



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

SILVIANE GOMES RODRIGUES

**MODULAÇÃO DE LARGURA DE PULSO NO ESPECTRO E NA VELOCIDADE DE
GOTAS DE PONTAS DE PULVERIZAÇÃO**

UBERLÂNDIA
2025

SILVIANE GOMES RODRIGUES

**MODULAÇÃO DE LARGURA DE PULSO NO ESPECTRO E NA VELOCIDADE DE
GOTAS DE PONTAS DE PULVERIZAÇÃO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Mestrado, área de concentração em Fitotecnia, para obtenção do título de “Mestre em Agronomia”.

Orientador: Prof. Dr. João Paulo Arantes R. da Cunha

UBERLÂNDIA
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

R696m Rodrigues, Silviane Gomes, 1984-
2025 Modulação de largura de pulso no espectro e na velocidade de gotas
de pontas de pulverização [recurso eletrônico] / Silviane Gomes
Rodrigues. - 2025.

Orientador: João Paulo Arantes Rodrigues da Cunha.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-graduação em Agronomia.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.5535>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Agronomia. 2. Pulverização. 3. Fitotecnia. I. Cunha, João Paulo
Arantes Rodrigues da, 1976-, (Orient.). II. Universidade Federal de
Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Agronomia. III. Título.

CDU: 631

Rejâne Maria da Silva
Bibliotecária-Documentalista – CRB6/1925



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Agronomia				
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, 007/2025, PPGAGRO				
Data:	Vinte e oito de abril de dois mil e vinte e cinco	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	11:05
Matrícula do Discente:	12222AGR012				
Nome do Discente:	Silviane Gomes Rodrigues				
Título do Trabalho:	MODULAÇÃO DE LARGURA DE PULSO NO ESPECTRO E NA VELOCIDADE DE GOTAS DE PONTAS DE PULVERIZAÇÃO				
Área de concentração:	Produção Vegetal				
Linha de pesquisa:	Produção Vegetal em Áreas de Cerrado				

Reuniu-se por videoconferência, a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, assim composta: Professores Doutores: Guilherme Sousa Alves- Máquinas Agrícolas Jacto S.A; Luana de Lima Lopes - UFSM; Sérgio Luiz de Freitas Maia - IFTM ; João Paulo Arantes Rodrigues da Cunha - UFU - orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. João Paulo Arantes Rodrigues da Cunha, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir a candidata. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando a candidata:

APROVADA

Essa dissertação possui mérito para ser indicada como destaque do Programa? (x) SIM NÃO ()

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **João Paulo Arantes Rodrigues da Cunha, Professor(a) do Magistério Superior**, em 28/04/2025, às 11:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Guilherme Sousa Alves, Usuário Externo**, em 28/04/2025, às 13:27, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sergio Luiz de Freitas Maia, Usuário Externo**, em 28/04/2025, às 14:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luana de Lima Lopes, Usuário Externo**, em 28/04/2025, às 14:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6288195** e o código CRC **6C681A6E**.

*A todos que colaboraram de maneira direta
ou indireta para a conclusão deste projeto.*

Dedico!

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida, e por me permitir ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo da realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. João Paulo A. Rodrigues da Cunha, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação e amizade.

Ao Dr. Guilherme Sousa Alves pelas contribuições durante a condução deste projeto.

Aos membros da Banca Examinadora, pela leitura e considerações.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Federal de Uberlândia, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso.

À empresa Jacto, pela condução do experimento e disponibilização dos dados que foram fundamentais para o desenvolvimento da pesquisa que possibilitou a realização deste trabalho.

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001”.

“Se você pode sonhar, você pode realizar.”
(Walt Disney)

RESUMO

Rodrigues, Silvine Gomes. **Modulação de largura de pulso no espectro e na velocidade de gotas de pontas de pulverização**. 2025. 28f. Dissertação. (Mestrado em Agronomia) – Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2025.

A modulação por largura de pulso (PWM) permite ajustar a vazão em tempo real de pontas de pulverização sem alterar a pressão do sistema, mostrando-se uma tecnologia promissora para melhoria da qualidade da aplicação de produtos fitossanitários. Contudo, seu efeito no processo de formação de gotas ainda não está completamente elucidado. Este trabalho avaliou o efeito do sistema PWM no espectro e na velocidade de gotas geradas por diferentes pontas de pulverização hidráulicas de jato plano. O experimento foi realizado utilizando um simulador de pulverização para testar o impacto da tecnologia PWM em diferentes condições operacionais e pontas de pulverização (jato plano padrão, com pré-orifício e com indução de ar). Com o auxílio de um analisador de partículas em tempo real baseado em imagens de alta resolução, foram analisadas as variáveis diâmetro da mediana volumétrica (DMV), amplitude relativa, velocidade das gotas e porcentagem do volume composto por gotas com diâmetro inferior a 100 μm , considerando quatro ciclos de trabalho da válvula PWM e velocidades simuladas de operação de 1,11, 1,67, 2,78 e 3,89 m s^{-1} . O sistema PWM alterou o tamanho das gotas, geralmente reduzindo o DMV, com variações dependendo do ciclo de trabalho e do modelo da ponta. A amplitude relativa não foi influenciada pelo ciclo de trabalho do sistema PWM, embora o acionamento do sistema tenha levado a uma elevação da heterogeneidade do tamanho das gotas em algumas pontas. A velocidade das gotas foi, em geral, reduzida com o PWM, mas o aumento do tempo de abertura das válvulas aumentou esse parâmetro. Os resultados gerais deste trabalho sugerem que os padrões de pulverização foram alterados com o acionamento do sistema PWM e a análise deste comportamento foi dependente do modelo da ponta de pulverização.

Palavras-chave: bicos de pulverização; PWM; tamanho de gotas; tecnologia de aplicação.

ABSTRACT

Rodrigues, Silvine Gomes. *Pulse-width modulation on the droplet spectrum and velocity of spray nozzles*. 2025. 28f. Dissertation (Master's in Agronomy) – Institute of Agricultural Sciences, Federal University of Uberlândia, Uberlândia, 2025.

Pulse-width modulation (PWM) allows real-time flow rate adjustment of spray nozzles without changing system pressure, proving to be a promising technology for improving the quality of pesticide applications. However, its effect on the droplet formation process is not yet fully understood. This study evaluated the effect of the PWM system on the droplet spectrum and velocity generated by different flat-fan hydraulic spray nozzles. The experiment was conducted using a spray simulator to test the impact of PWM technology under various operational conditions and nozzle types (standard flat-fan, pre-orifice, and air-induction). With the aid of a real-time particle analyzer based on high-resolution imaging, the following variables were analyzed: volume median diameter (VMD), relative span, droplet velocity, and the percentage of volume composed of droplets with a diameter smaller than 100 μm . Four PWM valve duty cycles and simulated operating speeds of 1.11, 1.67, 2.78, and 3.89 m s^{-1} were considered. The PWM system altered droplet size, generally reducing the VMD, with variations depending on the duty cycle and nozzle model. Relative span was not influenced by the PWM system's duty cycle, although system activation increased droplet size heterogeneity in some nozzle types. Droplet velocity was generally reduced with PWM, but longer valve opening times increased this parameter. Overall, the results of this study suggest that spray patterns were altered by PWM activation, and the analysis of this behavior depended on the spray nozzle model.

Keywords: spray nozzles; PWM; droplet size; application technology.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AR	Amplitude Relativa
ASABE	American Society of Agricultural and Biological Engineers
CV%	Coefficiente de Variação
DMV	Diâmetro da Mediana Volumétrica
LIDAR	Light Detection and Ranging

LISTA DE SIMBOLOS

Cm	Centímetros
Hz	Hertz
km h ⁻¹	Quilômetros por hora
L ha ⁻¹	Litros por hectare
m s ⁻¹	Metros por segundo
µm	Micrômetro
PSI	Pounds per Square Inch
%	Porcentagem

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – (a) Bancada de pulverização utilizada para coleta de dados; (b) Válvula solenóide PWM; (c) Monitor de operação.....	5
Figura 2 – Analisador de partículas por imagens utilizado para avaliação do espectro de gotas..	6

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Pontas de pulverização utilizadas no experimento.	7
Tabela 2 – Diâmetro da mediana volumétrica (DMV) e amplitude relativa (AR) das gotas pulverizadas por pontas de pulverização de jato plano padrão, com sistema PWM ligado (ON) e desligado (OFF) que simula diferentes velocidades de trabalho (V).....	9
Tabela 3 – Diâmetro da mediana volumétrica (DMV) e amplitude relativa (AR) das gotas pulverizadas por pontas de jato plano padrão com pré-orifício e indução de ar, com sistema PWM ligado (ON) e desligado (OFF) que simula diferentes velocidades de trabalho (V).....	13
Tabela 4 – Porcentagem do volume de gotas com diâmetros menores do que 100 μm ($\%<100$) e velocidade das gotas (VG) geradas por pontas de pulverização de jato plano padrão, com sistema PWM ligado (ON) e desligado (OFF) em diferentes velocidades de trabalho (V).	17
Tabela 5 – Porcentagem do volume de gotas com diâmetros menores do que 100 μm ($\%<100$) e velocidade das gotas (VG) geradas por pontas de pulverização de jato plano com pré-orifício e indução de ar, com sistema PWM ligado (ON) e desligado (OFF) que simula diferentes velocidades de trabalho (V).	19

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	MATERIAL E MÉTODOS	4
2.1	Local do experimento.....	4
2.2	Avaliação experimental.....	5
2.3	Pontas de pulverização	7
2.4	Características avaliadas	7
2.5	Análise estatística.....	8
3	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	9
4	CONCLUSÕES.....	23
	REFERÊNCIAS	24

1 INTRODUÇÃO

A aplicação de agroquímicos é um dos pontos de maior importância na produção agrícola, pois reduz os danos provocados pelo ataque de plantas infestantes, pragas e doenças, o que promove a sanidade das lavouras e altos rendimentos. A crescente demanda por práticas agrícolas mais eficientes e sustentáveis tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias que aprimoram a aplicação de defensivos agrícolas. Entre os principais desafios enfrentados na pulverização está o controle preciso do tamanho e da distribuição das gotas, uma vez que esses fatores influenciam diretamente na eficácia do tratamento fitossanitário, na segurança ambiental e na redução de perdas por deriva ou escoamento.

Nesse cenário, compreender os mecanismos envolvidos na geração das gotas e o impacto das novas tecnologias, como a modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation - PWM*), torna-se essencial para otimizar o desempenho dos pulverizadores modernos e promover uma aplicação mais racional dos insumos agrícolas. A geração das gotas durante o processo de pulverização é um processo intrincado, sendo afetado por vários elementos, como a pressão do líquido, o tamanho do orifício da ponta de pulverização e a velocidade de saída da solução (Luchese, 2021). Normalmente, o fluido é pressionado através de aberturas pequenas sob grande pressão, o que resulta em uma fina camada líquida que se torna instável e se divide em gotículas de diversos tamanhos, que podem variar de alguns micrômetros a centenas de micrômetros de diâmetro (Xue, 2024).

Um sistema de pulverização ideal objetiva viabilizar e depositar uma quantidade adequada de ingrediente ativo no alvo. Atingir esse objetivo é um dos grandes desafios da tecnologia de aplicação, pois as perdas podem ser expressivas, principalmente em função da deriva e do escoamento, o que resulta em cobertura do alvo inadequada. Além disso, pode afetar negativamente o ambiente além de comprometer a segurança alimentar, saúde humana e animal. Geralmente as aplicações convencionais tendem a ser ineficientes, uma vez que estas são realizadas a uma taxa de aplicação constante ($L\ ha^{-1}$) em toda a área, a despeito da presença de plantas infestantes, pragas e doenças, sistema de plantio e densidade da cultura, o que favorece também a ineficiência na aplicação (Grella *et.al.*, 2021).

Contudo, a qualidade da pulverização pode ser aprimorada utilizando-se de taxa variável de acordo com a área aplicada, ao realizar o ajuste através da utilização de controladores de fluxo baseados em sistemas de detecção de copa em tempo real ou direcionados por sensores

(por exemplo, infravermelho, detecção e alcance de luz - LIDAR, sensores de visão estéreo e ultrassom). Vários trabalhos na literatura verificaram melhor eficiência das aplicações e redução de perdas para fora do alvo com a utilização dessas tecnologias específicas de sensoriamento e controle, que permitem identificar com precisão as características da vegetação-alvo e ajustar automaticamente a vazão de aplicação em tempo real (Balsari *et al.*, 2009; Berk *et al.*, 2016; Comba *et al.*, 2019; Palleja; Landers, 2015; Zhang *et al.*, 2018).

Outro ponto relevante é que atualmente os pulverizadores agrícolas estão equipados com barras mais longas e trabalham em maior velocidade, a fim de se aumentar a capacidade operacional. A introdução de novas tecnologias embarcadas, a exemplo de controladores de fluxo nos últimos anos, proporcionou uma forma eficaz para aplicar o volume correto de produto durante a operação. Pulverizadores com longas barras e terrenos irregulares exigem uma rápida resposta do controlador para regular a taxa de aplicação durante a operação, o que pode levar a erros de taxa que vão desde aplicação excessiva, insuficiente ou fora do alvo (Porter *et al.*, 2013; Sama *et al.*, 2015). Além disso, com o acréscimo no tamanho da barra, o interior e o exterior das barras jornadeariam a um diferencial considerável de velocidade, principalmente durante as manobras curvilíneas (Fabula; Sharda, 2021).

Segundo Luck *et al.* (2010), que em seu trabalho abordam o aspecto da influência do formato e tamanho do campo na aplicação de insumos e nos erros de sobreposição, indica que as seções externas da barra do pulverizador excederam a velocidade de deslocamento da máquina, ao mesmo tempo que, uma menor velocidade de deslocamento pôde ser observada nas seções internas da barra durante o giro de manobra. De modo geral, um pulverizador com maior largura de barras e menor raio de giro, operando em alta velocidade, teria uma maior diferença de velocidade, o que pode incorrer em uma sub ou superaplicação significativa. Esta subaplicação poderia reduzir a eficácia do produto e promover a resistência aos agroquímicos (Butts *et al.*, 2019).

Além do tamanho das gotas, a velocidade das gotas também desempenha um papel crucial durante a aplicação de defensivos agrícolas. Na maioria dos modelos de pontas de pulverização disponíveis atualmente, as gotas são criadas durante a aplicação ao forçar o líquido sob pressão através de um pequeno orifício, o que proporciona a energia necessária para dispersar o líquido e formar uma camada fina que se torna instável e se transforma em gotículas de vários tamanhos (Mathews *et al.*, 2014).

Usualmente, o método tradicional para ajustar a vazão do fluido ao longo da barra, seja para adequá-la à demanda de um ponto específico ou compensar a alteração de velocidade, é a regulação de pressão, porém, este método não é tão eficaz pois está limitado à vazão das pontas instaladas no pulverizador e promove a alteração do tamanho das gotas. Com o surgimento dos microprocessadores e da tecnologia de comutação, a PWM tem sido utilizada como atributos de controle de precisão (Suroto, 2019).

O sistema PWM possibilita que aspectos como pressão e velocidade de operação tornem-se independentes da taxa de aplicação, o que permite, em tempo real, que mudanças na vazão sejam realizadas sem que haja necessidade de manipular a pressão como ocorre em outros sistemas de aplicação de taxa variável (Anglund; Ayers, 2003; Butts, 2018), sendo geralmente empregados em pulverizadores autopropelidos (Fabula; Sharda, 2021). A vazão é controlada por meio da pulsação de válvulas solenóides ativadas eletronicamente e posicionadas diretamente no porta-bicos (Giles; Comino, 1989), este pulsa normalmente em uma frequência que varia entre 10 a 50 Hz. A porção relativa de tempo em que a válvula está aberta, ciclo de trabalho, define a vazão, e assim permite alterações em tempo real e, de forma a manter a pressão operacional (Butts *et al.*, 2019).

Giles (2020), que avaliou o uso da PWM no controle de bicos de pulverização, indica que o efeito do controle de fluxo empregando a tecnologia PWM na velocidade e no tamanho das gotas tendem a ser menores, em comparação aos sistemas baseados em pressão. Salcedo *et al.*, (2020) observaram uma redução de mais de 65% no volume de calda gasto utilizando um turbo pulverizador capaz de aplicar em taxa variável controlada por PWM e orientado por laser, em comparação à aplicação realizada com taxa constante usando o mesmo pulverizador, desativando o sistema PWM, em macieiras de dois anos de idade.

No mercado atual encontram-se diversos tipos de pontas hidráulicas, cada uma destinada a usos específicos para diversas condições. A seleção e o uso adequado das pontas de pulverização são cruciais para aumentar a precisão e as condições de segurança na aplicação dos agroquímicos (Seixas *et al.*, 2020). Entre as mais utilizadas estão as pontas de jato plano, que dependendo do modelo, da pressão do sistema e do ângulo de abertura podem causar deriva. Para resolver essa questão, os fabricantes introduziram no mercado pontas antideriva, em que alguns modelos apresentam um pré-orifício posicionado anteriormente à saída do jato, o qual resulta na dispersão de gotas com diâmetro ampliado (Cunha *et al.*, 2005). Outra possibilidade é o emprego de pontas de indução de ar (Ramos *et al.*, 2004; Vargas; Ramos, 2006). A

constituição dessa ponta permite que o ar retirado do ambiente seja adicionado no interior da gota através do efeito Venturi.

O sistema PWM surgiu como uma técnica alternativa para melhorar as aplicações de agroquímicos, o que permite que aspectos de pressão de trabalho e tamanho de gota sejam mantidos, mesmo em diferentes velocidades de operação do pulverizador, ao passo que controla variavelmente a vazão das pontas (Butts *et al.*, 2018). Contudo, não está realmente claro na literatura até que ponto o uso da tecnologia PWM interfere ou não no espectro de gotas geradas pelos diferentes modelos de pontas de pulverização.

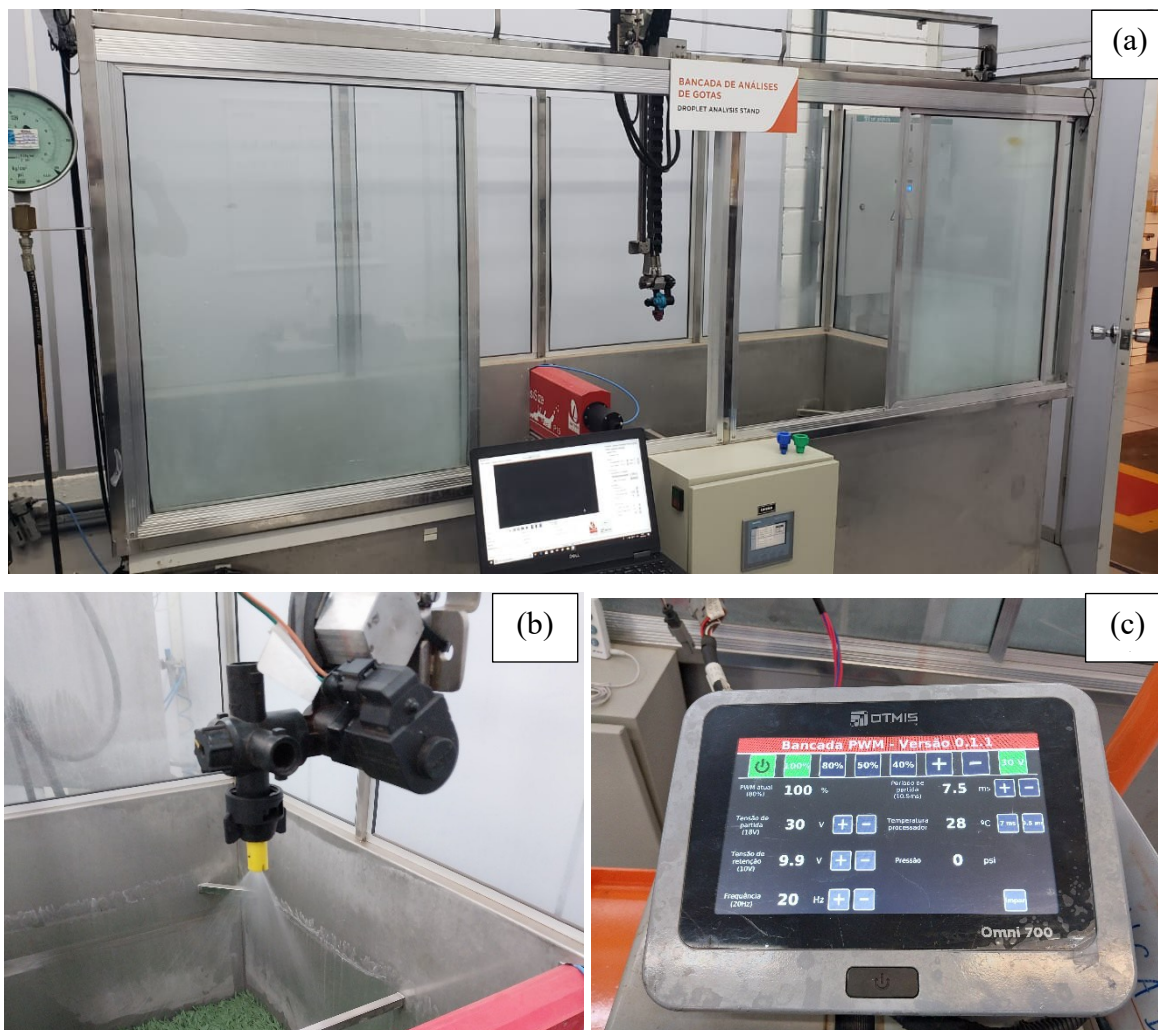
Neste contexto, a difusão dos pulverizadores com sistema PWM demanda que as atuais tecnologias de pontas de pulverização estejam conectadas a possibilidade de trabalho com as válvulas de pulsação, e isso precisa ser plenamente assimilado pelos técnicos a fim de potencializar a eficiência do pulverizador. Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi analisar a influência da operação de uma válvula de pulsação modulada em diferentes ciclos de trabalho no espectro e na velocidade de gotas geradas por diferentes pontas de pulverização do tipo jato plano em condições de operação similares às observadas em campo.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Local do experimento

O experimento foi conduzido no Laboratório de Tecnologia de Aplicação da empresa Máquinas Agrícolas Jacto S/A, localizado na cidade de Pompéia-SP, Brasil. As medições foram realizadas em uma bancada de pulverização (Figura 1), composta por um reservatório de 500 L, bomba de pistão (JP 45, Máquinas Agrícolas Jacto S/A, Pompéia, São Paulo, Brasil) com vazão nominal de 45 L min⁻¹, manômetro (Wika Alexander Wiegand SE & Co., Klingenberg, Germany) com escala de 0 a 413 kPa (60 PSI), regulador manual de pressão do tipo comando VAR alavanca duas vias (Máquinas Agrícolas Jacto S/A, Pompéia, São Paulo, Brasil) com controle da vazão de retorno e suporte porta-bico onde estava montada a válvula PWM acoplada ao bico de pulverização (Figura 1a). O sistema PWM utilizado era composto por uma válvula solenóide (Figura 1b), módulo de pulverização e monitor (Figura 1c) onde os parâmetros de operação eram configurados.

Figura 1 - (a) Bancada de pulverização utilizada para coleta de dados; (b) Válvula solenóide PWM; (c) Monitor de operação.



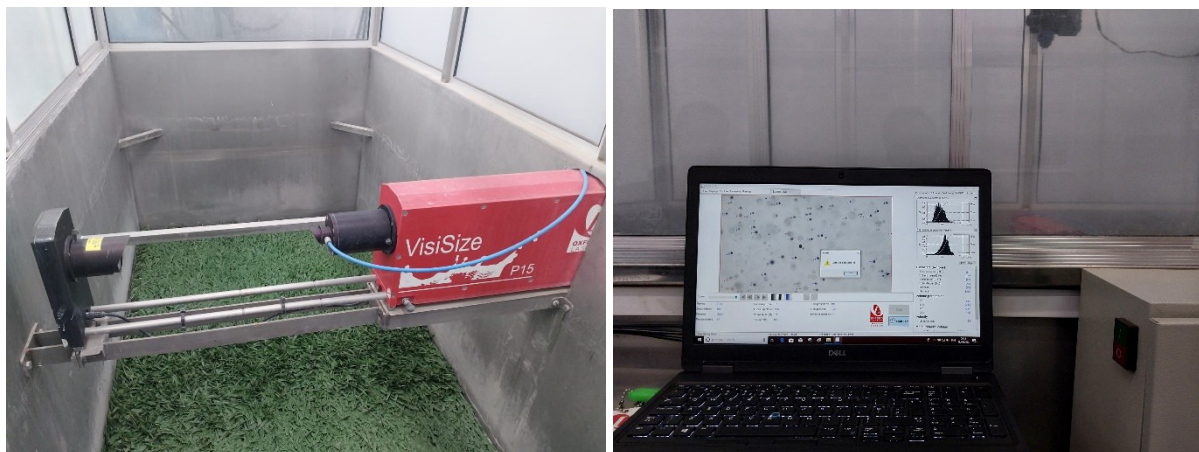
Fonte: Guilherme Sousa Alves (2023).

2.2 Avaliação experimental

O sistema PWM foi avaliado quanto ao espectro de gotas geradas quando acoplado a diferentes pontas de pulverização. As medições foram realizadas utilizando um analisador de partículas em tempo real baseado em imagens de alta resolução (Modelo VisiSize P15, Oxford Lasers, Inc., Didcot, United Kingdom) (Figura 2). Este sistema é dotado de uma câmera que captura as imagens das partículas pulverizadas em trajetória no ar, capaz de medir gotas com diâmetro acima de 10 μm , além de medir a distribuição do diâmetro das partículas e a velocidade das partículas em tempo real. Para fornecer os valores médios, o equipamento contabilizou cinco mil gotas em cada repetição. Para manter uma altura fixa, as pontas foram

acopladas a uma barra de pulverização posicionada a 30 cm acima e centralizada em relação ao feixe luminoso.

Figura 2 - Analisador de partículas por imagens utilizado para avaliação do espectro de gotas.



Fonte: Guilherme Sousa Alves (2023).

Durante as avaliações, foi utilizado um equipamento móvel montado de tal forma que todo o jato pulverizado passasse transversalmente em velocidade de 2 m s^{-1} através do feixe luminoso do analisador, o que permite obter diretamente o espectro de gotas médio para cada condição desejada. Os ensaios foram realizados utilizando somente água e em ambiente controlado, com o intento de minimizar o efeito das condições ambientais (temperatura do ar inferior a 28°C , umidade relativa do ar superior a 60% e ausência de ventos).

Os testes foram realizados com o sistema PWM ligado e desligado (sistema convencional), utilizando pontas de pulverização do tipo jato plano, com vazão nominal de $0,757 \text{ L min}^{-1}$ ($0,2 \text{ galão americano min}^{-1}$ na pressão de 276 kPa), simulando a taxa de aplicação fixa de 90 L ha^{-1} e velocidades simuladas de trabalho de 1,1; 1,7; 2,8; e $3,9 \text{ m s}^{-1}$, que correspondem às vazões de 0,210; 0,315; 0,525 e 0.735 L min^{-1} , respectivamente, ao considerar espaçamento entre bicos de 0,35 m. Com o sistema PWM ligado, foram avaliadas quatro configurações de ciclo de trabalho da válvula: 35%, 42%, 71% e 100% para se obter as vazões correspondentes nas velocidades simuladas de trabalho de 1,1; 1,7; 2,8; e $3,9 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente. O ciclo de trabalho representa a porcentagem do tempo em que a válvula se encontra aberta. Foi utilizada pressão de trabalho de 262 kPa (38 PSI) para as velocidades de 1,7; 2,8; e $3,9 \text{ m s}^{-1}$. Uma vez que o limite mínimo de ciclo de trabalho é de 35%, foi necessário ajustar a pressão de trabalho para 179 kPa (26 PSI) para se obter $0,210 \text{ L min}^{-1}$ ao simular a

velocidade de trabalho de $1,11 \text{ m s}^{-1}$. O sistema PWM foi configurado para trabalhar a 30 Hz nas simulações de velocidades de trabalho acima de $1,94 \text{ m s}^{-1}$ e 20 Hz para velocidades abaixo de $1,94 \text{ m s}^{-1}$, de acordo com as recomendações do fabricante. Com o sistema PWM desligado, utilizou-se pressão de trabalho de 90 kPa (13 PSI) para as velocidades simuladas de 1,1 e $1,7 \text{ m s}^{-1}$, 138 kPa (20 PSI) para a velocidade simulada de $2,7 \text{ m s}^{-1}$ e 262 kPa (38 PSI) para a velocidade simulada de $3,9 \text{ m s}^{-1}$. Adotou-se a mesma pressão para as velocidades de 1,1 e $1,7 \text{ m s}^{-1}$ pois configurou-se velocidade mínima do sistema em $1,7 \text{ m s}^{-1}$ para que a pressão não fosse inferior a 90 kPa.

Os testes foram realizados usando configuração de ponta única e repetidos três vezes.

2.3 Pontas de pulverização

Os modelos de ponta de pulverização avaliados, bem como suas características, estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Pontas de pulverização utilizadas no experimento

Modelo	Formato do jato/Material
AXI 11002	Plano/Cerâmica
ADI 11002	Plano (Pré-orifício) /Cerâmica
CVI 11002	Plano (Indução de ar)/Plástico
JA1 12002	Plano (Indução de ar)/Plástico
J3D 10002	Plano (Inclinado)/Plástico
JTT 11002	Plano (Defletor)/Plástico
JGC 12002	Plano (Pré-orifício, inclinado)/Plástico
JAP 11002	Plano (Indução de ar)/Plástico

Fonte: Adaptado de JACTO (2023).

2.4 Características avaliadas

A pulverização foi avaliada levando-se em conta o espectro e a velocidade das gotas produzidas pelas pontas de pulverização em diferentes condições operacionais. Os parâmetros de interesse foram: velocidade das gotas (VG), $Dv_{0,5}$ (diâmetro de gota tal que 50% do volume do líquido pulverizado é constituído de gotas de tamanho menor que esse valor, também conhecido como diâmetro da mediana volumétrica – DMV), porcentagem do volume composto

por gotas com diâmetro inferior a 100 μm ($\%<100$) e amplitude relativa (AR), expressa pela seguinte equação:

$$AR = \frac{Dv0,9 - Dv0,1}{Dv0,5}$$

Em que:

$Dv0,1$ = diâmetro de gota tal que 10% do volume do líquido pulverizado é constituído de gotas de tamanho menor que esse valor.

$Dv0,5$ = diâmetro de gota tal que 50% do volume do líquido pulverizado é constituído de gotas de tamanho menor que esse valor.

$Dv0,9$ = diâmetro de gota tal que 90% do volume é constituído de gotas de tamanho menor que esse valor.

2.5 Análise estatística

O delineamento experimental adotado foi inteiramente casualizado, com três repetições, no esquema fatorial $2 \times 3 + 1$: dois sistemas de pulverização (válvula PWM ligada e desligada), três velocidades simuladas de trabalho (2,8; 1,7 e 1,1 m s^{-1} , o que corresponde a ciclos de trabalho de 71%, 42% e 35% respectivamente) e um tratamento adicional simulando velocidade de 3,9 m s^{-1} e ciclo de trabalho a 100%). Esse último tratamento foi considerado adicional por não haver diferença entre tratamento com ciclo de trabalho a 100% com válvula PWM ligada e desligada. O ensaio foi realizado para as diferentes pontas.

Todos os dados obtidos foram primeiramente submetidos aos testes de normalidade dos resíduos de Shapiro Wilk, e de homogeneidade das variâncias de Oneill Mathews, ambos a 0,05 de significância. Nos casos em que as pressuposições não foram atendidas, os dados foram transformados em $\sqrt{(x + 0,5)}$ e submetidos à nova análise. Somente quando a transformação corrigiu ao menos uma das pressuposições, sem prejudicar as demais, utilizaram-se os dados transformados para a análise de variância. Do contrário, utilizaram-se os dados originais (Sokal; Rohlf, 1995).

Após a análise das pressuposições, os dados foram submetidos à análise de variância utilizando programa estatístico R Studio (AHMAD *et al.*, 2023). Quando pertinente, os

tratamentos foram comparados entre si pelo teste de Tukey e com o tratamento adicional pelo teste de Dunnett, a 0,05 de significância.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 tem-se os resultados de DMV e AR para as pontas de jato plano padrão AXI, J3D e JTT, nas diferentes condições operacionais com o sistema PWM ligado e desligado, sendo a condição ligado (ON) com ciclos a 35, 42, 71 e 100%, que correspondem respectivamente às velocidades de 1,1; 1,7; 2,8 e 3,9 m s⁻¹, ao passo que no modo desligado (OFF) o ciclo está sempre a 100%. Para o DMV, a interação entre os fatores sistema PWM e a velocidade simulada foi significativa para as pontas AXI e J3D. A interação entre os fatores não foi significativa para a ponta JTT. Para a AR, a interação entre os fatores não foi significativa para as três pontas.

Tabela 2 - Diâmetro da mediana volumétrica (DMV) e amplitude relativa (AR) das gotas pulverizadas por pontas de pulverização de jato plano padrão, com sistema PWM ligado (ON) e desligado (OFF) que simula diferentes velocidades de trabalho (V).

AXI 11002						
DMV (µm)						AR
V (m s ⁻¹)	ON	OFF	Média	ON	OFF	Média
1,1	126 bA	175 aA	151	1,09 ^{ns}	1,08 ^{ns}	1,08 A
1,7	112 bB ^{ns}	175 aA	146	1,36	1,08 ^{ns}	1,22 A
2,8	121 bA ^{ns}	137 aB	129	1,38	0,95 ^{ns}	1,16 A
3,9	111			0,72		
Média	120	162		1,28 a	1,03 b	
CV (%)	3,29			21,06		
J3D 10002						
DMV (µm)						AR
V (m s ⁻¹)	ON	OFF	Média	ON	OFF	Média
1,1	194 bA	282 aA	238	2,20 ^{ns}	1,17 ^{ns}	1,69 A
1,7	154 bB ^{ns}	282 aA	218	2,11 ^{ns}	1,17 ^{ns}	1,64 A
2,8	164 aB ^{ns}	180 aB	172	2,46 ^{ns}	1,36 ^{ns}	1,91 A
3,9	149			1,45		
Média	171	248		2,26 a	1,23 b	
CV (%)	5,95			32,53		

Médias seguidas por letras distintas, maiúscula na coluna e minúscula na linha, diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade; ^{ns}: Não há diferença entre a média e o tratamento adicional pelo teste de Dunnett; CV: Coeficiente de variação.

CONTINUAÇÃO – TABELA 2

JTT 11002						
V (m s ⁻¹)	DMV (μm)			AR		
	ON	OFF	Média	ON	OFF	Média
1,1	404 ^{ns}	488	446 A	1,52 ^{ns}	1,40 ^{ns}	1,46 A
1,7	364 ^{ns}	488	426 A	1,74 ^{ns}	1,40 ^{ns}	1,57 A
2,8	388 ^{ns}	425 ^{ns}	406 A	1,36 ^{ns}	1,42 ^{ns}	1,39 A
3,9	374			1,39		
Média	385 b	467 a		1,54 a	1,41 a	
CV (%)	7,93			10,74		

Médias seguidas por letras distintas, maiúscula na coluna e minúscula na linha, diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade; ^{ns}: Não há diferença entre a média e o tratamento adicional pelo teste de Dunnett; CV: Coeficiente de variação.

As medições realizadas com o analisador de partículas indicaram que, na maioria das condições testadas, o sistema PWM ligado resultou na produção de gotas menores em comparação ao sistema convencional, PWM desligado. Esse comportamento foi especialmente evidente nas pontas AXI 11002 e JTT 11002, nas quais o DMV apresentou reduções de até 49 micrômetros (por exemplo, 175 μm no OFF para 126 μm no ON com a AXI a 35% de ciclo). Essa redução pode ser atribuída ao aumento da perda de carga imposta pela válvula solenóide presente no sistema PWM, que eleva a resistência ao escoamento e, conseqüentemente, a pressão local nos bicos, favorecendo a formação de gotas menores mesmo em ciclos de trabalho elevados.

Além disso, verificou-se que o ciclo de trabalho influenciou o DMV, com exceção da ponta JTT, onde o diâmetro das gotas se manteve relativamente estável em diferentes ciclos. No caso da ponta J3D 10002, observou-se uma alteração no DMV de 154 μm para 164 μm ao se aumentar o ciclo de trabalho de 42% para 71%. No entanto, deve-se destacar que esse aumento no ciclo não implicou apenas na maior abertura da válvula, mas também em um acréscimo na pressão de trabalho, uma vez que, nas condições do experimento, o ciclo de trabalho foi ajustado para simular o aumento da velocidade de deslocamento, impactando tanto na demanda de vazão quanto na pressão da linha. Isso evidencia que a variação no tamanho das gotas não pode ser atribuída exclusivamente ao ciclo de trabalho, mas também às condições hidráulicas do sistema, que estão diretamente ligadas ao modelo da ponta e ao comportamento da válvula PWM.

Uma das vantagens que se aponta para os sistemas PWM, quando comparados aos sistemas convencionais, é que eles permitem a alteração da vazão da ponta sem a necessidade

de se alterar a pressão de trabalho, o que resulta na manutenção do tamanho das gotas produzidas (Butts *et al.*, 2018). Contudo, fica claro pela análise que há, para alguns modelos de pontas, alteração do tamanho das gotas quando se altera o ciclo de trabalho das válvulas. Mesmo se tratando de pontas de jato plano, sem tecnologia anti-deriva, houve diferença de comportamento entre elas.

Com o sistema PWM desligado, a simulação das velocidades foi feita por meio da alteração da pressão. Portanto, era esperado que, nestes casos, o aumento da velocidade levasse ao aumento da pressão de trabalho e, por conseguinte, à diminuição do tamanho das gotas. Esse comportamento foi notado para as pontas AXI e J3D, mas não ocorreu para a ponta JTT.

Butts *et al.*, (2019) relataram que a adição de uma válvula solenóide na linha de pulverização provocou uma redução no tamanho da gota quando se utilizou um ciclo de trabalho de 100% quando comparada a um sistema sem válvula solenóide utilizando pontas sem indução de ar. Contudo, isso não explica totalmente a redução no tamanho das gotas em um ciclo de trabalho inferior a 100%. Nestes casos, os bicos operam com abertura intermitente e pulsante, o que pode influenciar o padrão de atomização de forma mais complexa, envolvendo variações rápidas na dinâmica do jato e instabilidades no escoamento. Porém, ainda se identifica a necessidade de investigações adicionais para esclarecer os mecanismos subjacentes a esse fenômeno, considerando aspectos como a interação entre frequência de pulsação, tempo de resposta da válvula e comportamento do líquido na saída do bico durante os ciclos de abertura e fechamento.

Apesar de sistemas PWM operando com ciclos de trabalho elevados poderem gerar gotas menores, elevando o potencial de deriva, esse risco ainda é inferior ao apresentado por pulverizadores convencionais em vazões similares (Giles *et al.*, 2003). Isso ocorre porque o sistema PWM não permite a redução da pressão de trabalho para ajuste de vazão, o que mantém a pressão elevada e favorece a formação de gotas mais finas. No entanto, embora a deriva receba destaque na maioria dos estudos, há relativamente pouca atenção à cobertura e à deposição das gotas, que são parâmetros fundamentais para a eficácia da aplicação.

Neste contexto, o uso do PWM pode ser vantajoso, pois, mesmo com gotas menores, tende a promover uma melhor cobertura da superfície-alvo, devido ao maior número de gotas por unidade de área. Além disso, a manutenção da pressão de trabalho estável contribui para uma deposição mais uniforme, especialmente quando associada a pontas adequadas para redução de deriva, como aquelas com indução de ar. Assim, é necessário considerar não apenas

o risco de deriva, mas também o impacto positivo da tecnologia na qualidade da aplicação, sobretudo no que diz respeito à cobertura e deposição dos produtos fitossanitários.

Giles e Comino (1990) descreveram um efeito significativo do ciclo de trabalho sobre $Dv_{0,1}$ e $Dv_{0,5}$ para pontas de jato plano, com um acréscimo no tamanho da gota conforme o ciclo de trabalho reduzia, de forma semelhante ao encontrado no presente trabalho. Neste sentido, Butts *et al.*, (2019) observaram que o tamanho das gotas geralmente aumentava, o que reduz a porcentagem de gotas finas deriváveis, na medida em que o ciclo de trabalho decaía, tanto para pontas do tipo Venturi e não Venturi.

Wei *et al.*, (2021) observaram um aumento no diâmetro das gotas em pontas de jato plano ao comparar dois sistemas PWM de marcas diferentes, evidenciando diferenças nas taxas de fluxo entre ciclos de trabalho de 10% a 90%. Esses resultados indicam que o comportamento hidráulico pode variar significativamente entre diferentes válvulas solenóides, o que influencia diretamente a atomização. Por isso, os autores destacam a importância de uma escolha criteriosa das pontas de pulverização com base nas características específicas da válvula PWM utilizada para assegurar a consistência no tamanho das gotas e no desempenho da pulverização. Além disso, é essencial distinguir pulverização em taxa variável com controle de velocidade daquela em que há modificação real da dose aplicada por unidade de área, pois o comportamento do sistema pode variar em cada situação. Dessa forma, a combinação adequada entre válvula, ponta e estratégia de aplicação é fundamental para garantir eficiência, cobertura e segurança na aplicação.

Comparando-se os DMVs com o tratamento adicional, ciclo de trabalho a 100%, nota-se que houve um comportamento distinto entre as pontas, embora os menores valores de DMV tenham sido sempre encontrados com o ciclo de trabalho de 100%. Isso se explica em função de ter sido nesta condição o uso da maior pressão de trabalho, 262 kPa. Com a válvula PWM ligada trabalhando com ciclo igual ou acima de 42%, notou-se que não houve diferença do DMV em relação à condição de ciclo em 100%, o que representa uma característica positiva em relação ao funcionamento do sistema. Isso corrobora o argumento de Butts *et al.*, (2019), que recomendam que as aplicações em pulverizadores com sistema PWM devem ser realizadas em ciclos de 40% ou mais.

Na Tabela 2, tem-se também os resultados da amplitude relativa, que é um parâmetro essencial para avaliar a qualidade de uma pulverização, pois sua análise fornece informações sobre a homogeneidade do espectro de gotas (Antuniassi *et al.*, 2017). O cenário ideal seria

valores de AR tendendo a zero, pois, quanto maior a amplitude relativa, mais desuniforme será a população de gotas. Observou-se que o ciclo de trabalho prejudicou a homogeneidade das gotas produzidas pelas pontas AXI e J3D quando o sistema PWM estava ligado. Com o sistema PWM desligado, a alteração da velocidade simulada, e consequentemente a pressão de trabalho, não alterou os resultados.

Comparando-se os resultados de AR com o tratamento adicional, ciclo de trabalho a 100%, notou-se que, de forma geral, o ciclo de trabalho não interferiu nesta característica. Nesta variável, notou-se um maior coeficiente de variação, indicando uma heterogeneidade no conjunto de dados em relação à média, o que também ajuda a explicar a inexistência de diferenças significativas.

Na Tabela 3, tem-se os resultados de DMV e AR para as pontas com sistema anti-deriva ADI, CVI, JGC, JAI e JAP, nas diferentes condições operacionais com o sistema PWM ligado e desligado, sendo a condição ligado (ON) com ciclos a 35, 42, 71 e 100%, que correspondem respectivamente as velocidades de 1,1; 1,7; 2,8 e 3,9 m s⁻¹, ao passo que no modo desligado (OFF) o ciclo está sempre a 100%. Para o DMV, a interação entre os fatores sistema PWM e velocidade simulada foi significativa, enquanto para a AR, a interação entre os fatores não foi significativa. para todos os modelos de pontas de pulverização.

Tabela 3 - Diâmetro da mediana volumétrica (DMV) e amplitude relativa (AR) das gotas pulverizadas por pontas de jato plano padrão com pré-orifício e indução de ar, com sistema PWM ligado (ON) e desligado (OFF) que simula diferentes velocidades de trabalho (V).

ADI 11002						
V (m s ⁻¹)	DMV (μm)			AR		
	ON	OFF	Média	ON	OFF	Média
1,1	182 bA	375 aA	278	1,49	1,19	1,33 A
1,7	140 bB ^{ns}	375 aA	257	1,53	1,17	1,35 A
2,8	147 bB ^{ns}	211 aB	179	1,40	1,17	1,30 A
3,9	140			0,97		
Média	156	320		1,47 a	1,18 b	
CV (%)	5,67			8,45		

Médias seguidas por letras distintas, maiúscula na coluna e minúscula na linha, diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade; * Dados transformados em raiz (x+0,5); ^{ns}: Não há diferença entre a média e o tratamento adicional pelo teste de Dunnett; CV: Coeficiente de variação.

CONTINUAÇÃO - TABELA 3						
CVI 11002						
DMV (µm)						AR
V (m s ⁻¹)	ON	OFF	Média	ON	OFF	Média
1,1	624 aA	731 aA	678	2,11 ^{ns}	1,34 ^{ns}	1,73 A
1,7	321 bB ^{ns}	731 aA	526	1,75 ^{ns}	1,34 ^{ns}	1,55 A
2,8	373 aB ^{ns}	497 aB	435	2,44 ^{ns}	1,38 ^{ns}	1,91 A
3,9	266			1,60		
Média	439	653		2,10 a	1,36 b	
CV (%)			15,87			20,89
JGC 12002						
DMV (µm)						AR
V (m s ⁻¹)	ON	OFF	Média	ON	OFF	Média
1,1	310 aA	325 aA	317	2,07 ^{ns}	1,55 ^{ns}	1,81 A
1,7	293 bA	325 aA	309	1,96 ^{ns}	1,55 ^{ns}	1,76 A
2,8	289 aA	264 bB	277	2,35 ^{ns}	1,24 ^{ns}	1,80 A
3,9	227			1,42		
Média	297	305		2,13 a	1,45 b	
CV (%)			4,44			30,3
JAI 12002						
DMV (µm)						AR
V (m s ⁻¹)	ON	OFF	Média	ON	OFF	Média
1,1	394 bA ^{ns}	529 aA	461	1,39 ^{ns}	1,12 ^{ns}	1,26 A
1,7	340 bB ^{ns}	529 aA	434	1,29 ^{ns}	1,12 ^{ns}	1,21 A
2,8	369 bA ^{ns}	436 aB	403	1,44 ^{ns}	1,28 ^{ns}	1,36 A
3,9	378			1,31		
Média	368	498		1,37 a	1,18 a	
CV (%)			4,45			16,87
JAP 11002						
DMV (µm)						AR
V (m s ⁻¹)	ON	OFF	Média	ON	OFF	Média
1,1	402 bA	485 aA	444	2,04 ^{ns}	1,51 ^{ns}	1,77 A
1,7	331 bB ^{ns}	485 aA	408	1,79 ^{ns}	1,51 ^{ns}	1,65 A
2,8	334 bB ^{ns}	429 aB	382	1,83 ^{ns}	1,46 ^{ns}	1,64 A
3,9	318			1,34		
Média	356	466		1,89 a	1,49 b	
CV (%)			5,38			19,64

Médias seguidas por letras distintas, maiúscula na coluna e minúscula na linha, diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade; * Dados transformados em raiz ($x+0,5$); ^{ns}: Não há diferença entre a média e o tratamento adicional pelo teste de Dunnett; CV: Coeficiente de variação.

De forma geral, observa-se que a ativação do sistema PWM promoveu redução no DMV das gotas pulverizadas em comparação ao sistema desligado, independentemente do modelo da ponta. Essa tendência foi mais evidente para pontas como a ADI, cuja média de DMV caiu de 320 μm em OFF para 156 μm em ON, representando uma redução de 51%, o que implica em maior formação de gotas finas e, portanto, maior risco de deriva. Para a CVI, o DMV médio com PWM ligado foi de 439 μm , contra 653 μm com PWM desligado, uma redução de aproximadamente 33%.

Embora em muitos casos não tenha havido diferença estatística significativa (ns), a tendência de redução do DMV com o uso do PWM é consistente, especialmente em menores ciclos de trabalho e velocidades. No que diz respeito à AR, as médias foram maiores com o sistema ligado para todas as pontas, indicando uma pulverização menos uniforme, com maior variação no tamanho das gotas. Essa diferença foi estatisticamente significativa na maioria dos casos, como evidenciado pelas letras distintas nas colunas. Portanto, o uso do sistema PWM, apesar de contribuir para a geração de gotas menores, também pode comprometer a uniformidade da pulverização, exigindo atenção quanto à escolha das pontas e aos ajustes operacionais para mitigar riscos agronômicos e ambientais.

À exceção das pontas JGC e JAI, observou-se que conforme o ciclo de trabalho diminuiu, ocorreu o aumento do diâmetro das gotas. Esta alteração pode ser atribuída a redução da pressão, mas ainda pode ser relacionada aos ciclos de trabalho, atrelado à tecnologia de pontas de pulverização. Seguindo esta tendência, Butts *et al.*, (2019) relataram que, na medida que o ciclo de trabalho diminuiu, houve um aumento no tamanho da gota. Tem-se este efeito através de uma restrição na válvula solenóide, que reduz a pressão na ponta ao mesmo tempo que a pressão manométrica permanece estável.

As pontas ADI 11002 e JGC 12002 são pontas que possuem um pré-orifício que cria uma câmara interna, com o objetivo de promover um aumento no tamanho das gotas e permitir que gotas menores se agrupem, o que forma gotas maiores e reduz o risco de deriva. Geralmente, produzem gotas de tamanho intermediário entre as pontas de jato plano padrão e indução de ar “Venturi” (Minguela; Cunha, 2013). Foi necessária a transformação do conjunto de dados em raiz de $(X + 0,5)$ no modelo de ponta ADI, para que fosse possível adequar às pressuposições na análise estatística. Observou-se uma considerável redução no tamanho das gotas quando o sistema PWM passou de desligado para ligado nas pontas ADI, o que evidencia a atuação da válvula solenóide sobre o efeito antideriva das pontas através do controle da

pressão. Entretanto, houve pouco efeito dos ciclos de trabalho na pulverização, sendo assim, não apresenta resultados significativos pelo teste de Dunnett na ponta ADI, exceto, para o ciclo de 35%, em que se notou um ligeiro aumento no tamanho das gotas, em função da redução da pressão, em relação ao ciclo de 100%.

Os modelos CVI, JAI e JAP funcionam com indução de ar, por meio do efeito Venturi, em que são geradas gotas mais grossas, sendo muito utilizadas em pulverização de produtos sistêmicos. O efeito Venturi introduz ar ao líquido o que promove a geração de bolhas, que, por sua vez, gera gotas grossas a muito grossas com ar em seu interior, o que reduz o risco de deriva (Azevedo; Freire, 2006). Do mesmo modo que a ponta ADI, foi observada redução no tamanho das gotas para as pontas JAI e JAP com o acionamento da válvula PWM, OFF para ON. Para a ponta CVI, essa tendência não ocorreu nas condições testadas, tendo como exceção a velocidade de $1,7 \text{ m s}^{-1}$. Para a ponta JAI, não houve diferença de DMV quanto a válvula trabalhou pulsando em relação ao ciclo de 100%, no entanto, para a ponta CVI e JAP, houve diferença no menor ciclo de trabalho, demonstrando que o comportamento pode ser diferente mesmo dentre as pontas com indução de ar. Com exceção da ponta JGC, em todas as demais não se verificou diferença no DMV entre os ciclos de 100%, 71% e 42%, indicando que se deve dar preferência ao uso de ciclos de trabalho iguais ou superiores a 42%, para evitar variações no tamanho das gotas, concordando com as recomendações apresentadas por Butts *et al.*, (2019). Algumas válvulas apresentam um funcionamento ineficaz em baixas porcentagens (Mangus *et al.*, 2017). Abaixo de 40%, pode ocorrer um atraso significativo na resposta da válvula ou até mesmo ela não abrir de forma controlável. Isso se deve às forças mecânicas e eletromagnéticas internas que precisam ser superadas para o funcionamento adequado.

Na Tabela 3, tem-se também os dados de amplitude relativa. Observou-se que o ciclo de trabalho não interferiu na homogeneidade das gotas. Entretanto, o sistema PWM ligado elevou a AR do espectro de gotas produzidas por todas as pontas, à exceção da ponta JAI. Relacionando os resultados de AR com o tratamento adicional, verificou-se que o sistema PWM, ligado ou desligado, não afetou essa variável, exceto para a ponta ADI. O maior coeficiente de variação indica uma heterogeneidade no conjunto de dados, o que pode explicar a ausência de resultados significativos.

Os resultados das avaliações de porcentagem do volume composto por gotas menores que $100 \mu\text{m}$ e velocidade das gotas produzidas pelas pontas de jato plano AXI, J3D e JTT estão apresentados na Tabela 4. Para a $\%<100$ e VG, a interação entre os fatores sistema PWM e

velocidades simuladas foi significativa para todas as pontas, o que indica a dependência entre eles.

Tabela 4 - Porcentagem do volume de gotas com diâmetros menores do que 100 μm ($\%<100$) e velocidade das gotas (VG) geradas por pontas de pulverização de jato plano padrão, com sistema PWM ligado (ON) e desligado (OFF) em diferentes velocidades de trabalho (V).

AXI 11002						
%<100*				VG (m s ⁻¹)		
V (m s ⁻¹)	ON	OFF	Média	ON	OFF	Média
1,1	28,77 aB	11,03 bB	19,9	1,42 bB	1,96 aA ^{ns}	1,69
1,7	39,20 aA ^{ns}	11,03 bB	25,12	1,63 bA	1,96 aA ^{ns}	1,80
2,8	29,77 aB	20,07 bA	24,92	1,77 bA	1,95 aA ^{ns}	1,86
3,9	37,3			1,98		
Média	32,58	14,04		1,61	1,96	
CV (%)	12,05			3,91		
J3D 10002						
%<100				VG (m s ⁻¹)		
V (m s ⁻¹)	ON	OFF	Média	ON	OFF	Média
1,1	14,60 aB	5,52 bB	10,06	1,77 bC	2,51 aB	2,14
1,7	24,13 aA ^{ns}	5,52 bB	14,82	2,16 bB	2,51 aB	2,33
2,8	19,87 aA ^{ns}	15,00 aA	17,43	2,61 bA	2,82 aA	2,71
3,9	23,8			3,18		
Média	19,53	8,68		2,18	2,61	
CV (%)	19,81			3,46		
JTT 11002						
%<100				VG (m s ⁻¹)		
V (m s ⁻¹)	ON	OFF	Média	ON	OFF	Média
1,1	5,87 aAB ^{ns}	2,47 bB	4,17	1,67 bC	1,94 aB	1,80
1,7	7,10 aA	2,47 bB	4,78	2,21 aB	1,94 bB	2,07
2,8	5,67 aB ^{ns}	3,47 bA	4,57	2,69 aA	2,36 bA	2,52
3,9	5,43			3,30		
Média	6,21	2,80		2,19	2,08	
CV (%)	12,73			2,61		

Médias seguidas por letras distintas, maiúscula na coluna e minúscula na linha, diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade; * Dados transformados em raiz ($x+0,5$); ^{ns}: Não há diferença entre a média e o tratamento adicional pelo teste de Dunnett; CV: Coeficiente de variação.

Seguindo a tendência apresentada para o DMV, a mudança de estado de desligado para ligado do sistema PWM reduziu o tamanho das gotas, o que eleva a $\%<100$. Para a ponta AXI, por exemplo, na média a porcentagem de 14% passou para 33%, o que caracteriza uma elevação

de 135%, mostrando que houve aumento do risco de deriva. Com relação aos ciclos de trabalho com o sistema ligado, o comportamento foi dependente do modelo da ponta, mas a %<100 sempre sofreu alteração.

De acordo com Cunha *et al.*, (2003), não existe um valor ideal ou permitido para o risco de deriva, usualmente valores menores a 15% do volume em gotas com tamanho inferior a 100 μm são mais recomendados para aplicações seguras. Butts *et al.*, (2019) relataram que as gotas finas deriváveis foram reduzidas em pontas sem indução de ar na medida em que o ciclo de trabalho reduziu de 100% para 40%, assim demonstrando que a pulsação nos pulverizadores com sistema PWM pode diminuir o risco de deriva. Contudo, esta tendência nem sempre foi evidenciada no presente trabalho, ficando condicionada ao tipo de ponta avaliada. Na ponta J3D, por exemplo, ocorreu essa redução do risco de deriva com a diminuição do ciclo de trabalho.

Com o sistema PWM desligado, o aumento da velocidade simulada levou, no geral, a um aumento do risco de deriva, visto que houve um aumento de pressão e, por consequência, redução do tamanho das gotas. No tratamento adicional, a pressão empregada foi a mais elevada, de modo a contribuir para o aumento do risco de deriva. De acordo com Camara *et al.*, (2008), o tamanho da gota é diretamente proporcional à pressão de operação, isto é, aumentando-se a pressão, reduz-se o tamanho das gotas. Observou-se que os resultados de VG, em geral, também sofreram alteração ao se acionar o sistema PWM. Na maioria das condições testadas, o sistema PWM ligado levou à redução da VG, ponta AXI e J3D, em comparação ao sistema PWM desligado.

As gotas, ao se afastarem da ponta de pulverização, enfrentam a influência da gravidade e da resistência do ar. Essa resistência suaviza a VG, o que pode até fragmentá-las em partes menores. Gotas pequenas diminuem sua velocidade mais rapidamente do que gotas grandes, caem mais devagar e são mais suscetíveis a serem levadas pelo vento, de modo a promover a deriva. Segundo Farooq *et al.*, (2001), na proximidade da ponta, percebe-se que as gotas menores se movem com menor velocidade em comparação às gotas maiores. Já ao se distanciar da ponta, é possível observar que gotículas pequenas podem até mesmo ter velocidade negativa, sugerindo seu movimento ascendente.

Assim, as pequenas gotas permanecem suspensas no ar por mais tempo, o que aumenta a probabilidade de serem carregadas pelo vento, principalmente quando a pulverização é realizada em condições meteorológicas desfavoráveis, como temperaturas elevadas, acima de

30°C, baixa umidade relativa do ar, inferior a 55%, e ventos fortes, acima de 10 km h⁻¹ ou abaixo de 3 km h⁻¹. Nessas situações, há maior risco de perdas por evaporação e deriva, tornando a pulverização ineficiente (Antuniassi; Boller, 2019). Essa velocidade terminal é importante porque, quanto menor o tamanho da gota, mais tempo ela gastará para se depositar, e assim, durante esse período fica sujeita à ação da evaporação e do arraste pelo vento para fora da área alvo (Chaim, 2004).

Ao comparar os tratamentos com diferentes ciclos de trabalho, sistema PWM ligado, notou-se que o aumento do tempo de abertura das válvulas promoveu o incremento da VG produzidas pelas pontas J3D e JTT. Com o PWM desligado, o aumento da velocidade simulada de 1,11 para 2,78 m s⁻¹ também levou ao aumento da VG produzidas pelas pontas J3D e JTT. Para a ponta AXI não foram observadas diferenças para este parâmetro.

Já quando comparado o PWM ligado com o tratamento adicional, notou-se que a VG com ciclo de trabalho de 100% foi sempre maior do que quando a válvula trabalhou em ciclos menores. Com o PWM desligado, o aumento da pressão também levou ao incremento da VG, com exceção do ocorrido com a ponta AXI.

Na Tabela 5 são apresentados os resultados de %<100 e VG para as pontas ADI, CVI, JGC, JAI e JAP. A interação entre os fatores sistema PWM e velocidade simulada foi significativa para todas as pontas, indicando a dependência entre eles.

Tabela 5 - Porcentagem do volume de gotas com diâmetros menores do que 100 µm (%<100) e velocidade das gotas (VG) geradas por pontas de pulverização de jato plano com pré-orifício e indução de ar, com sistema PWM ligado (ON) e desligado (OFF) que simula diferentes velocidades de trabalho (V).

ADI 11002						
V (m s ⁻¹)	%<100*			VG (m s ⁻¹)		
	ON	OFF	Média	ON	OFF	Média
1,1	18,13 aB ^{ns}	2,93 bB	10,53	1,51 bC ^{ns}	2,07 aA ^{ns}	1,79
1,7	25,17 aA	2,93 bB	14,05	1,71 bB ^{ns}	2,07 aA ^{ns}	1,89
2,8	20,93 aB ^{ns}	9,83 bA*	15,38	2,07 aA ^{ns}	2,12 aA ^{ns}	2,09
3,9	19,70			2,22		
Média	21,41	5,23		1,76	2,09	
CV (%)	10,73			1,76		

Médias seguidas por letras distintas, maiúscula na coluna e minúscula nas linhas, diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade; * Dados transformados em raiz (x+0,5); ^{ns}: Não há diferença entre a média e o tratamento adicional pelo teste de Dunnett; CV: Coeficiente de variação.

CONTINUAÇÃO – TABELA 5**CVI 11002**

%<100*				VG (m s ⁻¹)		
V (m s ⁻¹)	ON	OFF	Média	ON	OFF	Média
1,1	2,90 aB ^{ns}	0,83 bA	1,87	1,29 bC	1,45 aB	1,37
1,7	6,40 aA ^{ns}	0,83 bA	3,62	1,43 aB	1,45 aB	1,43
2,8	3,63 aB ^{ns}	1,63 bA	2,63	1,64 aA	1,62 aA	1,63
3,9	4,43			1,85		
Média	4,31	1,10		1,45	1,50	
CV (%)		31,45		3,06		

JGC 12002

%<100				VG (m s ⁻¹)		
V (m s ⁻¹)	ON	OFF	Média	ON	OFF	Média
1,1	8,47 aA	5,13 bB	6,80	1,79 bC	2,13 aB	1,96
1,7	10,03 aA ^{ns}	5,13 bB	7,58	2,48 aB	2,13 bB	2,30
2,8	8,43 aA	7,57 aA	8,00	2,96 aA	2,59 bA	2,77
3,9	11,97			3,55		
Média	8,98	5,94		2,41	2,28	
CV (%)		12,88		4,36		

JAI 12002

%<100*				VG (m s ⁻¹)		
V (m s ⁻¹)	ON	OFF	Média	ON	OFF	Média
1,1	3,20 aB	0,78 bA	2,00	1,47 bC	1,76 aA	1,61
1,7	5,67 aA	0,78 bA	3,23	1,78 aB	1,76 aA	1,77
2,8	2,90 aB	1,03 bA	1,97	2,07aA ^{ns}	1,75 bA	1,91
3,9	1,93			2,26		
Média	3,92	0,86		1,77	1,76	
CV (%)		17,27		4,91		

JAP 11002

%<100				VG (m s ⁻¹)		
V (m s ⁻¹)	ON	OFF	Média	ON	OFF	Média
1,1	5,70 aB ^{ns}	1,67 bB	3,68	1,49 bC	2,01 aB	1,75
1,7	7,27 aA	1,67 bB	4,47	1,93 bB	2,01 aB	1,97
2,8	6,23 aB ^{ns}	2,80 bA	4,51	2,35 aA	2,28 bA	2,31
3,9	6,13			2,83		
Média	6,40	2,04		1,92	2,10	
CV (%)		10,56		1,73		

Médias seguidas por letras distintas, maiúscula na coluna e minúscula nas linhas, diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade; * Dados transformados em raiz (x+0,5); ^{ns}: Não há diferença entre a média e o tratamento adicional pelo teste de Dunnett; CV: Coeficiente de variação.

O mesmo comportamento ocorrido na Tabela 4 pôde ser observado para as pontas na Tabela 5, em que se verificou considerável aumento na população de gotas menores que 100 μm com o sistema PWM ligado. Para a ponta ADI, por exemplo, o percentual médio de 5% passou a 21%, o que demonstra um aumento de 320%. O efeito dos diferentes ciclos de trabalho, de modo geral, mostrou uma relação de dependência com os modelos das pontas, entretanto, os maiores riscos potenciais de deriva apresentaram-se no ciclo de 42% em todas as pontas avaliadas, embora não tenha ocorrido diferença significativa para a ponta JGC.

Não foi possível estabelecer uma relação linear comum para as pontas avaliadas entre o ciclo de trabalho e o risco de deriva. De fato, encontra-se na literatura resultados conflitantes para essa relação. Grella *et al.*, (2021) relataram um aumento na $\%<100$ à medida em que o ciclo de trabalho diminuiu de 100% para 30%, evidenciando um efeito físico sobre a geração de gotas menores. Em contrapartida, Butts *et al.*, (2019) constataram que, à medida que o ciclo de trabalho foi reduzido, o percentual de gotas propensas à deriva diminuiu, seja para pontas do tipo Venturi ou não Venturi, o que demonstra tratar-se de um processo complexo que ainda exige mais estudos.

Conforme Adegas e Gazziero (2020), a alteração da pressão de trabalho interfere diretamente no tamanho das gotas, produzindo gotas maiores ou menores conforme se reduz ou eleva a pressão, independentemente da tecnologia de ponta empregada. Quando comparado ao tratamento adicional com ciclo de 100%, observou-se que, em várias pontas, principalmente as com tecnologia antideriva, como ADI e JAP, os menores ciclos de trabalho (35% e 42%) resultaram em valores de $\%<100$ significativamente superior, o que indica maior potencial de deriva. Para a ponta ADI, por exemplo, a $\%<100$ passou de 19,7% no ciclo de 100% para 25,17% no ciclo de 42%, e até 18,13% no de 35%, reforçando o aumento do risco de formação de gotas finas em ciclos menores. Tais resultados evidenciam que, embora o tratamento adicional, ciclo de 100%, apresente de forma geral, menor proporção de gotas finas, os ciclos intermediários, como 42%, podem representar o maior risco de deriva, especialmente em pontas com indução de ar ou pré-orifício. Portanto, a escolha do ciclo de trabalho ideal deve considerar não apenas o controle da vazão, mas também o modelo da ponta e os impactos no espectro de gotas geradas.

De acordo com Butts *et al.*, (2018), os pulverizadores com sistema PWM possibilitam aplicações mais assertivas através da automação de abertura e fechamento das pontas individualmente, o que reduz variações na trajetória e velocidade das gotas. Com o acionamento

do sistema PWM, a VG foi afetada na maioria das condições testadas. No entanto, não ficou claro um comportamento padrão para todas as pontas. O efeito da velocidade simulada com o sistema PWM ligado sempre resultou em maiores velocidades das gotas com maiores tempos de abertura da válvula.

Analisando o sistema PWM em diferentes ciclos de trabalho em comparação com o tratamento adicional, ciclo de 100%, observou-se que a VG das pontas CVI, JGC e JAP foi significativamente maior no ciclo de 100%, PWM ligado, em relação aos ciclos menores. Por exemplo, para a ponta ADI, a VG foi de $2,22 \text{ m s}^{-1}$ no ciclo de 100%, enquanto nos ciclos de 35%, 42% e 71% foram de 1,51, 1,71 e $2,07 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente, representando um aumento de até 47% no ciclo máximo. Da mesma forma, para a ponta JGC, a VG atingiu $3,55 \text{ m s}^{-1}$ no ciclo de 100%, contra 1,79, 2,48 e $2,96 \text{ m s}^{-1}$ nos ciclos menores, evidenciando um incremento de quase 98% entre os extremos. Para a JAP, a velocidade no ciclo de 100% foi de $2,83 \text{ m s}^{-1}$, enquanto nos ciclos de 35%, 42% e 71% os valores foram 1,49, 1,93 e $2,35 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente, o que indica um aumento de 89,9% da VG entre os ciclos de 35% e 100%.

Por outro lado, com o sistema PWM desligado, também se observou um acréscimo da VG com o aumento da pressão de trabalho, que simula o aumento da velocidade operacional. Para a ponta CVI, por exemplo, a VG aumentou de $1,45 \text{ m s}^{-1}$ no menor ciclo simulado para $1,62 \text{ m s}^{-1}$ no ciclo mais alto. Situação semelhante foi verificada para a ponta JGC, cuja VG passou de $2,13 \text{ m s}^{-1}$ para $2,59 \text{ m s}^{-1}$; para a JAI, de $1,76 \text{ m s}^{-1}$ para $1,75 \text{ m s}^{-1}$, com leve oscilação; e para a JAP, de $2,01 \text{ m s}^{-1}$ para $2,28 \text{ m s}^{-1}$. Comparando diretamente o sistema PWM ligado com o desligado no mesmo ciclo de trabalho, por exemplo, ciclo de 71%, nota-se que, em geral, a VG foi ligeiramente inferior com o sistema ligado. Para a JAP, a VG foi de $2,35 \text{ m s}^{-1}$ com PWM ligado e $2,28 \text{ m s}^{-1}$ com o sistema desligado, diferença de apenas 3%. No entanto, para a JGC, essa diferença foi mais expressiva: $2,96 \text{ m s}^{-1}$ com PWM ligado contra $2,59 \text{ m s}^{-1}$ com o sistema desligado, evidenciando que a tecnologia PWM pode, em determinadas condições, contribuir para elevações na velocidade das gotas, especialmente em ciclos maiores. Esses dados reforçam que a VG é influenciada tanto pelo ciclo de trabalho quanto pela configuração do sistema, sendo fundamental considerar a interação entre esses fatores para se obter uma pulverização eficiente e segura.

4 CONCLUSÕES

O acionamento do sistema PWM, caracterizado pela mudança do estado desligado para ligado, resultou em alteração no tamanho das gotas, com tendência de redução do DMV para a maioria das pontas testadas. No entanto, essa variação foi menor do que aquela observada com o sistema convencional, em que as mudanças de pressão influenciaram de forma mais acentuada o tamanho das gotas.

A AR do espectro de gotas não foi influenciada de forma significativa pelo ciclo de trabalho, embora o acionamento do PWM tenha elevado a heterogeneidade do tamanho das gotas em alguns modelos de ponta. Com o sistema convencional, a alteração da pressão não modificou substancialmente a homogeneidade.

Observou-se aumento no risco potencial de deriva com o uso do PWM em alguns ciclos de trabalho, especialmente em pontas que não utilizam tecnologia antideriva. Ainda assim, o risco de deriva no sistema PWM, operando com pressão constante, foi geralmente inferior ao sistema convencional com aumento de pressão. A VG foi reduzida com o PWM na maioria das condições testadas, mas aumentou com maiores tempos de abertura da válvula.

Embora alguns pesquisadores não tenham recomendado o uso de pontas com indução de ar em sistemas PWM, isso se deve às especificidades de cada estudo e das pontas utilizadas. No presente trabalho, observou-se que é possível utilizar pontas com inclusão de ar com o sistema PWM, desde que os ciclos de trabalho sejam iguais ou superiores a 42%, evitando alterações significativas no tamanho das gotas.

Por fim, é possível concluir que o sistema PWM é uma alternativa viável para pulverização em taxa variável, promovendo maior estabilidade no espectro de gotas em comparação ao sistema convencional. A escolha adequada da ponta e do ciclo de trabalho é fundamental para garantir eficiência e segurança na aplicação. Recomenda-se o uso de ciclos de trabalho acima de 40% e atenção redobrada na seleção das pontas, especialmente no caso de modelos com indução de ar. Mais estudos são necessários para entender completamente a interação entre válvula PWM, tipo de ponta e espectro de gotas sob diferentes condições operacionais.

REFERÊNCIAS

- ADEGAS, F. S.; GAZZIERO, D. L. P. Tecnologia de aplicação de agrotóxicos. *In*: SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. de C. (ed.). **Tecnologias de produção de soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2020. (Embrapa Soja. Sistemas de Produção, 17). Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1128406>. Acesso em: 10 fev. 2025.
- AHMAD, W. M. A. W.; GHAZALI, F. M. M.; YAQOOB, M. A. **Basic Statistical Analysis Using R Studio Software**. Penang: Penerbit USM, 2023. 139p.
- ANGLUND, E. A.; AYERS, P. D. Field evaluation of response times for a variable rate (pressure-based and injection) liquid chemical applicator. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 19, n. 3, 1 maio 2003. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.13659>
- ANTUNIASSI, U. R.; CARVALHO, F. K.; MOTA, A. A. B.; CHECHETTO, R. G. **Entendendo a tecnologia de aplicação**. 4. Ed. Botucatu: FEPAF, 2017. 72p.
- ANTUNIASSI, U. R.; BOLLER, W. **Tecnologia de Aplicação Culturas Anuais**. 2. ed. Botucatu: FEPAF, 2019. 373p.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL AND BIOLOGICAL ENGINEERS (ASABE). Spray nozzle classification by droplet spectra. St. Joseph, MI: **ASABE Standard**. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=51101>. Acesso em: 10 maio 2023.
- AZEVEDO, F. R.; FREIRE, F. C. O. **Tecnologia de Aplicação de Defensivos Agrícolas**. Fortaleza. Embrapa Agroindústria Tropical. 2006. 48p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/426350/1/Dc102.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2024.
- BALSARI, P.; MARUCCO, M.; TAMAGNONE, M. A crop identification system (CIS) to optimise pesticide applications in orchards. **The Journal of Horticultural Science and Biotechnology**, v. 84, n. 6, p. 113–116, jan. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1080/14620316.2009.11512606>
- BERK, P.; HOCEVAR, M.; STAJNKO, D.; BELSAK, A. Development of alternative plant protection product application techniques in orchards, based on measurement sensing systems: A review. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 124, p. 273–288, jun. 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2016.04.018>
- BUTTS, T.; LUCK, J.; FRITZ, B.; HOFFMANN, C.; KRUGER, G. Evaluation of spray pattern uniformity using three unique analyses as impacted by nozzle, pressure, and pulse-width modulation duty cycle. **Pest Management Science**, v. 75, n. 7, p. 1875–1886, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.5352>

BUTTS, T. R.; BUTTS, L. E.; LUCK, J. D.; FRITZ, B. K.; HOFFMANN, W. C.; KRUGER, G. R. Droplet size and nozzle tip pressure from a pulse-width modulation sprayer. **Biosystems Engineering**, v. 178, p. 52–69, fev. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.11.004>

BUTTS, T. **Spray characterization and herbicide efficacy as influenced by pulse-width modulation sprayers**. 2018. 257 f. Tese (Doutorado em Filosofia) – University of Nebraska, Lincoln, Nebraska, 2018. Disponível em: <https://digitalcommons.unl.edu/dissertations/AAI10844641/>. Acesso em: 20 dez. 2023.

CAMARA, F. T.; SANTOS, J. L.; SILVA, E. A.; FERREIRA, M. D. C. Volumetric distribution and spectrum of drops of hydraulic nozzles of plane jet of expanded strip XR11003. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 28, n. 4, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162008000400014>

CHAIM, A. Tecnologia de aplicação de agrotóxicos: fatores que afetam a eficiência e o impacto ambiental. In: SILVA, C. M. M. de S.; FAY, E. F. (ed.). **Agrotóxicos e ambiente**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 289–317. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/14169>. Acesso em: 11 jan. 2024.

COMBA, L. *et al.* 2D and 3D data fusion for crop monitoring in precision agriculture. In: **PROCEEDINGS of MetroAgriFor** – IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry, 2019. p. 62–67. DOI: <https://doi.org/10.1109/MetroAgriFor.2019.8909219>

CUNHA, J. P. A. R. *et al.* Avaliação de estratégias para redução da deriva de agrotóxicos em pulverizações hidráulicas. **Planta daninha**, v. 21, p. 325–332, 2003. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pd/a/bFdVxxz6vPJjVyGsSTcsD3t/?lang=pt&format=html>. Acesso em 15 jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582003000200019>

CUNHA, J. P. A. R.; TEIXEIRA, M. M.; VIEIRA, R. F. Avaliação de pontas de pressão hidráulica na aplicação de fungicida em feijoeiro. **Ciência Rural**, v. 5, p. 1069–1074, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000500013>

CUNHA, J. P. A. R.; TEIXEIRA, M. M.; FERNANDES, H. C. Avaliação do espectro de gotas de pontas de pulverização hidráulicas utilizando a técnica da difração do raio laser. **Engenharia Agrícola**, v. 27, n. esp., p. 10–15, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000200002>

CUNHA, J. P. A. R.; BUENO, M. R.; FERREIRA, M. C. Espectro de gotas de pontas de concentração com adjuvantes de uso agrícola. **Planta Daninha**, v. 28, n. esp., p. 1153–1158, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582010000500023>

FABULA, J. V.; SHARDA, A. Field evaluation of turn compensation feature of pulse width modulation (PWM)-equipped agricultural sprayer. In: **PROCEEDINGS of the 2021 ASABE Annual International Virtual Meeting**, Online, 12–16 July 2021; American Society of Agricultural and Biological Engineers: St. Joseph, MI, USA, 2021. DOI: <https://doi.org/10.13031/aim.202101190>

FAROOQ, M.; BALACHANDAR, R.; WULFSOHN, D.; LOBO, T. M. Agricultural sprays in cross-flow and drift. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 78, n. 4, p. 347–358, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1006/jaer.2000.0660>

GILES, D. K.; COMINO, J. A. Variable flow control for pressure atomization nozzles. SAE Technical Papers on CD-ROM/SAE Technical Paper Series, set. 1989. DOI: <https://doi.org/10.4271/891836>

GILES, D. K.; COMINO, J. A. Droplet size and spray pattern characteristics of an electronic flow controller for spray nozzles. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 47, p. 249–267, 1990. DOI: [https://doi.org/10.1016/0021-8634\(90\)80045-V](https://doi.org/10.1016/0021-8634(90)80045-V)

GILES, D. K. *et al.* Pulse-width modulated sprays for flow rate and droplet size control: spray dynamics and field performance. In: PESTICIDE Formulations and Delivery Systems, 2003. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/378605609_Pulse_Width_Modulated_Sprays_for_Flow_Rate_and_Droplet_Size_Control_Spray_Dynamics_and_Field_Performance. Acesso em: 04 mar. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1520/STP11118S>

GILES, D. K. Pulse width modulation for nozzle flow control: principles, development and status of the technology. **Aspects of Applied Biology**, v. 144, p. 59–66, 2020.

GRELLA, M.; GIOELLI, F.; MARUCCO, P. *et al.* Field assessment of a pulse width modulation (PWM) spray system applying different spray volumes: duty cycle and forward speed effects on vines spray coverage. **Precision Agriculture**, v. 23, n. 1, p. 219–252, ago. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11119-021-09835-6>

JACTO. **Guia de Bicos**. Brasil, 2023. Disponível em: <https://jacto.com/brasil/products/bicos-e-acessorios/guia-de-bicos>. Acesso em: 30 jul. 2023.

LUCHESI, E. F. **Pulverização eletrostática no controle de Giberella zeae em trigo e Spodoptera frugiperda em milho**. 2021. 48 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2021. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/23569>. Acesso em: 18 nov. 2024.

LUCK, J. D.; ZANDONADI, R. S.; LUCK, B. D.; SHEARER, S. A. Effects of field shape and size on application errors using manual and automatic boom section control on a self-propelled agricultural sprayer. In: PROCEEDINGS of the 2010 ASABE Annual International Meeting. American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2010, Pittsburgh. St. Joseph: ASABE, 2010. v. 6. DOI: <https://doi.org/10.13031/2013.31997>

MANGUS, D. L. *et al.* Analyzing the nozzle spray fan pattern of an agricultural sprayer using pulse-width modulation technology to generate an on-ground coverage map. **Transactions of the ASABE**, v. 60, p. 315–325, 2017. DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.11835>

- MATHEWS, G. A.; BATEMAN, R.; MILLER, P. Formulation of pesticides. *In*: **PESTICIDE application methods**. 4. ed. Oxford: John Wiley & Sons, 2014. p. 63–89. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118351284.ch3>
- MINGUELA, J. V.; CUNHA, J. P. A. R. **Manual de aplicação de produtos fitossanitários**. 1. ed. Viçosa: [s.n.], 2013. 588 p.
- PALLEJA, T.; LANDERS, A. J. Real time canopy density estimation using ultrasonic envelope signals in the orchard and vineyard. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 115, p. 108–117, jul. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.05.014>
- PORTER, W. M. *et al.* Laboratory evaluation of a turn compensation control system for a ground sprayer. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 29, n. 5, 1 set. 2013. DOI: <https://doi.org/10.13031/aim.20131562442>
- RAMOS, H. *et al.* **Manual de tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários**. ANDEF – Associação Nacional de Defesa Vegetal. 1. ed. Campinas: [s.n.], Linea Creativa, 2004. 52 p.
- SALCEDO, R. *et al.* Foliar deposition and coverage on young apple trees with PWM-controlled spray systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 178, p. 105794, nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105794>
- SAMA, M. P.; LUCK, J. D.; STOMBAUGH, T. S. Scalable control architecture for variable-rate turn compensation. **Applied Engineering in Agriculture**, p. 425–435, jun. 2015. DOI: <https://doi.org/10.13031/aea.31.10848>
- SEIXAS, C. D. S.; NEUMAIER, N.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; KRZYZANOWSKI, F. C.; LEITE, R. M. V. B. C. (ed.). **Tecnologias de produção de soja**. 21. ed. Londrina: Embrapa Soja, n. 17. 2020. 347 p. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1123928>. Acesso em: 11 jan. 2024.
- SOKAL, R. R.; ROHLF, F. J. **Biometry**: the principles and practice of statistics in biological research. 3. ed. New York: W. H. Freeman, 1995. 937 p.
- SUROTO, M. A. A. D. B. J. Desain sistem kontrol laju aliran massa sprayer menggunakan pulse width modulation. **Jurnal Ilmu dan Inovasi Fisika**, v. 3, n. 1, p. 5–9, jan. 2019. DOI: <https://doi.org/10.24198/jiif.v3i1.20621>
- VARGAS, L.; ROMAN, E. S. **56 conceitos e aplicações dos adjuvantes**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2006. 10 p. (Embrapa Trigo. Documentos Online, 56). Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/852510>. Acesso em: 15 abr. 2023.
- WEI, Z. *et al.* Droplet size spectrum, activation pressure, and flow rate discharged from PWM flat-fan nozzles. **Transactions of the ASABE**, v. 64, n. 1, p. 313–325, 2021. DOI: <https://doi.org/10.13031/trans.14100>

XUE, S. *et al.* Coordination of distinctive pesticide adjuvants and atomization nozzles on droplet spectrum evolution for spatial drift reduction. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 66, p. 250–262, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2023.10.001>

ZHANG, Z.; WANG, X.; LAI, Q.; ZHANG, Z. Review of variable-rate sprayer applications based on real-time sensor technologies. *In*: AUTOMATION in Agriculture: securing Food Supplies for Future Generations, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.73622>