tensão necessários para os instrumentos.

Cumprе ressaltar que as tensões necessárias ao correto funcionamento dos circuitos são obtidas a partir de dois reguladores do tipo conversor CC/CC Buck-Boost, alimentados por uma fonte de notebook $19,5 V_{cc}$, nos testes de laboratório, ou diretamente pela bateria do trator, nos testes de campo. A saída do primeiro conversor, de maior capacidade de corrente, entrega $12 V_{cc}$. Já o segundo, possui saída de $5 V_{cc}$.

Por fim, na Figura 19, mostra-se uma visão geral do protótipo, destacando-se a interface Bluetooth entre o aplicativo Android e o módulo de controle do sistema. Por meio dessa interface, o operador pode enviar comandos de abertura/fechamento do bicos, além de acompanhar os valores de pressão e vazão medidos na barra.



Figura 19: Visão geral do protótipo.

3.1.7 Software

Com base no *hardware* disponível e no projeto eletrônico apresentado, desenvolve-se um conjunto de instruções e estratégias de automação para permitir o correto funcionamento do sistema. Assim, no Algoritmo 1, apresenta-se, em pseudocódigo, um resumo das funções executadas pelo Arduino MEGA. Já no Algoritmo 2, as funções executadas no Arduino UNO.

Algoritmo 1: Controlador principal: Arduino MEGA.

```

1 inicializa constantes e variáveis globais;
2 define pinos de entradas/saídas;
3 inicializa todos os módulos;
4 inicializa comunicação I2C como mestre;
5 enquanto controlador ligado faça
6   lê bluetooth;
7   se algum comando recebido então
8     | abre/fecha solenoide respectiva;
9   fim
10  lê sensores de pressão;
11  solicita leitura de vazão via I2C;
12  atualiza variável de status_atual;
13  se status_atual <> status_anterior então
14    | envia valores atuais para aplicativo Android via bluetooth;
15    | armazena os dados no SD Card;
16    | status_anterior ← status_atual;
17  fim
18 fim

```

Algoritmo 2: Controlador secundário: Arduino UNO.

```

1 inicializa constantes e variáveis globais;
2 define pinos de entrada como interrupção;
3 inicializa comunicação I2C como escravo;
4 enquanto controlador ligado faça
5   lê e atualiza temporizador interno;
6   se tempo transcorrido maior que um segundo então
7     | lê sensores de vazão (conta pulsos);
8     | calcula os valores de vazão do FT-11 e do FT-31;
9     | se houve mudança nas vazões & valores são aceitáveis então
10    | atualiza as variáveis de vazão com os novos valores;
11    fim
12  fim
13  se recebeu requisição do Master então
14    | envia valor do FT-11 via I2C;
15    | envia valor do FT-31 via I2C;
16  fim
17 fim

```

3.2 Procedimento para Experimentos Práticos

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, são feitos vários experimentos para verificar e validar o funcionamento do protótipo. Os testes são também fundamentais para permitir a detecção de pequenas falhas operacionais, com suas subsequentes correções. Oportunizam ainda a implementação de melhorias diversas, abrangendo desde novos requisitos de interface para melhorar a usabilidade do aplicativo Android, até a otimização do código Arduino para, por exemplo, aumentar a velocidade de execução do *software* e a confiabilidade das comunicações, dentre outras.

Vencidas as primeiras baterias de testes e tendo-se o protótipo funcional, desenvolve-se um procedimento para avaliar o comportamento da pressão e da vazão na barra, a partir de diferentes cenários de abertura e fechamento dos bicos. Esse procedimento, resumidamente apresentado na Tabela 2, trata de colocar o sistema em operação, com todos os bicos ligados, nas duas barras. Em seguida, ajustar manualmente a válvula reguladora até se obter no manômetro (PG-00) uma indicação de pressão compatível com o valor nominal de operação dos bicos, *i.e.*, 2 bar, 3, 1 bar ou 4, 1 bar. No primeiro teste, a pressão é ajustada em 2 bar. Feito isso, registram-se os valores lidos pelos quatro sensores (PT-12, PT-13, FT-11, FT-31). Em seguida, fecha-se o primeiro bico e refaz-se a medição dos sensores. Repete-se o procedimento até que todos os bicos estejam fechados.

Bicos Abertos:										Pressão 1	Pressão 2	Vazão 1	Vazão 2	OBS:
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	PT_12 (bar)	PT_13 (bar)	FT_11 (L/min)	FT_31 (L/min)	
o	o	o	o	o	o	o	o	o	o					
o	o	o	o	o	o	o	o	o	x					
o	o	o	o	o	o	o	o	x	x					
o	o	o	o	o	o	o	x	x	x					
o	o	o	o	o	x	x	x	x	x					
o	o	o	x	x	x	x	x	x	x					
o	o	x	x	x	x	x	x	x	x					
o	x	x	x	x	x	x	x	x	x					
x	x	x	x	x	x	x	x	x	x					

Tabela 2: Procedimento para coleta de dados - ordem crescente.

Logo em seguida, refaz-se o procedimento mais duas vezes a partir do início, com pressão de ajuste de 3, 1 bar e, depois, de 4, 1 bar.

Feito isso, mais três rodadas de testes são realizadas para as mesmas pressões anteriores (2; 3, 1; e 4, 1 bar). Dessa vez, porém, os bicos são fechados em ordem inversa, ou seja, do décimo para o primeiro, sucessivamente, conforme Tabela 3. As planilhas completas utilizadas para o levantamento de dados são apresentadas no Apêndice B.

Com a implementação dos módulos RTC e SD Card no protótipo, é possível automatizar a coleta de dados. Para isso, desenvolve-se um procedimento, codificado no Arduino

Bicos Abertos:										Pressão 1	Pressão 2	Vazão 1	Vazão 2	OBS:
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	PT_12 (bar)	PT_13 (bar)	FT_11 (L/min)	FT_31 (L/min)	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
X	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
X	X	0	0	0	0	0	0	0	0					
X	X	X	0	0	0	0	0	0	0					
X	X	X	X	0	0	0	0	0	0					
X	X	X	X	X	0	0	0	0	0					
X	X	X	X	X	X	0	0	0	0					
X	X	X	X	X	X	X	0	0	0					
X	X	X	X	X	X	X	X	0	0					
X	X	X	X	X	X	X	X	X	0					
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					

Tabela 3: Procedimento para coleta de dados - ordem decrescente.

MEGA, para que os dados sejam armazenados no cartão toda vez que se observa alguma mudança nos parâmetros da barra.

Por mudança de parâmetros, considera-se: modificação no estado de algum dos bicos, *i.e.*, se ao menos um bico passa de aberto para fechado, ou *vice-versa*; ou, ainda, se o valor medido por ao menos um dos quatro sensores apresenta mudança superior a um delta pré-definido, em relação ao instante anterior. O cálculo é feito calculando-se o módulo da diferença entre o valor atual e o anterior; e verificando-se se o resultado é maior que 0,02.

Assim, detectada alguma mudança de parâmetros, o controlador registra os dados em arquivo no cartão de memória (SD Card). O nome do arquivo criado é codificado como AAMMDD.TXT, onde AA representa o ano, MM, o mês, e DD o dia do registro. Quando o arquivo já existe, ele é apenas aberto para escrita e o controlador, então, monta uma *String* e a escreve em uma linha no final do arquivo. Com isso, todos os registros feitos em um mesmo dia ficam agrupados no mesmo arquivo.

Cada linha armazenada no SD Card contém o registro dos seguintes dados, separados por ponto-e-vírgula: DATE; TIME; PT-12; PT-13; FT-11; FT-31; TIP-01; TIP-02; TIP-03; TIP-04; TIP-05; TIP-06; TIP-07; TIP-08; TIP-09; TIP-10. O estado de cada ponta de pulverização (TIP⁸) é representado por 0 (bico fechado) ou 1 (bico aberto). A posição TIP-05 da *String*, por exemplo, representa o estado do quinto bico.

3.3 Modelagem Matemática

Modelos matemáticos de barras de pulverização semelhantes são apresentados tanto em Mercaldi (2012) quanto em Rosa (2018). Com a diferença de que o primeiro foca na dinâmica de uma válvula proporcional visando controlar a injeção direta de agrotóxicos. Já a segunda, trata de modelar a dinâmica da pressão visando implementar uma malha de controle regulatório a partir da instalação de uma válvula proporcional para retornar a

⁸Usa-se o termo *tip* que significa ponta (em inglês).

calda ao reservatório.

Na modelagem dos sistemas de pulverização, conforme abordagem utilizada neste trabalho, considera-se que a barra é composta por restrições hidráulicas (perdas de carga) que provocam redução na vazão e, por consequência, na pressão do sistema (GARCIA, 2005). Os principais elementos que se opõem à passagem do fluido decorrem do atrito viscoso com as paredes internas da tubulação, curvas, conexões, válvulas solenoides e, principalmente, as pontas de pulverização. Esses elementos oferecem o que se chama de resistências fluídicas.

3.3.1 Número de Reynolds

De acordo com Hughes (2002), o perfil da velocidade de escoamento de um fluido resulta em efeitos significativos na relação entre pressão e vazão. Para se determinar esse perfil, utiliza-se o número de Reynolds, conforme a seguir:

$$Re = \frac{\rho \cdot d_i \cdot v}{\mu}, \quad (3)$$

onde ρ é a massa específica do fluido, em kg/m^3 ; d_i é o diâmetro interno da tubulação, em m ; v é a velocidade média de escoamento, em m/s ; e μ é a viscosidade dinâmica do fluido, em $Pa \cdot s$.

O número de Reynolds é um valor adimensional que serve para identificar o tipo de regime de escoamento apresentado pelo fluido numa dada situação. Representa a influência relativa entre as forças de inércia e as forças viscosas (LINSINGEN, 2003).

Para Garcia (2005), quando o número de Reynolds é menor que 1100, trata-se de um perfil de escoamento laminar, enquanto valores maiores que 3500 representam escoamento turbulento. Já no caso de valores intermediários, diz-se que o escoamento está em regime transitório. É importante ressaltar que esses valores limites são aproximados, decorrem de observações experimentais, e, portanto, podem variar de autor para autor.

Linsingen (2003), por exemplo, considera que para números de Reynolds abaixo de 2300, o amortecimento viscoso é suficiente para dissipar o efeito de eventuais perturbações, garantindo boa ordenação do movimento macroscópico das camadas de fluido (lâminas), caracterizando, pois, um escoamento laminar. Assume, ainda, que o escoamento turbulento se dá para números de Reynolds acima de 4000. Logo, a transição do regime de escoamento laminar para turbulento ocorre na faixa de $2300 < Re < 4000$.

Já Delmée (2003) considera regime laminar com $Re < 2000$; e regime transitório com $2000 < Re < 4000$. Logo, concorda com Linsingen (2003) no caso do regime turbulento, assumindo que ele ocorre com $Re > 4000$.

No sistema em estudo, como discorrido na seção anterior, o fluido escoava por uma tubulação (mangueira) de 1/2", com diâmetro interno $d_i = 12,7 \text{ mm}$. Com base nos dados do fabricante das pontas de pulverização (Figura 12), para as faixas de operação

recomendadas, tem-se que a vazão mínima em cada bico é de $0,50 L/min$; e a máxima, de $0,70 L/min$. Lembrando que são dez bicos em cada barra (Figura 15), então, a vazão mínima e máxima para cada lado do pulverizador é de 5 e $7 L/min$, respectivamente.

A tubulação (mangueira) tem seção transversal circular, logo sua área (A) pode ser calculada a partir do seu diâmetro interno (d_i), conforme:

$$A = \frac{\pi (d_i)^2}{4}. \quad (4)$$

Já a velocidade média de escoamento (v), pode ser obtida a partir razão entre a vazão (Q) e a área (A), conforme:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (5)$$

Antes, porém, de utilizar a equação, é importante destacar que os valores de Q e A devem ser convertidos para o SI (Sistema Internacional de Unidades), ou seja, m^3/s e m^2 , respectivamente. Assim, a velocidade é obtida em m/s .

Observando que a calda é uma solução líquida de agrotóxicos diluídos em água, considera-se, para fins de modelo, que essa mistura homogênea é apenas água. Portanto, utilizam-se os seguintes valores para os coeficientes de massa específica e de viscosidade do fluido pulverizado: $\rho = 1000 kg/m^3$ e $\mu = 0,001 Pa \cdot s$, respectivamente (SCHAMPHELEIRE et al., 2009).

Assim, podem-se obter os valores limite, mínimo e máximo, esperados para o número de Reynolds. Utilizando a vazão mínima, obtém-se a velocidade mínima e, em seguida, o número de Reynolds mínimo. Analogamente, o número de Reynolds máximo esperado é calculado a partir da velocidade máxima. Esses valores de mínimo e máximo consideram o cenário original, no qual todos os dez bicos, de cada lado da barra, estão abertos e resultam num regime de escoamento completamente turbulento.

A partir da instalação do novo sistema de automação na barra de pulverização, são criados novos cenários de operação. Avalia-se o caso de cinco bicos abertos, ou seja, metade da barra é fechada. Nesse cenário, o regime de escoamento continua turbulento.

Com o controle bico-a-bico, a vazão mínima ocorrerá quando apenas um bico está aberto e os nove restantes, fechados. Nesse caso, o número de Reynolds mínimo absoluto é calculado considerando a velocidade mínima de escoamento como aquela decorrente da vazão mínima de um único bico. Nesse novo cenário, percebe-se que o perfil de escoamento apresenta-se em regime laminar.

Na Tabela 4, apresentam-se os valores calculados para o número de Reynolds nos cenários discutidos acima, bem como seus respectivos regimes de escoamento.

De acordo com a concepção da solução, nos cenários mais prováveis de utilização do sistema, assume-se que dificilmente ocorre o fechamento simultâneo de mais de cinco bicos de uma mesma barra. Logo, é raro o caso em que o número de Reynolds fica abaixo de 4175. Assim, na maior parte do tempo, o regime se apresentará na forma turbulenta.

Bicos abertos	Q (L/min)	v (m/s)	Re	Escoamento
um	0,5	0,0658	835	Laminar
cinco	2,5	0,3289	4175	Turbulento
dez	5,0	0,6578	8.350	Turbulento
dez	7,0	0,9210	11.700	Turbulento

Tabela 4: Número de Reynolds e regimes de escoamento.

3.3.2 Vazão na Barra

Conhecido o regime de escoamento esperado, pode-se buscar uma relação entre a pressão na barra e a vazão nas pontas de pulverização. Conforme discutido em Linsingen (2003), e com base no princípio da conservação da massa para um volume de controle (VC) qualquer, sabe-se que o fluxo líquido de massa através da superfície de controle (SC) é igual à variação de massa no interior do volume de controle (VC).

O fluxo de massa atravessando uma área elementar (dA) da SC, em termos vetoriais, é $dm = \rho \vec{v} \cdot d\vec{A}$. Logo, aplicando o princípio de conservação de massa a um VC genérico, obtém-se:

$$\int_{SC} \rho \vec{v} \cdot d\vec{A} + \frac{\partial}{\partial t} \int_{VC} \rho dV = 0, \quad (6)$$

onde o primeiro termo representa o fluxo líquido de massa através da SC; e o segundo, a variação de massa no interior do VC.

O escoamento através da mangueira é unidirecional, no sentido da bomba para os bicos de pulverização. Em regime permanente, pode-se modelar um volume de controle fixo a partir de qualquer trecho da mangueira, sem derivações, conforme esquema da Figura 20.



Figura 20: Volume de controle fixo em trecho da mangueira.
Adaptado de Linsingen (2003)

Convencionando que a normal à SC aponta para fora do VC, pode-se usar a velocidade escalar, obtendo-se:

$$\int_{A_1} \rho_1 (-v_1) \cdot dA + \int_{A_2} \rho_2 v_2 \cdot dA = 0. \quad (7)$$

Donde, integrando-se em função da área e reorganizando os termos, obtém-se:

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2. \quad (8)$$

Lembrando que a vazão Q é o produto da velocidade (v) pela área (A), conforme visto em (5), pode-se expressar o fluxo de massa, tanto de entrada (\dot{m}_1) quanto de saída (\dot{m}_2), por:

$$\dot{m}_1 = \rho_1 v_1 A_1 = \rho_1 Q_1 \quad \text{e} \quad \dot{m}_2 = \rho_2 v_2 A_2 = \rho_2 Q_2 . \quad (9)$$

Admitindo-se escoamento incompressível, pode-se considerar que a massa específica não varia, logo $\rho_1 = \rho_2 = \rho$. Assim, a equação da continuidade pode ser reduzida a $Q_1 = Q_2 = Q$.

Para o problema estudado, o fluido entra por uma extremidade da mangueira e sai por dez derivações idênticas, conforme Figura 21. Lembrando que, em cada derivação, há um bico pulverizador com sua respectiva válvula solenoide *on/off*.

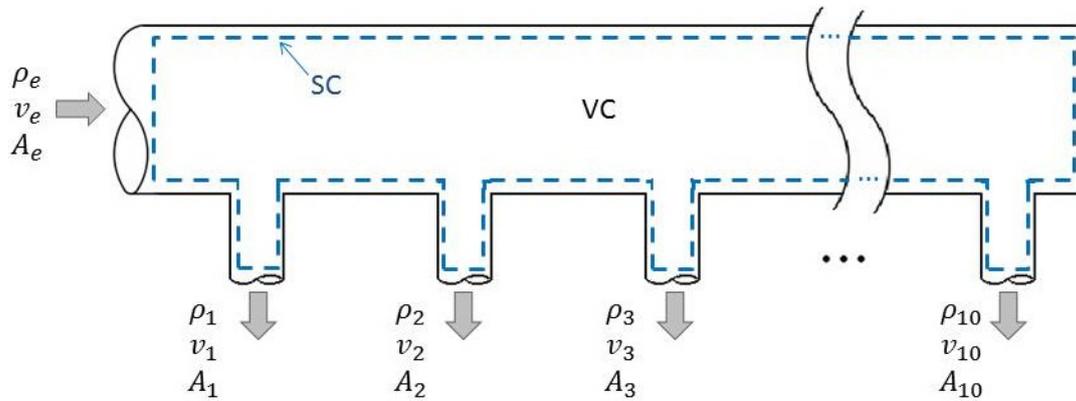


Figura 21: Volume de controle fixo na mangueira com as dez derivações.

Então, analisando-se o volume de controle, e considerando as derivações para os dez bicos, obtém-se:

$$\int_{A_e} \rho_e (-v_e) dA_e + \int_{A_1} \rho_1 v_1 dA_1 + \int_{A_2} \rho_2 v_2 dA_2 + \dots + \int_{A_{10}} \rho_{10} v_{10} dA_{10} = 0 . \quad (10)$$

Donde, integrando-se em função da área e reorganizando as entradas e saídas de massa, obtém-se:

$$\rho_e v_e A_e = \rho_1 v_1 A_1 + \rho_2 v_2 A_2 + \dots + \rho_{10} v_{10} A_{10} . \quad (11)$$

No entanto, como os bicos são idênticos, pode-se dizer que todas as derivações possuem a mesma área:

$$A_1 = A_2 = A_3 = \dots = A_{10} = A_b . \quad (12)$$

Além disso, assumindo que a pressão é a mesma para todo o VC, a vazão também será a mesma e, como as áreas são idênticas, as velocidades também serão iguais, tem-se:

$$v_1 = v_2 = v_3 = \dots = v_{10} = v_b . \quad (13)$$

Com base nas considerações anteriores, e atentando-se para o fato de que o fluido, incompressível, que entra no VC é o mesmo que sai em cada um dos bicos, não sofrendo modificação em sua composição, pode-se dizer que a massa específica também não se altera:

$$\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \dots = \rho_{10} = \rho . \quad (14)$$

Por fim, substituindo essas considerações em (11), e lembrando que a vazão em cada bico pode ser expressa por $Q_b = v_b A_b$, onde o subscrito b indica o número do bico, conclui-se que a vazão que entra na barra (Q_e) é dada pela soma das vazões que saem, ou seja:

$$Q_e = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots + Q_{10} \quad (15)$$

$$Q_e = 10 Q_b . \quad (16)$$

Com a solução de automação instalada, o número de bicos abertos pode variar em função da necessidade da lavoura. Assim, pode-se extrapolar o raciocínio e dizer que a vazão que entra na barra é sempre igual à soma das vazões que saem pelos bicos que estão abertos num dado instante de tempo. Em outras palavras: a vazão da barra (Q_e) é dada pelo produto entre o número de bicos abertos (n) e a vazão de um bico (Q_b):

$$Q_e = n Q_b . \quad (17)$$

3.3.3 Pressão e Vazão nos Bicos

Tendo-se a visão macro do comportamento da vazão na barra, pode-se analisar no detalhe o que ocorre em cada bico. Mais especificamente, como é a relação entre a pressão na barra e a vazão de saída em cada ponta de pulverização.

Com base em Linsingen (2003), e considerando que a massa específica é constante e que a aceleração gravitacional não varia na região analisada, pode-se integrar a equação de Euler do regime permanente entre dois pontos quaisquer de uma mesma linha de corrente. O resultado será a equação de Bernoulli para um escoamento unidimensional, incompressível, de um fluido ideal em regime permanente, dada por:

$$\frac{1}{\rho} p_1 + \frac{1}{2} (v_1^2) + g z_1 = \frac{1}{\rho} p_2 + \frac{1}{2} (v_2^2) + g z_2 . \quad (18)$$

A equação de Bernoulli pode ser reescrita em função das pressões. Para isso, basta multiplicar todos os seus termos pela massa específica do fluido (ρ). Obtendo-se:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g z_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g z_2 . \quad (19)$$

Lembrando que em cada bico pulverizador, o escoamento do fluido se dá através de

um orifício (ponta de pulverização), caracterizando uma redução brusca na seção de escoamento. Assumindo que esse orifício possui canto vivo, pode-se representar esse escoamento pelo esquema da Figura 22.

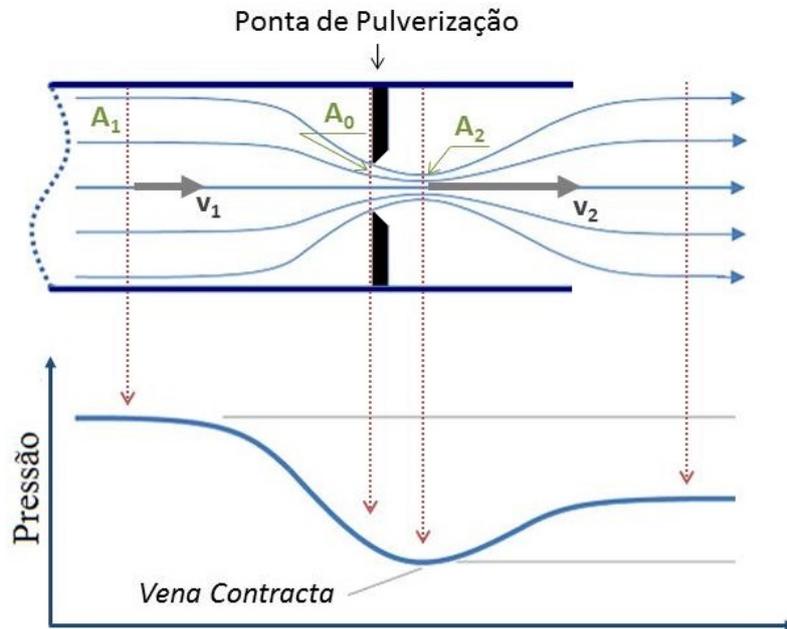


Figura 22: Escoamento através da ponta de pulverização.
Adaptado de Linsingen (2003), Vena-Contracta (2019)

Nesse tipo de restrição, as linhas de corrente retornam gradualmente após o orifício, fazendo com que a menor seção (A_2), chamada *vena contracta*, situe-se pouco depois da passagem pelo orifício (A_0). Considerando desprezível a variação de altura, *i.e.*, assumindo elevação constante, e aplicando-se a equação de Bernoulli entre as seções A_1 e A_2 , obtém-se:

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 . \quad (20)$$

Como a área A_1 é muito maior que A_2 , a velocidade v_1 é também muito menor que a velocidade v_2 , na *vena contracta*. Dessa forma, pode-se desprezar a velocidade v_1 , sem prejuízo de cálculo, donde obtém-se:

$$p_1 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 . \quad (21)$$

Denominando a diferença entre as pressões nos dois pontos de Δp , tem-se que:

$$p_1 - p_2 = \Delta p . \quad (22)$$

Substituindo o resultado em (21) e isolando v_2 , obtém-se:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} . \quad (23)$$

Multiplicando ambos os lados por A_2 e lembrando que $v_2 A_2 = Q_2 = Q_b$, tem-se que:

$$Q_b = A_2 \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}. \quad (24)$$

Como a área A_2 depende da geometria particular da restrição, sendo muito difícil de ser determinada, (24) pode ser reescrita em função de A_0 . Para isso, usa-se o coeficiente de descarga (C_d) que é uma combinação dos coeficientes de contração (C_c) e de velocidade (C_v). Assim, obtém-se:

$$Q_b = C_d A_0 \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}}. \quad (25)$$

Na prática, a literatura mostra que os coeficientes de descarga tipicamente situam-se na faixa de 0,6 a 0,8; e variam em função do número de Reynolds (LINSINGEN, 2003).

Pode-se, então, nominar uma constante K_b para representar todos os termos de (25) que não se alteram nos diferentes cenários de utilização da barra. Essa constante K_b equivale a uma condutância hidráulica (GARCIA, 2005):

$$K_b = C_d A_0 \sqrt{\frac{2}{\rho}}. \quad (26)$$

Em seguida, substituindo K_b em (25), obtém-se:

$$Q_b = K_b \sqrt{\Delta p}. \quad (27)$$

Para o modelo de ponta utilizado, o valor de K_b pode ser obtido a partir dos dados do fabricante (Figura 12). Na pressão máxima de trabalho, 4,1 *bar.g*, é esperada uma vazão de 0,7 *L/min* através do orifício. Como as pressões são utilizadas em escala manométrica, tem-se que a pressão na saída da ponta corresponde à pressão atmosférica local, ou seja, $p_2 = 0 \text{ bar.g}$. Logo, $\Delta p = p_1$.

Assim, convertendo os dados de catálogo da ponta para unidades do SI e substituindo em (27), obtém-se $K_b = 18,22 \times 10^{-9} \text{ Pa}^{-1/2} \text{ m}^3/\text{s}$.

Como o diâmetro da mangueira é muito maior que o diâmetro do orifício de cada uma das pontas de pulverização, pode-se usar o conceito de linha tronco, ou *header* de distribuição. Também o comprimento da mangueira, tanto na barra do lado direito do pulverizador quanto do esquerdo, é da ordem de apenas 5 *m*. Logo, relativamente pequeno. Além disso, a vazão na linha tronco também é relativamente baixa, correspondendo à soma das vazões nos bicos abertos em cada instante, o que corresponde a um valor máximo aproximado de apenas 7 *L/min*.

Desse modo, é tecnicamente confortável assumir que a pressão é a mesma ao longo

de todo o comprimento da mangueira, ou seja, sua perda de carga distribuída pode ser considerada nula⁹. Com isso, pode-se afirmar que a pressão a montante do primeiro bico é a mesma do segundo, do terceiro, e assim sucessivamente, até o último bico.

3.3.4 Pressão na Barra e Funcionamento da PCV

Conforme discutido anteriormente, a partir da solução de automação instalada, o número de bicos abertos na barra pode variar. Assim, à medida que os bicos vão sendo fechados, parte do fluido bombeado na descarga da bomba fica confinado na mangueira e provoca aumento uniforme da pressão estática. Logo em seguida, porém, esse aumento de pressão provoca aumento da abertura da válvula de reciclo (PCV), por meio da qual o excedente de vazão é redirecionado ao reservatório.

Vale lembrar que a PCV faz parte do esquema original do pulverizador. É usada pelo operador para fazer o ajuste da pressão de trabalho que será empregada durante a aplicação do agrotóxico.

Na Figura 23, é apresentado um esquema do funcionamento da PCV-00. A abertura da válvula é dada a partir do equilíbrio entre a força de abertura, causada pela pressão do fluido atuando sobre a área do obturador, e as forças de fechamento, onde a mola representa a principal contribuição.

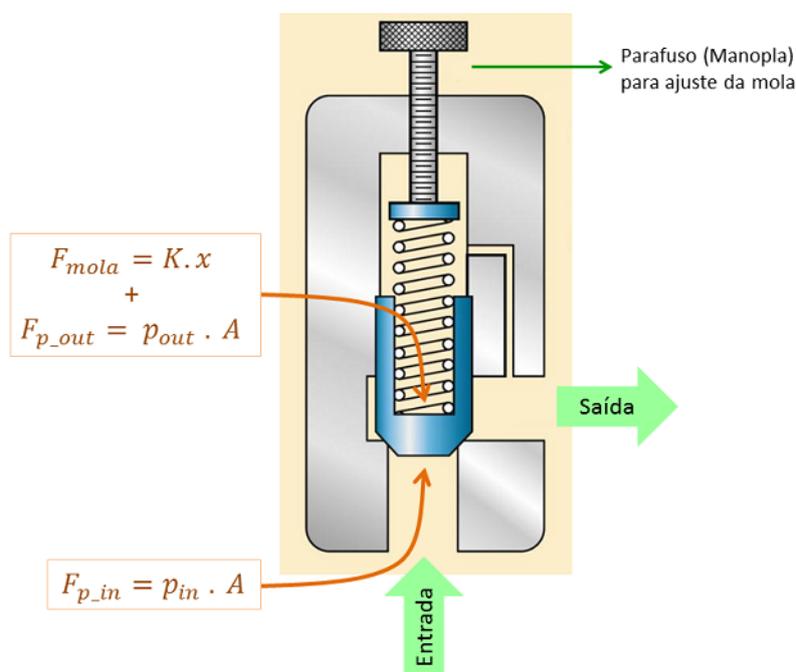


Figura 23: Esquema interno da válvula de reciclo (PCV-00).
Adaptado de Hydraulics&Pneumatics (2019)

O comportamento da variação da pressão na barra a partir do fechamento dos bicos pode ser modelado conforme esquema apresentado em Garcia (2005). O aumento da

⁹A perda de carga calculada para o pior cenário foi menor que 0,05 bar, conforme Apêndice A.

pressão ocorre devido à injeção do fluido num volume de controle fixo. Pela conservação de massa, conforme apresentado em (6), sabe-se que:

$$\text{acumulação} = \sum \text{entra} - \sum \text{sai} . \quad (28)$$

Lembrando que a massa de um fluido pode ser obtida a partir do produto entre o volume do fluido e sua massa específica ($m = \rho.V$). Então, a taxa de variação de massa confinada no VC pode ser dada por:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho.V)}{dt} = V \frac{d\rho}{dt} + \rho \frac{dV}{dt} = V \frac{d\rho}{dt} . \quad (29)$$

Como as pressões de trabalho são relativamente baixas, é confortável assumir que a mangueira e os componentes da barra são todos rígidos. Assim, pode-se desprezar o segundo termo da equação.

A taxa de variação de massa (29) é dada em kg/s e, na verdade, representa a vazão mássica do fluido (Q_m) que pode ser obtida a partir do produto da massa específica pela vazão volumétrica:

$$Q_m = \rho Q . \quad (30)$$

Igualando as duas equações anteriores e isolando a vazão volumétrica Q obtém-se:

$$Q = \frac{V}{\rho} \frac{d\rho}{dt} . \quad (31)$$

Sabendo que o módulo de elasticidade volumétrica (Bulk Modulus) é tipicamente constante para líquidos e, conforme Cunha (2001), pode ser obtido por:

$$\beta = \rho \frac{dp}{d\rho} . \quad (32)$$

Para os líquidos, sabe-se que é necessária uma variação de pressão muito alta para produzir variações muito pequenas na massa específica. Assim, observando-se a equação anterior, é esperado que os líquidos apresentem valores elevados para o módulo de elasticidade volumétrica (BURTON, 1994).

Isolando a derivada de ρ em (32) e substituindo em (31), obtém-se:

$$Q = \frac{V}{\beta} \frac{dp}{dt} . \quad (33)$$

Isolando-se a derivada da pressão em (33), nota-se que a taxa de variação da pressão na barra, decorrente do fechamento dos bicos, comporta-se em função do produto de uma

constante $\alpha = \beta/V$ pela vazão volumétrica Q injetada num dado intervalo de tempo:

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{\beta}{V} Q = \alpha Q. \quad (34)$$

3.4 Simulação Computacional

A partir do reconhecimento do funcionamento do pulverizador e de sua modelagem matemática, é possível realizar simulações computacionais para avaliar o comportamento da pressão e da vazão para diferentes cenários de abertura e fechamento dos bicos disponíveis.

Vale ressaltar que as simulações foram importantes especialmente nos momentos iniciais da pesquisa, enquanto ainda não estava sendo possível realizar experimentos práticos com o pulverizador.

3.4.1 FESTO FluidSIM Hydraulics

Inicialmente, o sistema é simulado com o auxílio do *Software* FESTO FluidSIM Hydraulics, conforme circuito hidráulico apresentado na Figura 24.

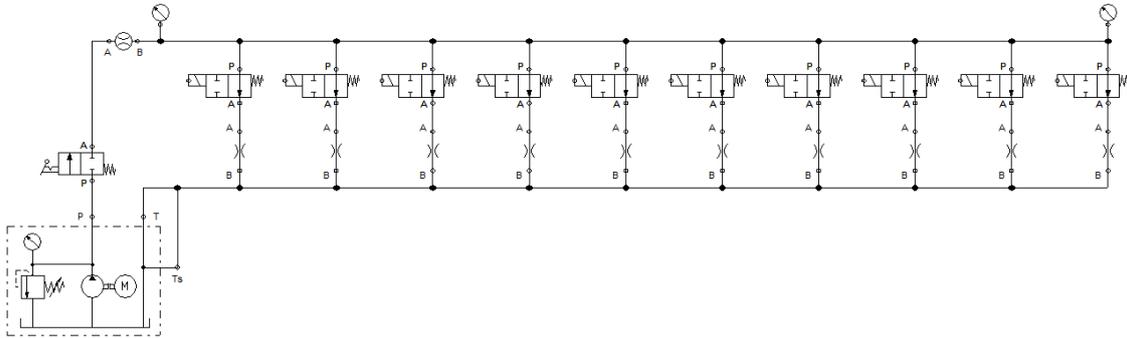


Figura 24: Circuito hidráulico simulado no FluidSIM.

Modela-se cada bico a partir da composição de uma válvula solenoide *on/off*, NA, em série com uma restrição, representando a ponta de pulverização. Em cada ponta, considera-se uma resistência hidráulica, calculada a partir dos dados de catálogo do fabricante.

No FluidSIM, a resistência hidráulica (R_H) é calculada exatamente conforme a definição de resistência fluídica apresentada em Garcia (2005), ou seja:

$$R_H = \frac{\Delta p}{Q_b^2}, \quad (35)$$

onde, para $\Delta p = 4,1 \text{ bar.g}$ e $Q_b = 0,7 \text{ L/min}$, obtém-se $R_H = 8,37 \text{ bar.g}/(\text{L/min})^2$.

Com a simulação, pode-se observar o comportamento da vazão e da pressão, por meio dos valores mostrados nos instrumentos. Na Figura 25, apresentam-se dois cenários

simulados. O primeiro, na parte superior da figura, com todos os bicos abertos, onde é indicada vazão total de $6,99 \text{ L/min}$ e pressão de $4,1 \text{ bar}$. O segundo cenário, na parte inferior da figura, com metade dos bicos fechados (do primeiro ao quinto), onde a vazão indicada é $3,65 \text{ L/min}$, e a pressão, $4,46 \text{ bar}$.

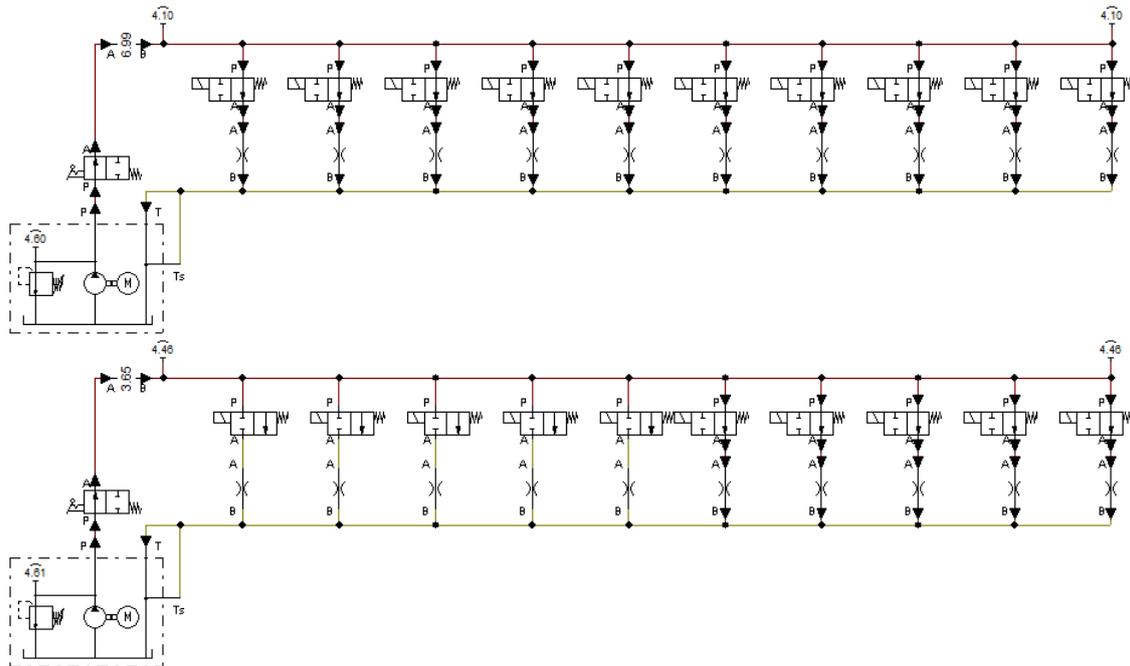


Figura 25: Execução da simulação no FluidSIM.

Na Tabela 5, apresentam-se os valores de pressão e vazão obtidos para diferentes cenários de abertura e fechamento de bicos.

Bicos abertos	$Q \text{ (L/min)}$	$p \text{ (bar)}$
dez	6,99	4,10
sete	5,03	4,34
cinco	3,65	4,46
um	0,74	4,60

Tabela 5: Valores obtidos com a simulação no FluidSIM.

Cumprе ressaltar que, na simulação, avalia-se a pressão nos dois extremos da barra. Conclui-se que, para as dimensões dos componentes do sistema, e com os valores de vazão de referência dos bicos, a perda de carga ao longo da barra pode ser desprezada, o que está de acordo com os cálculos apresentados no Apêndice A.

3.4.2 Matlab Simulink

Em seguida, para uma análise mais detalhada, o sistema é também simulado com o auxílio da ferramenta Simulink, do Matlab, conforme esquema apresentado na Figura 26. Os componentes são representados no modelo de forma a manter fidelidade ao fluxograma do sistema, apresentado na Figura 15.

Cada ponta é modelada como uma restrição hidráulica do tipo orifício fixo, com coeficiente de descarga de 0,7 e área calculada a partir de (25).

Para representar a bomba, com vazão nominal de 43 L/min , e seu respectivo acionamento a 540 rpm , utilizam-se componentes prontos da biblioteca. Já o fluido é modelado como água pura a 20°C .

A válvula de alívio também é modelada a partir de um bloco pronto, com a área útil de passagem da ordem de metade do seu diâmetro nominal e abertura variável em função da pressão de entrada, com comportamento semelhante apresentado na Figura 23. As pressões de trabalho são ajustadas nessa válvula conforme as faixas de trabalho das pontas que estão sendo utilizadas, da mesma forma que é feito com os pulverizadores reais.

A simulação é realizada de forma que todos os bicos iniciam abertos. Seu fechamento se dá sequencialmente, a cada um segundo de espera, do primeiro ao décimo bico, a partir dos comandos configurados nos blocos de sinal *on/off* que acionam os blocos das solenoides.

Vale observar que as válvulas solenoides são modeladas com área de passagem igual ao diâmetro interno da mangueira. Logo, o modelo despreza eventuais perdas de carga decorrentes da passagem do fluido por essas válvulas.

A mudança de estado dos bicos é registrada pelo *Scope3*, no canto superior esquerdo da Figura 26, e apresentada na parte inferior do gráfico da Figura 27.

As medições de vazão (FT-11) e pressão (PT-12) são também registradas pelo *Scope3*, após a conversão de suas unidades do SI para L/min e bar , respectivamente. No gráfico superior da Figura 27, apresentam-se os valores de vazão (em azul) e de pressão (em vermelho) e seu comportamento estático em função do fechamento sequencial dos bicos.

Assim, à medida que os bicos são fechados, a vazão total na barra é reduzida em aproximadamente $0,7 \text{ L/min}$, para cada bico. Já a pressão apresenta leve aumento, na faixa de $0,05 \text{ bar}$ para cada bico que é fechado. Isso ocorre, pois, conforme previsto no modelo, o sistema trabalha com uma bomba de deslocamento positivo; e, à medida que os bicos são fechados, o excedente de vazão precisa ser recirculado pela válvula de alívio (PCV).

Todavia, a válvula de alívio é ajustada na pressão de trabalho ($4,1 \text{ bar}$) com a bomba em rotação nominal (540 rpm) e com todos os bicos abertos. Por ser uma válvula mecânica, com mola, necessita que a pressão aumente um pouco para comprimir a mola mais alguns milímetros e, com isso, aumentar a abertura da válvula¹⁰ e, conseqüentemente, sua capacidade de vazão. Assim, sempre que a vazão de alívio através da válvula precisa aumentar, é necessário que, antes, a pressão a montante da válvula também au-

¹⁰Lembrando que a pressão atua sobre a área do obturador da válvula, gerando uma força de abertura ($F_a = p A$). No outro sentido, há a força de fechamento, gerada pela mola, e proporcional ao produto entre seu coeficiente de elasticidade e seu deslocamento ($F_f = k x$). Vide Figura 23.

mente.

Na Tabela 6, apresentam-se os valores de pressão e vazão obtidos para alguns dos diferentes cenários de abertura e fechamento de bicos simulados com o Simulink.

Bicos abertos	Q (L/min)	p (bar)
dez	6,84	4,10
sete	4,89	4,11
cinco	3,50	4,12
um	0,73	4,53

Tabela 6: Valores obtidos com a simulação no Simulink.

Ainda no diagrama de simulação (Figura 26), observa-se que o *Scope1* é usado para confirmar que reduções na vazão de entrada da barra implicam em aumento proporcional da vazão recirculada pela válvula (PCV), mantendo-se estável o total de $43 L/min$ fornecido no recalque da bomba volumétrica. Já o *Scope2* é utilizado apenas para confirmar que a rotação da bomba está correta, ou seja, $540 rpm$.

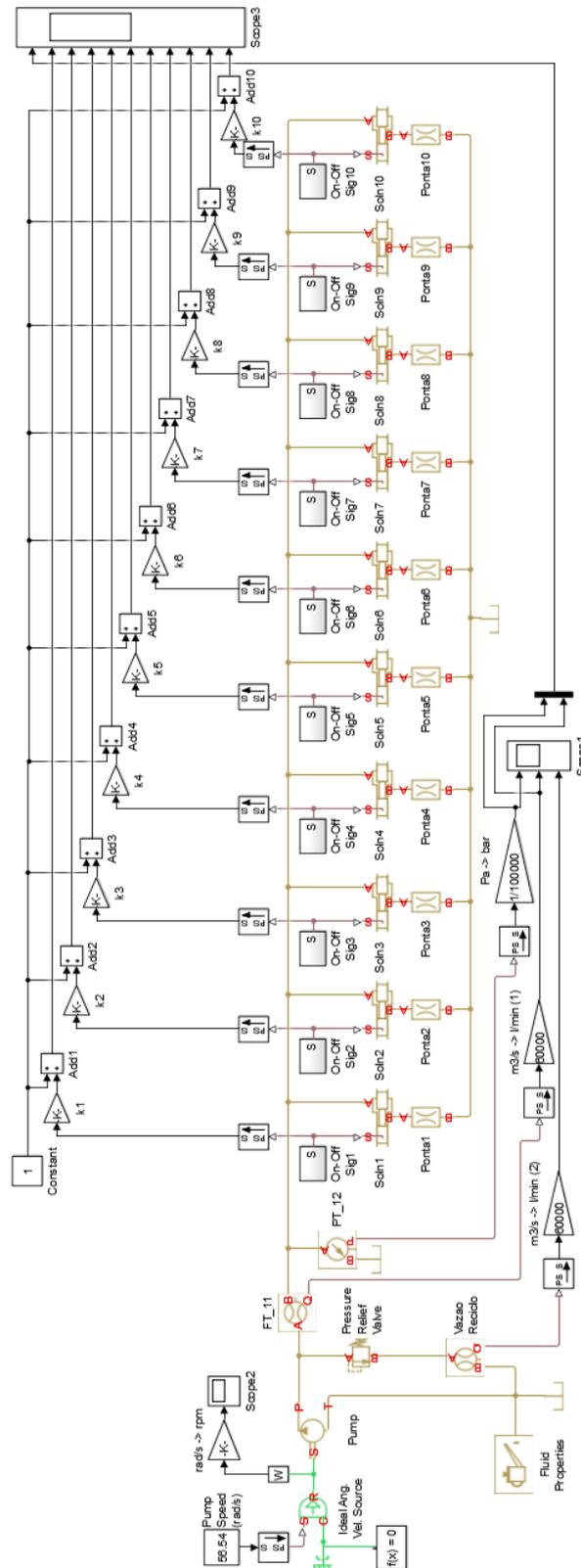


Figura 26: Processo modelado e simulado no Simulink.

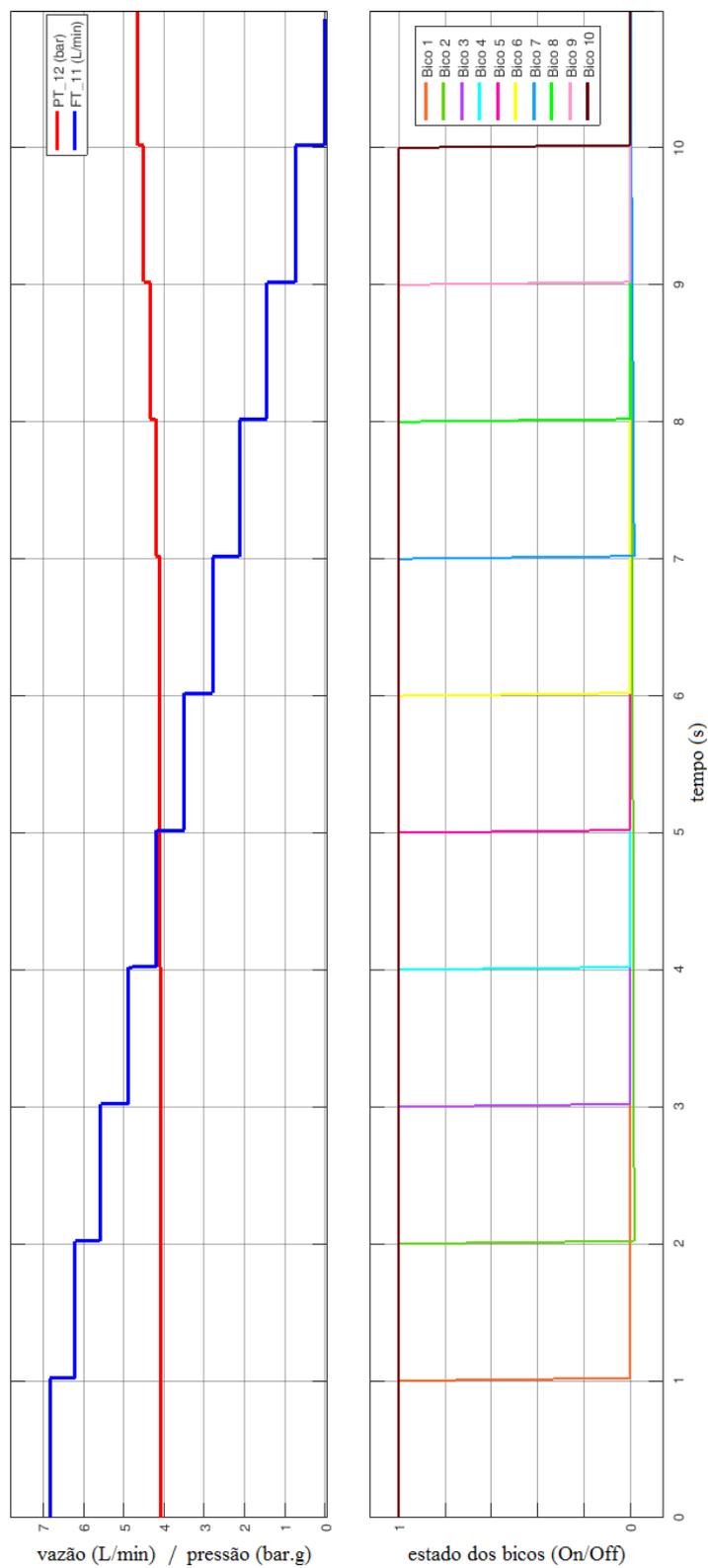


Figura 27: Curvas de pressão e vazão variando com o fechamento sequencial dos bicos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos experimentos realizados e tendo-se os dados coletados e planilhados, é possível analisar a relação da abertura dos bicos com a pressão e a vazão na barra. Os resultados obtidos são apresentados separadamente para os experimentos com o pulverizador acionado por motor elétrico e, em seguida, acoplado ao trator da FURG.

4.1 Acionamento via Motor Elétrico

Foram realizados diversos experimentos operacionais do protótipo do pulverizador com acionamento via motor elétrico. Na Figura 28, são apresentadas duas fotos obtidas durante parte desses experimentos.



Figura 28: Testes do protótipo, acionamento via motor elétrico.

Na Tabela 7, pode-se ver um conjunto de dados coletados durante um desses experimentos. Nesse caso, a pressão foi ajustada em 4,1 *bar* e os bicos fechados no sentido crescente (do primeiro ao décimo). Vale ressaltar que esses dados são apresentados após terem sido exportados para uma planilha Excel, donde foram excluídas as linhas para as quais não houve mudança no estado dos bicos. Ou seja, não estão apresentados os transitórios, nem as eventuais oscilações decorrentes dos ruídos intrínsecos à medição.

Na realização desse experimento, manteve-se a barra da esquerda fechada, por isso, observa-se, na sexta coluna, um valor fixo e próximo de zero (0,31 *L/min*) para o FT-31.

DATE	TIME	PT-12	PT-13	FT-11	FT-31	TIP-01	TIP-02	TIP-03	TIP-04	TIP-05	TIP-06	TIP-07	TIP-08	TIP-09	TIP-10
23/09/2019	14:16:09	4,08	4,07	6,80	0,13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23/09/2019	14:16:19	4,11	4,16	6,27	0,13	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23/09/2019	14:16:23	4,14	4,17	5,73	0,13	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
23/09/2019	14:16:29	4,26	4,30	4,93	0,13	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
23/09/2019	14:16:35	4,29	4,32	4,13	0,13	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
23/09/2019	14:16:40	4,45	4,29	3,73	0,13	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
23/09/2019	14:16:46	4,39	4,43	2,93	0,13	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
23/09/2019	14:16:50	4,60	4,38	2,27	0,13	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
23/09/2019	14:16:57	4,43	4,54	1,47	0,13	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
23/09/2019	14:17:03	4,67	4,49	0,67	0,13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
23/09/2019	14:17:10	4,71	4,54	0,13	0,13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 7: Dados coletados durante experimento: 4,1 bar.

O valor não é nulo, possivelmente, em decorrência de algum ruído de fundo provocado pelo motor elétrico ou mesmo pela pulsação do fluido no recalque da bomba de diafragma.

Já na Tabela 8, são apresentados novos dados experimentais. Dessa vez, com pressão ajustada em 2 bar, barra da esquerda mantida aberta (FT-31 não nulo), e bicos fechados no sentido decrescente (do décimo até o primeiro).

DATE	TIME	PT-12	PT-13	FT-11	FT-31	TIP-01	TIP-02	TIP-03	TIP-04	TIP-05	TIP-06	TIP-07	TIP-08	TIP-09	TIP-10
23/09/2019	16:18:43	2,00	2,03	5,07	5,07	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23/09/2019	16:18:49	2,06	1,96	4,53	5,33	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
23/09/2019	16:18:53	2,15	2,00	4,13	5,39	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
23/09/2019	16:18:58	2,15	2,05	3,67	5,07	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
23/09/2019	16:19:03	2,13	2,18	3,34	5,20	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
23/09/2019	16:19:08	2,16	2,14	2,69	5,20	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
23/09/2019	16:19:13	2,19	2,18	2,24	5,20	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
23/09/2019	16:19:19	2,21	2,22	1,69	5,20	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
23/09/2019	16:19:24	2,22	2,22	1,09	5,07	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
23/09/2019	16:19:30	2,23	2,24	0,62	5,07	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23/09/2019	16:19:36	2,24	2,30	0,40	5,20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 8: Dados coletados durante experimento: 2 bar.

Ao longo dos experimentos, uma grande quantidade de dados é coletada. A partir desses dados, é possível obter curvas como as da Figura 29, em que se correlaciona o estado dos bicos com os valores lidos tanto da pressão (PT-12 e PT-13) quanto da vazão (FT-11). Vale ressaltar que os gráficos dos sensores são plotados utilizando interpolação linear a partir da interligação dos pontos para todos os valores medidos.

No gráfico da Figura 29, os bicos iniciam todos abertos e vão sendo fechados sequencialmente, do primeiro ao décimo, o que é representado na identificação do eixo horizontal, abaixo do gráfico.

São coletadas várias medições dos sensores em cada cenário. Cada instante de coleta é representado pelas barras verticais (em marrom claro), com altura proporcional ao número de bicos abertos a cada instante. Por esse motivo, há mais de um valor tanto de pressão quanto de vazão para um mesmo cenário. Já a transição de cenário, a cada fechamento de bico, é destacada pelas linhas verticais mais fortes (em preto).

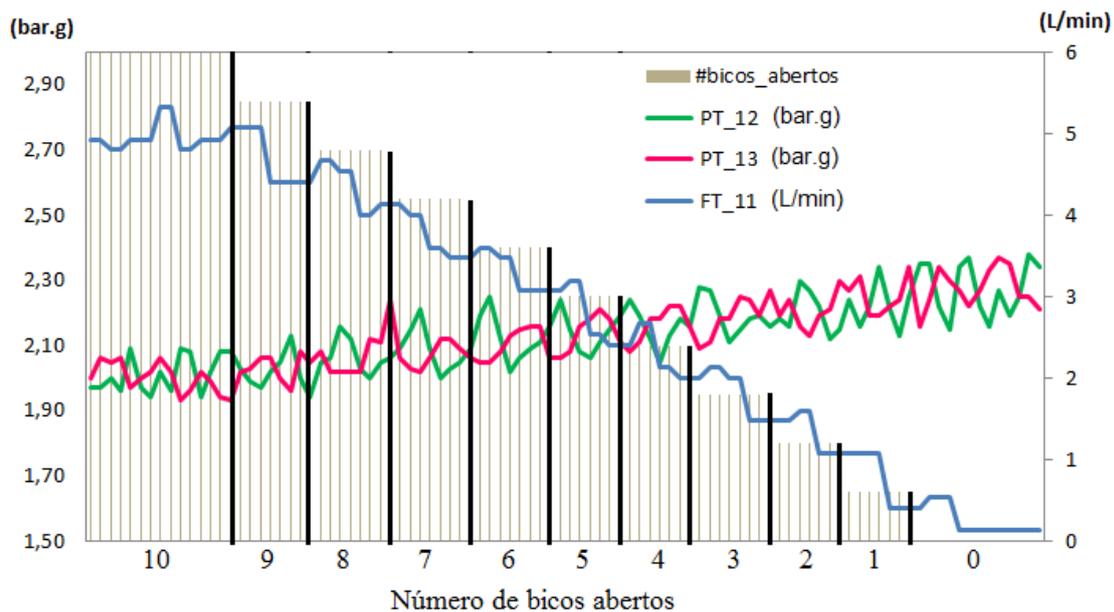


Figura 29: Curvas para ajuste de 2 bar no regulador da barra.

Analisando as curvas, apesar das medições apresentarem certo ruído¹, observa-se que a vazão (FT-11, em azul) é reduzida à medida que os bicos vão sendo fechados. Atentar que a escala de vazão é indicada em L/min , no lado direito do gráfico.

Analogamente, os valores de pressão (PT-12, em verde; e PT-13, em vermelho) vão aumentando à medida que os bicos fecham. A escala de pressão é representada em $bar.g$, no lado esquerdo do gráfico. Cumpre ressaltar que esse comportamento é compatível com as curvas da Figura 27, obtidas durante a simulação computacional.

Na Figura 30, têm-se apenas as curvas com os valores de pressão, medidos nos dois sensores (PT-12 e PT-13). Para facilitar a análise, plota-se nesse mesmo gráfico as curvas linearizadas equivalentes para os dois sensores.

Observa-se que as pressões apresentam a mesma ordem de grandeza tanto no extremo inicial da barra (PT-12) quanto no final (PT-13). Com isso, pode-se avaliar que a perda de carga ao longo da mangueira é desprezível, em consonância com o cálculo apresentado no Apêndice A.

Além disso, ainda na Figura 30, observa-se que, para os valores linearizados (Linear PT-12, em verde escuro; e Linear PT-13, em vermelho escuro), a pressão inicia em aproximadamente 1,98 bar, quando todos os bicos estão abertos; e cresce até aproximadamente 2,28 bar, quando os dez bicos são fechados. Isso representa uma variação de 15% na pressão.

Já na Figura 31, pode-se ver o comportamento da vazão, medida pelo sensor FT-11 (em azul claro) e seus valores linearizados (Linear FT-11, em azul escuro). Com todos os bicos abertos, a vazão linearizada corresponde a aproximadamente 5,6 L/min .

¹No Apêndice C, é feita uma avaliação dos ruídos observados na medição de pressão

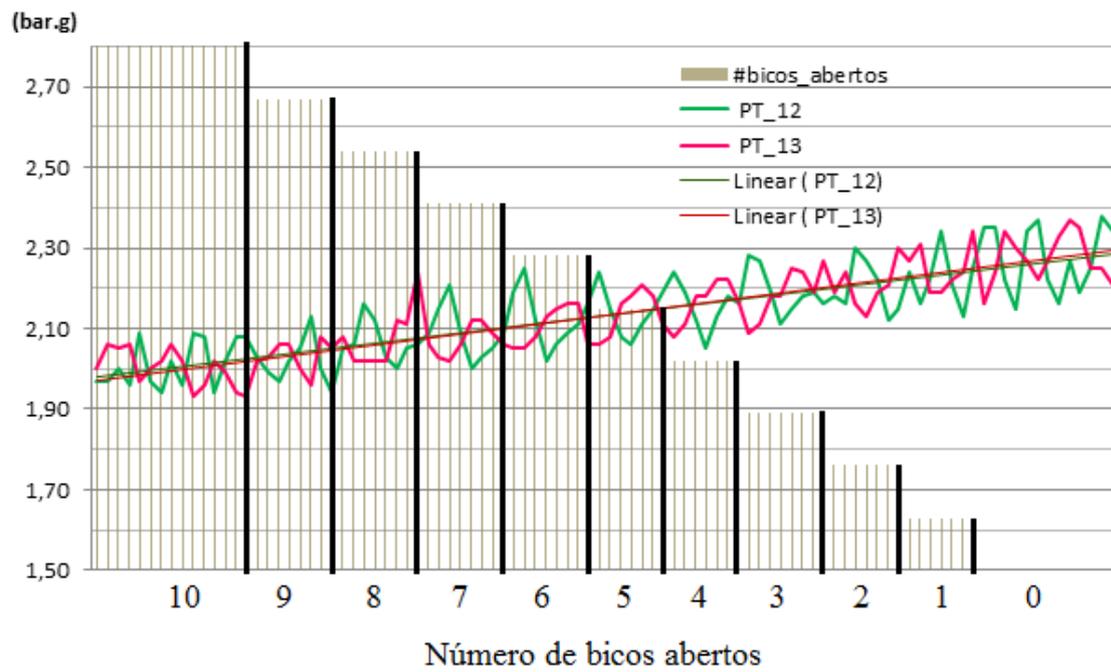


Figura 30: Curva de pressão (PT-12 e PT-13).

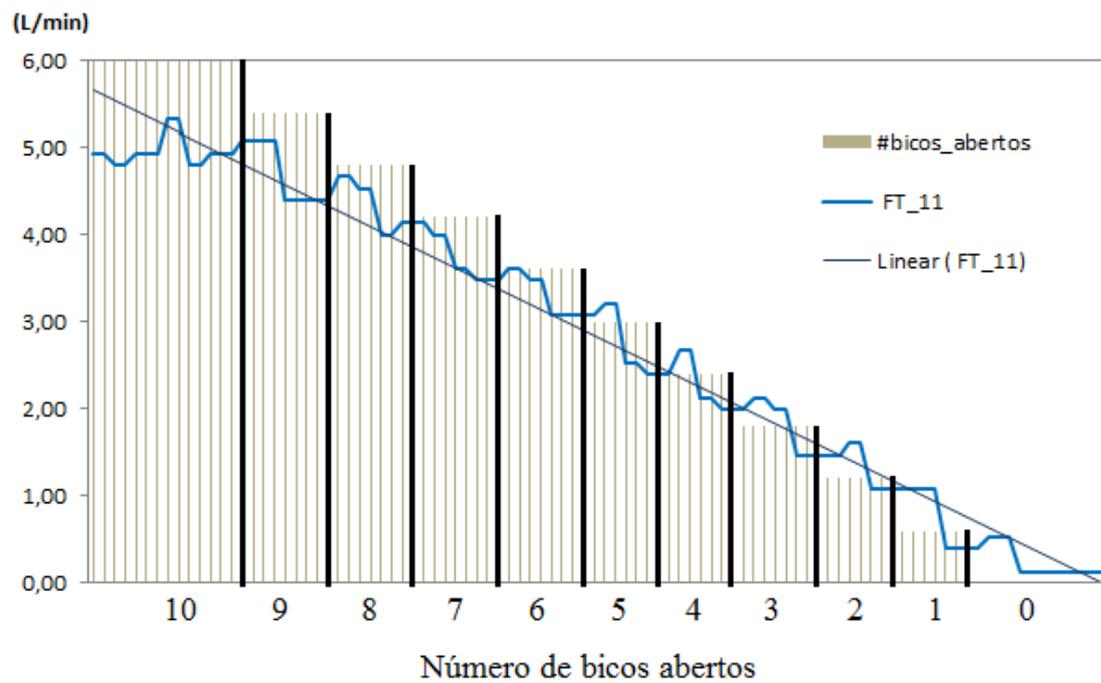


Figura 31: Curva de vazão (FT-11).

À medida que os bicos são fechados, a vazão de calda consumida pela barra é reduzida proporcionalmente. Até que, com todos os bicos fechados, a vazão linearizada é nula, o que representa não haver consumo nem vazamentos na barra.

Com isso, observa-se que, na prática, pelos valores medidos, para uma pressão ajustada em 2 *bar*, cada bico consome aproximadamente 0,56 *L/min*. Bem próximo, portanto, do valor nominal informado pelo fabricante das pontas (0,5 *L/min*).

Vale ressaltar que a variação tanto da pressão (Figura 30), quanto da vazão (Figura 31) ocorre em saltos, pois o fechamento dos bicos se dá de forma brusca. Todavia, como as variações são pequenas, entre o fechamento de um bico e o próximo, opta-se por aproximar os pontos por uma reta ajustada.

Em seguida, repetem-se os experimentos para as outras faixas de pressão recomendadas pelo fabricante das pontas de pulverização. Os resultados observados podem ser vistos nas Figuras 32 e 33, com pressão ajustada em 3,1 *bar* e 4,1 *bar*, respectivamente.

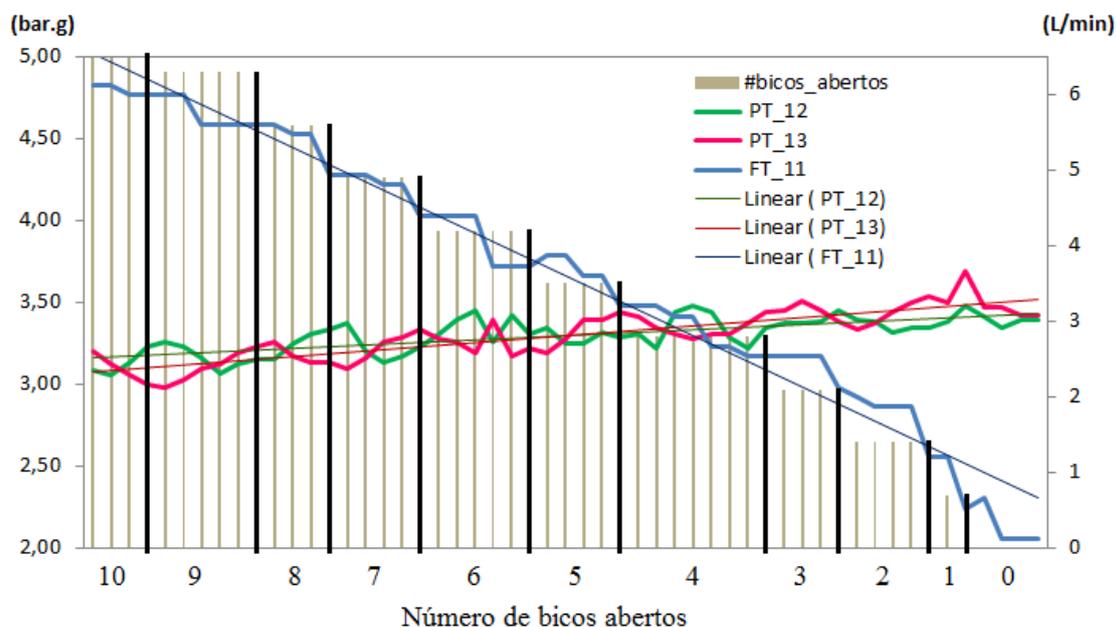


Figura 32: Curvas para ajuste de 3,1 *bar* no regulador da barra.

Nesses gráficos, novamente, é possível observar os valores de pressão medidos pelos sensores (PT-12 e PT-13) são muito próximos. Com isso, permanece confortável assumir que a perda de carga ao longo da barra é desprezível.

Verifica-se ainda que a pressão medida aumenta à medida que os bicos são sucessivamente fechados e que, nos casos extremos, a variação é da ordem de 8% para ajuste de 3,1 *bar*; e de 12%, para 4,1 *bar*.

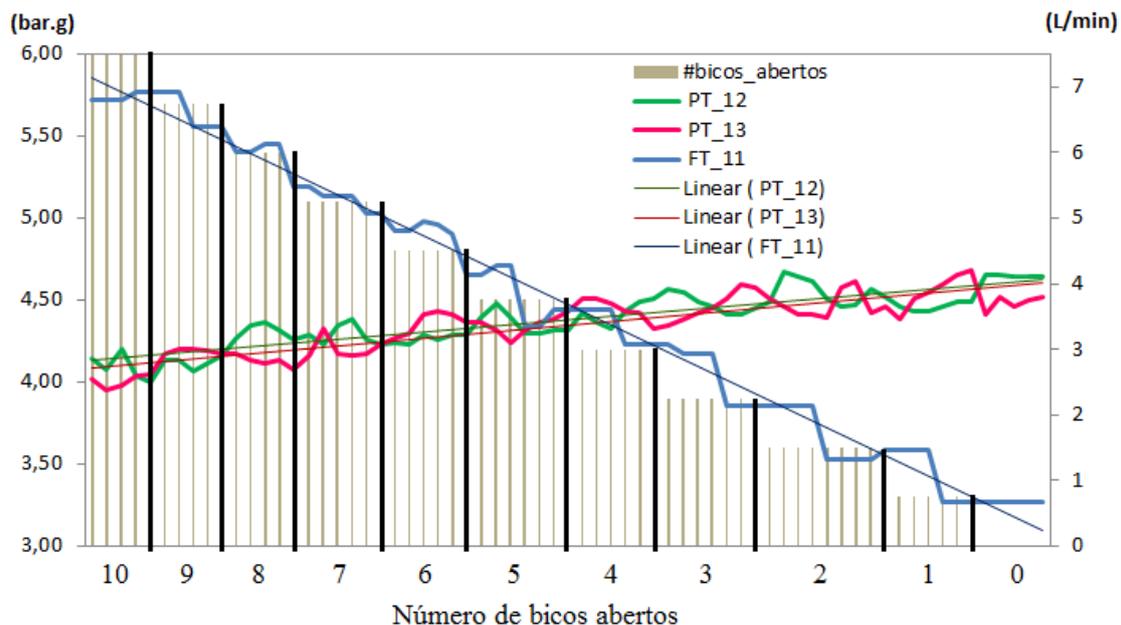


Figura 33: Curvas para ajuste de 4,1 bar no regulador da barra.

4.2 Acionamento via TDP do Trator

O protótipo também passou por diversos experimentos em conjunto com o trator, com a bomba acionada pela TDP e a eletrônica alimentada pela bateria do trator. Na Figura 34, apresentam-se registros fotográficos dos testes de campo.



Figura 34: Testes do protótipo, acoplado ao trator.

Durante esses experimentos de campo, com o protótipo acoplado ao trator, foi possível, novamente, fazer a coleta de uma grande quantidade de dados. Assim, na Tabela 9, são apresentados dados obtidos em um desses testes de campo. Nesse caso, a pressão foi ajustada em 2,4 bar. A barra da esquerda foi mantida aberta; e os bicos foram fechados no sentido crescente (do primeiro ao décimo) e, logo em seguida, reabertos no sentido decrescente (do décimo até o primeiro).

Já na Figura 35, podem-se observar os gráficos obtidos a partir dos dados experimentais da Tabela 9. Vale ressaltar que, nessa figura, os resultados são apresentados a partir

DATE	TIME	PT_12	PT_13	FT_11	FT_31	TIP_01	TIP_02	TIP_03	TIP_04	TIP_05	TIP_06	TIP_07	TIP_08	TIP_09	TIP_10
18/02/2020	15:20:50	2,41	2,33	4,45	5,20	ON									
18/02/2020	15:20:52	2,44	2,35	4,07	5,39	OFF	ON								
18/02/2020	15:20:56	2,46	2,39	3,84	5,34	OFF	OFF	ON							
18/02/2020	15:21:00	2,47	2,44	3,47	5,36	OFF	OFF	OFF	ON						
18/02/2020	15:21:05	2,48	2,48	2,72	5,44	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	ON
18/02/2020	15:21:10	2,50	2,49	2,29	5,44	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	ON
18/02/2020	15:21:15	2,54	2,50	2,00	5,36	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON
18/02/2020	15:21:19	2,60	2,54	1,36	5,42	OFF	ON	ON	ON						
18/02/2020	15:21:23	2,64	2,57	0,93	5,37	OFF	ON	ON							
18/02/2020	15:21:28	2,69	2,68	0,77	5,56	OFF	ON								
18/02/2020	15:21:34	2,73	2,69	0,58	5,55	OFF									
18/02/2020	15:21:38	2,71	2,70	0,93	5,60	OFF	ON								
18/02/2020	15:21:41	2,70	2,67	1,07	5,54	OFF	ON	ON							
18/02/2020	15:21:44	2,70	2,66	1,47	5,50	OFF	ON	ON	ON						
18/02/2020	15:21:48	2,68	2,73	2,21	5,67	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON
18/02/2020	15:21:52	2,67	2,72	2,58	5,55	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	ON
18/02/2020	15:21:56	2,64	2,62	3,11	5,74	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON	ON	ON	ON
18/02/2020	15:21:59	2,60	2,59	3,73	5,62	OFF	OFF	OFF	ON						
18/02/2020	15:22:04	2,55	2,53	3,92	5,54	OFF	OFF	ON							
18/02/2020	15:22:08	2,43	2,37	4,09	5,31	OFF	ON								
18/02/2020	15:22:14	2,37	2,34	4,50	5,32	ON									

Tabela 9: Dados coletados durante experimento com o trator: 2,4 bar.

das médias aritmética dos valores lidos pelos sensores em cada cenário.

Nesse experimento, a pressão é ajustada em aproximadamente 2,4 bar, com todos os bicos abertos. Em seguida, o bicos são fechados sequencialmente do primeiro ao décimo e os valores de pressão (PT-12_fech) e vazão (FT-11_fech), para cada cenário, são indicados no gráfico.

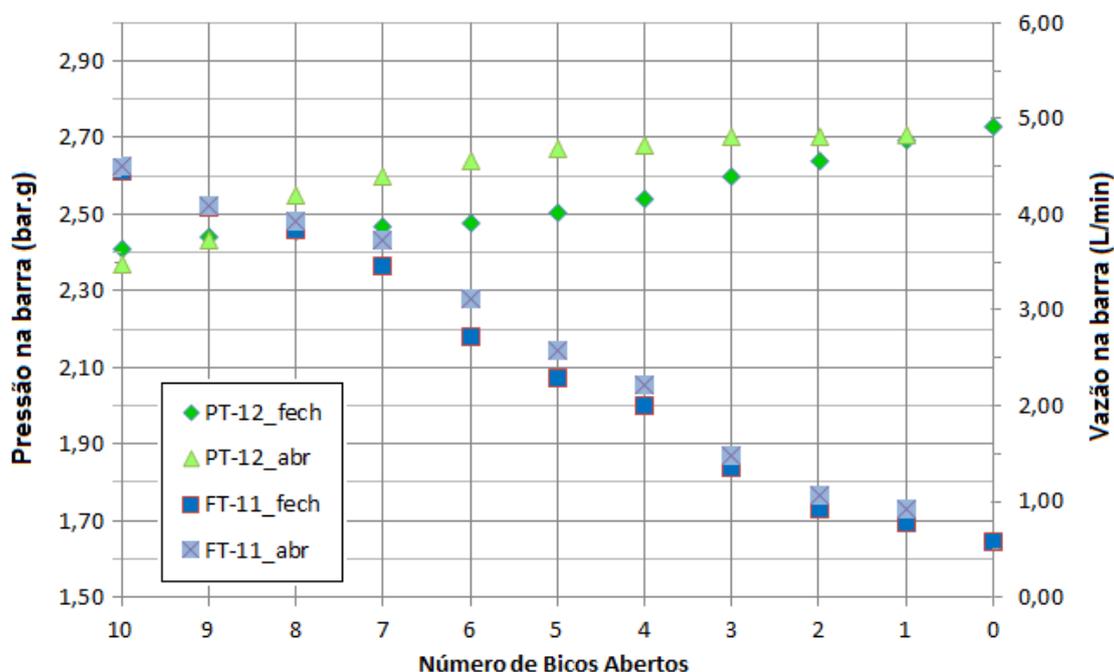


Figura 35: Curvas para ajuste de 2,4 bar, com acoplamento ao trator.

Analisando-se esse gráfico, observa-se que, no caso extremo de fechamento de todos os bicos, a pressão sobe até aproximadamente 2,73 bar. Isso representa uma variação de

pressão da ordem de 14%.

Neste experimento, após o fechamento completo dos bicos, eles são novamente abertos, do décimo ao primeiro. Os valores de pressão e vazão associados a cada cenário também estão indicados no gráfico por meio dos símbolos PT-12_abr e FT-11_abr, respectivamente.

Adicionalmente, pode-se perceber a tendência de surgimento de uma certa histerese, tanto nos valores de pressão, quanto de vazão. No entanto, como essas grandezas são lidas apenas para fins de monitoramento, considera-se não haver necessidade de tratamento da não-linearidade decorrente da histerese.

4.3 Análise

Pelos experimentos realizados, observa-se que a cada fechamento de um ou mais bicos, ocorre um acúmulo de massa na barra, conforme discutido no Capítulo 3 a partir de (6), (28) e (32). Com isso, observa-se um aumento da pressão na barra, de acordo com (34). Esse comportamento é apresentado na Figura 36.

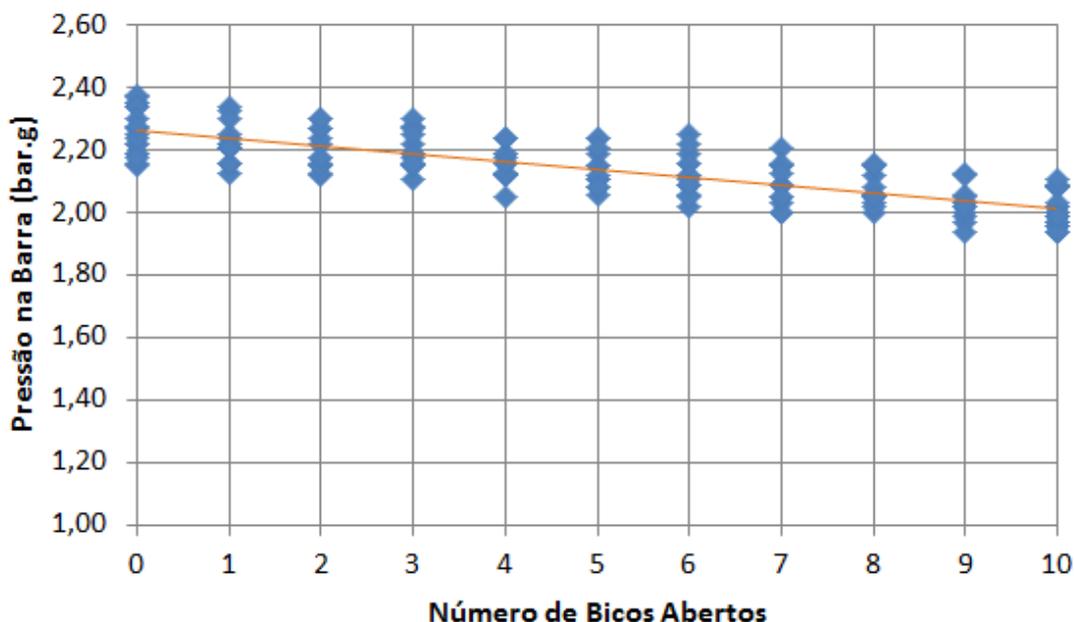


Figura 36: Pressão na barra em função do número de bicos abertos, para um conjunto de experimentos, com ajuste inicial de 2 bar.

A pressão na barra não aumenta indefinidamente, pois, como é típico no recalque de bombas volumétricas, o sistema conta com uma válvula de alívio (PCV-00), responsável por recircular o excedente de vazão e manter a pressão próxima do valor ajustado.

Vale lembrar que se trata de uma válvula mecânica, na qual o ajuste da pressão é feito a partir de uma manopla rotativa, alterando-se a compressão da mola que atua sobre o obturador da válvula.

Assim, conforme esquema apresentado na Figura 23, para que o excedente de vazão, ocasionado pelo fechamento do(s) bico(s), escoe através da PCV e retorne ao reservatório, é necessário que o obturador da válvula se desloque no sentido de aumentar sua abertura e, conseqüentemente sua capacidade de vazão.

Entretanto, como discutido anteriormente, para que a válvula aumente sua abertura, comprimindo mais sua mola interna, é necessário que haja uma força maior atuando sobre a área do seu obturador. Força essa que decorre do aumento de pressão na barra.

Dessa forma, o fechamento dos bicos, sempre causa pequeno aumento de pressão na barra, que, por sua vez, provoca pequeno aumento na abertura da PCV. Com isso, o volume de líquido excedente retorna ao reservatório e a pressão se mantém num patamar próximo ao ajuste inicial.

O mesmo ocorre no sentido contrário, ou seja, à medida que bicos são abertos, aumenta a demanda de vazão na barra, fazendo cair a pressão por breve intervalo. Assim, a válvula reduz sua abertura, reduzindo a vazão de recirculação da calda. Com isso, mantém a pressão estável na barra e permite o aumento da vazão necessária para suprir os bicos que foram abertos.

O comportamento da PCV-00, correlacionando a pressão na barra com a vazão de reciclo, é apresentado na Figura 37. Não há medidor de vazão instalado diretamente na linha de reciclo. Os valores são obtidos por meio da diferença entre a vazão nominal da bomba e as vazões medidas na barra direita (FT-11) e esquerda (FT-31), ou seja:

$$Q_{reciclo} = Q_{bomba} - (Q_{FT11} + Q_{FT31}) . \quad (36)$$

Na Figura 37, os dados são apresentados como nuvem de pontos. Ainda assim, é possível observar uma tendência de aumento na vazão de reciclo a partir do aumento da pressão na barra.

Esse comportamento é avaliado também para as pressões de ajuste de 3,1 *bar* e 4,1 *bar*. Os gráficos da pressão na barra em função do número de bicos abertos, como também do comportamento da PCV estão disponíveis nos Apêndices D e E, respectivamente.

Os resultados obtidos com os experimentos mostram que a variação média de pressão na barra fica abaixo de 15%, que é o valor observado no cenário de fechamento total dos bicos.

No entanto, durante a aplicação dos agrotóxicos, pode-se assumir que é muito pouco provável ser necessário fechar muitos bicos simultaneamente, tendo-se que trabalhar com apenas um, dois ou três bicos abertos, por exemplo. Como visto nos cenários de economia discutidos nos Capítulos 1 e 2, e exemplificado na Figura 9, o mais comum é o fechamento de apenas alguns bicos, seja para minimizar a sobreposição, compensar falhas de plantio, ou mesmo para evitar as perdas no fim da lavoura.

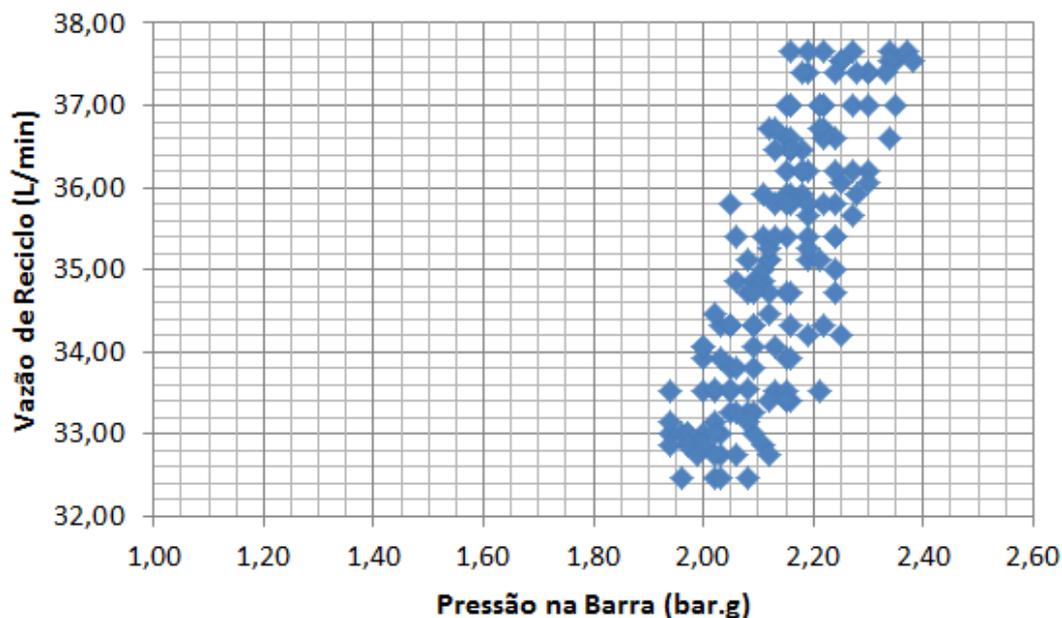


Figura 37: Vazão de reciclo da PCV em função da pressão na barra, para um conjunto de experimentos, com ajuste inicial de 2 *bar*.

Assim, analisam-se novamente os dados experimentais. Opta-se por focar nos cenários em que são fechados apenas três bicos; e, logo em seguida, apenas cinco dos dez bicos. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 10.

Atentar que, nessa tabela, é apresentado o número de bicos que estão abertos em cada cenário avaliado (vide segunda coluna: #Bicos_{abertos}). Além disso, os valores de P_{medida} são obtidos a partir da média aritmética (\bar{P}) de todos os valores registrados pelo sensor para cada um dos cenários em questão. O desvio padrão amostral (s) das medidas também é indicado na tabela.

Com base nos dados apresentados, percebe-se que a variação de pressão na barra é pequena. Está numa faixa que vai de 3,5%, para sete bicos abertos, com pressão ajustada em 2,0 *bar*; até 9,5%, para cinco bicos abertos, com $P_{ajuste} = 2,4$ *bar*.

Comparando-se os resultados da Tabela 10 com os resultados de simulação apresentados na Tabela 5 e na Tabela 6, observa-se que os comportamentos são semelhante. O fechamento parcial dos bicos provoca aumento da pressão na barra. Para um cenário no qual cinco bicos são fechados, observa-se que a variação de pressão fica sempre abaixo de 10%, tanto para os valores calculados nas simulações quanto para os valores medidos nos experimentos práticos.

Com isso, assume-se que o regulador mecânico original do pulverizador, implementado por meio da válvula de alívio (PCV-00), apresenta desempenho satisfatório para os casos mais prováveis de operação e que, portanto, a solução de automação projetada não causará prejuízo para o tamanho da gota.

Assim, num primeiro momento, considera-se não ser necessário projetar solução de

Comportamento da pressão para fechamento de três e cinco bicos					
P_{ajuste} [bar.g]	Acion.	#Bicos _{abertos}	P_{medida} ($\bar{P} \pm s$) [bar.g]	Aumento na P_{medida} [bar.g] [%]	
2,0	Motor Elétrico	10	2,01 \pm 0,02	-	-
		7	2,08 \pm 0,02	0,07	3,5%
		5	2,14 \pm 0,02	0,13	6,5%
3,1	Motor Elétrico	10	3,11 \pm 0,02	-	-
		7	3,25 \pm 0,04	0,14	4,5%
		5	3,32 \pm 0,04	0,21	6,8%
4,1	Motor Elétrico	10	4,07 \pm 0,05	-	-
		7	4,25 \pm 0,04	0,18	4,4%
		5	4,37 \pm 0,04	0,30	7,4%
2,4	TDP Trator	10	2,42 \pm 0,15	-	-
		7	2,58 \pm 0,09	0,16	6,6%
		5	2,65 \pm 0,10	0,23	9,5%

Tabela 10: Resultados experimentais em cenários típicos.

instrumentação adicional para controlar a pressão do sistema, visto que seu comportamento já se apresenta de forma estável nos casos típicos de operação.

Comparando-se com os resultados obtidos por Rosa (2018), que utiliza uma bancada de testes de laboratório com sete bicos em série, verifica-se que para o fechamento de apenas três bicos, a autora observou o aumento da pressão em quase 30%. Por isto, concluiu pela necessidade de adicionar uma nova válvula de controle de pressão para recircular o excedente de vazão de volta para o reservatório, no intuito de auxiliar a válvula reguladora mecânica da bomba (PCV) a manter a pressão estável na barra.

É, portanto, uma situação diferente da observada neste trabalho, na qual se verifica que a variação de pressão é praticamente desprezível para os cenários em que são fechados até 50% dos bicos. Com isso, permite-se que a solução aqui proposta seja ainda mais econômica, em função de não ser necessária a válvula de controle de pressão.

Em relação às válvulas solenoides *on/off*, adicionadas para permitir que os bicos sejam abertos/fechados remotamente, observa-se que apresentaram desempenho satisfatório. Foi possível fechar e abrir os bicos remotamente a partir da interface via aplicativo Android, tantas vezes quanto necessário.

Além disso, a solução de acionamento desenvolvida é semelhante ao feito por Rosa (2018) para uma bancada de laboratório. A diferença principal está no fato de que a estratégia aqui adotada utiliza solenoides normalmente abertas (NA); e a autora utiliza solenoides normalmente fechadas (NF).

A justificativa principal para o uso das válvulas NA é o aumento da robustez do sistema, pois, durante a pulverização, espera-se que os bicos estejam abertos na maior parte do tempo. Assim, em caso de mal-funcionamento da eletrônica ou de alguma

válvula, os bicos tenderão a falhar mantendo-se abertos, não comprometendo a aplicação do agrotóxico. Ou seja, em caso de falha, o pulverizador continuará funcionando como era originalmente, *i.e.*, sem a automação.

Ademais, como os bicos ficam fechados por pouco tempo, durante a operação, as válvulas do tipo NA são acionadas também por menos tempo que as NF, o que proporciona redução no consumo energético do sistema. Com isso, espera-se que esse menor consumo de corrente proporcione aumento na vida útil dos componentes, em função da redução do seu aquecimento por efeito Joule.

Por fim, vale lembrar que a solução aqui proposta pretende ser uma alternativa acessível, simples e de baixo custo, para viabilizar aplicação liga/desliga, com controle bico-a-bico, em pulverizadores existentes. Logo não se cogita implementar PWM de alta velocidade nas válvulas utilizadas no protótipo apresentado neste trabalho, tampouco competir em desempenho com soluções internacionais de alto custo, como as apresentadas no Capítulo 2.3.

4.4 Custo do Protótipo

Para a confecção do protótipo, fez-se a aquisição de diversos materiais e componentes. Considerando-se que a solução desenvolvida deve ser de baixo custo, opta-se pelo uso de componentes que tenham melhor preço, e que atendam aos requisitos técnicos mínimos do projeto.

Assim, na Tabela 11, é apresentada uma lista dos principais itens de suprimento utilizados na execução do protótipo, com suas respectivas quantidades e custos aproximados. Ao final da lista, apresenta-se o valor estimado global do *hardware* utilizado, a partir do somatório de todos os valores parciais.

Vale ressaltar que estão contabilizados apenas os custos dos materiais e componentes utilizados para a implantação da solução no pulverizador.

Logo, não estão considerados custos de HH (homem-hora) referentes às atividades de engenharia, projeto, *software*, fabricação e montagem. Tampouco se contabiliza o custo de aquisição do pulverizador em si, uma vez que a solução é pensada de forma modular, para ser adaptada ao maquinário existente.

Também não estão contabilizados custos referentes aos equipamentos utilizados para os testes sem o trator, quais sejam: motor elétrico, inversor de frequência, polias, correia e cabos de alimentação.

Ainda assim, entende-se ser possível viabilizar uma solução com custo significativamente inferior ao praticado para a aquisição dos produtos comerciais existentes atualmente, com valores da ordem de centenas de milhares de reais.

Item	Qtd.	Custo Parcial
Sensor de Pressão HK1100C	2	R\$ 200,00
Sensor de Vazão YSF-S201	2	R\$ 50,00
Válvula Solenoide NA 12Vcc	10	R\$ 700,00
Material para Conexões em Tecnil (Nylon)	20	R\$ 100,00
Arduino MEGA R3 (ATmega2560)	1	R\$ 80,00
Arduino UNO (ATmega328P)	1	R\$ 30,00
Módulo Bluetooth HC-05	1	R\$ 25,00
Módulo RTC	1	R\$ 15,00
Módulo Micro SD-Card	1	R\$ 15,00
Módulo de Potência (Placa de Relés)	1	R\$ 120,00
Painel de Controle (caixa acrílica IP-65)	1	R\$ 70,00
Caixa de Junção (caixa acrílica IP-65)	1	R\$ 50,00
Miscelânea (cabos, bornes, conectores, etc.)	-	R\$ 200,00
Total:		R\$ 1.655,00

Tabela 11: Custo aproximado do *hardware* do protótipo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Neste trabalho, foi possível fazer um estudo dos equipamentos utilizados na pulverização agrícola. Foi dado foco no pulverizador de barras tratorizado, devido a sua larga utilização no contexto da agricultura familiar.

Foram discutidas as vantagens do tratamento localizado em pulverização. E, para suprir essa demanda, avaliou-se o uso de dispositivos de instrumentação e automação embarcados no protótipo desenvolvido.

Assim, verificou-se ser possível o desenvolvimento de uma solução de baixo custo para implantar controle bico-a-bico num pulverizador agrícola. Essa solução é requisito inicial para viabilizar a automação da pulverização, no contexto da agricultura de precisão, com tratamento localizado do tipo liga/desliga.

No desenvolvimento do protótipo, utilizaram-se tecnologias correntes, como: módulos e controladores da família Arduino; interface bluetooth para *smartphones*; sensores de pressão e vazão; válvulas solenoides *on/off*; além de diversas miscelâneas necessárias para tornar a solução funcional.

No trabalhado, descreveram-se os passos necessários para o desenvolvimento do protótipo, tanto em nível de *hardware* quanto de *software*. Detalhou-se sua integração com o pulverizador, caracterizando uma solução embarcada.

Foram descritos os experimentos realizados para validação do protótipo, tanto com acionamento via conjunto motor-inversor, quanto via acoplamento à TDP do trator. Avaliou-se o comportamento da pressão a partir dos diversos cenários de fechamento sucessivo de bicos. Concluiu-se que, para os níveis de exatidão esperados com um protótipo de baixo custo, a pressão varia dentro de uma faixa aceitável e que, portanto, *a priori*, não é necessária a instalação de válvula de controle ou dispositivo adicional com função de regular a pressão na barra.

Portanto, a principal contribuição deste trabalho é o estudo do problema do tratamento localizado em pulverização e a proposição de uma solução tecnológica, desenvolvida e validada na forma de protótipo. O escopo da solução foi pensado de forma a utilizar componentes de baixo custo, visando ser economicamente acessível aos agricultores fa-

miliares.

Como trabalhos futuros, propõe-se:

- Analisar os ganhos reais do protótipo a partir da sua aplicação em culturas típicas da agricultura familiar. Recomenda-se mensurar o volume médio de calda consumido para cada utilização do pulverizador na lavoura; e, em seguida, comparar com dados históricos do mesmo talhão. Com isso, quantificar a economia de agrotóxico obtida pela instalação da solução de automação. Sugere-se confrontar os dados obtidos com métricas da literatura, como as apresentadas nos Capítulos 2 e 2.3.
- Avançar na integração com as outras frentes de trabalho do projeto, especialmente as partes de visão computacional, localização e pulverização eletrostática. Com a visão e a localização, poderá se fazer a abertura e o fechamento dos bicos automaticamente a partir de técnicas de percepção para o reconhecimento das linhas de plantio, além do rastreamento das áreas pulverizadas. Já com a eletrização, será possível mensurar novos ganhos econômicos a partir da maior aderência da calda nas plantas, o que tende a melhorar significativamente a eficiência da pulverização, reduzindo o volume aplicado.
- Estudar possibilidades de arranjos com microcontroladores menores e distribuídos, a exemplo do ARM STM32 F103 Blue Pill. Com isso, avaliar custo benefício de usar barramento de dados, a exemplo da rede CAN.
- Avaliar desempenho da solução proposta a partir do uso de distintas pontas de pulverização. Utilizar pontas com faixas de trabalho de pressão e vazão diferentes das empregadas no protótipo desenvolvido.
- Desenvolver procedimento e mensurar tempo de resposta da solução, desde o comando no aplicativo Android até a abertura ou fechamento da válvula. Sugere-se avaliar tempos mínimo, máximo e médio para um conjunto representativo de experimentos. Esses tempos serão fundamentais para a futura implementação dos comandos de forma automática a partir da visão computacional.
- Avaliar outros modelos de válvula solenoide e testar seu acionamento via controle com modulação por largura de pulso (PWM: *Pulse Width Modulation*). Como visto, este tipo de acionamento permite um *pseudo* controle regulatório da vazão de calda aplicada por cada bico, podendo-se, por exemplo, aplicar diferentes receitas num mesmo talhão ou melhor compensar trajetórias curvilíneas. Lembrando que, nestas trajetórias, o ponto mais distante do centro da curva tem velocidade maior que o ponto central. Logo, há variação na velocidade linear de cada bico em relação à lavoura, o que pode demandar correção na taxa de aplicação do produto.

- Avaliar uso de válvula para permitir controle do volume de calda pulverizador pela barra em tempo real por meio de comandos do aplicativo. Avaliar uso de válvula de controle regulatório com variação de abertura ou com controle PWM. Com isso, permitir que se varie a taxa de aplicação (VRA), em tempo real, para todos os bicos abertos no instante considerado.
- Fazer novos estudos para aprofundar o entendimento do ruído percebido no sinal dos sensores e, a partir de então, avaliar e propor estratégia filtragem de baixo custo para atenuar essas oscilações.
- Estudar o fenômeno de histerese observado nos dados coletados, já que, para um mesmo cenário, os valores dos sensores apresentaram diferença nas sequências de abertura e de fechamento dos bicos.

REFERÊNCIAS

- AGRICONET. **Pulverizadores para floricultores**. 2018. Disponível em: <http://agriconet.blogspot.com/2018/04/pulverizadores-para-floricultores.html>. Acesso em 23/09/2019.
- AGROLINK. **Aplicação de defensivos agrícolas**. 2018. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/agrolinkfito/artigo/aplicacao-de-defensivos-agricolas_43944.html. Acesso em 27/11/2018.
- ANDEF. **Manual de Tecnologia de Aplicação de Produtos Fitossanitários**. Brasil: Associação Nacional de Defesa Vegetal, Comitê de Boas Práticas Agrícolas, 2010.
- BEGA, E. A.; DELMÉE, G. J.; COHN, P. E.; BULGARELLI, R.; KOCH, R.; FINKEL, V. S. **Instrumentação Industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência: IBP, 2006.
- BERNARDI, A. C. d. C.; NAIME, J. d. M.; RESENDE, A. V. d.; BASSOI, L. H.; INAMASU, R. Y. (Ed.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília, DF: Embrapa, 2014.
- BLUE RIVER. **See & Spray**. 2020. Disponível em: <http://www.bluerivertechnology.com/>. Acesso em 15/01/2020.
- BOLTON, W. **Engenharia de Controle**. 1. ed. São Paulo: Makron Books, 1995.
- BRASQUIMICA. **Benefícios da pulverização aérea**. 2018. Disponível em: <http://brasquimica.ind.br/beneficios-da-pulverizacao-aerea/>. Acesso em 27/11/2018.
- BURTON, T. **Introduction to Dynamic Systems Analysis**. USA: McGraw-Hill, 1994.
- CASE. **Autonomous Concept Vehicle**. 2020. Disponível em: <https://www.caseih.com/northamerica/en-us/Pages/campaigns/autonomous-concept-vehicle.aspx>. Acesso em 27/01/2020.
- CHANG, Y. K.; ZAMAN, Q. U.; SCHUMANN, A. W.; PERCIVAL, D. C.; ESAU, T. J.; AYALEW, G. Development of color co-occurrence matrix based machine vision algorithms for wild blueberry fields. **Applied Engineering in Agriculture**, Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE), 2012.
- CRUVINEL, P. E.; OLIVEIRA, V. A.; FELIZARDO, K. R.; MERCALDI, H. V. Bancada automatizada para ensaios e desenvolvimento de pulverizadores de agrotóxicos. **Agricultura de Precisão: um Novo Olhar**, Embrapa Instrumentação - Capítulo em livro científico (ALICE), São Carlos, SP, v. 1, 2011.

CRUVINEL, P. E.; OLIVEIRA, V. A.; MERCALDI, H. V.; PEÑALOZA, E. A.; FELIZARDO, K. R. An advanced sensors-based platform for the development of agricultural sprayers. In: YURISH, S. Y. (Ed.). **Sensors and Applications in Measuring and Automation Control Systems**. Indianapolis, IN, USA: International Frequency Sensor Association Publishing - IFSA, 2016. cap. 10, p. 181–204.

CUNHA, M. A. B. **Controle em Cascata de um Atuador Hidráulico: Contribuições Teóricas e Experimentais**. Tese (Doutorado) — UFSC, Florianópolis, SC, 2001.

DELMÉE, G. **Manual de medição de vazão**. São Paulo: Editora Blucher, 2003.

DEXTER, A. G. Herbicide spray drift. **NDSU**, North Dakota State University Extension Service, 1993.

EMBRAPA. **Aplicação com Pulverizador Costal Manual**. 2018. Disponível em: https://www.embrapa.br/image/journal/article?img_id=40382998&t=1546510629910. Acesso em 27/11/2018.

EVENSON, R. E.; GOLLIN, D. Assessing the impact of the green revolution, 1960 to 2000. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 300, n. 5620, p. 758–762, 2003.

FARM-EQUIPMENT. **John Deere Reveals New 'Driverless' Tractor Concept**. 2020. Disponível em: <https://www.farm-equipment.com/articles/17489-john-deere-reveals-new-driverless-tractor-concept>. Acesso em 27/01/2020.

FELIZARDO, K.; OLIVEIRA, V.; CRUVINEL, P. Bancada didática para avaliação de sistema de injeção direta de herbicidas agrícolas de interesse em agricultura de precisão. In: EMBRAPA INSTRUMENTAÇÃO - ARTIGO EM ANAIS DE CONGRESSO (ALICE). In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO - ConBAP**. Ribeirão Preto, 2010.

FELIZARDO, K. R.; MERCALDI, H. V.; CRUVINEL, P. E.; OLIVEIRA, V. A.; STEWARD, B. L. Modeling and model validation of a chemical injection sprayer system. **Applied Engineering in Agriculture**, American Society of Agricultural and Biological Engineers, v. 32, n. 3, p. 285, 2016.

FERREIRA, C. A. J. G.; CRUVINEL, P. E.; PEÑALOZA, E. A. G.; OLIVEIRA, V. A.; MERCALDI, H. V. et al. A hydraulic-pump speed controller in agricultural sprayers based on the automation and use of the control area network (can) bus. In: **IEEE. 2018 IEEE 12th International Conference on Semantic Computing (ICSC)**. USA, 2018. p. 358–362.

FOX, R.; MCDONALD, A.; PRITCHARD, P. **Introduction to Fluid Mechanics**. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2004.

FUNSETH, T. G.; HUMPAL, R. A.; BULLOCK, S. L. **Spray nozzle system, spray boom with such and agricultural vehicle having such spray boom**. Paris: Google Patents, 2016. EP 2 995 382 A1.

GARCIA, C. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos**. 2. ed. São Paulo: EDUSP, 2005.

GIL, E.; LLORENS, J.; LLOP, J.; FÀBREGAS, X.; ESCOLÀ, A.; ROSELL-POLO, J. Variable rate sprayer. part 2–vineyard prototype: Design, implementation, and validation. **Computers and Electronics in Agriculture**, Elsevier, v. 95, p. 136–150, 2013.

GIL, Y.; SINFORT, C. Emission of pesticides to the air during sprayer application: A bibliographic review. **Atmospheric Environment**, v. 39, p. 5183–5193, 09 2005.

GRÜTZMACHER, D. D.; GRÜTZMACHER, A. D.; AGOSTINETTO, D.; LOECK, A. E.; ROMAN, R.; PEIXOTO, S. C.; ZANELLA, R. Monitoramento de agrotóxicos em dois mananciais hídricos no sul do brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 6, p. 632–637, 2008.

HEEGE, H. J. **Precision in crop farming: site specific concepts and sensing methods: applications and results**. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 2013.

HUGHES, T. A. **Measurement and Control Basics**. 3. ed. Research Triangle Park: ISA Press, 2002.

HUMPAL, R. A.; FUNSETH, T. G. **Dispositivo de bico de pulverização, bico de pulverização individual, e método para operar um bico de pulverização**. Brasil: Google Patents, 2016. BR 102015023131-8 A2.

HYDRAULICS&PNEUMATICS. **Engineering Essentials: Pressure-Control Valves**. 2019. Disponível em: <https://www.hydraulicspneumatics.com/200/TechZone/HydraulicValves/Article/False/6411/TechZone-HydraulicValves>. Acesso em 08/10/2019.

IBGE. **Censo Agropecuário 2006: Agricultura Familiar**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2009. Disponível em: https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/periodicos/50/agro_2006_agricultura_familiar.pdf. Acesso em 22/11/2018.

IBGE. **Censo Agropecuário 2017**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2018. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017>. Acesso em 17/09/2019.

IEC. **Degrees of protection provided by enclosures (IP Code) - IEC 60529**. 2013. International Electrotechnical Commission.

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

JACTO. **Pulverizador agrícola: tudo o que você precisa saber**. 2017. Disponível em: <https://blog.jacto.com.br/pulverizador-agricola-tudo-o-que-voce-precisa-saber/>. Acesso em 19/11/2018.

JACTO. **Pulverizador costal manual 20L**. 2018. Disponível em: <https://www.casadomecanico.com.br/pulverizador-costal-20-litros-pjh9000-jacto-p7049/>. Acesso em 27/11/2018.

JACTO. **Uniport**. 2018. Disponível em: <https://blog.jacto.com.br/uniport-conheca-as-maquinas-agricolas-da-jacto-em-detalhes/>. Acesso em 27/11/2018.

- JACTO. **Uniport 3030 EletroVortex**. 2019. Disponível em: <https://www.jacto.com/brasil/products/pulverizador-automotriz/uniport-3030-eletrovortex>. Acesso em 17/09/2019.
- JOHN DEERE. **Pulverizador de Arrasto PV1020**. 2019. Disponível em: <https://www.deere.com.br/pt/tratos-culturais/pulverizador-de-arrasto-pv1020/>. Acesso em: 19/12/2019.
- JOHN DEERE. **Sprayers & Applicators**. 2019. Disponível em: <https://www.deere.com/en/sprayers/>. Acesso em 17/09/2019.
- KAGAN, J. **Thomas Malthus**. 2019. Disponível em: <https://www.investopedia.com/terms/t/thomas-malthus.asp>. Acesso em 11/11/2019.
- KO. **Atomizador KO Speed Jet**. 2019. Disponível em: <http://www.komaquinas.com.br/>. Acesso em 23/09/2019.
- LIND, K. M.; PEDERSEN, S. M. Perspectives of precision agriculture in a broader policy context. In: **Precision Agriculture: Technology and Economic Perspectives**. Switzerland: Springer, 2017. p. 251–266.
- LINSINGEN, I. von. **Fundamentos de sistemas hidráulicos**. 2. ed. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.
- LIPTÁK, B. G. Book. **Instrument engineers' handbook, Volume 1: Process Measurement and Analysis**. 4. ed. New York, USA: CRC-Press, 2003.
- LIPTÁK, B. G. Book. **Instrument engineers' handbook, Volume 2: Process control and optimization**. 4. ed. New York, USA: CRC-Press, 2003.
- MACHADO, A. L. T.; REIS, A. d.; MORAES, M. d.; ALONÇO, A. d. S. **Máquinas para preparo do solo, semeadura, adubação e tratamentos culturais**. Pelotas: UFPel-Universitária, 2005.
- MAGNOJET. **Ponta de Pulverização MF**. 2019. Disponível em: <http://www.magnojet.com.br/produtos/produto/17>. Acesso em 07/10/2019.
- MAPA. **Principais Conceitos e Expressões Utilizados na Agricultura de Precisão - AP**. Brasil: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2017. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/tecnologia-agropecuaria/agricultura-de-precisao-1/arquivos-de-agricultura-de-precisao/conceitos-relacionados-a-agricultura-de-precisao-1.pdf>. Acesso em 19/11/2018.
- MAZOYER, M.; ROUDART, L. (Ed.). **História das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea**. São Paulo, SP: UNESP, 2010.
- MERCALDI, H. V. **Automação de um sistema de pulverização para aplicação de agroquímicos a taxa variada usando injeção direta**. Dissertação (Mestrado) — EESC-USP, São Carlos, SP, 2012.
- MERCALDI, H. V.; PEÑALOZA, E. A. G.; MARIANO, R. A.; OLIVEIRA, V. A.; CRUVINEL, P. E. Flow and pressure regulation for agricultural sprayers using solenoid valves. **Internacional Federation of Automatic Control - IFAC**, Elsevier, v. 50, n. 1, p. 6607–6612, 2017.

- MICHAEL, N. **Localized product injection system for an agricultural sprayer**. USA: Google Patents, 2014. WO Patent App. 61/833,290.
- MILHORANCE, F. Brasil lidera o ranking de consumo de agrotóxicos. Instituto Nacional de Câncer José Alencar Gomes da Silva, 2015.
- MOLIN, J. P.; AMARAL, L. R. do; COLAÇO, A. **Agricultura de precisão**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- MONTEIRO, L. H. A. **Sistemas dinâmicos**. 2. ed. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2006.
- NASCIMENTO, G. do; WEBER, F.; ROSA, G.; TERRA, F.; DREWS-JR, P. A perception system for an autonomous pesticide boom sprayer. **Latin American Robotics Symposium (LARS)**, 2019.
- NEW LANDS. **Newlands, Safe Application of Pesticides Boom Sprayers**. 2019. Disponível em: <https://www.newlandstraining.co.uk/pesticide-application/fepa-spraying/fepa-spraying-boom-spraying>). Acesso em: 10/06/2019.
- NUSPL, S. J.; RUDOLPH, W. W.; GUTHLAND, R. Use of injection for site-specific chemical application. In: **Third International Conference on Precision Agriculture**. Madison, WI: Precision Agriculture, ASA, CSSA, SSSA, 1996. p. 739–744.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2003.
- OLIVEIRA, D. L. d. **Impactos do crescimento populacional sobre a produção agrícola de alimentos e demanda dos fatores primários de produção: uma abordagem de blocos econômicos**. Dissertação (Mestrado) — UFJF, Juiz de Fora, MG, 2017.
- OWEN, M. D.; ZELAYA, I. A. Herbicide-resistant crops and weed resistance to herbicides. **Pest Management Science: formerly Pesticide Science**, Wiley Online Library, v. 61, n. 3, p. 301–311, 2005.
- PENALOZA, E. A.; OLIVEIRA, V. A.; CRUVINEL, P. E. Soft-sensor approach based on principal components analysis to improve the quality of the application of pesticides in agricultural pest control. In: EMBRAPA INSTRUMENTAÇÃO - ARTIGO EM ANAIS DE CONGRESSO (ALICE). In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN SENSORS, ACTUATORS, METERING AND SENSING - ALLSENSORS 2018**. Rome, 2018.
- PREHEIM, J. D.; DRIESEN, B. A.; MICHAEL, N. O.; KOCER, J. E. **Nozzle control system and method**. usA: Google Patents, 2017. US Patent App. 15/629,696.
- RAVEN. **Precision Ag Products and Systems**. 2019. Disponível em: <https://ravenprecision.com/products>). Acesso em 17/09/2019.
- RIBEIRO, M. L.; LOURENCETTI, C.; PEREIRA, S. Y.; MARCHI, M. R. R. de. Contaminação de águas subterrâneas por pesticidas: avaliação preliminar. **Química Nova**, v. 30, n. 3, p. 688–694, 2007.
- ROSA, G. R. A. da. **Controle de pressão em sistemas de pulverização em barras com bicos em série**. Monografia (Projeto de Graduação em Engenharia de Automação) — FURG, Rio Grande, RS, 2018.

ROSA, G. R. A. da; TERRA, F. P.; DREWS-JR, P. L. J. Pulverizador agrícola em barras com aplicação a taxa variada: Modelagem física. **14º Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI)**, 2019.

RPA. **Pulverização Terrestre**. 2018. Disponível em: <https://revistarpanews.com.br/ed/75-edicao2015/edicao-175/2028-pulverizacao-terrestre>. Acesso em 28/11/2018.

RUBEMAQ. **Pulverizador P320 Litros X**. 2018. Disponível em: <https://www.rubemaq.com.br/detalhe-produto/65>. Acesso em 20/11/2018.

SCHAMPHELEIRE, M. D.; NUYTENS, D.; BAETENS, K.; CORNELIS, W.; GABRIELS, D.; SPANOGHE, P. Effects on pesticide spray drift of the physicochemical properties of the spray liquid. **Precision Agriculture**, Springer, v. 10, n. 5, p. 409–420, 2009.

SHIRATSUCHI, L. S.; CHRISTOFFOLETI, P. J.; FONTES, J. R. A. **Aplicação Localizada de Herbicidas**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2003. Disponível em: http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPAC-2009/25155/1/doc_91.pdf. Acesso em 19/12/2019.

SMART SENSING BRASIL. **Weed-it: Sistema para Pulverização Localizada**. 2019. Disponível em: <http://smartsensingbrasil.com.br/weed-it/>. Acesso em 17/09/2019.

UNITED NATIONS. **World Population Prospects: The 2019 Revision**. 2019. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/>. Acesso em 19/11/2019.

VENA-CONTRACTA. **Vena Contracta**. 2019. Disponível em: <https://www.vena-contracta.com/venacontracta>. Acesso em 08/10/2019.

WEBER, F.; ROSA, G.; TERRA, F.; OLDONI, A.; DREWS, P. A low cost system to optimize pesticide application based on mobile technologies and computer vision. In: IEEE. **Latin American Robotic Symposium (LARS), Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and Workshop on Robotics in Education (WRE)**. João Pessoa, PB, 2018. p. 345–350.

WEBER, F. B. **Identificação de linhas de cultivo com uso de visão computacional em ambiente não controlado de campo**. Dissertação (Mestrado) — FURG, Rio Grande, RS, 2019.

WEED-IT. **Weed-it Precision Spraying**. 2019. Disponível em: <https://www.weed-it.com/>. Acesso em 17/09/2019.

WHEELER, W. B. Role of research and regulation in 50 years of pest management in agriculture prepared for the 50th anniversary of the journal of agricultural and food chemistry. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 50, n. 15, p. 4151–4155, 2002.

ZHANG, Q. **Precision agriculture technology for crop farming**. USA: CRC Press, 2015.

ZHANG, Q.; PIERCE, F. J. **Agricultural automation: fundamentals and practices**. USA: CRC Press, 2016.

ZHANG, Z.; WANG, X.; LAI, Q.; ZHANG, Z. Review of variable-rate sprayer applications based on real-time sensor technologies. In: HUSSMANN, S. (Ed.). **Automation in Agriculture**. Rijeka: IntechOpen, 2018. cap. 4. Disponível em: <https://doi.org/10.5772/intechopen.73622>.

APÊNDICE A PERDA DE CARGA NA MANGUEIRA

De acordo com Garcia (2005), a perda de carga distribuída em trechos de tubulação, pode ser calculada em função do perfil de escoamento, das características do fluido e da rugosidade interna do tubo. Para escoamento turbulento em tubos rugosos, usa-se:

$$p_i - p_f = \Delta p = R_{F,TR} \cdot Q^2, \quad (37)$$

onde: p_i é a pressão no ponto inicial e p_f , no ponto final; Δp é a perda de carga (*Pascal*); $R_{F,TR}$, a resistência fluídica; e Q , a vazão (m^3/s).

Vale destacar que a equação acima é válida para escoamento de qualquer líquido incompressível em tubulações de diâmetro constante, instaladas em qualquer posição (horizontal, vertical ou inclinada). A resistência fluídica ($R_{F,TR}$) é dada por:

$$R_{F,TR} = \frac{f_a \cdot L \cdot \rho}{2 \cdot D \cdot A^2}, \quad (38)$$

onde:

f_a = coeficiente de atrito (*adimensional*)

L = comprimento do trecho reto de tubulação (m)

ρ = massa específica do fluido (kg/m^3)

D = diâmetro interno da tubulação (m)

A = área interna da tubulação (m^2)

O fator de atrito (f_a) é determinado experimentalmente e os valores mais usados podem ser obtidos pelos diagramas de Moody. Neste trabalho, optou-se por calculá-lo analiticamente com base na equação Shacham. Assim, para regimes turbulentos ($Re > 2100$), f_a é dado por:

$$f_a = \left\{ -2 \cdot \log_{10} \left[\frac{RUG}{3,7 \cdot D} - \left(\frac{5,02 \cdot \log_{10} \left(\frac{RUG}{3,7 \cdot D} + \frac{14,5}{Re} \right)}{Re} \right) \right] \right\}^{-2}, \quad (39)$$

onde RUG é a rugosidade absoluta interna do tubo, com valor típico de $45,7 \mu m$ (GAR-

CIA, 2005; FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 2004).

Lembrando que o sistema é composto por uma entrada e dez derivações, conforme Figura 38, pode-se calcular a perda de carga para cada trecho. O primeiro trecho, a montante do bico 1, é chamado de *A* e assume-se 2 m para seu comprimento. Os trechos seguintes, batizados de *B* até *J*, respectivamente, possuem comprimento de 50 cm, que corresponde à distância entre os bicos sucessivos da barra estudada.

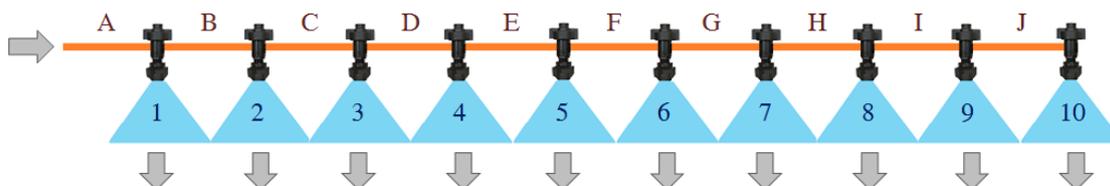


Figura 38: Trechos da mangueira e derivações.

As perdas de carga são calculadas com base nas equações apresentadas acima, donde observa-se que quanto maior a vazão, maior será a perda de carga. Desse modo, calcula-se apenas o pior cenário, que é quando os bicos consomem vazão de 0,7 L/min cada. Os cálculos intermediários para a perda de carga de cada trecho, bem como os resultados obtidos são apresentados na Tabela 12.

Trecho:	L (m)	Q (L/min)	Q (m ³ /s)	v (m/s)	Re	fa	R _{F,TR}	DeltaP (Pa)	DeltaP (bar)
A	2,0	7,0	0,000117	0,9210	11.696,43	0,0289	141.612.875.299	1.927,51	0,0193
B	0,5	6,3	0,000105	0,8289	10.526,78	0,0297	36.421.624.743	401,55	0,0040
C	0,5	5,6	0,000093	0,7368	9.357,14	0,0307	37.605.584.925	327,59	0,0033
D	0,5	4,9	0,000082	0,6447	8.187,50	0,0318	39.008.880.742	260,17	0,0026
E	0,5	4,2	0,000070	0,5526	7.017,86	0,0332	40.714.299.499	199,50	0,0020
F	0,5	3,5	0,000058	0,4605	5.848,21	0,0349	42.857.885.297	145,84	0,0015
G	0,5	2,8	0,000047	0,3684	4.678,57	0,0372	45.684.088.260	99,49	0,0010
H	0,5	2,1	0,000035	0,2763	3.508,93	0,0405	49.693.230.415	60,87	0,0006
I	0,5	1,4	0,000023	0,1842	2.339,29	0,0458	56.149.226.021	30,57	0,0003
J	0,5	0,7	0,000012	0,0921	1.169,64	0,0570	69.900.494.694	9,51	0,0001
Soma:									0,0346

Tabela 12: Cálculo da perda de carga na mangueira.

Assim, observa-se que a perda de carga total, distribuída na barra de pulverização estudada, no pior cenário de utilização, será de 0,0346 bar. Logo, conclui-se que a perda de carga na barra pode ser desprezada e, portanto, é coerente que sejam muito próximas as pressões medidas no início (PT-12) e no fim da barra (PT-13).

APÊNDICE B PLANILHAS PARA EXPERIMENTOS

A seguir, são apresentadas as planilhas utilizadas nos experimentos iniciais, para orientar a execução dos testes e registrar os valores medidos pelos sensores.

Na primeira folha, os formulários para fechamento sequencial dos bicos na ordem crescente, do primeiro ao décimo. E, na segunda, para fechamento decrescente, do décimo ao primeiro bico.



2 Pressão Ajustada: _____ Barra Esquerda: _____ Agitador: _____ Modelo das Pontas: _____

Bicos Abertos:										Pressão 1	Pressão 2	Vazão 1	Vazão 2	OBS:
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	PT_12 (bar)	PT_13 (bar)	FT_11 (L/min)	FT_31 (L/min)	
O	O	O	O	O	O	O	O	O	O					
O	O	O	O	O	O	O	O	O	X					
O	O	O	O	O	O	O	O	X	X					
O	O	O	O	O	O	X	X	X	X					
O	O	O	O	O	X	X	X	X	X					
O	O	O	X	X	X	X	X	X	X					
O	O	X	X	X	X	X	X	X	X					
O	X	X	X	X	X	X	X	X	X					
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					

3.1 Pressão Ajustada: _____ Barra Esquerda: _____ Agitador: _____ Modelo das Pontas: _____

Bicos Abertos:										Pressão 1	Pressão 2	Vazão 1	Vazão 2	OBS:
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	PT_12 (bar)	PT_13 (bar)	FT_11 (L/min)	FT_31 (L/min)	
O	O	O	O	O	O	O	O	O	O					
O	O	O	O	O	O	O	O	O	X					
O	O	O	O	O	O	O	X	X	X					
O	O	O	O	O	X	X	X	X	X					
O	O	O	X	X	X	X	X	X	X					
O	O	X	X	X	X	X	X	X	X					
O	X	X	X	X	X	X	X	X	X					
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					

4.1 Pressão Ajustada: _____ Barra Esquerda: _____ Agitador: _____ Modelo das Pontas: _____

Bicos Abertos:										Pressão 1	Pressão 2	Vazão 1	Vazão 2	OBS:
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	PT_12 (bar)	PT_13 (bar)	FT_11 (L/min)	FT_31 (L/min)	
O	O	O	O	O	O	O	O	O	O					
O	O	O	O	O	O	O	O	O	X					
O	O	O	O	O	O	O	X	X	X					
O	O	O	O	O	X	X	X	X	X					
O	O	O	X	X	X	X	X	X	X					
O	O	X	X	X	X	X	X	X	X					
O	X	X	X	X	X	X	X	X	X					
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					



2 Pressão Ajustada: _____ Barra Esquerda: _____ Agitador: _____ Modelo das Pontas: _____

Bicos Abertos:										Pressão 1	Pressão 2	Vazão 1	Vazão 2	OBS:
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	PT_12 (bar)	PT_13 (bar)	FT_11 (L/min)	FT_31 (L/min)	
O	O	O	O	O	O	O	O	O	O					
X	O	O	O	O	O	O	O	O	O					
X	X	O	O	O	O	O	O	O	O					
X	X	X	O	O	O	O	O	O	O					
X	X	X	X	O	O	O	O	O	O					
X	X	X	X	X	O	O	O	O	O					
X	X	X	X	X	X	O	O	O	O					
X	X	X	X	X	X	X	O	O	O					
X	X	X	X	X	X	X	X	O	O					
X	X	X	X	X	X	X	X	X	O					
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					

3.1 Pressão Ajustada: _____ Barra Esquerda: _____ Agitador: _____ Modelo das Pontas: _____

Bicos Abertos:										Pressão 1	Pressão 2	Vazão 1	Vazão 2	OBS:
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	PT_12 (bar)	PT_13 (bar)	FT_11 (L/min)	FT_31 (L/min)	
O	O	O	O	O	O	O	O	O	O					
X	O	O	O	O	O	O	O	O	O					
X	X	O	O	O	O	O	O	O	O					
X	X	X	O	O	O	O	O	O	O					
X	X	X	X	O	O	O	O	O	O					
X	X	X	X	X	O	O	O	O	O					
X	X	X	X	X	X	O	O	O	O					
X	X	X	X	X	X	X	O	O	O					
X	X	X	X	X	X	X	X	O	O					
X	X	X	X	X	X	X	X	X	O					
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					

4.1 Pressão Ajustada: _____ Barra Esquerda: _____ Agitador: _____ Modelo das Pontas: _____

Bicos Abertos:										Pressão 1	Pressão 2	Vazão 1	Vazão 2	OBS:
10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	PT_12 (bar)	PT_13 (bar)	FT_11 (L/min)	FT_31 (L/min)	
O	O	O	O	O	O	O	O	O	O					
X	O	O	O	O	O	O	O	O	O					
X	X	O	O	O	O	O	O	O	O					
X	X	X	O	O	O	O	O	O	O					
X	X	X	X	O	O	O	O	O	O					
X	X	X	X	X	O	O	O	O	O					
X	X	X	X	X	X	O	O	O	O					
X	X	X	X	X	X	X	O	O	O					
X	X	X	X	X	X	X	X	O	O					
X	X	X	X	X	X	X	X	X	O					
X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					

APÊNDICE C RÚIDO NA MEDIÇÃO DE PRESSÃO

Na aquisição dos sinais dos sensores de pressão e de vazão, percebe-se bastante oscilação dos valores medidos, conforme observado nos gráficos apresentados no Capítulo 4. Na tentativa de identificar as origens dessa oscilação, são isoladas e avaliadas algumas possíveis fontes de ruído.

C.1 Ruído no Sinal de Pressão

Para avaliar o ruído intrínseco do sensor de pressão, fez-se a montagem numa mesa de calibração hidráulica, ajustando-se uma pressão fixa. Com o auxílio do osciloscópio, fez-se a leitura do sinal fornecido pelo sensor, conforme Figura 39.

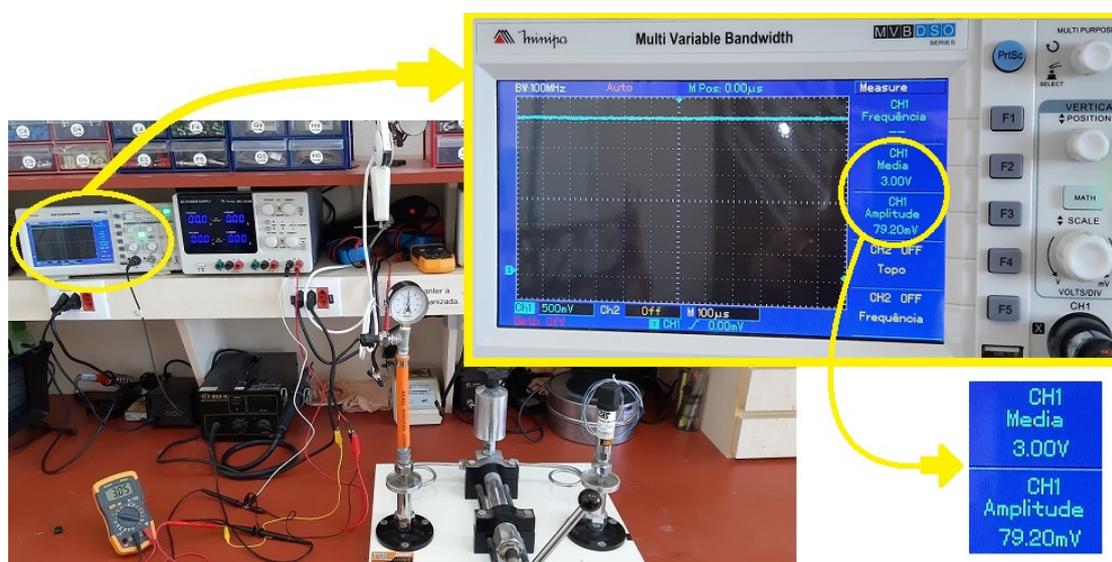


Figura 39: Medição do ruído de fundo no sensor de pressão.

Observa-se que o ruído de medição apresentado pelo sensor tem amplitude de aproximadamente 80 mV , o que corresponde a uma pressão na faixa de $0,24\text{ bar}$, conforme fator de conversão do equipamento (2).

Por se tratar de uma oscilação de pressão relativamente baixa, estima-se que o ruído observado nos gráficos do Capítulo 4 conta com a contribuição de outras fontes.

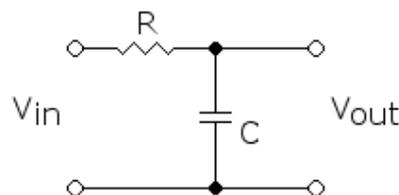
Além disso, percebe-se que o ruído de medição do sensor não afeta a média do sinal. De forma que o valor de pressão pode ser apresentado de forma mais agradável a partir de uma média móvel. Isso é considerado adequado, pois a pressão é apenas monitorada e registrada pelo sistema. Logo, não é utilizada para nenhuma estratégia de controle.

Ainda assim, e apesar do ruído observado no sensor ter amplitude de oscilação relativamente pequena, fizeram-se alguns testes em laboratório com filtros para avaliar possível melhora no sinal.

C.2 Filtro Passa-Baixas

Considera-se que as variações de pressão que se desejam observar podem ser consideradas de dinâmica lenta. Até porque, por ora, existe interesse apenas nos seus valores de regime permanente e não nos transitórios. Logo, pode ser tratado como um sinal de baixa frequência. Já as oscilações observadas na Figura 39, como também nos gráficos do Capítulo 4 representam frequências mais altas.

Assim, assume-se que o sinal de pressão a ser medido tem frequência inferior a 100 Hz , representando ondas de período maior que 10 ms . Portanto, deseja-se atenuar todas as frequências superiores a este valor. Com base nos componentes disponíveis, implementou-se um filtro RC passivo, eletrônico, de primeira ordem, conforme esquema a seguir:



Nesse tipo de filtro, a frequência de corte (f_c) é dada por:

$$f_c = \frac{1}{2 \pi R C}, \quad (40)$$

onde R é o valor da resistência utilizada e C o valor da capacitância. Utilizou-se um resistor de $4,7 \text{ k}\Omega$ e um capacitor de 470 nF , resultando numa frequência de corte de 72 Hz e período de 14 ms .

Para avaliar o desempenho desse filtro, utilizou-se um gerador de funções com um sinal de onda quadrada de 500 Hz e amplitude de $1,6 \text{ V}$. Após passar pelo filtro RC, esse sinal foi atenuado em aproximadamente 4,7 vezes, resultado numa amplitude de 340 mV , conforme montagem apresentada na Figura 40.

Em seguida, o mesmo filtro foi testado tendo como entrada o sinal do sensor de pressão, utilizando a mesa de calibração hidráulica, numa montagem semelhante à apresentada na Figura 39. Nesse arranjo, observou-se que a amplitude do ruído foi atenuada

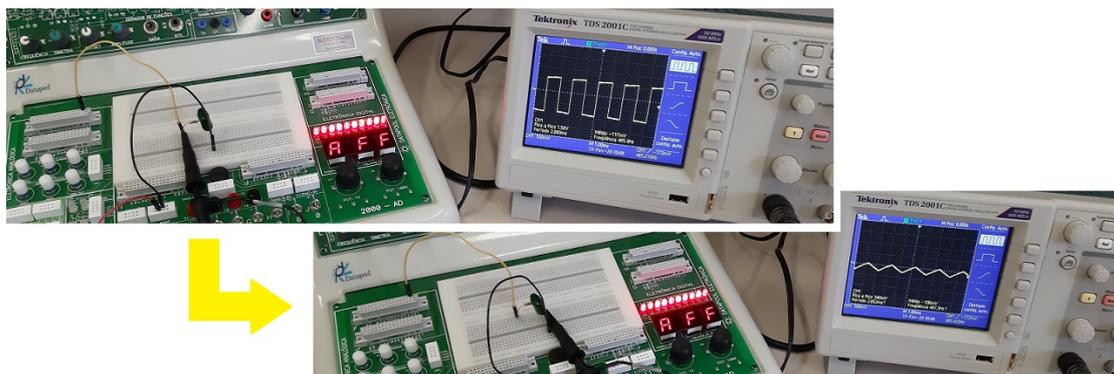


Figura 40: Testes com filtro passa-baixas RC passivo.

em aproximadamente 2,5 vezes, o que foi considerado um comportamento razoável.

C.3 Ruído da Bomba de Membrana

A bomba hidráulica utilizada no pulverizador também representa uma fonte de oscilação de pressão. Como visto no Capítulo 3, trata-se de uma bomba de deslocamento positivo, do tipo membrana (diafragma) acionada pela TDP do trator em rotação de 540 *rpm*.

Por seu princípio de funcionamento, essa bomba tem uma característica de vazão de recalque relativamente pulsada que corresponde a uma frequência da ordem de 9 *Hz*. Portanto, também representa uma fonte de ruído, contribuindo para as oscilações de pressão observadas nas medições.

APÊNDICE D GRÁFICOS DE PRESSÃO NA BARRA

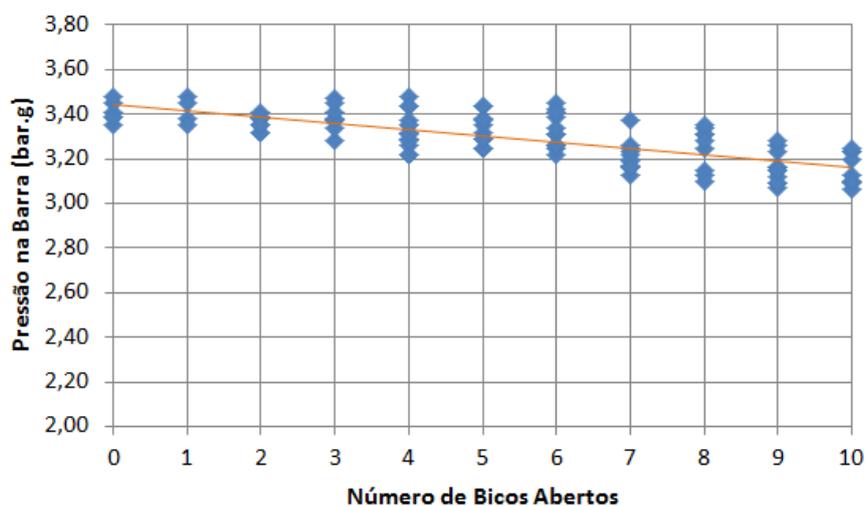


Figura 41: Pressão na barra em função do número de bicos abertos, para um conjunto de experimentos, com ajuste inicial de 3,1 bar.

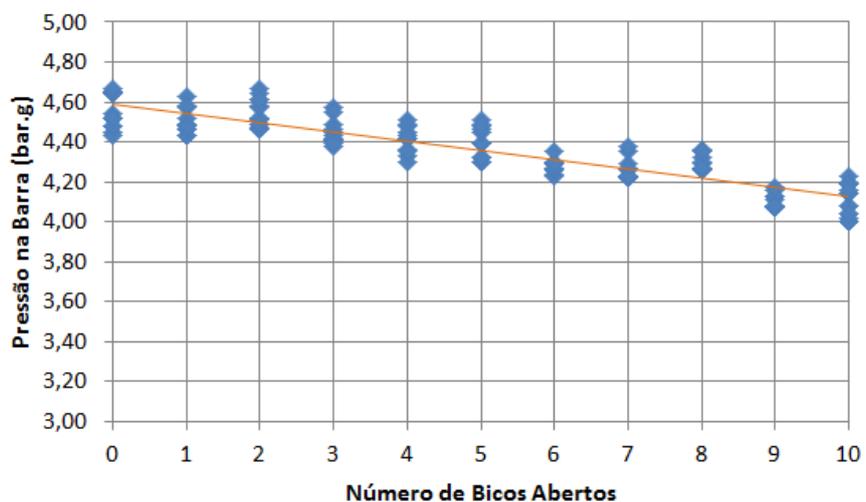


Figura 42: Pressão na barra em função do número de bicos abertos, para um conjunto de experimentos, com ajuste inicial de 4,1 bar.

APÊNDICE E GRÁFICOS DA PCV: PRESSÃO VS VAZÃO

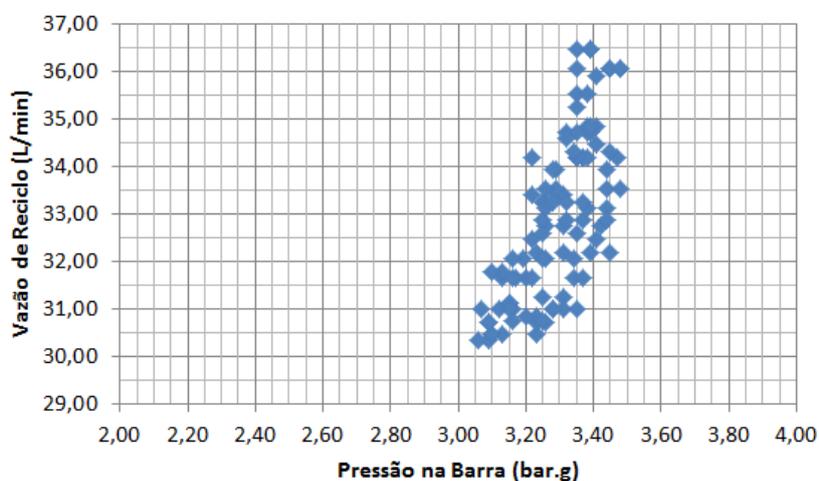


Figura 43: Vazão de reciclo da PCV em função da pressão na barra, para um conjunto de experimentos, com ajuste inicial de 3,1 *bar*.

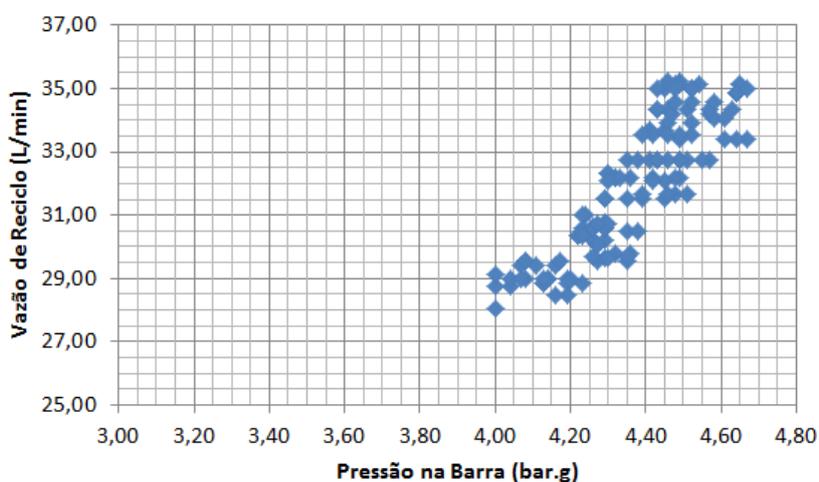


Figura 44: Vazão de reciclo da PCV em função da pressão na barra, para um conjunto de experimentos, com ajuste inicial de 4,1 *bar*.

APÊNDICE F EXPERIMENTOS COM CÂMERA DE ALTA VELOCIDADE

Para avaliar se a variação da pressão na barra é capaz de impactar em variação perceptível no tamanho da gota (VMD: *volume median diameter*), realizaram-se experimentos com uma câmera de alta velocidade.

A câmera utilizada é uma Phantom Miro 311, fabricada pela Vision Research Inc, com lentes Nikon modelo Af-s nikkor 70-200mm f/2.8g Ed VR 2.

Para as capturas, utiliza-se o *software* PCC (*Phantom Camera Control*), com os seguintes parâmetros: Resolução de 768x576; Taxa de amostragem de 5500 *fps* (*frames per second*); Tempo de exposição de 20 μ s; e EDR (*Extreme Dynamic Range*) de 0 μ s.

Por se tratar de uma câmera rápida, seu tempo de exposição é extremamente curto. Logo, para que o CCD (*Charge-Coupled Device*) seja sensibilizado e a imagem obtida com qualidade adequada, é necessária uma grande quantidade de luz. Assim, utiliza-se um feixe laser de alta luminosidade Cavilux, da Cavitar Ltd., e monta-se um cenário para maximizar a iluminação frontal das gotas. Além disso, para reduzir a influência da iluminação natural, utiliza-se uma lona atrás dos bicos pulverizadores. Esta configuração também auxilia para reduzir as variações provocadas pelo vento no jato pulverizado (efeito deriva).

Na Figura 45, pode-se ver a equipe do projeto realizando a montagem dos equipamentos para a captura das imagens. E na Figura 46, apresenta-se um comparativo das imagens obtidas para duas pressões diferentes.

Observa-se, pelas imagens, que, para grandes variações de pressão, a variação no tamanho da gota se torna perceptível. Todavia, as medições são imprecisas, pois, para se obter a dimensão correta da gota é necessário saber sua profundidade exata na imagem. Isso não ocorre, uma vez que o jato d'água sai do bico e se expande em vários planos.

Assim, vale ressaltar que os tamanhos de gota apresentados na Figura 46 foram estimados com base nas gotas maiores, possíveis de serem medidas e, portanto, não representam o DMV (diâmetro mediano volumétrico), para o qual seria necessário medir todas as gotas e encontrar a mediana. Logo, as imagens não foram utilizadas como parâmetro de validação do tamanho da gota.



Figura 45: Montagem dos equipamentos para captura das imagens.

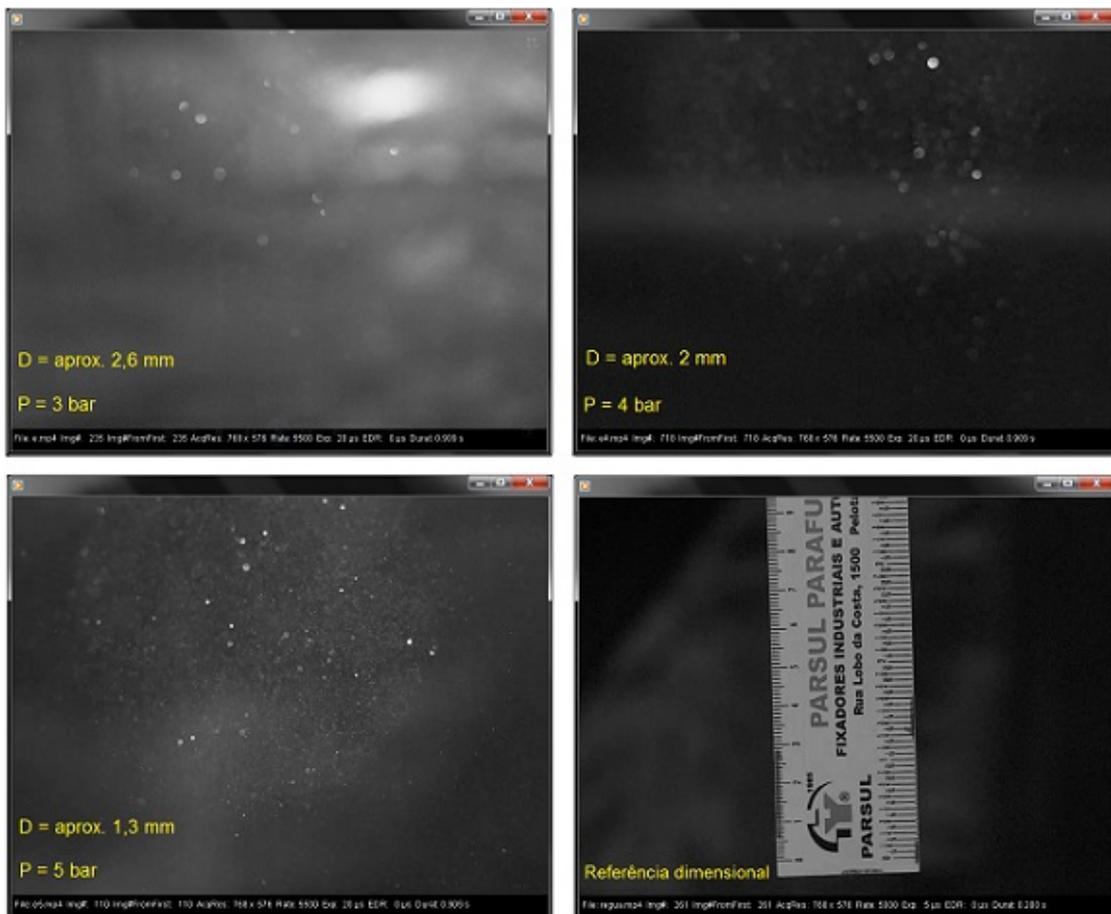
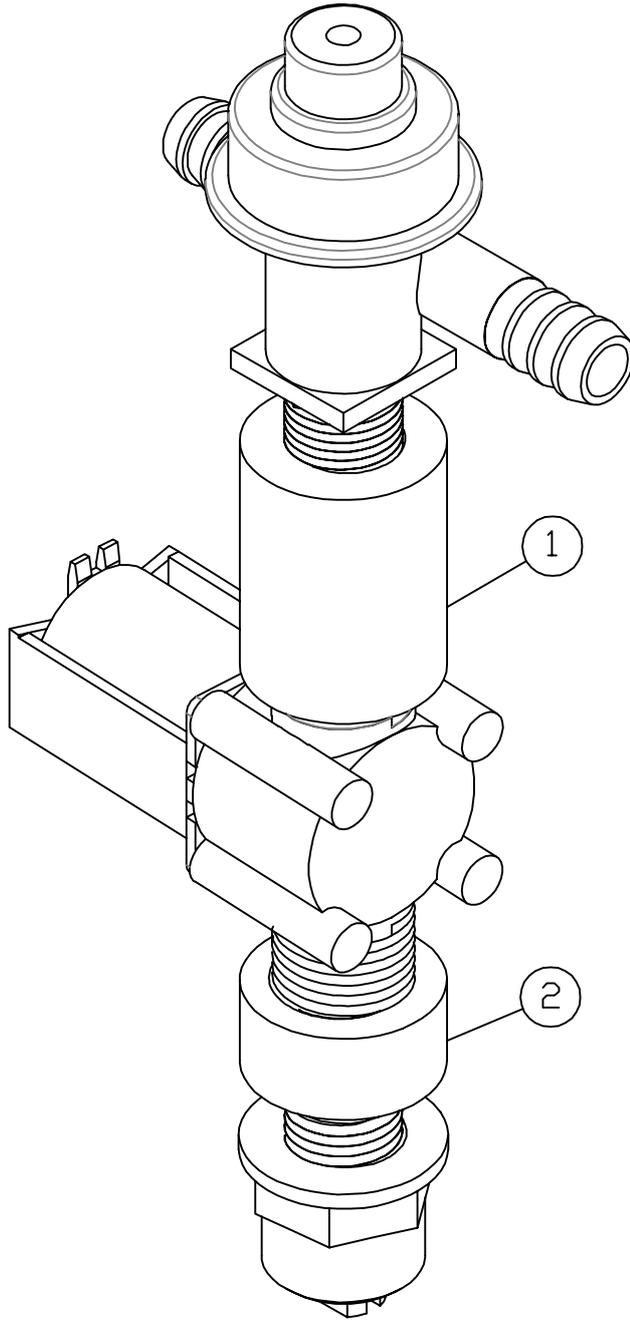


Figura 46: Exemplos de *frames* obtidos. Da esquerda pra direita: Em cima: P_{ajuste} em 3 bar; e 4 bar. Em baixo: P_{ajuste} em 5 bar; e referência dimensional.

ANEXO A DESENHO DE FABRICAÇÃO DAS CO- NEXÕES



PEÇA	DESCRIÇÃO
1	Luva de redução 11/16" 16f RO x 1/2" NPT 14f RO
2	Niple adaptador 1/2" NPT 14f (M) x 11/16" 16f (F)

SE NÃO ESPECIFICADO:
 DIMENSÕES EM MILÍMETROS
 ACABAM. SUPERFÍCIE:
 TOLERÂNCIAS:
 LINEAR:
 ANGULAR:

ACABAMENTO:

REBARBAR E
 QUEBRAR
 ARESTAS
 AGUDAS

NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO

REVISÃO

	NOME	ASSINATURA	DATA		
DESEN.	Jardel P.				
VERIF.	Igor V.				
APROV.	Fábio T.				
MANUF.					
QUALID.					
				MATERIAL:	
				PESQ:	

TÍTULO:

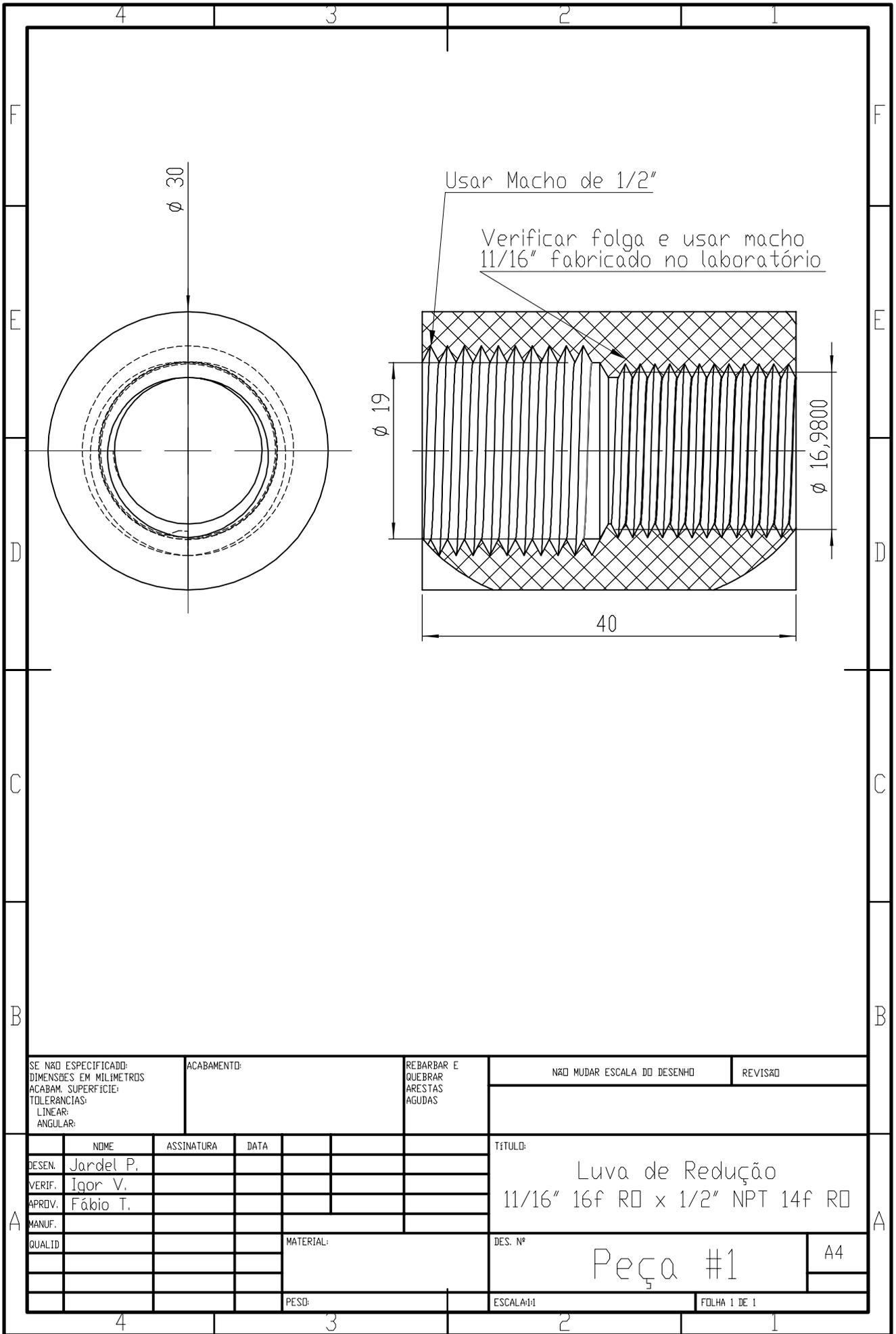
Montagem completa da
 solenoide no bico

DES. Nº

A4

ESCALA: 1:2

FOLHA 1 DE 1



Usar Macho de 1/2"

Verificar folga e usar macho 11/16" fabricado no laboratório

ϕ 30

ϕ 19

ϕ 16,9800

40

SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS		NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
DESEN.	Nome	ASSINATURA	DATA			TÍTULO:			
VERIF.	Jardel P.					Luva de Redução			
APROV.	Igor V.					11/16" 16f RD x 1/2" NPT 14f RD			
MANUF.	Fábio T.					DES. Nº		A4	
QUALID				MATERIAL:		Peça #1			
				PESD:		ESCALA: 1:1		FOLHA 1 DE 1	

ANEXO B FOLHAS DE DADOS DOS SENSORES

A seguir são apresentadas as folhas de dados dos sensores de vazão e de pressão, respectivamente. Ressalta-se que os documentos estão apresentados conforme fornecidos pelos fabricantes. Logo, infelizmente, sua qualidade não é boa, o que os torna pouco legíveis. Além disso, não estão disponíveis em língua portuguesa.

B.1 Sensor de Vazão YSF-S201

Flow-Pulse	Flow-Curve	Connection method
→Flow Range:100L/H-1800H-L/H		
120L/H	16	±10
240L/H	32.5	
360L/H	49.3	
480L/H	65.5	
600L/H	82	
720L/H	90.2	

Connection method:

YIFA the plastics Ltd
Product Introduction

1.Model:YF-21
2.Product Name:Hall sensor
3.Flow Range: 1-30L/MIN
4.(1)Connection Method

(2)Voltage Range 3.5-24VDC, Pulse Characteristic:F=7Q(L/MIN).
(3)Extent of error:±5%.
(4)Flow-Pulse
2L/MIN=16HZ 4L/MIN=32.5HZ 6L/MIN=49.3HZ
8L/MIN=65.5HZ 10L/MIN=82HZ

5.Bom

No	Item	Material	Qty.
1	Connection wire		1
2	Bonnet	PA	1
3	Screw		4
4	Valve body	PA	1
5	Leak press valve		1
6	Magnet		1
7	Hall		1
8	Impeller	POM	1
9	Rustless steel axis	SUS304	1
10			
11			

B.2 Sensor de Pressão HK1100C

HK1100C Pressure Sensor

