

GUSTAVO GUETHI MANHANI

**AUTOMATIZAÇÃO DE PULVERIZADOR PNEUMÁTICO VISANDO À
EFICIÊNCIA DA APLICAÇÃO E REDUÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola, para obtenção do título de
Magister Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2011

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

M277a
2011

Manhani, Gustavo Guethi, 1984-

Automatização de pulverizador pneumático visando à
eficiência da aplicação e redução de impactos ambientais /
Gustavo Guethi Manhani. – Viçosa, MG, 2011.
xvi, 98f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: Mauri Martins Teixeira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 90-98.

1. Equipamento de pulverização - Automação.
2. Pulverização. 3. Produtos químicos agrícolas -
Aplicação. 4. Evaporação. I. Universidade Federal
de Viçosa. II. Título.

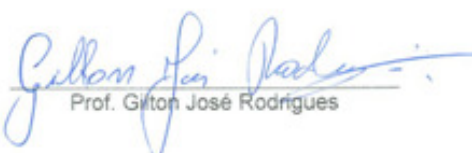
CDD 22. ed. 631.3

GUSTAVO GUETHI MANHANI

**AUTOMATIZAÇÃO DE PULVERIZADOR PNEUMÁTICO VISANDO À
EFICIÊNCIA DA APLICAÇÃO E REDUÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola, para obtenção do título de
Magister Scientiae.

APROVADA: 11 de julho de 2011.

 _____ Prof. Haroldo Carlos Fernandes (Coorientador)	 _____ Prof. Gilton José Rodrigues
 _____ Prof. Mauri Martins Teixeira (Orientador)	

“Agradeço todas as dificuldades que enfrentei; não fosse por elas, eu não teria saído do lugar. As facilidades nos impedem de caminhar. Mesmo as críticas, nos auxiliam muito.”

(Chico Xavier)

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela fé incondicional.

A meus pais, Pedro Antônio Manhani e Catarina Guethi, por sempre acreditarem, pelas palavras de apoio, compreensão e por serem a razão da minha vida.

A Universidade Federal de Viçosa, por ter me dado a oportunidade de aprender as regras da vida.

Ao Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realização do Curso de Pós-graduação.

Ao meu orientador, professor Mauri Martins Teixeira, pela paciência, compreensão, ajuda e pelos valiosos ensinamentos acadêmicos e de vida.

Aos professores Haroldo Carlos Fernandes, Sérgio Zolnier e Paulo Roberto Cecon, pelos conselhos, incentivos e colaboração na realização deste trabalho.

Aos funcionários do Laboratório de Mecanização Agrícola (Marcelo, Danilo, Wantuil e Geraldo), pela valiosa ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus queridos amigos da Mecanização Agrícola, por terem sido fundamentais em todos os momentos.

Em especial aos meus amigos Cleyton Batista de Alvarenga e Robson Shigueaki Sasaki, pela ajuda, pela paciência, pelos ensinamentos e pela dedicação.

À Republica Grozop pela amizade verdadeira em todos esses anos de UFV.

A todos que contribuíram, direta ou indiretamente, na condução e na realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

GUSTAVO GUETHI MANHANI, filho de Pedro Antônio Manhani e Catarina Guethi, nasceu em Porto Ferreira, SP, no dia 28 de dezembro de 1984.

Em julho de 2009, graduou-se em Agronomia pela Universidade Federal de Viçosa. Em agosto de 2009, iniciou o curso de mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Mecanização Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa da dissertação em julho de 2011.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	xi
LISTA DE QUADROS	xii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Tecnologia de aplicação de agrotóxicos	6
2.2. Gotas de pulverização.....	7
2.3. Volume de pulverização	9
2.4. Pulverização pneumática	10
2.5. Influência das condições meteorológicas na aplicação de agrotóxicos.....	13
2.5.1. Vento e deriva	13
2.5.2. Temperatura e umidade relativa do ar na evaporação das gotas	14
2.6. Implicações socioambientais da aplicação de agrotóxicos	17
2.7. Automação na agricultura	19
2.7.1. Sensores e microcontroladores.....	21
3. MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1. Área experimental e equipamentos.....	26
3.2. Curva característica do ventilador do pulverizador.....	26
3.3. Potência exigida	31
3.4. Temperatura do ar na saída do ventilador	32
3.5. Condições meteorológicas	33
3.6. Sistema eletromecânico para controle do diafragma	34
3.7. Determinação dos parâmetros técnicos da aplicação	35

3.7.1. Diâmetro da mediana volumétrica.....	36
3.7.2. Densidade de gotas	37
3.7.3. Cobertura	37
3.7.4. Coeficiente de homogeneidade.....	38
3.7.5. Amplitude relativa.....	38
3.8. Análise estatística	39
3.9. Automatização do pulverizador pneumático.....	39
3.9.1. Sensor de temperatura e umidade relativa do ar	39
3.9.2. Microcontrolador.....	40
3.9.3. Sistema eletrônico e algoritmo de controle	41
3.9.4. Avaliação do tempo de resposta de posicionamento do diafragma	46
3.9.5. Avaliação da precisão do sistema	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
4.1. Determinação da curva característica do ventilador.....	49
4.2. Potência exigida	53
4.3. Temperatura do ar na saída do ventilador	54
4.4. Determinação e análise dos parâmetros técnicos da aplicação.....	61
4.4.1. Diâmetro da mediana volumétrica.....	62
4.4.2. Densidade da população de gotas	67
4.4.3. Cobertura	71
4.4.4. Coeficiente de homogeneidade.....	76
4.4.5. Amplitude relativa.....	79
4.5. Automatização do pulverizador pneumático.....	82
4.5.1. Avaliação do tempo de resposta de posicionamento do diafragma	83
4.5.2. Avaliação da precisão de resposta do sistema	89
5. CONCLUSÕES.....	92
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Aquisição de dados e atuação (DARGIER; POELLABAUER, 2010).	22
FIGURA 2 - Representação do diafragma utilizado no experimento.....	26
FIGURA 3 - Duto de ar para testes em ventiladores centrífugos (MESQUITA et al., 1985)	27
FIGURA 4 - Pulverizador pneumático e tubo homogeneizador.....	28
FIGURA 5 - Transdutor de torque entre o trator e o pulverizador e equipamentos de aquisição dos dados.....	31
FIGURA 6 - Sistema eletromecânico para movimentação do diafragma. (a) motor elétrico, (b) cantoneira, (c) parafuso de potência, (d) porca, (e) tirante de ferro.....	34
FIGURA 7 - Disposição das etiquetas hidrossensíveis na faixa de aplicação.....	35
FIGURA 8 - Aplicação pneumática na área experimental.	36
FIGURA 9 - Sensor de umidade relativa e temperatura do ar modelo Humitter 50Y (VAISALA, 2011).....	40
FIGURA 10 - Microcontrolador Arduino Duemilanove (ARDUINO, 2011).....	41
FIGURA 11 - Sistema eletrônico e seus componentes. (a) sensor, (b) microcontrolador, (c) placa controladora de relés, (d) sensores de posição, (e) conjunto de LEDs.....	41
FIGURA 12 - Sensores de posição instalados à estrutura eletromecânica.....	42
FIGURA 13 - Diagrama de funcionamento do algoritmo.	45
FIGURA 14 - Comparação dos valores obtidos de vazões de ar para as diferentes aberturas do diafragma.	52
FIGURA 15 - Curva característica do ventilador de acordo com a abertura do diafragma.	53
FIGURA 16 - Potência exigida na TDP em função da vazão de ar do ventilador do pulverizador.....	54
FIGURA 17 - Temperatura do ar na saída do ventilador em função da temperatura ambiente para diferentes vazões de ar	55
FIGURA 18 - Representação do aumento do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}) na saída do ventilador das condições ambientes	

(DPV _{ar1}) para a condição do diafragma na abertura de 100 % (DPV _{AR2}) e 50 % (DPV _{ar3}).....	58
FIGURA 19 - Representação do aumento do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV _{ar}) na saída do ventilador das condições ambientes (DPV _{ar1}) para a condição do diafragma na abertura de 100 % (DPV _{AR2}) e 50 % (DPV _{ar3}).....	60
FIGURA 20 - Resultado dos parâmetros técnicos da aplicação em etiquetas hidrossensíveis. (a) diafragma na abertura de 100 %, (b) diafragma na abertura de 50 %.....	61
FIGURA 21 - Diâmetro da mediana volumétrica em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV _{ar} menor que 7,01 hPa.....	63
FIGURA 22 - Diâmetro da mediana volumétrica em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV _{ar} entre 7,01 e 12,67 hPa.....	64
FIGURA 23 - Diâmetro da mediana volumétrica em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV _{ar} entre 12,67 e 21,21 hPa.....	65
FIGURA 24 -Densidade de gotas em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV _{ar} menor que 7,01 hPa.....	67
FIGURA 25 - Densidade de gotas em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV _{ar} entre 7,01 e 12,67 hPa.	68
FIGURA 26 - Densidade de gotas em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV _{ar} entre 12,67 e 21,21 hPa.	68
FIGURA 27 - Percentual de cobertura em função da faixa de aplicação para condição de DPV _{ar} menor que 7,01 hPa.	72
FIGURA 28 - Percentual de cobertura em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV _{ar} entre 7,01 e 12,67 hPa.	73
FIGURA 29 - Percentual de cobertura em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV _{ar} entre 12,67 e 21,21 hPa.	74
FIGURA 30 - Coeficiente de homogeneidade em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV _{ar} menor que 7,01 hPa.....	76

FIGURA 31 - Coeficiente de homogeneidade em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV_{ar} entre 7,01 e 12,67 hPa.....	77
FIGURA 32 - Coeficiente de homogeneidade em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV_{ar} entre 12,67 e 21,21 hPa.....	78
FIGURA 33 - Amplitude relativa em função da faixa de aplicação para condição de DPV_{ar} menor que 7,01 hPa.	80
FIGURA 34 - Amplitude relativa em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV_{ar} entre 7,01 e 12,67 hPa.	81
FIGURA 35 - Amplitude relativa em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV_{ar} entre 12,67 e 21,21 hPa.	81
FIGURA 36 - Sequência de operação de posicionamento do diafragma. (a) LED amarelo aceso indicando acionamento do atuador, (b) LED verde aceso indicando que o diafragma atinge a posição desejada.	84
FIGURA 37 - Sinalização do sistema eletrônico para altos valores de déficit de pressão.	86
FIGURA 38 - Modelo de aquisição de dados via usb.....	87

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Coeficiente de posicionamento do tubo de pitot (φ) para seis pontos de amostragem	29
TABELA 2 - Recomendações mínimas para as populações de gotas	37

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - Diâmetros referentes às aberturas do diafragma	27
QUADRO 2 - Posições da válvula cônica em relação ao bocal de saída do duto	29
QUADRO 3 – Classificação das condições evaporativas para as aplicações.....	34
QUADRO 4 - Condições estabelecidas para os déficits de pressão de vapor e resposta do diafragma.....	42
QUADRO 5 - Valores de pressão estática, velocidade do ar e vazão do ar para abertura de 100 % do diafragma.....	49
QUADRO 6 - Valores de pressão estática, velocidade do ar e vazão do ar para abertura de 90 % do diafragma.....	49
QUADRO 7 - Valores de pressão estática, velocidade do ar e vazão do ar para abertura de 80 % do diafragma.....	50
QUADRO 8 - Valores de pressão estática, velocidade do ar e vazão do ar para abertura de 70 % do diafragma.....	50
QUADRO 9 - Valores de pressão estática, velocidade do ar e vazão do ar para abertura de 60 % do diafragma.....	50
QUADRO 10 - Valores de pressão estática, velocidade do ar e vazão do ar para abertura de 50 % do diafragma.....	51
QUADRO 11 - Valores de pressão estática, velocidade do ar e vazão do ar para abertura de 40 % do diafragma.....	51
QUADRO 12 - Valores de pressão estática, velocidade do ar e vazão do ar para abertura de 30 % do diafragma.....	51
QUADRO 13 - Equações de regressão ajustadas para temperatura do ar na saída do ventilador (TS) em função da temperatura ambiente (TA), em cada vazão de ar do ventilador	55
QUADRO 14 - Resumo da análise de variância dos parâmetros da pulverização para a condição de DPV_{ar} menor que 7,01 hPa.....	62
QUADRO 15 - Resumo da análise de variância dos parâmetros da pulverização para a condição de DPV_{ar} entre 7,01 e 12,67 hPa.....	62

QUADRO 16 - Resumo da análise de variância dos parâmetros da pulverização para a condição de DPV_{ar} entre 12,67 e 21,21 hPa	62
QUADRO 17 - Faixa útil de aplicação para as vazões de ar do pulverizador nas diferentes condições de déficit de pressão e tratamentos.....	70
QUADRO 18 - Estatística descritiva da variável tempo de resposta de posicionamento do diafragma	88
QUADRO 19 - Estatística descritiva da variável vazão de ar do pulverizador automatizado.....	89
QUADRO 20 - Análise de variância das vazões de ar do pulverizador automatizado obtidas de acordo com as condições meteorológicas avaliadas	90
QUADRO 21 - Médias de volume de ar do pulverizador automatizado em função de três intervalos de déficit de pressão de vapor d'água no ar	90

RESUMO

MANHANI, Gustavo Guethi, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2011. **Automatização de pulverizador pneumático visando à eficiência da aplicação e redução de impactos ambientais.** Orientador: Mauri Martins Teixeira. Co-Orientadores: Haroldo Carlos Fernandes, Sérgio Zolnier, Brian Lynn Steward e Paulo Roberto Cecon.

O pouco conhecimento da tecnologia de aplicação de agrotóxicos pelos produtores agrava os problemas associados à aplicação de má qualidade, aumentando as perdas de produto e a contaminação do ambiente. Em campo, é difícil obter o controle de todos os fatores que interferem na aplicação, como, por exemplo, as condições meteorológicas. Fisicamente, o déficit de pressão de saturação do vapor de água no ar (DPV_{ar}) determina a capacidade evaporativa do ambiente, sendo uma variável meteorológica importante a ser considerada durante as aplicações. Para contornar as condições meteorológicas adversas, há a necessidade da adequação dos parâmetros durante a aplicação em campo. Uma alternativa é o uso da tecnologia embarcada provida de sensores e microcontroladores para automatização dos equipamentos. Na pulverização pneumática, é possível uma variação dos parâmetros da aplicação a partir do controle do volume de ar responsável pelo fracionamento das gotas. Portanto, objetivou-se com este trabalho automatizar um pulverizador pneumático para o ajuste dos parâmetros técnicos da aplicação frente à diversidade das condições meteorológicas. Para o controle da vazão de ar foi construído um diafragma de chapa de aço galvanizada e posicionado na entrada do ventilador. Foram previamente estudadas oito aberturas do diafragma, entre 30 e 100 % do diâmetro inicial. A curva característica do ventilador, para cada abertura do diafragma, foi obtida com auxílio de um tubo de Pitot para a medida das velocidades do ar. Utilizou-se um termopar na saída do bocal do canhão para a medição da temperatura da corrente de ar produzida pelo ventilador. Para aplicação em campo, foram estabelecidas três classes de capacidade evaporativa do ar, especificadas como baixa ($DPV_{ar} \leq 7,01$ hPa), média ($7,01 < DPV_{ar} \leq 12,67$ hPa) e alta ($12,67 < DPV_{ar} \leq 30,00$ hPa). Assim, não ocorreu a aplicação quando o DPV_{ar} estava acima de 30,00 hPa. As aberturas de 30 e 40 % foram descartadas

por não produzirem suficiente atomização. Avaliaram-se o diâmetro da mediana volumétrica, densidade de gotas, percentagem de cobertura, coeficiente de homogeneidade e amplitude relativa para as aberturas do diafragma, em cada intervalo de DPV_{ar} . Para a automatização, foi construído um sistema eletromecânico associado a um sistema eletrônico formado por microcontrolador, sensor de temperatura e umidade relativa do ar e sensores de posição que foram colocados na estrutura mecânica. Foi desenvolvido um algoritmo de controle do sistema para a adequação da abertura do diafragma à faixa de DPV_{ar} . Avaliou-se o tempo de resposta e a precisão de posicionamento do diafragma para uma determinada condição meteorológica. A maior e menor vazão de ar foi obtida nas aberturas de 100 e 50 % do diafragma, correspondendo às vazões de $51,28 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ e $38,97 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, respectivamente. Entre as aberturas de 100 e 70 % a vazão de ar reduziu 4,56 %. Para as demais aberturas 60, 50, 40 e 30 %, houve redução na vazão de ar de 14,08; 24,00; 35,37 e 47,09 %, respectivamente. Com o fechamento do diafragma, ocorreu aumento da temperatura do ar na saída do ventilador, chegando a $36 \text{ }^{\circ}\text{C}$ quando a temperatura ambiente era de $27 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Os maiores tamanhos de gotas foram obtidos nas menores vazões de ar, sendo que, o aquecimento elevado na saída do ventilador, associado ao baixo volume de aplicação, não permitiu a formação de gotas de maior diâmetro. As faixas úteis de aplicação foram reduzidas conforme o decréscimo da vazão de ar e houve o aumento do DPV_{ar} , pelo aumento no processo de evaporação. Observou-se comportamento semelhante de aplicação nas maiores vazões de ar para as condições de baixa e média capacidade evaporativa do ar, devido à estreita faixa entre eles. Todos os parâmetros da aplicação analisados tiveram valores reduzidos no maior intervalo de DPV_{ar} , pelo maior poder evaporativo do ambiente. Encontrou-se para o pulverizador automatizado vazões de ar estatisticamente diferentes à 5 % de probabilidade, com boa precisão, baseado nos valores do coeficiente de variação, que esteve abaixo de 3,5 %. As vazões de ar obtidas tiveram valores bem próximos daquelas tomadas manualmente. O maior tempo de resposta de posicionamento do diafragma foi de 66,3 segundos, o que, para uma velocidade de $2,6 \text{ km h}^{-1}$, representa uma distância percorrida de 47,88 metros. O sistema apresentou uma boa precisão de tempo de resposta, com

todos os componentes analisados possuindo coeficiente de variação abaixo de 5,0 %.

ABSTRACT

MANHANI, Gustavo Guethi, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2011. **Automation of pneumatic sprayer aiming the application efficiency and reduction of environmental impacts.** Adviser: Mauri Martins Teixeira. Co-advisers: Haroldo Carlos Fernandes, Sérgio Zolnier, Brian Lynn Steward and Paulo Roberto Cecon.

The lack of knowledge of pesticide application technology by growers aggravates the problems associated to the application of poor quality, increasing product losses and environmental contamination. In the field, it is difficult to control all factors that affect the application, for example, weather conditions. Physically, the water vapor pressure deficit in the air (VPD_{air}) determines the evaporative capacity of the environment, being an important meteorological variable to be considered during the applications. To avoid the adverse weather conditions, there is a need for adjustment of parameters during the application in the field. An alternative is the use of embedded technology provided with sensors and microcontrollers for automation equipment. In the pneumatic spraying, it is possible a variation of the application parameters by controlling the air volume responsible for the droplets fractionation. Therefore, this study aimed to automate a pneumatic sprayer for setting the application technical parameters against the diversity of weather conditions. To control the air flow a diaphragm was built from a galvanized steel sheet and placed onto the fan inlet. Eight diaphragm openings were studied between 30 and 100 % of initial diameter. The fan characteristic curve for each opening was obtained with the aid of a Pitot tube for the measurement of air velocities. It was used a thermocouple at the cannon outlet to measure the temperature of the air stream produced by the fan. For application in the field, it were established three classes for evaporative capacity of air, specified as low ($VPD_{air} \leq 7,01$ hPa), medium ($7,01 \leq VPD_{air} \leq 12,67$) and high ($12,67 \leq VPD_{air} \leq 30,00$ hPa). Thus, the application did not occur when the VPD_{air} was higher than 30,00 hPa. The 30 and 40 % of diaphragm

openings were excluded for not producing enough atomization. It were evaluated the volumetric median diameter, the droplets density, the coverage percentage, the homogeneity coefficient and the relative amplitude, for each interval of VPD_{air} . For automation, it was built an electromechanical system associated to an electronic system comprised of microcontroller, temperature and relative humidity sensor and position sensors that were placed into the mechanical structure. It was developed a system control algorithm for adjustment of the diaphragm opening to the interval of VPD_{air} . It was evaluated the response time and the accuracy of diaphragm positioning for a weather condition. The highest and lowest air flow was obtained with the diaphragm openings of 100 and 50 %, corresponding to the air flows of $51,28 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ e $38,97 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, respectively. Between the diaphragm openings of 100 and 70 % the air flow decreased 4,56 %. For the other diaphragm openings 60, 50, 40 e 30 %, there was air flow reduction of 14,08; 24,00; 35,37 and 47,09 %, respectively. With the closing of the diaphragm, it occurred an increasing on the air temperature at the fan outlet, reaching $36 \text{ }^{\circ}\text{C}$ when the environment temperature was $27 \text{ }^{\circ}\text{C}$. The highest droplets size were obtained at the lowest air flow, and that, with the elevated heating at the fan outlet, associated to the low application rate, did not allowed the formation of higher droplets size. The application useful range was reduced as the air flow reduced and there was a increasing on the VPD_{air} , by the increasing of the evaporation process. It was noticed similar application behavior in the low and medium evaporative capacity of the air, due to the narrow range between them. Every application parameters analyzed had its values reduced in the highest interval of VPD_{air} , by the higher evaporative power of the environment. It was found for the automated sprayer air flows statistically different to 5 % probability, with good accuracy, based on the values of the coefficient of variation, which was below 3,5 %. The longest positioning response time of the diaphragm was 66,3 seconds, which, for a travel speed of $2,6 \text{ km h}^{-1}$, represents a distance traveled of 47,88 meters. The system showed good accuracy of response time, with every components analyzed having a coefficient of variation below 5,0 %.

1. INTRODUÇÃO

O cultivo de grandes áreas agrícolas nos remete ao desafio da utilização de agrotóxicos paralelamente à preservação do meio ambiente, sanidade do operador, produção de alimentos a baixo custo e livre de resíduos, buscando-se, desse modo, a sustentabilidade do sistema agrícola. Para que tais desafios sejam concretizados com sucesso, há a necessidade da avaliação e monitoramento da aplicação, controlando sua qualidade.

O aperfeiçoamento das técnicas de aplicação contribui para a concretização de uma aplicação de qualidade, garantindo a eficácia da operação, evitando problemas como a contaminação ambiental e a pressão de seleção sobre organismos. Assim, mecanismos que possam quantificar e qualificar as variáveis envolvidas na aplicação, com rapidez e precisão, buscando agilizar o processo de desenvolvimento, são cada vez mais necessários.

Em uma aplicação de agrotóxicos a meteorologia tem um papel importante na determinação do movimento das gotas na atmosfera, bem como onde essas gotas serão depositadas. Hoje, descrever o movimento exato das gotas na atmosfera é um desafio para a ciência moderna, apesar de o processo de deriva causado por fatores meteorológicos ser entendido e passível de ser calculado.

Grande parte dos insucessos na aplicação ocorre por condições meteorológicas desfavoráveis, principalmente devido à deriva e evaporação, e equipamentos em péssimas condições de conservação, tendo como consequência menor deposição do agrotóxico no alvo. Nessas condições, há uma redução na eficiência da aplicação e um aumento do número de pulverizações.

Uma vez que os fatores meteorológicos afetam a qualidade das aplicações, pesquisas estão sendo realizadas para o emprego de tecnologias que se adaptem melhor ao sistema de aplicação de agrotóxicos e às variações meteorológicas. Isso é possível graças à adição de tecnologia e inovação no setor de aplicação de agrotóxicos, como o uso da eletrônica embarcada, fato que se torna mais frequente a medida que os produtores passam a ocupar o papel de empresários do setor.

A automação agrícola, ou tecnologia de informação aplicada ao setor agrícola, é uma oportunidade atual e viável para a realização de uma aplicação de agrotóxicos de qualidade frente a fatores imprevisíveis, como os meteorológicos.

O controle de um sistema físico visa monitorar tarefas rotineiras e respostas comuns a certas características do ambiente. A maioria dos sistemas de automação necessita de algum tipo de parâmetro que lhes permita avaliar o estado atual do ambiente. Essa interface, geralmente, consiste de sensores que medem características do local, tais como temperatura, umidade relativa, intensidade luminosa e outros.

Uma das maneiras de ajustar os parâmetros da tecnologia de aplicação seria, portanto, a utilização de equipamentos de aplicação conectados a sensores. Na eletrônica, um sensor é conhecido como qualquer componente ou circuito eletrônico que permita a análise de uma determinada condição do ambiente, como umidade relativa, temperatura ou velocidade dos ventos. A utilização de sensores possibilita durante a aplicação de agrotóxicos, uma alteração dos parâmetros em tempo real, promovendo o ajuste desses parâmetros da aplicação frente às variáveis meteorológicas.

A tecnologia dos sensores pode ser associada aos diversos tipos de pulverizadores, alterando o funcionamento dos mesmos em busca de sua adaptação às condições locais de aplicação. Os pulverizadores de jato transportado, como o pneumático, oferecem a condição necessária de associação à sensores para seu controle de padrão de funcionamento.

O pulverizador pneumático apresenta em sua constituição, um ventilador de fluxo radial, com alta pressão de ar. O fluxo de ar transporta as gotas em direção ao alvo. Para que a aplicabilidade do uso de sensores seja efetiva em pulverizadores pneumáticos, uma alternativa seria a construção de um diafragma para o controle do volume de ar succionado pelo ventilador, sendo este um dos fatores responsáveis pela determinação das características do espectro de gotas de uma pulverização pneumática.

A abertura ou fechamento do diafragma pode ser realizado com o auxílio de um atuador como um motor elétrico. Este dispositivo pode ser acionado por um microcontrolador, em função das informações provenientes de sensores meteorológicos. O uso de tais equipamentos é uma prova da necessidade atual de avanço da tecnologia na busca de melhorias no setor produtivo agrícola.

Apesar de ser uma tecnologia de bases recentes, a automação é considerada um processo irreversível, pois estará contribuindo cada vez mais no

sucesso de uma atividade agrícola, através de um melhor gerenciamento da informação e, é previsto de ser cada vez mais empregado, uma vez que é a consequência do progresso científico empregado no setor.

Na busca da garantia da sustentabilidade do setor produtivo agrícola e considerando a automação como um processo de bases com crescente evolução e contribuição à agricultura, objetivou-se com este trabalho o desenvolvimento de um sistema de controle automático de vazão de ar em um pulverizador pneumático, através da utilização de um diafragma, e avaliar esse sistema para ajuste dos parâmetros técnicos da aplicação às diferentes condições meteorológicas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O mercado de agrotóxicos no Brasil, em 2009, foi de US\$ 6,6 bilhões (R\$ 12,9 bilhões), 7% a menos que 2008. Deste valor, o mercado de herbicidas representou 38% (US\$ 2,5 bilhões), seguido por inseticidas e acaricidas, com 31% (US\$ 2,1 bilhões), fungicidas com 27% (US\$ 1,8 bilhões) e outros, com 4% (US\$ 0,3 bilhões). A previsão para 2010 é que o mercado cresça 10% em relação ao ano anterior (SINDAG, 2010).

Muitas terminologias são usadas para a designação de agroquímicos. Defensivos agrícolas, agrotóxicos, pesticidas, praguicidas ou biocidas são alguns dos termos, frequentemente, usados. A utilização de termo específico depende de cada setor em que é empregado, como nas indústrias onde a especificação defensivo agrícola ou agroquímicos é a mais utilizada.

Uma das designações mais utilizadas para tais produtos, na sociedade, é o termo agrotóxico. Por esse termo definem-se os mesmos como sendo produtos e agentes de processos físicos, químicos ou biológicos, destinados ao uso nos setores de produção, armazenamento e beneficiamento de produtos agrícolas, pastagens, proteção de florestas nativas ou implantadas e de outros ecossistemas, bem como de ambientes urbanos, hídricos e industriais (MAPA, 2010).

Estes produtos são utilizados na agricultura moderna, a fim de proteger as culturas de pragas, doenças e plantas daninhas, visando atender a crescente demanda por alimentos e produtos agrícolas, devido à população mundial em rápido crescimento (ZHAO et al., 2008).

O uso de agrotóxicos tem gerado crescente preocupação do público, que por sua vez, aumentou a pressão sobre as autoridades de planejamento agrícola e ambiental. Tsay et al. (2002) menciona que para estar em conformidade com a opinião pública e maximizar o benefício para o ambiente e a indústria agrícola, os agrotóxicos devem ser aplicados somente quando necessário, com o menor número de aplicações e as doses recomendadas do produto químico.

Para Zabkiewicz (2007) os desafios enfrentados pelos usuários de agrotóxicos tem sido crescentes, em complexidade, nos últimos anos. Os consumidores exigem a mais alta qualidade dos produtos, as entidades

reguladoras insistem em segurança e redução de risco para o operador ou o ambiente. Para esse mesmo autor, assumindo que a dependência em agrotóxicos continuará, então é razoável que procedimentos operacionais devam ser desenvolvidos pelos fabricantes de agrotóxicos e equipamentos de aplicação, aplicadores e entidades reguladoras, para atender aos novos critérios.

A qualidade da aplicação pode ser crucial para atingir a produtividade almejada da cultura (SUGISAWA et al., 2007). A importância do monitoramento desta qualidade se faz ao passo que se alcança um eficiente controle dos fatores danosos à cultura.

Para se obter maior eficiência de controle com um menor uso de agrotóxicos, os efeitos combinados do desempenho do sistema de aplicação, a formulação de agentes de controle de insetos e doenças, estrutura da superfície da planta e as condições microclimáticas devem ser reconhecidas e estudadas. Ignorado qualquer desses fatores, pode-se proporcionar o uso excessivo de agrotóxicos (YU et al., 2009a).

Em condições de campo, é difícil respeitar todas as circunstâncias ideais para a realização de uma pulverização, assim como é difícil somente realizá-la quando todas as restrições estiverem sob controle (PEREIRA, 2006). O sucesso em uma aplicação é muitas vezes dificultado, pela rapidez com que ocorrem as mudanças das condições ambientais (RUEDELL, 2002).

Métodos que consideram o momento correto de aplicação baseado em fatores meteorológicos têm sido aplicados na agricultura. Antuniassi et al. (2005) trabalharam com um método que facilitava a operacionalização das atividades. Tal método baseou-se na seleção de pontas de pulverização de acordo, principalmente, com as condições de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento.

Com o objetivo de alcançar maior controle e redução das perdas nas aplicações de agrotóxicos, atualmente, novos recursos e dispositivos estão sendo desenvolvidos e empregados. Essa área de atuação tem recebido expressivos benefícios do uso da computação e das tecnologias de comunicação. São exemplos de aplicações agrícolas que incorporam sistemas computacionais: sensores embarcados em equipamentos de manejo agrícola para coleta de dados, posicionamento global para o mapeamento de áreas de plantio, controle

automático de operação e *software* para gestão de dados (de campo ou administrativos) (MELLO; CAIMI, 2008).

2.1. Tecnologia de aplicação de agrotóxicos

Dentre os vários componentes do processo de produção agrícola, a tecnologia de aplicação de agrotóxicos é um dos mais importantes. O seu uso visa colocar o ingrediente ativo no alvo, com a máxima eficiência e da maneira mais econômica possível, afetando o mínimo o ambiente (MATTHEWS, 2002). Isto possibilita evitar desperdícios e o aumento na resistência de insetos e doenças. Uma aplicação de agrotóxicos ineficiente aumenta o impacto ao meio ambiente e os prejuízos econômicos (MAIA et al., 2007).

A aplicação de agrotóxicos é um processo de grande complexidade. No intervalo de tempo entre a preparação do produto e sua ação contra as enfermidades agrícolas, acontecem transformações e perdas que podem impactar negativamente a sua devida ação. O controle deste processo é de relevância, por que pode gerar efeitos negativos sobre a saúde humana e ao meio ambiente (MAGDALENA et al., 2010).

A tecnologia de aplicação continua sendo um dos pontos de estrangulamento na produção agrícola, sendo uma das etapas mais exigentes, pois se necessita melhorar a qualidade das aplicações, tratando com eficiência a área cultivada, porém diminuindo gastos e desperdícios, aumentando assim o retorno econômico.

Nos últimos anos, um número cada vez maior de produtos visando o controle fitossanitário de culturas agrícolas tem sido desenvolvido pelas indústrias agroquímicas e lançados no mercado. O fato é que, embora de eficácia comprovada, tais produtos, muitas vezes, não conseguem sua atuação plena pela má e desatualizada tecnologia de aplicação empregada, passando a serem contabilizados negativamente, com seus impactos econômicos e ambientais.

É bem conhecido que o uso de agrotóxicos apresenta os efeitos potenciais adversos às pessoas e ao meio ambiente. Muitas vezes são desperdiçados por não atingirem o alvo. Grandes esforços são demandados para reduzir o montante total do uso de agrotóxicos. Estes esforços são principalmente destinados a

aumentar a deposição de agrotóxicos sobre as culturas e a redução de perdas fora do alvo (ZHAO et al., 2008).

Belforte et al. (2009) citam que as tendências para a redução da quantidade de produtos utilizados na proteção de plantas e os esforços paralelos para garantir que os tratamentos continuem a serem eficazes, têm levado a grandes mudanças e inovações no equipamento usado na aplicação de produtos de controle. Para esses mesmos autores, pulverizadores equipados com sensores de tecnologia avançada também têm sido investigados para melhorar o desempenho da pulverização, melhorando a precisão e reduzindo as necessidades de agrotóxicos

Um ajuste adequado do equipamento à uma condição estabelecida melhora a precisão e eficiência, resultando em um depósito de pulverização mais uniforme e direcionado, o que contribui para prevenir um inadequado controle de pragas, indução de resistência, perdas econômicas de tempo, de produto e de trabalho, e poluição ambiental. Por isso, é importante monitorar a qualidade da pulverização e a quantidade que atinge o alvo e adjacências, a fim de melhorar a eficiência de aplicação de agrotóxicos e reduzir a contaminação ambiental (MARÇAL; CUNHA, 2008).

2.2. Gotas de pulverização

O espectro de gotas em uma aplicação de agrotóxicos caracteriza-se em função dos diferentes tamanhos de gotas produzidas. O espectro é considerado homogêneo quando a população gotas de uma pulverização apresenta diâmetros semelhantes, sendo considerado heterogêneo, caso o ocorra o contrário.

Em uma aplicação de agrotóxicos o tamanho das gotas de uma população é expresso como o diâmetro da mediana volumétrica (DMV) que é o diâmetro da gota que separa a população de gotas, ordenadas de menor a maior, em duas metades iguais, em volume de líquido.

Para eficácia de controle de um determinado agente, as gotas devem ter o tamanho ideal, sendo grande o suficiente para depositarem no alvo após alguma evaporação durante o transporte, porém pequenas, buscando fornecer a cobertura suficiente de produto sobre o alvo. Portanto, é preciso conhecer o espectro das gotas pulverizadas, de forma a adequar o seu tamanho, garantindo,

ao mesmo tempo, eficácia biológica e segurança ambiental, de acordo com as condições meteorológicas, no momento da aplicação (CUNHA et al., 2003). Kirk (2007) evidencia tal fato ao afirmar que o tamanho das gotas, bem como o espectro da população, são fatores dominantes na determinação da deriva de agrotóxicos, com as gotas menores mais propensas a se afastarem da zona de aplicação do que gotas maiores.

Matthews (2000) menciona que agricultores, na busca de redução de deriva e contaminação do ambiente, têm utilizado gotas grossas em suas aplicações, porém este procedimento pode levar ao ineficaz controle do inseto, patógeno ou planta daninha. O motivo é explicado pelo fato de que gotas grossas proporcionam uma menor cobertura do alvo de aplicação, quando comparadas às gotas mais finas.

O ganho com a aplicação de gotas finas se deve a possibilidade de manter a área de cobertura atingida, porém com menor taxa de aplicação. Este fato promove a redução do volume de aplicação e água utilizada, e por consequência, o aumento do rendimento operacional da máquina (ANTUNIASSI; BAIO, 2004).

Para a avaliação da qualidade de uma aplicação de agrotóxicos diversas metodologias têm sido propostas e usadas em experimentos relacionados à área. As determinações dos parâmetros que definem uma população de gotas podem ser realizadas pela utilização de alvos artificiais. Para Salyani et al. (2006), um coletor de pulverização, amostrador ou mesmo alvo artificial, deverá ter capacidade suficiente para interceptar e reter gotas de pulverização; não interferir nas medições analíticas; ter limitações de manipulação mínima e ser acessível.

Para Holownicki et al. (2002), papéis sensíveis à água e óleo têm sido utilizados há mais de 30 anos, sendo os alvos artificiais mais populares para avaliação do espectro de uma população de gotas, particularmente cobertura e distribuição. Este alvo fornece uma indicação qualitativa e rápida, à base de água, da deposição de fluídos em superfícies, penetração no dossel e do processo de escoamento do líquido pulverizado que eventualmente se perde ao solo (CROWE et al., 2005).

O dimensionamento das gotas também é possível quando um fator de expansão adequada ou equação de calibração for desenvolvido para sistemas específicos de transformação de imagem para converter as manchas de gotas no

alvo artificial ao seu tamanho real (HOFFMAN et al., 2003). Para Wolf (2003) o escaneamento digital também tem sido usados para medir efetivamente diferenças nas características das gotas para diferentes aplicações.

2.3. Volume de pulverização

Os pulverizadores utilizados para aplicação de agrotóxicos, além de dividir o líquido em finas gotículas e distribuí-las homogeneamente sobre o alvo, devem também possibilitar a redução do volume de calda aplicado por hectare sem alterar a eficiência da aplicação. A redução do volume de calda tem como benefícios a redução da contaminação do ambiente, maior capacidade operacional da máquina, menor compactação do solo, redução das perdas de calda e menor consumo de água.

A redução do uso de agrotóxicos tem sido enfatizada há muitos anos devido aos riscos potenciais para a saúde humana e o meio ambiente (YU et al., 2009a). O uso de menor volume de calda aumenta a autonomia e a capacidade operacional dos pulverizadores em valores expressivos, podendo ser o principal componente do desempenho operacional em diversas culturas (ROMÁN et al., 2009). Além disso, permite diminuir os riscos de contaminação ambiental, pois reduz o escoamento e, em alguns casos, a evaporação e deriva (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Nas décadas passadas, pouco se dava atenção ao tamanho e à uniformidade das gotas produzidas durante a aplicação de agrotóxicos, pois o que interessava era molhar bem a cultura, o que se conseguia mediante um volume de calda bastante alto. Porém, para Matthews (2000), o aumento do volume de pulverização pode não resultar em um controle satisfatório, uma vez que é limitado o volume de calda por unidade de área que a folha de uma cultura pode reter.

A relação redução de volume de aplicação e aumento da eficácia de controle é mostrada por Tomazela et al. (2006). No controle de *Brachiaria plantaginea*, tais autores concluem que à medida que se decresceu o volume de calda de pulverização por hectare, ocorreram acréscimos, de modo geral, na porcentagem de depósito nas plantas e, concomitantemente, decréscimos na

porcentagem depositada no solo, indicando maior eficiência quanto ao objetivo de atingir o alvo biológico.

A adaptação das condições de aplicação do pulverizador é ainda um problema nas aplicações em culturas frutíferas. A dose do ingrediente ativo a ser usada para controlar um inseto ou doença é um dos ajustes mais difíceis. Para garantir uma distribuição homogênea da dose desejada, um volume de aplicação deve ser selecionado e o equipamento deve ser calibrado para fornecer esse volume específico da mistura por unidade de área. Quando o ingrediente ativo de uma preparação de agrotóxicos não é entregue com o volume de aplicação adequado para cada cultura, pode causar uma diminuição da eficácia de controle (ESCOLÁ et al., 2006)

Por essa mesma linha de raciocínio, a distribuição do produto na cultura pode ser melhorado, teoricamente, aplicando-se gotas de tamanho reduzido, o que é mais facilmente carregado pela corrente de ar do pulverizador. Cross et al. (2001) menciona que as gotículas de diâmetro reduzido fornecem uma densidade de gotas proporcionalmente maior para qualquer nível de depósito de pulverização. É desta forma que o volume de calda necessária por hectare para uma dada cobertura de pulverização pode ser reduzido, e desta forma, melhorado.

2.4. Pulverização pneumática

Nos pulverizadores penumáticos, a calda é impulsionada por uma bomba de baixa pressão ou por gravidade até um bocal através do qual passa uma corrente de ar produzida por um ventilador centrífugo (DI PRINZIO et al., 2010). A pulverização pneumática resulta do choque de uma corrente de ar com um líquido que assegura igualmente o transporte das gotas, por isso também conhecidos como pulverizadores de jato transportado.

Este tipo de pulverização é empregado em várias culturas para o controle de pragas e doenças em café, banana e cereais. Também é bastante utilizado para aplicação de herbicidas em pastagens, devido às faixas de aplicação alcançadas. Para aplicações em cafeeiros e bananeiras possuem configurações diferentes, permitindo alcançar alturas de 4,0 e 6,5 metros, respectivamente.

Como possui diversas opções de aplicação, os volumes aplicados nesse tipo de pulverização localizam-se na faixa entre 25 e 300 L ha⁻¹.

Os pulverizadores tipo canhão podem cobrir grandes faixas de pulverização e são utilizados em viveiros de plantas onde pulverizadores com assistência de ar convencionais não são viáveis para aplicação. Devido à alta velocidade do ar empregado, o jato pulverizado pode penetrar na copa da planta, criando uma turbulência que aumenta a deposição da calda em ambas as faces da folha. Comparados com outros pulverizadores com assistência de ar, o pulverizador tipo canhão é geralmente menor, facilmente transportado e armazenado, necessitando um espaço pequeno para a aplicação (CHEN, 2010).

Pulverizadores utilizados em culturas arbóreas tiveram um avanço tecnológico importante na utilização do ar como meio de transporte. Seus benefícios têm sido reconhecidos desde antes da década de 1930. A utilização de uma corrente de ar na aplicação de agrotóxicos em frutas significou um avanço importante no final dos anos 50 (MAGDALENA, 2004).

De acordo com Cross et al. (2003), o jato de ar forçado transporta as gotas de pulverização por todo o alvo, movendo-se e levantando a folhagem para permitir a penetração e deposição das gotas sobre a superfície vegetal, incluindo a parte inferior das folhas

Nos dias atuais, em muitas culturas, as pulverizações são frequentemente assistidas pelos fluxos de ar do ventilador do pulverizador, produzidos para ajudar no transporte das gotas para o alvo (GIL et al., 2008). Para Di Prinzio et al. (2010), como se requerem velocidades elevadas de ar para o transporte das gotas, a energia necessária para este tipo de pulverização é maior que em uma pulverização hidráulica.

Conforme relatado por Laryea e No (2005), esses pulverizadores não servem somente como um método para o transporte do produto químico do pulverizador para o seu alvo, mas também afeta a boa penetração e deposição ou cobertura das gotas.

A corrente de ar produzida pelo ventilador é eficiente quando mantém certa velocidade que lhe permite transportar o agroquímico até a árvore e penetrar no seu interior. Para Di Prinzio et al. (2010), se a velocidade é excessiva, provoca maiores perdas por deriva, devido o produto químico atravessar a árvore sem

ocorrer o depósito na mesma; em caso contrário, o produto não se distribui uniformemente em todos os setores da árvore.

Segundo Fox et al. (2008), a deposição de gotículas contendo o agrotóxico podem ser modeladas pelos princípios da impactação inercial, interceptação e sedimentação. Gotas grandes são depositadas sobre a folhagem principalmente por impactação inercial e sedimentação; gotas pequenas tendem a seguir as linhas de corrente do jato de ar e depositam quando são carregadas para perto de um alvo pelo movimento turbulento, onde aderem.

Holownicki et al. (2000) afirmam que as aplicações de agrotóxicos em pomares são consideradas ineficientes, visto que mais de 50% dos produtos aplicados são perdidos. Isso causa perda econômica para o produtor, além do risco de poluição ambiental.

Aubertot et al. (2006) indicaram que a assistência de ar é muitas vezes acompanhada de perdas para o solo e para a atmosfera, e que as diferenças de velocidade entre o fluxo de ar e gotas podem aumentar a evaporação. Eles encontraram que as perdas para o ar pode estar entre 10% e 20% durante uma aplicação típica.

Em uma pulverização com assistência de ar, o transporte das gotas é muito influenciado pelo tamanho e a velocidade das mesmas, a dinâmica do pulverizador, as condições meteorológicas e as propriedades físicas das plantas. O melhor método de condução de uma pulverização é definir o alvo e a seleção de um tamanho de gota apropriado (LARYEA; NO, 2005).

O componente principal de um pulverizador pneumático é seu ventilador. A função básica de um ventilador é, pois, mover uma dada quantidade de ar por um sistema de ventilação a ele conectado. Assim, o ventilador deve gerar uma pressão estática suficiente para vencer as perdas do sistema e uma pressão cinética para manter o ar em movimento (MESQUITA et al., 1985).

Segundo Mesquita et al. (1985), quando em repouso, um ventilador centrífugo comporta-se como um vaso volumétrico contendo um volume de ar. Ao entrar em movimento, o ar é centrifugado, recebendo um incremento de energia, sendo um vazio criado no interior do ventilador preenchido com novo ar, pela ação da pressão atmosférica, a uma velocidade suficiente para repor a quantidade que foi descarregada. Quando em movimento em rotação constante, o

volume específico do ventilador é induzido e descarregado continuamente, sendo que o volume total depende apenas da rotação do ventilador.

2.5. Influência das condições meteorológicas na aplicação de agrotóxicos

As condições meteorológicas definem o estado instantâneo ou a sequência temporal de estados da atmosfera. O comportamento da atmosfera em um local específico pode ser descrito por elementos que caracterizam o estado físico do ar, tais como a temperatura, a pressão, a umidade, o movimento, etc. Os principais fatores meteorológicos que afetam as aplicações de agrotóxicos são a temperatura, a umidade relativa e o vento. Os dois primeiros tem um efeito marcante sobre a evaporação e volatilização das gotas pulverizadas, enquanto que a velocidade e a direção do vento afetam a deriva aerotransportada (VILLALBA e HETZ, 2010).

2.5.1. Vento e deriva

A condição mais propícia para execução das aplicações ocorre quando a velocidade do vento se encontra na faixa de 1,0 a 1,81 m s⁻¹ (ANDEF, 2004). Aplicações com velocidades do vento próximas a zero podem ser prejudicadas pela menor eficiência no transporte das gotas, comprometendo a deposição do produto. Ramos (2001) afirma que ventos com velocidade acima de 1 m s⁻¹ aumentam o impacto das gotas de pulverização e a sua penetração na cultura. Por outro lado, Ruedel (2002) relata que valores acima de 2,78 m s⁻¹ afetam a qualidade da pulverização, devido ao excesso de movimentação lateral das gotas, podendo promover o desvio das mesmas para fora da área alvo.

Para Tsay (2002) a deriva é uma das principais preocupações na aplicação de agrotóxicos. Embora a deriva possa ocorrer na forma de vapor após a aplicação, a principal fonte de deriva de pulverização é o movimento físico de pequenas gotas para fora da área alvo.

Fox et al. (2008) afirmam que a deriva é a maior desvantagem de uma aplicação de agrotóxicos, sendo fortemente afetada pelo tamanho das gotas; gotas pequenas que não têm seu impacto na copa das culturas são carregadas diversos metros na atmosfera pela corrente de ar podendo evaporarem-se devido

a seu tamanho reduzido. Por estes mesmos autores, somente uma pequena porcentagem dessas gotas são depositadas pelas forças de sedimentação.

O tamanho adequado das gotas é de fundamental importância para a deposição do ingrediente ativo sobre o alvo, com a redução de perdas por deriva (MATTHEWS, 2000). Uma vez que as condições meteorológicas são muito variáveis e difíceis de controlar, entre todas as técnicas, o aumento do tamanho da gota é amplamente recomendado pelos pesquisadores (MILLER et al., 2001)

Fatores como métodos de pulverização, tipos de ponta, propriedades físicas de misturas no tanque e condições meteorológicas, podem afetar os tamanhos de gotas (GULER et al., 2007). Uma pulverização que tem como sua característica gotas grossas apresenta menos deriva do que aquelas com gotas finas.

Cunha e Teixeira (2003) verificaram que as gotas de diâmetro reduzido (100 μm) são biologicamente mais eficazes, entretanto, pouco seguras sob o ponto de vista ambiental, devido ao elevado potencial de deriva. Alguns pesquisadores sustentam que o espectro de gotas com um DMV menor que 250 μm determina aplicações com elevado risco. Outros consideram que a fração de gotas menores que 100 μm não deve superar os 10% do total de uma população de gotas (VILLALBA e HETZ, 2010). Para Guler et al. (2007), diversas técnicas de pulverização foram desenvolvidas para minimizar a deriva nos últimos quinze anos.

2.5.2. Temperatura e umidade relativa do ar na evaporação das gotas

Além da deriva, que acarreta perda do produto aplicado, sabe-se que os elementos meteorológicos influenciam a evaporação das gotas de pulverização. Farooq et al. (2001) relataram que as técnicas atuais, com emprego de alta tecnologia, ainda não resolveram os problemas causados pelas influências dos fatores dinâmicos a campo, tais como, as condições meteorológicas que afetam a aplicação de agrotóxicos.

A umidade relativa tem grande relevância na evaporação das gotas provenientes de uma pulverização. Para Vieira (2009), a umidade relativa é definida como a relação entre a quantidade de vapor d'água existente em uma

amostra de ar e a quantidade máxima de vapor que este mesmo ar poderia reter, na mesma temperatura.

Para Ruedell (2002), dentre os elementos meteorológicos, a ação dos agrotóxicos é principalmente influenciada pela umidade relativa do ar, por que a mesma tem importância decisiva no tempo de vida de uma gota durante seu percurso até o alvo. Para esse mesmo autor, gotas menores que 100 μm (muito finas) são as gotas que sofrem mais com as condições meteorológicas, e em condições de umidade relativa inferiores a 50% a pulverização deve ser interrompida.

A existência de água na atmosfera e suas mudanças de fase desempenham importante papel em vários processos físicos naturais, como o transporte e a distribuição de calor, evaporação, evapotranspiração, absorção de diversos comprimentos de onda da radiação solar e terrestre, entre outros. O vapor d'água na atmosfera é igualmente importante como condicionante da ocorrência e do controle fitossanitário em vegetais e animais, sendo também determinante da qualidade, armazenamento, conservação dos produtos agrícolas e conforto animal (PEREIRA et al., 2007).

Pelo conceito de saturação, Vieira (2009) afirma que a teoria cinética dos gases indica que a evaporação ocorre quando as moléculas de um líquido vencem a força de atração entre si e escapam de uma lamina d'água, passando à forma de vapor no espaço acima dessa lâmina. Neste processo, algumas moléculas atingem novamente a lâmina d'água e são recapturadas. Para cada temperatura, este equilíbrio ocorre a uma determinada pressão de vapor, denominada pressão de saturação do vapor d'água no ar (e_s) ou pressão máxima de vapor.

A pressão parcial de vapor d'água (e_a) é função da pressão de saturação máxima e da umidade relativa. A diferença entre a pressão exercida pelo vapor d'água existente no ar e a pressão de saturação nas mesmas condições de temperatura, é denominada de déficit da pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}). Segundo Vieira (2009), essa diferença é uma medida do poder evaporante do ar, tendo relação direta com os processos de evaporação e transpiração, uma vez que dependem do gradiente de pressão de vapor entre a superfície evaporante e o ar, entre outros fatores.

Com muitas pesquisas conclusivas já realizadas a respeito do aumento da taxa evaporativa de uma gota proveniente de uma aplicação, a tendência é que uma gota evapore mais sob condições de alto déficit de pressão de vapor, visto que altos valores do mesmo implicam em altas temperaturas e baixas umidades relativas do ar. Wan Ishak et al. (2011) verificaram que os maiores valores de temperatura do ar são encontrados nas proximidades do meio-dia, bem como os menores valores de umidade relativa. De acordo com esses autores, a combinação da alta temperatura com a baixa umidade relativa do ar leva aos maiores valores de déficit de pressão de vapor.

Para Villalba e Hetz (2010), uma combinação de alta temperatura ($>30\text{ }^{\circ}\text{C}$) e baixa umidade relativa ($<40\%$) pode ter uma forte influência sobre a evaporação das gotas pulverizadas, em especial quando estas são finas. Ruedell (2002) mencionou que os limites inferior de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ e superior de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ apresentam os valores na qual uma pulverização deve ser interrompida, sendo que, valores de temperatura do ar entre 20 e $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ compreendem a faixa ideal para pulverizações.

Muitos trabalhos têm comprovado a importância das condições meteorológicas durante uma pulverização. Fritz e Hoffmann (2007) concluíram que baixa velocidade de vento, temperaturas mais baixas e maior umidade relativa do ar durante as aplicações no período da manhã, resultaram em menores perdas por evaporação. O aumento da velocidade do vento, maior temperatura do ar e menor umidade relativa durante as aplicações no período da tarde causaram o aumento da evaporação de gotículas menores e da deriva.

Palladini e Souza (2004) quantificaram, percentualmente, as diferenças negativas nos depósitos de pulverização em diferentes horários de aplicação com turboatomizadores. Estes autores verificaram menores porcentagens de depósitos sobre as folhas com o aumento da temperatura e diminuição da umidade relativa do ar. Mesmo sob condições ambientais consideradas adequadas, as diferenças entre a primeira e última condição de aplicação chegaram a 17%.

Yu et al. (2009b) concluíram que, com a redução da umidade relativa de 90% para 30%, o tempo de evaporação de uma gota de $343\text{ }\mu\text{m}$ reduziu de 115 para 52 segundos. Já em umidade do ar de 60%, o tempo médio de evaporação

aumentou de 40 para 453 segundos, respectivamente para o diâmetro das gotas de 246 e 886 μm .

Estudando as taxas de evaporação de gotas e a área coberta por gotículas de agrotóxicos em faces foliares hidrofóbicas e hidrofílicas, e folhas com superfície cerosa e pilosa, sob condições ambientais controladas, Yu et al. (2009a) encontraram que a evaporação dinâmica, após a deposição das gotas em superfícies foliares cerosa e pilosa, é fortemente influenciada pela adição de aditivos à pulverização, do tamanho de gotas e da umidade relativa. Em pulverização com espectro de gotas entre 246 a 886 μm e umidade relativa na faixa de 30 e 90 %, a adição de surfactante aumentou a área de cobertura de pulverização de 4,5 a 10,1 vezes em folhas pilosas e 3,4 a 4,1 vezes em folhas com superfície cerosa.

Já Xu et al. (2010) determinaram, utilizando de imagens sequenciais, o tempo para evaporação de gotas de 300 e 600 μm . Os autores observaram que, quando as gotas aumentaram de 300 para 600 μm em seu diâmetro, o tempo de evaporação aumentou 279 %, sem surfactante e 452 % com o surfactante, enquanto que a média total da área molhada aumentou de 166 %, sem o surfactante e 229 % com o surfactante.

Trabalhando com a aplicação de herbicidas em lavouras de trigo, Sugisawa et al. (2007) verificaram que a eficácia dos herbicidas é influenciada pela temperatura e umidade relativa do ar, que afetam a absorção e a translocação desses compostos na planta. Com a diminuição da umidade relativa e/ou com o aumento da temperatura, as gotas da pulverização secam mais rapidamente, e a absorção do produto diminui ou, até mesmo, cessa, afetando o desempenho biológico.

2.6. Implicações socioambientais da aplicação de agrotóxicos

Todo ano, entre dois e três milhões de toneladas de agrotóxicos são colocados a venda em todo o mundo. Os dados experimentais dos produtos utilizados para fins agrícolas, em várias culturas com diferentes técnicas de aplicação, têm demonstrado que o uso dos mesmos libera contaminantes químicos na atmosfera (GIL et al., 2007). Para Bedos et al. (2002), a quantidade de perda para atmosfera é influenciada por diversos fatores como as

propriedades físico-químicas dos compostos, as condições ambientais e das técnicas agrícolas.

A preocupação da sociedade com o uso de agrotóxicos em processos agrícolas aumentou, significativamente, nos últimos anos. Em particular, a relação entre a saúde dos aplicadores e as questões ambientais com a dose de aplicação, é um problema persistente em áreas rurais e urbanas. Uma das causas deste problema poderia ser o transporte de agentes poluidores em áreas de cultivo para o ar, água e outros recursos naturais, através de diferentes vias (GIL e SINFORT, 2005).

Para Balsari et al. (2007), nos últimos dez anos, as preocupações ambientais relacionadas com a aplicação de agrotóxicos, especialmente nos países do norte europeu, levaram à adoção de medidas legislativas destinadas a minimizar os efeitos negativos que a aplicação desses produtos pode ter sobre organismos não-alvo. A União Européia tem atuado no desenvolvimento de estratégias, principalmente contra a deriva, para o uso sustentável de agrotóxicos na agricultura.

Dentre todos os impactos sobre organismos específicos, os seres humanos são os mais afetados, pois a contaminação das águas e solo, bem como o impacto direto na biodiversidade, interfere diretamente na qualidade de vida humana. Também existem resíduos presentes nos alimentos e na água potável, fatores que podem tornar-se carcinogênicos. Para Caldas e Souza (2000), estudos que avaliam o risco crônico da ingestão de agrotóxicos pela população e programas que analisam resíduos dos mesmos nos alimentos *in natura* evidenciam preocupações com essa temática.

Ribeiro et al. (2007) mencionaram que, mesmo em concentrações baixas, são encontrados resíduos de agrotóxicos em amostras de água subterrânea em países como Grã-Bretanha, Alemanha, Estados Unidos, Grécia, Bulgária, Espanha, Portugal e Brasil. Nesse último, a contaminação atinge níveis moderados quando comparados com alguns países do hemisfério norte, embora no Brasil, existam áreas altamente poluídas (RIBAS; MATSUMURA, 2009).

Para De Schamphelre et al. (2007), as águas superficiais são muito sensíveis à contaminação através de pulverizações. Para Zande et al. (2008) a

redução da contaminação de águas superficiais localizadas próximas aos campos de pulverização pode ser alcançada por melhorias nas técnicas de aplicação.

A deriva é dependente de vários fatores, principalmente da técnica de pulverização (ZANDE et al., 2000), das condições meteorológicas (GIL et al., 2008), e das propriedades físico-químicas do líquido de pulverização (HERBST, 2003). Segundo De Schamphelre et al. (2008), países europeus como Inglaterra, Holanda, Alemanha, Suécia e Bélgica têm delineado medidas de redução de deriva de agrotóxicos em várias culturas para proteger as águas superficiais.

Para Cantarutti et al. (2008), o fato dos agrotóxicos ainda constituírem a principal estratégia para o combate e prevenção de pragas agrícolas colocou o Brasil entre os maiores mercados consumidores de agrotóxicos no mundo. Por isto, a contaminação dos alimentos é alvo de constante preocupação no âmbito da saúde pública.

Hoje, o consumidor além de buscar características visuais nos produtos, como frutas de boa qualidade e aparência, passa a necessitar de segurança no momento da aquisição. Por esse motivo, características organolépticas, segurança alimentar e proteção ambiental passam a ser informações necessárias e de exigência do mercado consumidor.

2.7. Automação na agricultura

Devido aos avanços técnicos em vários campos da agricultura, o panorama mundial para a automação das atividades agrícolas é bastante favorável. A automação possui um amplo potencial de aplicação em várias áreas, contribuindo de forma fundamental para assegurar a sustentabilidade no processo produtivo e também para fomentar o desenvolvimento econômico e social.

No desenvolvimento de um sistema automatizado deve ser considerado o tamanho do equipamento, facilitando acesso, a coleta de dados, o transporte e a instalação do equipamento. Atualmente o mercado oferece uma série de “*data loggers*” portáteis comercialmente disponíveis, assim como sistemas de aquisição de dados para computadores portáteis que são apropriados para uso em campo (SILVA, 2000).

Umezu e Capeli (2006) mencionam que sistemas de controle têm sido cada vez mais utilizados em máquinas e sistemas agrícolas. Atualmente, é comum encontrar sistemas de controle operando máquinas agrícola como tratores, pulverizadores e colhedoras, tornando possível a execução de tarefas de forma precisa, produtiva, eficiente e segura, porém sem a necessidade de um número grande de pessoas para efetuar a operação.

A utilização da automação na agricultura e a consequente automatização de pulverizadores são possíveis graças à utilização da eletrônica embarcada (MENEZES; MARTINS, 2009). Para Saraiva (2006), a eletrônica embarcada na agricultura é representada pelo uso em máquinas agrícolas de sensores, atuadores, computadores de bordo, softwares e sistemas de informações geográficas via satélite (GPS). Seu objetivo é monitorar a operação das máquinas, realizar o controle automático e registrar dados para análise posterior.

As vantagens do uso da eletrônica embarcada são melhoria da qualidade da produção, redução das perdas e desgastes, ajuda no planejamento do negócio e na proteção ao meio ambiente. Scarlett (2001) mencionou que a evolução do sistema de controle em tratores poderia aumentar a eficiência operacional do trator de 15 a 20 %, obtendo melhoras na eficiência operacional e qualidade do trabalho produzido, reduções na carga de trabalho imposta ao operador e, consequentemente, sua fadiga.

Os pulverizadores agrícolas sofreram transformações nos últimos anos que marcaram seu constante desenvolvimento, como exemplo aqueles equipados com comandos eletrônicos e Sistema de Posicionamento Global – GPS. Para Antuniassi e Baio (2004), o monitoramento e controle de equipamentos ligados ao setor agrícola têm avançado rapidamente através do uso de sistemas eletrônicos, causando um efeito positivo em termos operacionais e gerenciais.

Batte e Ehsani (2006) avaliaram o emprego de sistema automático de controle de precisão em pulverização usando um sistema de posicionamento global RTK (*real-time kinematic*) para fornecer orientação do pulverizador e controle individual das pontas de pulverização. Segundo estes autores, este sistema tem uma promessa substancial em reduzir a sobreposição de aplicação, permitindo a economia de produtos químicos, de combustível, e do tempo durante o processo de aplicação.

Doruchowsky et al. (2009) trabalharam em um sistema de aplicação dependente ambientalmente (EDAS) e obtiveram, através do uso de anemômetro ultrassônico, associado a um sistema de posicionamento global diferencial em um pulverizador hidropneumático, resultados positivos para ajustes em tempo real dos parâmetros de aplicação.

Balsari et al. (2009), trabalhando com um sistema de identificação da cultura (CIS) em pomares de maçã, utilizaram sensores ultrassônicos montados em um pulverizador hidropneumático, juntamente com o software CIS desenvolvido, para adaptar o volume de aplicação às características da vegetação e, desse modo, foi possível o ajuste automático dos parâmetros do pulverizador, de acordo com as informações fornecidas pelos sensores.

O tempo de resposta é um importante fator que define a eficiência e precisão da atuação de um sistema eletrônico. No ambiente agrícola, o tempo de resposta é amplamente empregado em avaliações de aplicações de agrotóxicos, principalmente àquelas voltadas para aplicações em taxas variáveis.

Pereira (2006) avaliou, para um sistema baseado em condições climáticas, através de videografia, o tempo de resposta das comutações de três pontas em cada bico, ao longo da barra de pulverização, que correspondiam à produção de gotas muito finas, finas e médias, obtendo o valor de 49,42 centésimos de segundo como tempo de resposta médio do sistema para comutar as pontas. Este mesmo autor estudou o sistema baseado em VRT (Variable Rate Technology) onde, através da comutação de pontas, foram propostos três volumes de pulverização simulando uma aplicação em local com menor ou maior grau de intensidade de infestação do agente a ser controlado. Os resultados obtidos representaram um tempo de resposta médio do sistema de 37,47 centésimos de segundo para comutar de ponta no bico.

2.7.1. Sensores e microcontroladores

A maioria dos sistemas de automação necessita de algum tipo de parâmetro que lhes permita avaliar o estado atual do ambiente. Essa interface, geralmente, consiste de sensores que medem características do local, tais como temperatura, umidade relativa, intensidade luminosa e outros. Dependendo do tipo de sensor, o sistema terá maior ou menor precisão (SILVA et al., 2007).

Para Johann (2004), os sensores podem ser qualquer tipo de transdutor que efetue a leitura de alguma grandeza física e a transforme em um sinal elétrico, tais como sensores de temperatura, pressão, força, deslocamento, velocidade, etc. Os atuadores, por sua vez, são dispositivos capazes de transformar o sinal enviado pelo controlador em uma ação física, podendo-se exemplificar os motores, bobinas solenóides, resistências, etc. Quanto aos demais dispositivos de entrada e saída de dados, estes geralmente são circuitos eletrônicos dedicados a efetuar algum tipo de leitura ou atuação, ou outro controlador ou microcomputador externo.

Segundo Dargier e Poellabauer (2010), um sensor é um tipo de transdutor que converte energia no mundo físico em energia eléctrica que podem ser passadas para um sistema de computação ou um controlador. Um exemplo dos passos realizados por uma tarefa de sensoriamento (ou aquisição de dados) é mostrado na Figura 1.

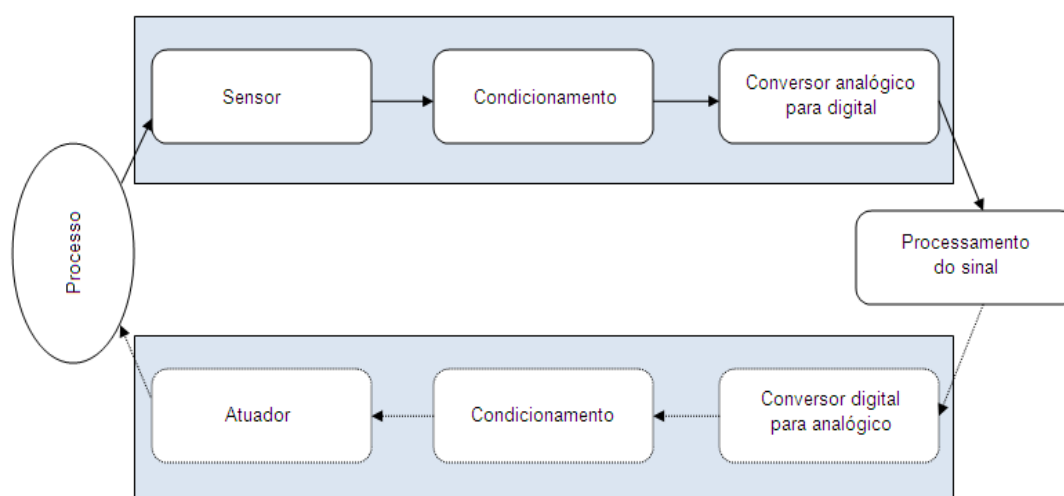


Figura 1 - Aquisição de dados e atuação (DARGIER; POELLABAUER, 2010).

Os sinais elétricos resultantes frequentemente não estão prontos para imediato processamento, consequentemente eles passam por um estágio de condicionamento de sinal. Aqui, uma variedade de operações pode ser aplicada ao sinal do sensor para prepará-lo para posterior utilização (DARGIER; POELLABAUER, 2010).

Muitas redes de sensores também incluem atuadores que permitem controlar o mundo físico. Por exemplo, um atuador pode ser uma válvula de

controle de fluxo de água quente, um motor que abre ou fecha uma porta ou uma janela, ou uma bomba que controla a quantidade de combustível injetado no motor. Tal sensor ou atuador assume o comando do dispositivo de processamento (controlador) e transforma esses comandos em sinal de entrada para o atuador, que interage com um processo físico, formando um circuito fechado (Figura 1) (DARGIER; POELLABAUER, 2010).

Na agricultura, sensores são adaptados a tratores, pulverizadores, aviões agrícolas a fim de monitorar e fornecer informações úteis, como fatores meteorológicos, heterogeneidade do solo, dados sobre diferentes culturas e plantas daninhas (REYNALDO, 2009). Chen (2010) afirma que para cumprir plenamente os requisitos de tratamentos eficazes e eficientes em diferentes culturas, é necessário desenvolver sistemas de aplicação inteligentes controlados por sensores, que ofereçam sistemas de pulverização de agrotóxicos de forma mais econômica, precisa, oportuna e ambientalmente sustentável, com envolvimento humano mínimo antes, durante e após as aplicações.

Vários tipos de sensores vêm sendo utilizados em experimentos nas áreas agrícolas. Um exemplo é o sensor de temperatura e umidade relativa do ar HMP50 da Vaisala. Este sensor apresenta bom desempenho de medição através de uma simples e pequena sonda. Béziat et al. (2009) utilizaram este sensor para medir o perfil de temperatura e umidade relativa no ambiente 50 e 150 cm acima do solo durante suas pesquisas de balanço de carbono em sucessão de culturas agrícolas na região sudoeste da França.

Para Wang et al. (2006), outro tipo de sensor que está em fase inicial de emprego no ambiente agrícola é aquele que usa tecnologia *wireless* para sua comunicação. Esta tecnologia oferece flexibilidade quase ilimitada para a instalação dos sensores, além de reduzir a complexidade e os custos de manutenção. Este mesmo autor exemplifica o emprego desta tecnologia na agricultura para monitoramento meteorológico onde foram instalados sessenta e cinco sensores *wireless* em uma área de um acre para informar, de maneira remota, a temperatura, umidade relativa e intensidade da luz solar, diretamente a uma unidade processadora a cada cinco minutos. Deste modo, o proprietário pode facilmente monitorar cada área da cultura em tempo real para evitar a

geada, promover o gerenciamento da irrigação, determinar a aplicação de fertilizantes e organizar cronograma de colheita.

Para Fontes e Cagnon (2002), um dos fatores que geralmente influenciam na tomada de decisão, quando se opta pela automação de processos agrícolas, está relacionado com a disponibilidade de sensores que atendam às necessidades de projeto, bem como de sistemas de integração das informações provenientes dos mesmos, de forma que a relação custo/benefício se mantenha dentro de limites aceitáveis.

O emprego de sistemas microcontrolados em experimentos no ambiente agrícola acompanha o desenvolvimento deste setor, onde a automatização é muitas vezes uma alternativa de avanço tecnológico. Os benefícios incluem aumento de produtividade e qualidade do produto agrícola, em conjunto com a preservação ambiental.

Os microcontroladores (μC 's) são computadores digitais capazes de realizarem operações em sequência sem a intervenção humana. Sua programação segue uma lista de instruções que compõe uma linguagem utilizada, por exemplo, Assembly, C ou Java. Em um microcontrolador podemos encontrar memória, Unidade Central de Processamento (CPU), entradas e saídas, sendo que alguns ainda possuem periféricos como conversores analógico-digital (A/D) e digital-analógico (D/A) (ANGNES, 2003).

Os microcontroladores permitem que sejam gravados em seu sistema rotinas de programas desenvolvidos externamente em aplicativos próprios. Através destes programas, são implementadas as funções do microcontrolador em cada circuito. O código fonte do programa, ou seja, a escrita do programa precisa passar por um compilador, o compilador irá traduzir cada linha digitada em linguagem de máquina, para que o microcontrolador possa ser gravado (ANGNES, 2003).

A grande vantagem dos microcontroladores é sua funcionalidade, uma vez que possuem todos os periféricos necessários para que possam ser usados inseridos em um único chip, reduzindo custos em projetos no qual são empregados, uma vez que descartam o emprego de componentes necessários, por exemplo, em microprocessadores. Ainda, por possuírem um programa

interno, permitem que o projeto microcontrolado sofra mudança na sua estrutura de programação rapidamente.

Para Palmieri (2009), o sistema automatizado deve fazer a leitura do sinal elétrico do sensor e enviá-la a um dispositivo de memória. Desse modo é de fundamental importância o uso de um microcontrolador para desempenhar esse papel.

Através de um microcontrolador, é possível realizar controle de máquinas e equipamentos com grande diversidade de aplicações e, por isso, a quantidade de microcontroladores desenvolvidos para um modelo projetado é bastante grande, havendo a diluição de grande parte do investimento de desenvolvimento, que por sua vez torna o componente bastante atrativo em termos de custo (SENAI, 2006).

A utilização de microcontroladores é uma realidade no setor agrícola. Kamunda e Carelse (2007) desenvolveram e construíram um sistema simples, robusto e confiável, baseado em um microcontrolador PIC16F876, para monitoramento das variáveis meteorológicas, exibindo os dados em tempo real e armazenando os valores para posterior recuperação. Wan Ishak et al. (2011) utilizaram um microcontrolador PIC no desenvolvimento de um sistema de controle automático em tempo real de temperatura e umidade relativa em casa de vegetação. Os dados de temperatura e umidade eram enviados para o microcontrolador como um sinal de entrada e convertidos para forma digital através de um conversor analógico-digital presente no microcontrolador. Sinais de saída eram então enviados para ativar o atuador durante a automação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área experimental e equipamentos

O experimento foi conduzido no Laboratório de Aplicação de Defensivos Agrícolas (LADA) do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - Minas Gerais. O clima da região é classificado como tropical de altitude, com verões chuvosos e invernos frios e secos, sendo classificado de acordo com os critérios propostos por Köppen como Cwa (KÖPPEN, 1948).

Para realização do experimento foi utilizado um pulverizador pneumático, marca Berthoud, modelo AF 427, equipado com ventilador radial, acoplado a um trator John Deere, modelo 5705, e potência nominal de 62,5 kW.

3.2. Curva característica do ventilador do pulverizador

Considerando que a corrente de ar é responsável pelo fracionamento do líquido em gotas, um diafragma foi projetado através do programa computacional Computer Aided Design (CAD) no intuito de controlar a entrada de ar no ventilador em resposta ao movimento de rotação de um atuador a ele conectado. O mesmo foi construído utilizando chapas de aço galvanizadas e fixado na entrada de ar do ventilador do pulverizador (Figura 2).

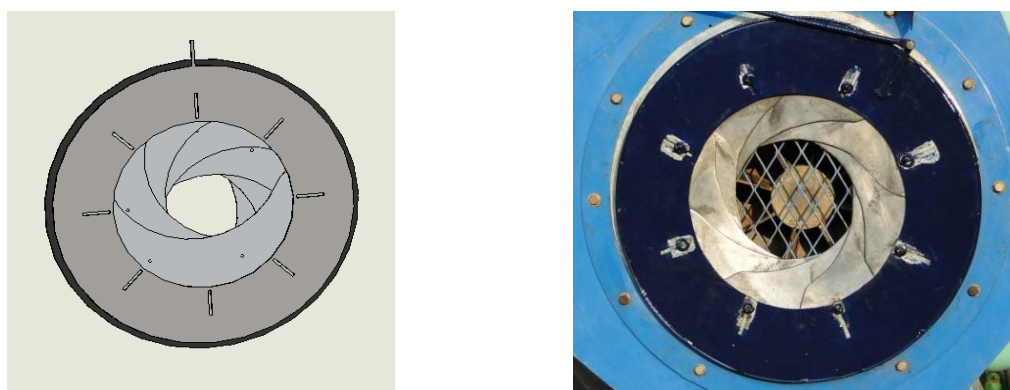


Figura 2 - Representação do diafragma utilizado no experimento.

O movimento de abrir e fechar o diafragma resulta em alteração da vazão de ar no bocal do canhão do pulverizador. Buscou-se, com a determinação da vazão de ar, obter uma associação do grau de abertura do diafragma com os respectivos parâmetros da aplicação.

Foram determinadas as velocidades e vazões de ar para cada abertura do diafragma, a partir do mesmo totalmente aberto, 0,27 m de diâmetro, até a abertura de 0,081 m de diâmetro, totalizando oito aberturas (Quadro 1).

Quadro 1 - Diâmetros referentes às aberturas do diafragma

Diâmetro das aberturas (m)	Diâmetro da abertura do diafragma (%)
0,270	100
0,243	90
0,216	80
0,189	70
0,162	60
0,162	50
0,108	40
0,081	30

Para determinar da vazão de ar fornecida pelo ventilador, foi utilizado o método americano estabelecido pela Air Moving and Conditions Association (AMCA). Por este método, foi construído um túnel de vento dotado de um tubo homogeneizador de fluxo de ar e um controlador de vazão através de uma válvula cônica na saída do duto (Figura 3).

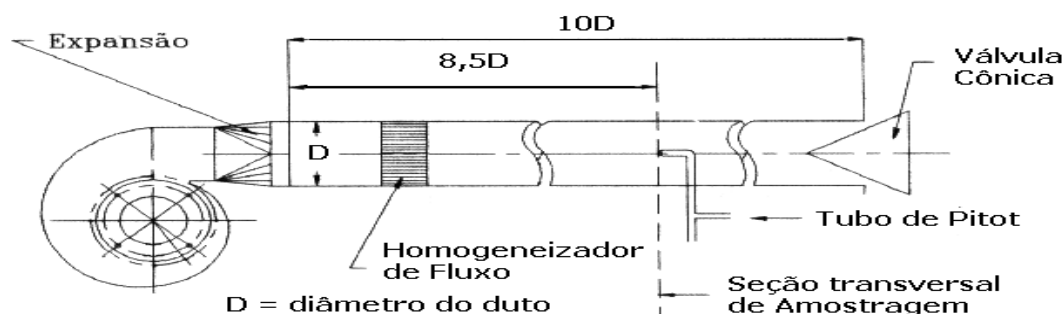


Figura 3 - Duto de ar para testes em ventiladores centrífugos (MESQUITA et al., 1985).

Para a determinação da vazão de ar, o duto foi acoplado ao bocal do canhão do pulverizador (Figura 4). Neste duto, foi instalado um Tubo de Pitot para determinação das pressões dinâmica e estática. A pressão dinâmica ou cinética (p_{cin}) foi utilizada para o cálculo da velocidade do fluido. A pressão estática, juntamente com os valores estabelecidos de vazão de ar, foi utilizada para a determinação da curva característica do ventilador.



Figura 4 - Pulverizador pneumático e tubo homogeneizador.

Para a determinação do número de pontos de leitura de pressão cinética, na seção transversal do duto circular, foi necessário obter o diâmetro do duto, o que fornece, segundo Mesquita et al. (1985), uma relação direta com o número necessário de pontos de leitura. Na Tabela 1 encontram-se os coeficientes de posicionamento do Tubo de Pitot sugeridos por Mesquita et al. (1985).

Tabela 1 - Coeficiente de posicionamento do Tubo de Pitot (ϕ) para seis pontos de amostragem

Amostras	Coeficiente de posicionamento do Tubo de Pitot (ϕ)
1	Centro
2	0,316
3	0,548
4	0,707
5	0,837
6	0,961

Fonte: Mesquita et al. (1985)

Após a seleção do tubo homogeneizador determinou-se a distância do centro do tubo ao ponto de posicionamento do Tubo de Pitot (Equação 1).

$$L_n = \phi r \quad (1)$$

em que

L_n = distância do centro do duto ao ponto de posicionamento do Tubo de Pitot (mm);

ϕ = coeficiente de posicionamento do Tubo de Pitot;

r = raio do tubo homogeneizador (mm);

As leituras da pressão cinética foram realizadas, primeiramente, com a válvula cônica bloqueando totalmente o bocal de saída. Posteriormente, novas leituras foram realizadas para afastamentos graduais da válvula cônica, totalizando seis leituras, sendo a última com a válvula totalmente aberta (Quadro 2).

Quadro 2 - Posições da válvula cônica em relação ao bocal de saída do duto

Posição	Abertura
1	Totalmente fechada
2	0,03 m da borda
3	0,06 m da borda
4	0,09 m da borda
5	0,12 m da borda
6	Totalmente aberta

Com a pressão cinética obtida em pontos da seção transversal, a velocidade em determinado ponto do duto pode ser obtida pela Equação 2.

$$V = 4,04\sqrt{P_{cin}} \quad (2)$$

em que

V = velocidade do ar (m s^{-1});

P_{cin} = pressão cinética (mmca).

Desse modo, foi obtida a velocidade em cada ponto de leitura no duto. Segundo Mesquita et al. (1985), com a velocidade do fluido atingindo seu valor máximo no centro da tubulação, fez-se necessário o cálculo da velocidade média na seção (Equação 3) para, posteriormente, se calcular a vazão média (Equação 4).

$$V_{med} = 1/n \sum_{i=1}^n V_i \quad (3)$$

em que

V_{med} = velocidade média na seção (m s^{-1});

V_i = velocidade em cada ponto (m s^{-1}); e

n = número de ponto em que a velocidade é determinada.

$$Q_{med} = V_{med} A \quad (4)$$

em que

Q_{med} = vazão média ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$);

V_{med} = velocidade média na seção (m s^{-1}); e

A = área da seção (m^2).

Para a determinação da vazão de ar, o pulverizador foi acoplado a um trator que operou com rotação de $219,91 \text{ rad s}^{-1}$ (2100 rpm) no contagiros, produzindo $56,55 \text{ rad s}^{-1}$ (540 rpm) na Tomada de Potência (TDP), que correspondeu a uma rotação média de $408,42 \text{ rad s}^{-1}$ (3900 rpm) do eixo do ventilador. Para a verificação da rotação do eixo da TDP foram realizadas leituras,

para cada tomada de pressão, da rotação do eixo do ventilador com auxílio de um tacômetro (modelo TDR-100, Instrutherm, São Paulo, SP, Brasil). Foram realizadas quatro repetições para tomada de vazão de ar em cada abertura do diafragma. A partir dos valores de vazão e pressão estática foi possível determinar a curva característica do ventilador.

3.3. Potência exigida

A potência na TDP para o acionamento do ventilador foi determinada para as oito aberturas do diafragma. As leituras foram realizadas com o pulverizador em situação estática, sem acionamento da bomba centrífuga.

A determinação da potência foi realizada com o auxílio de um torquímetro eletrônico marca Omega modelo TQ501-10K com torque de 1130 mN e rotação de $62,83 \text{ rad s}^{-1}$ (600 rpm) (Figura 5). O torquímetro esteve ligado ao sistema de aquisição de dados Spider8, da HBM, para o condicionamento do sinal, e este a um *laptop* para o armazenamento dos dados. O sistema operou sobre a frequência de 1200 Hz, que forneceu a coleta de 6000 dados de torque a cada 30 segundos. Para maior precisão, os dois mil dados inferiores e os dois mil dados superiores foram descartados. O controle dos canais e os tratamentos iniciais dos dados feitos pelo sistema de aquisição foi realizado usando o *software* CATMAN.



Figura 5 - Transdutor de torque entre o trator e o pulverizador e equipamentos de aquisição dos dados.

Através dos valores de torque obtidos a potência exigida para o acionamento do ventilador foi calculada usando a Equação 5.

$$P = \frac{2\pi \times n \times T}{60000} \quad (5)$$

em que

P = potência exigida na TDP (kW);

n = rotação do eixo cardan (rpm); e

T = torque no eixo cardan (mN).

O experimento foi montado no delineamento inteiramente casualizado, sendo oito aberturas do diafragma com quatro repetições, totalizando trinta e duas unidades experimentais. A variável potência exigida na TDP foi submetida à análise de variância de regressão.

3.4. Temperatura do ar na saída do ventilador

Para medição da temperatura do ar foi utilizado um termopar modelo DM6802B. Para cada avaliação foi determinada a temperatura ambiente e na saída do bocal do pulverizador. Foram realizadas quatro repetições de leitura da temperatura para cada condição de abertura do diafragma.

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado. Para as aberturas do diafragma de 100, 90, 80, 70, 60 e 50 % foi tomada a temperatura do ar de saída a partir das temperaturas ambientes de 17, 19, 21, 23, 25 e 27°C, com quatro repetições, totalizando vinte e quatro unidades experimentais para cada posição do diafragma, sendo a umidade relativa do ambiente obtida a partir de um psicrômetro não aspirado. As vazões de ar correspondentes às aberturas de 30 e 40 % do diafragma foram descartadas das análises, pois, em testes preliminares, foi verificado que as mesmas não promoviam a atomização do líquido.

Para cada posição foi gerado um modelo de regressão linear da relação temperatura ambiente e na saída do canhão.

3.5. Condições meteorológicas

A pressão exercida pelo vapor d'água no ar em condições de saturação (e_s) depende da temperatura do ar, podendo ser obtida pela equação proposta por Tetens (ZOLNIER, 1994) (Equação 6).

$$e_s = 6,108 \times 10^{\frac{7,5T}{237,3+T}} \quad (6)$$

em que

e_s = pressão de saturação de vapor d'água no ar, hPa

T = temperatura do ar, °C.

A partir dos valores medidos de umidade relativa do ar e calculados de e_s , determinou-se a pressão parcial de vapor d'água (e_a) (Equação 7).

$$e_a = \frac{UR\% \times e_s}{100} \quad (7)$$

em que

e_a = pressão parcial exercida pelo vapor d'água no ar, hPa

UR = umidade relativa do ar, %.

O déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}) foi obtido pela diferença entre a pressão de saturação e a pressão atual de vapor d'água no ar (Equação 8).

$$DPV_{ar} = e_s - e_a \quad (8)$$

em que

DPV_{ar} = déficit da pressão de saturação do vapor d'água no ar, hPa.

As pulverizações foram realizadas para três faixas de capacidade evaporativa do ar, desde que a velocidade do vento estivesse entre 0,5 e 1 m s⁻¹ (Quadro 3). O monitoramento da velocidade do vento foi realizado com auxílio de um anemômetro digital portátil (modelo AD-250, Instrutherm, São Paulo, SP,

Brasil) instalado fora do trator, para que a velocidade deste não interferisse nas leituras.

Quadro 3 – Classificação das condições evaporativas para as aplicações

Capacidade evaporativa do ar	Intervalos de DPV_{ar} (hPa)
Baixa	$DPV_{ar} \leq 7,01$
Média	$7,01 < DPV_{ar} \leq 12,67$
Alta	$12,67 < DPV_{ar} \leq 30,00$
Muito alta (não recomendada)	$DPV_{ar} > 30,00$

A partir da análise dos resultados dos parâmetros técnicos obtidos na aplicação, o propósito foi o estabelecimento de três graus de abertura do diafragma, conforme o padrão de gotas que atendesse às necessidades dos intervalos de condição meteorológica estabelecidos.

3.6. Sistema eletromecânico para controle do diafragma

Para o controle da abertura do diafragma, optou-se pela montagem de um sistema eletromecânico que proporcionasse a abertura desejada mediante a atuação de um motor elétrico, procedimento considerado base para a posterior automatização do equipamento.

O sistema eletromecânico constituiu-se de um motor elétrico motorreductor tipo CEP de 12V e 7,5A, com torque de 25 a 48 mN e rotação máxima de 10,47 rad s^{-1} (100 rpm), montado em uma estrutura do tipo cantoneira e fixado na estrutura do pulverizador (Figura 6).



Figura 6 - Sistema eletromecânico para movimentação do diafragma. (a) motor elétrico, (b) cantoneira, (c) parafuso de potência, (d) porca, (e) tirante de ferro.

3.7. Determinação dos parâmetros técnicos da aplicação

As análises dos parâmetros técnicos de aplicação foram realizadas a partir das amostras das pulverizações, usando etiquetas de papéis hidrossensíveis. As etiquetas foram dispostas a 1,5 m do bocal do canhão do pulverizador e a cada 1,5 metros entre si, em uma faixa de 30 metros, totalizando 20 amostras por repetição (Figura 7).



Figura 7 - Disposição das etiquetas hidrossensíveis na faixa de aplicação.

Após a fixação da velocidade o conjunto trator-pulverizador foi posicionado a uma distância de 1,5 metros da fileira de etiquetas. Uma bateria de 12 volts foi utilizada com objetivo de gerar a carga necessária para alimentar o motor, rotacionando seu eixo e assim o parafuso de potência, até atingir a abertura desejada no diafragma.

Antes do início de todas as aplicações a velocidade do vento era monitorada e as pulverizações foram realizadas quando a velocidade do vento estava dentro da faixa proposta. Adotou-se um tempo de espera de 20 segundos para estabilização da vazão de líquido. Após a normalização dava-se início à aplicação (Figura 8).



Figura 8 - Aplicação pneumática na área experimental.

As aplicações foram realizadas com dois bicos de quatro orifícios de 4,0 mm diâmetro e com pastilhas número 20 e 30, 2,0 e 3,0 mm de diâmetro, respectivamente, no canhão primário e um bico de quatro orifícios de 2,0 mm com pastilha 12, 2,0 mm de diâmetro, no canhão secundário, o que proporcionou uma vazão média de líquido de 4 L min^{-1} . As aplicações foram realizadas dentro dos intervalos de DPV_{ar} propostos. Após a aplicação, as etiquetas foram recolhidas e levadas para o laboratório visando a determinação dos parâmetros diâmetro da mediana volumétrica, densidade de gotas, percentagem de cobertura, coeficiente de homogeneidade e amplitude relativa.

3.7.1. Diâmetro da mediana volumétrica

Foram utilizadas etiquetas de papel sensível à água, de acordo com metodologia apresentada por Wolf e Froberg (2002). Após a aplicação, as etiquetas foram fotografadas e analisadas através do programa "Image Tool versão 3.0".

Houve uma correção do diâmetro das gotas em função do coeficiente de espalhamento indicado para papel hidrossensível proposta por Chaim et al. (1999) (Equação 9).

$$F(D) = 0,74057 + 0,0001010399D + 0,2024884 \ln(D) \quad (9)$$

em que

F = fator de espalhamento;

D = diâmetro limite de cada classe de tamanho (μm).

3.7.2. Densidade de gotas

Após a pulverização, as etiquetas foram levadas para o laboratório para a determinação da densidade de gotas através do software “Image Tool versão 3.0”. A recomendação mínima do número de impactos para um dado produto aplicado foi descrita por Barthelemy et al. (1990) (Tabela 2).

Tabela 2 – Recomendações mínimas para as populações de gotas

Produto	Tratamento	Volume de calda (L ha ⁻¹)	Impactos (gota cm ⁻²)
Herbicidas	Pré-plantio	200 – 500	20 – 40
	Pré-emergência	150 – 300	20 – 30
	Pós-emergência	150 – 300	30 – 40
Inseticidas		300 – 400	20 – 30
Fungicidas		300 – 400	50 – 70

Fonte: Barthelemy et al. (1990)

A determinação da faixa útil de aplicação foi realizada considerando cada condição meteorológica e para cada vazão de ar. Sua avaliação foi feita pela determinação da densidade populacional para os tratamentos, sendo o final da faixa útil obtido a partir do ponto em que não se obteve o número de impactos necessários recomendados por tratamento, segundo Barthelemy et al. (1990).

3.7.3. Cobertura

A cobertura do alvo pela calda corresponde à área ocupada pelas gotas após uma aplicação. Assim, as etiquetas hidrossensíveis foram analisadas após a aplicação para determinação da área coberta pelas gotas, utilizando o programa para análise de gotas “Image Tool versão 3.0”.

A percentagem de cobertura foi obtida pela relação entre a área coberta pelas gotas e a área total das etiquetas.

3.7.4. Coeficiente de homogeneidade

O coeficiente de homogeneidade foi obtido pela relação entre o diâmetro da mediana volumétrica e diâmetro da mediana numérica (Equação 10). Esta última, caracterizando-se como o diâmetro da gota que separa a população de gotas, ordenadas de menor a maior, em duas metades iguais em número de gotas.

$$CH = \frac{DMV}{DMN} \quad (10)$$

em que

CH = coeficiente de homogeneidade;

DMV = diâmetro da mediana volumétrica, μm ;

DMN = diâmetro da mediana numérica, μm .

Este parâmetro avalia a variabilidade do diâmetro das gotas em uma população, onde, quanto mais próximo a 1 for o valor de CH, mais homogêneo é o espectro de gotas desta população.

3.7.5. Amplitude relativa

A amplitude relativa, assim como o coeficiente de homogeneidade, fornece a variação do diâmetro das gotas. Valores de amplitude relativa próximos de zero, indicam uma população de gotas homogênea (Equação 11).

$$SPAN = \frac{D_{v0,9} - D_{v0,1}}{D_{v0,5}} \quad (11)$$

em que

SPAN = amplitude relativa;

$D_{v0,9}$ = diâmetro de gota tal que 90 % do volume pulverizado é constituído de gotas menores que este valor, μm ;

$D_{v0,1}$ = diâmetro de gota tal que 10 % do volume pulverizado é constituído de gotas menores que este valor, μm ;

$D_{v0,5}$ = diâmetro de gota tal que 50 % do volume pulverizado é constituído de gotas menores que este valor, μm .

3.8. Análise estatística

Para a análise estatística o trabalho foi dividido em três experimentos individuais, sendo que cada faixa de capacidade evaporativa do ar representou um experimento independente.

Cada experimento foi montado no delineamento inteiramente casualizado (DIC) onde o primeiro fator avaliado, vazão de ar, foi composto de seis níveis equivalentes às aberturas do diafragma de 100, 90, 80, 70, 60 e 50 % e o segundo fator, distância em relação ao pulverizador, composto de 20 níveis (1,5; 3,0; 4,5;...; 30,0 metros).

Os dados foram submetidos à análise de variância e de regressão para estabelecimento de modelos para as variáveis estudadas. Os critérios adotados para a escolha dos modelos foram: regressão significativa (teste F), critério *Stepwise* para eliminação de coeficientes não significativos (teste t) e coeficiente de determinação (R^2). Os resultados foram submetidos à análise de superfície de resposta por meio do programa MINITAB® Release 14 versão demo.

3.9. Automatização do pulverizador pneumático

3.9.1. Sensor de temperatura e umidade relativa do ar

O sensor de temperatura e umidade relativa do ar era do tipo analógico (modelo Humitter 50Y, Vaisala, Woburn, MA, USA), possuindo um sinal de tensão elétrica proporcional às variações dos elementos meteorológicos. Este sensor possui um baixo consumo de energia e reduzido tempo de resposta. Apresenta precisão de $\pm 3\%$ para medição da umidade relativa do ar de 0 a 100 % e de $\pm 0,6\text{ }^\circ\text{C}$ para faixa de temperatura de -10 a 60°C . Sua tensão de alimentação está compreendida entre 7 a 28 VCC, com consumo de 2 mA (VAISALA, 2011) (Figura 9).



Figura 9 - Sensor de umidade relativa e temperatura do ar modelo Humitter 50Y (VAISALA, 2011).

Os sinais de tensão elétrica, denominados de Sinal_Tar e Sinal_UR, referentes às medições de temperatura e umidade relativa do ar, respectivamente, são utilizados pelo microcontrolador nas Equações 12 e 13.

$$Tar = -40 + 100(5/1023)Sinal_Tar \quad (12)$$

$$UR = 100(5/1023)Sinal_UR \quad (13)$$

3.9.2. Microcontrolador

O microcontrolador era constituído, basicamente, de um processador, memória, periféricos de entrada e saída, como conversores analógico/digital e conversores digital/analógico.

O microcontrolador Arduino Duemilanove foi utilizado para processar dados providos do sensor. É um dispositivo que utiliza o microcontrolador da ATMEL, ATmega328. Apresenta 14 portas de entradas/saídas, 6 entradas analógicas e comunicação USB. Possui uma tensão elétrica de alimentação externa compreendida entre 7 a 12V, com limites críticos de 6 a 20V, corrente contínua de 40mA, podendo também ser alimentado pela conexão USB (ARDUINO, 2011).

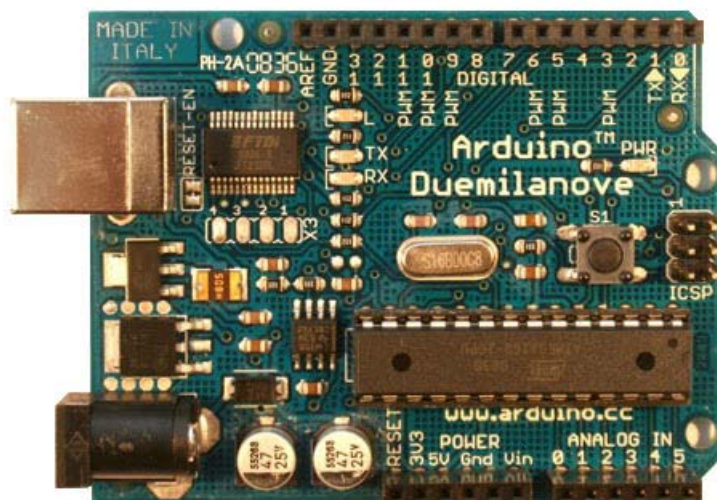


Figura 10 - Microcontrolador Arduino Duemilanove (ARDUINO, 2011).

3.9.3. Sistema eletrônico e algoritmo de controle

O sistema eletrônico foi composto pelo sensor conjugado de temperatura e umidade relativa do ar, um microcontrolador, uma placa controladora de relés, três sensores de posição e um conjunto composto de três LEDs, com a aquisição de dados realizada via comunicação USB por meio de um *laptop* (Figura 11).

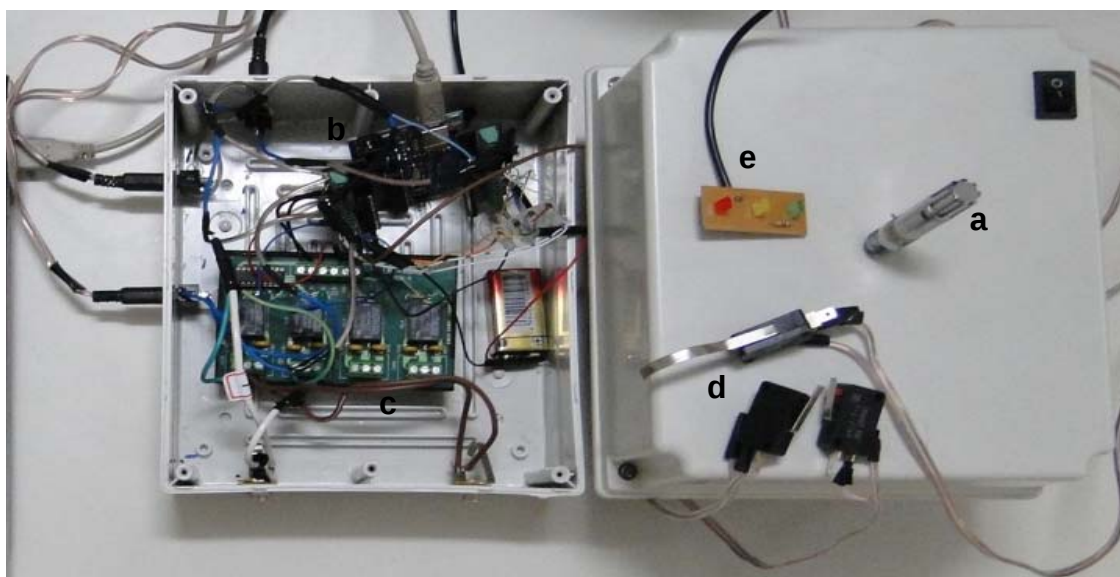


Figura 11 - Sistema eletrônico e seus componentes. (a) sensor, (b) microcontrolador, (c) placa controladora de relés, (d) sensores de posição, (e) conjunto de LEDs.

A placa controladora de relés do sistema eletrônico fez a interface entre o microcontrolador e o atuador incluído no sistema eletromecânico, o qual aciona o

diafragma. Essa placa é a responsável pela alteração da polaridade da ligação do motor na fonte, alterando o sentido de rotação do motor e, conseqüentemente, do parafuso de potência, possibilitando o movimento de abertura e fechamento do diafragma.

Os sensores de posição, que são os componentes do sistema eletrônico responsáveis pelo posicionamento do diafragma, foram adaptados à estrutura eletromecânica e conectados ao microcontrolador (Figura 12).



Figura 12 - Sensores de posição instalados à estrutura eletromecânica.

O algoritmo foi elaborado para interpretar os sinais de temperatura e umidade relativa do ar medidas pelo sensor conjugado e, conseqüentemente, calcular o déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar. Através do sistema eletromecânico desenvolvido, coube ao sistema eletrônico posicionar automaticamente o diafragma, adequando a vazão de ar do ventilador a uma dada condição meteorológica (Quadro 4).

Quadro 4 - Condições estabelecidas para os déficits de pressão de vapor e resposta do diafragma

Abertura do diafragma (%)	Intervalo de DPV_{ar} (hPa)
100	$DPV_{ar} \leq 7,01$
70	$7,01 < DPV_{ar} \leq 12,67$
50	$12,67 < DPV_{ar} \leq 30,00$
Sinalização	$DPV_{ar} > 30,00$

O algoritmo faz a seleção do posicionamento do diafragma e determina a interrupção da aplicação, conforme uma limitação imposta por um valor de DPV_{ar} maior que 30,00 hPa, isto é, o algoritmo não age atuando diretamente no sistema

eletromecânico, ele envia automaticamente um comando para que o operador paralise a aplicação, cabendo ao mesmo a iniciativa da tomada de decisão.

O operador tem a função de receber e interpretar a informação da condição em tempo real através de um sistema de controle de LEDs que estão conectados ao microcontrolador. Este sistema de controle é composto por LEDs de cores diferentes, um verde, um amarelo e um vermelho, cada um com sua ação representativa (Figura 13).

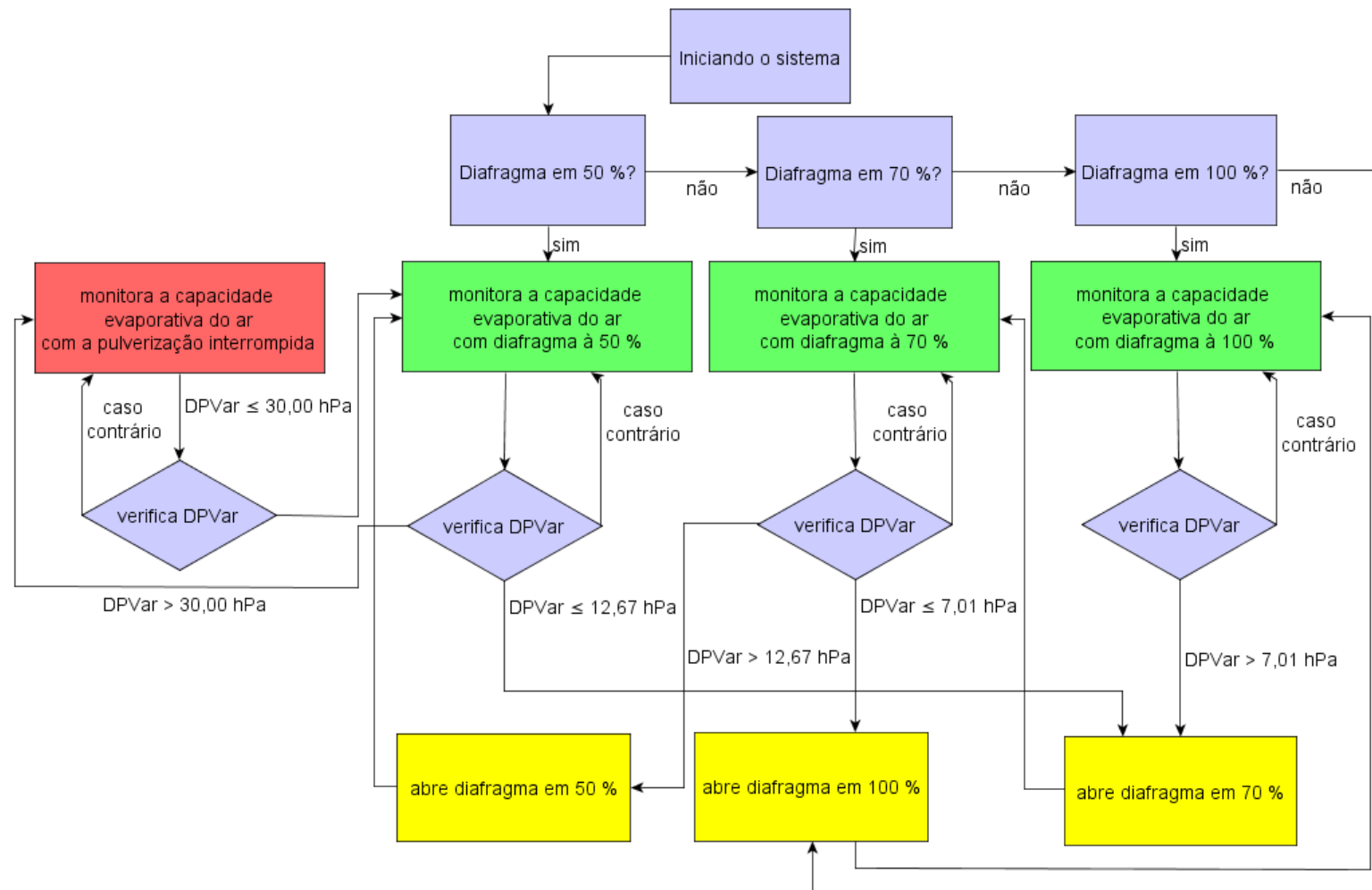


Figura 13 - Diagrama de funcionamento do algoritmo.

O algoritmo elaborado contém os comandos para cada movimento do diafragma e direciona aos LEDs a via de interpretação para estes movimentos, isto é: o LED verde pisca por dez segundos quando o sistema é inicializado e permanece ligado caso o diafragma já se encontre na correta posição, simultaneamente informando ao operador que o sistema eletrônico está em constante processo de monitoramento da demanda evaporativa do ar. Caso o diafragma se encontre em uma posição não conhecida pelo algoritmo, ele é automaticamente movido ao ponto inicial (máxima abertura), porém, não sendo essa a posição desejada, o microcontrolador interpreta a informação e move o diafragma para a abertura correta.

Quando o DPV_{ar} é alterado e o diafragma está prestes a se movimentar para uma nova posição, o LED verde é desligado e o amarelo pisca por dez segundos, como contagem regressiva do movimento do diafragma que está para acontecer.

Ao iniciar o movimento, o LED amarelo permanece ligado, informando que o diafragma está deslocando-se para uma nova posição. O diafragma atingindo esta posição, o LED amarelo é desligado e o verde é novamente aceso, indicando que o diafragma atingiu a abertura desejada e o monitoramento contínuo é novamente inicializado.

A sinalização descrita no Quadro 4 refere-se à condição limite de DPV_{ar} . Neste caso, o LED vermelho é acionado, indicando que a aplicação deve ser interrompida. O LED vermelho continuará aceso, monitorando as condições do ambiente, até que uma nova ordem de posicionamento seja enviada pelo microcontrolador.

3.9.4. Avaliação do tempo de resposta de posicionamento do diafragma

O tempo de resposta foi estudado no intuito de se verificar a precisão com que o sistema eletrônico e eletromecânico atuam sobre o posicionamento do diafragma.

Os déficits de pressão de vapor estudados foram obtidos através do aumento da umidade relativa do ar e do aquecimento do ambiente próximo ao sensor, este pelo uso de um aquecedor de ar. Com o estabelecimento das

condições meteorológicas desejadas, dava-se início a movimentação do diafragma.

Os componentes do tempo de resposta analisados foram baseados na ação do LEDs, onde o tempo foi estabelecido a partir do momento em que o LED amarelo começava a piscar, até o acionamento do LED verde, indicando o alcance da posição desejada. As análises dos componentes foram feitas através das informações fornecidas pelo programa responsável pela leitura dos dados, posteriormente transmitidos, via USB, do microcontrolador ao *laptop*.

Os componentes do tempo de resposta estudados foram:

Componente 1- tempo em que os sistemas eletrônico e eletromecânico levam para movimentar o diafragma da abertura de 100 até 70 %;

componente 2 - tempo em que os sistemas eletrônico eletromecânico levam para movimentar o diafragma da abertura de 70 até 50 %;

componente 3 - tempo em que os sistemas eletrônico e eletromecânico levam para movimentar o diafragma da abertura de 50 até 70 %;

componente 4 - tempo em que os sistemas eletrônico e eletromecânico levam para movimentar o diafragma da abertura de 70 até 100 %;

Foram realizadas dez repetições para a coleta dos dados dos componentes avaliados. Os resultados foram analisados através de estatística descritiva.

3.9.5. Avaliação da precisão do sistema

A cada condição meteorológica estudada foi designado uma abertura do diafragma que correspondeu a uma determinada vazão de ar. Para avaliação da precisão do sistema em posicionar o diafragma, de acordo com o estabelecido para cada intervalo de DPV_{ar} , foram realizadas novas medições da vazão de ar do ventilador do pulverizador. Procurou-se verificar a precisão do posicionamento do diafragma através dos resultados de vazão de ar coletados.

O experimento foi montado em um delineamento inteiramente casualizado onde as vazões de ar foram estudadas para cada intervalo de DPV_{ar} em 10 repetições. Previamente à execução do experimento houve um sorteio entre os tratamentos para a definição da ordem de coleta dos dados.

O trabalho foi realizado no momento em que o DPV_{ar} estava entre 7,01 e 12,67 hPa, para facilidade da execução do mesmo. No momento da coleta dos

dados o diafragma foi colocado em uma posição desconhecida pelo algoritmo, sendo que o mesmo, ao ser inicializado, movimentava o diafragma retornando-o na máxima posição, 100 % de abertura. Se a ordem estabelecida indicasse que a coleta seria na condição de menor capacidade evaporativa do ar, este valor era provocado no sensor, aumentando a umidade relativa nas suas proximidades, e, assim, o algoritmo enviava o sinal para que a abertura inicial fosse mantida.

Uma vez que a ordem de coleta indicasse para o intervalo intermediário de DPV_{ar} , o algoritmo enviava o sinal para o posicionamento na abertura de 70 %, não necessitando, nesse caso, que nenhuma ação fosse provocada no sensor. Quando a ordem de coleta indicava para a condição de alta capacidade evaporativa do ar, fez-se uso de um aquecedor de ar, para permitir simular o aumento da temperatura e reduzir a umidade relativa do ar ao redor do sensor.

Os resultados de vazão de ar obtidos em cada déficit de pressão foram submetidos à análise de variância e as médias foram comparadas utilizando-se o teste de Tuckey a 5 % de probabilidade.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Determinação da curva característica do ventilador

As curvas que traduzem a dependência entre duas grandezas chamam-se curvas características. Um exemplo que expressa a curva característica para ventiladores é aquela que mostra a dependência entre as grandezas pressão estática e vazão do ar. Deste modo, para cada posição do diafragma foi determinado a velocidade e vazão do ar de saída e, posteriormente, com os dados de pressão estática e vazão de ar, foi possível a determinação da curva característica do ventilador do pulverizador.

Os valores obtidos de pressão estática, velocidade e vazão de ar para as diferentes posições do cone são apresentados nos Quadros 5 a 12. Na Figura 14 é apresentada uma comparação dos valores obtidos de vazão de ar.

Quadro 5 - Valores de pressão estática, velocidade do ar e vazão do ar para abertura de 100 % do diafragma

Posição do Cone (m)	Pressão Estática (Pa)	Velocidade do Ar (m s^{-1})	Vazão de Ar ($\text{m}^3 \text{min}^{-1}$)
Aberto	0	27,20	51,28
0,12	91,50	26,95	50,81
0,09	236,14	26,44	49,85
0,06	541,82	25,37	47,82
0,03	1509,05	21,05	39,68
Fechado	3432,92	0	0

Quadro 6 - Valores de pressão estática, velocidade do ar e vazão do ar para abertura de 90 % do diafragma

Posição do Cone (m)	Pressão Estática (Pa)	Velocidade do Ar (m s^{-1})	Vazão de Ar ($\text{m}^3 \text{min}^{-1}$)
Aberto	0	26,63	50,20
0,12	88,46	26,17	49,33
0,09	217,41	25,70	48,45
0,06	530,83	24,81	46,77
0,03	1436,67	20,94	39,47
Fechado	3414,58	0	0

Quadro 7 - Valores de pressão estática, velocidade do ar e vazão do ar para abertura de 80 % do diafragma

Posição do Cone (m)	Pressão Estática (Pa)	Velocidade do Ar (m s^{-1})	Vazão de Ar ($\text{m}^3 \text{min}^{-1}$)
Aberto	0	26,78	50,47
0,12	95,42	26,45	49,86
0,09	241,54	26,31	49,59
0,06	521,42	25,08	47,28
0,03	1412,55	21,30	40,15
Fechado	3399,67	0	0

Quadro 8 - Valores de pressão estática, velocidade do ar e vazão do ar para abertura de 70 % do diafragma

Posição do Cone (m)	Pressão Estática (Pa)	Velocidade do Ar (m s^{-1})	Vazão de Ar ($\text{m}^3 \text{min}^{-1}$)
Aberto	0	25,97	48,94
0,12	88,85	25,49	48,04
0,09	222,71	24,89	46,91
0,06	494,45	24,41	46,01
0,03	1409,71	20,05	37,79
Fechado	3391,24	0	0

Quadro 9 - Valores de pressão estática, velocidade do ar e vazão do ar para abertura de 60 % do diafragma

Posição do Cone (m)	Pressão Estática (Pa)	Velocidade do Ar (m s^{-1})	Vazão de Ar ($\text{m}^3 \text{min}^{-1}$)
Aberto	0	23,37	44,06
0,12	74,53	23,28	43,87
0,09	168,97	22,66	42,70
0,06	389,23	21,95	41,37
0,03	1126,98	18,65	35,15
Fechado	3295,82	0	0

Quadro 10 - Valores de pressão estática, velocidade do ar e vazão do ar para abertura de 50 % do diafragma

Posição do Cone (m)	Pressão Estática (Pa)	Velocidade do Ar (m s^{-1})	Vazão de Ar ($\text{m}^3 \text{min}^{-1}$)
Aberto	0	20,67	38,97
12	57,86	20,65	38,92
9	121,80	19,82	37,36
6	274,00	19,21	36,22
3	881,13	16,60	31,30
Fechado	3152,45	0	0

Quadro 11 - Valores de pressão estática, velocidade do ar e vazão do ar para abertura de 40 % do diafragma

Posição do Cone (m)	Pressão Estática (Pa)	Velocidade do Ar (m s^{-1})	Vazão de Ar ($\text{m}^3 \text{min}^{-1}$)
Aberto	0	17,58	33,14
12	45,40	17,50	32,98
9	84,63	17,12	32,27
6	231,24	16,47	31,05
3	642,14	14,74	27,79
Fechado	2904,63	0	0

Quadro 12 - Valores de pressão estática, velocidade do ar e vazão do ar para abertura de 30 % do diafragma

Posição do Cone (m)	Pressão Estática (Pa)	Velocidade do Ar (m.s^{-1})	Vazão de Ar ($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$)
Aberto	0	14,39	27,13
0,12	31,87	13,85	26,11
0,09	59,82	13,49	25,43
0,06	133,17	13,20	24,87
0,03	442,97	11,75	22,16
Fechado	2649,66	0	0

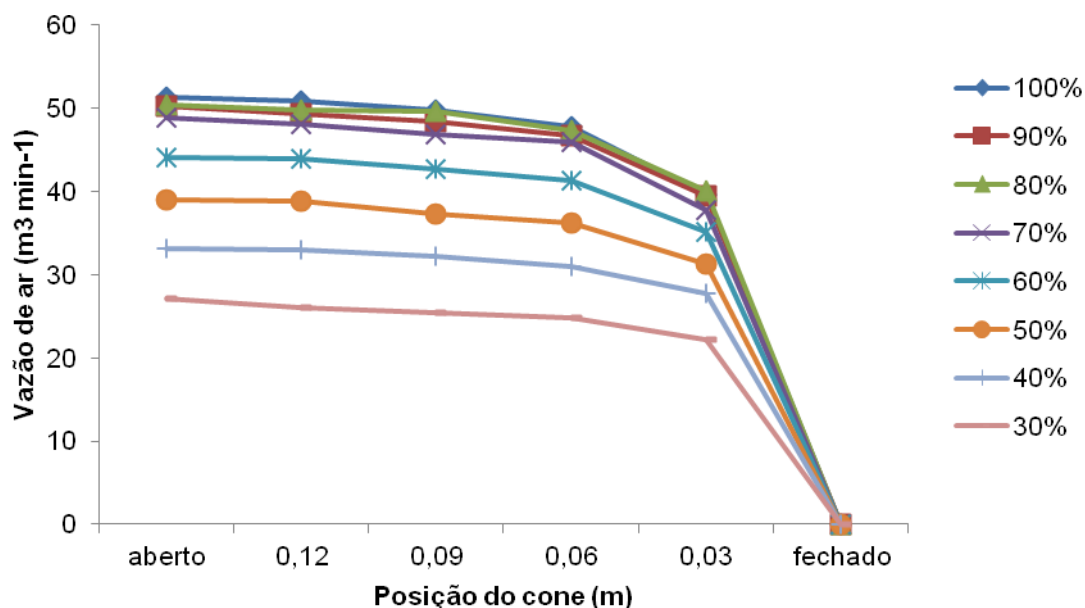


Figura 14 - Comparação dos valores obtidos de vazões de ar para as diferentes aberturas do diafragma.

Observa-se na Figura 14, uma redução dos valores de vazão de ar, à medida que se estrangulava a área de entrada de ar no ventilador pelo fechamento do diafragma. Entre as aberturas de 100 e 70 %, o fechamento do diafragma promoveu uma redução na vazão de $2,34 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ o que corresponde ao decréscimo de 4,56 %. A justificativa para este comportamento é uma tentativa do sistema em compensar a vazão de ar original que, com a restrição da área de entrada de ar do ventilador, promove um aumento da velocidade de entrada desse ar, culminando em pequena redução da vazão.

A partir da abertura de 60 % o fechamento do diafragma resultou em reduções mais evidentes da vazão de ar, obtendo para os valores de 60, 50, 40 e 30 % de abertura do diafragma reduções de 14,08; 24,00; 35,37 e 47,09 % na vazão, respectivamente. Seguindo o raciocínio acima, a partir da abertura de 60 %, devido uma maior restrição da área de entrada de ar, o sistema não consegue compensar a vazão de ar com a mesma eficiência.

A redução da vazão do ar de saída, promovida pela restrição da entrada de ar em função da utilização do diafragma, é consequência da redução da velocidade com que o ar deixa o sistema. Estes resultados também foram obtidos por Doruchowski et al. (2009) quando os mesmos posicionaram um diafragma na

entrada do ventilador radial de um pulverizador hidropneumático para redução da velocidade do ar de saída. Tais autores observaram que com o fechamento do diafragma e a consequente restrição na entrada de ar do ventilador, as velocidades do ar de saída reduziam progressivamente, o que culminou com o propósito da redução da velocidade de ar para controle do processo de deriva.

Cada condição de abertura do diafragma permitiu ao ventilador operar sob condições específicas. Desse modo, foi determinada sua curva característica para as condições de operação do diafragma (Figura 15).

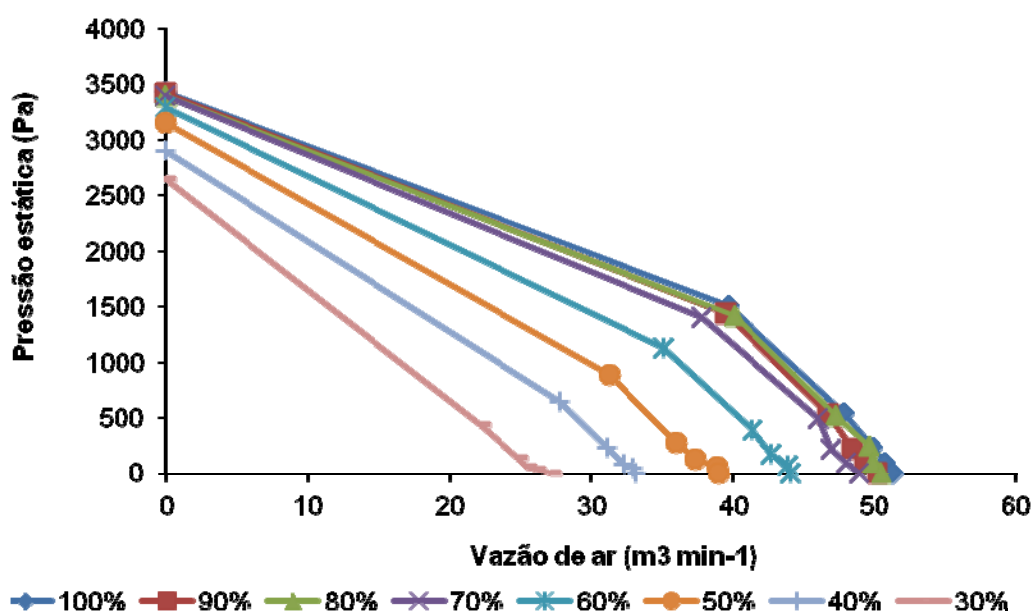


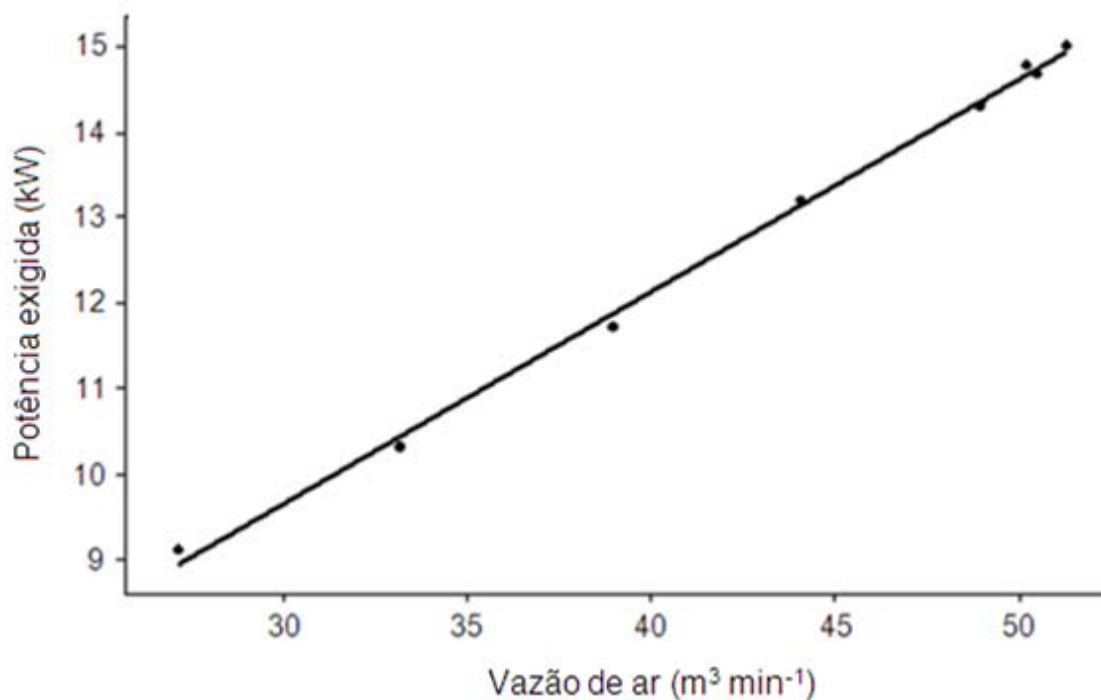
Figura 15 - Curva característica do ventilador de acordo com a abertura do diafragma.

Os resultados corroboram com o que foi mencionado Mesquita et al. (1985). Conforme há um fechamento gradual do diafragma, menor é a massa de ar que entra no sistema, desse modo, menor é a pressão cinética necessária para manter o ar em movimento, justificando o fato da queda de velocidade e da vazão de ar com o fechamento gradual do diafragma.

4.2. Potência exigida

Na Figura 16 é analisado o comportamento da potência exigida pelo ventilador quando a vazão de ar é alterada com o estrangulamento da entrada de

ar provocada pela ação do diafragma. Verificou-se que o aumento da vazão de ar aumenta a potência exigida pelo ventilador. A maior demanda de potência, 14,98 kW, ocorreu quando o pulverizador produziu a máxima vazão de ar, 51,28 m³ min⁻¹, alcançando o menor valor 8,96 kW, quando o pulverizador gerou a menor vazão, 27,13 m³ min⁻¹.



$$\hat{POT} = 2,21 + 0,249^{**}VAZ \quad r^2 = 0,997$$

****** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste t

Figura 16 - Potência exigida na TDP em função da vazão de ar do ventilador do pulverizador.

4.3. Temperatura do ar na saída do ventilador

O aumento da temperatura do ar na saída do ventilador provocado pelo atrito do ar succionado com suas pás pode influenciar no processo evaporativo, alterando as características do espectro de gotas.

Observa-se na Figura 17 um aumento gradual da temperatura do ar na saída do ventilador à medida que há um aumento da temperatura do ar ambiente e uma redução da abertura do diafragma. Para a temperatura de 19 °C constatou-se um aumento de 7,4 e de 10,3 °C para as aberturas de 100 e 50 % do

diafragma, respectivamente, apresentando, para as demais aberturas, valores intermediários entre estes dois extremos. No Quadro 13, observam-se os modelos de regressão ajustados para estimar a temperatura do ar na saída do ventilador nas temperaturas avaliadas.

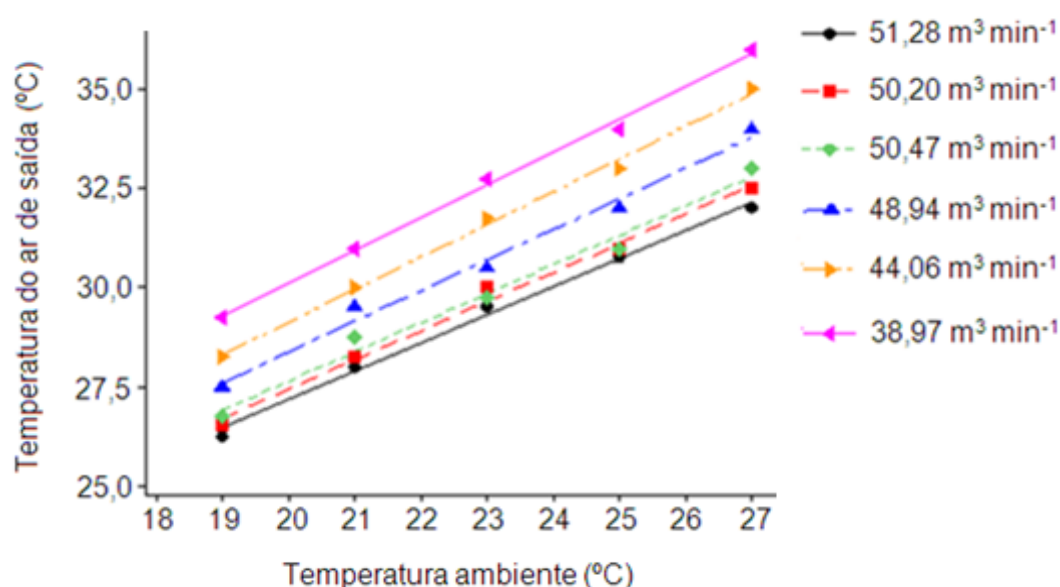


Figura 17 - Temperatura do ar na saída do ventilador em função da temperatura ambiente para diferentes vazões de ar

Quadro 13 - Equações de regressão ajustadas para temperatura do ar na saída do ventilador (TS) em função da temperatura ambiente (TA), em cada vazão de ar do ventilador

Vazão de ar ($\text{m}^3 \text{min}^{-1}$)	Equação ajustada (^)	r^2
51,28	$TS = 12,9 + 0,713^{**}TA$	0,994
50,20	$TS = 12,7 + 0,738^{**}TA$	0,991
50,47	$TS = 12,9 + 0,738^{**}TA$	0,986
48,94	$TS = 12,9 + 0,775^{**}TA$	0,989
44,06	$TS = 12,6 + 0,825^{**}TA$	0,996
38,97	$TS = 13,6 + 0,825^{**}TA$	0,996

** significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Esse fato é explicado pela dinâmica do ventilador, ao utilizar um sistema de pás radiais. O atrito da massa de ar succionada com as pás do ventilador promove uma transferência de energia, ocasionando seu aquecimento. Quando

há o estrangulamento da entrada de ar pelo fechamento do diafragma, uma menor massa de ar se movimenta para o interior do sistema, porém, o ventilador operando na mesma rotação, transmite a mesma energia. Como uma menor massa de ar está submetida ao mesmo ganho de calor que na situação prévia, o resultado é um aquecimento maior quando se estrangula a entrada de ar do ventilador.

Com auxílio do gráfico psicrométrico, adaptado por Zolnier (1994), verificou-se que, para uma temperatura ambiente de 19 °C e umidade relativa de 84 % (linha vermelha), houve um aumento da capacidade evaporativa do ar na saída do ventilador quando o diafragma foi gradualmente fechado a partir da abertura de 100 % (linha verde) até 50 % (linha azul) (Figura 18).

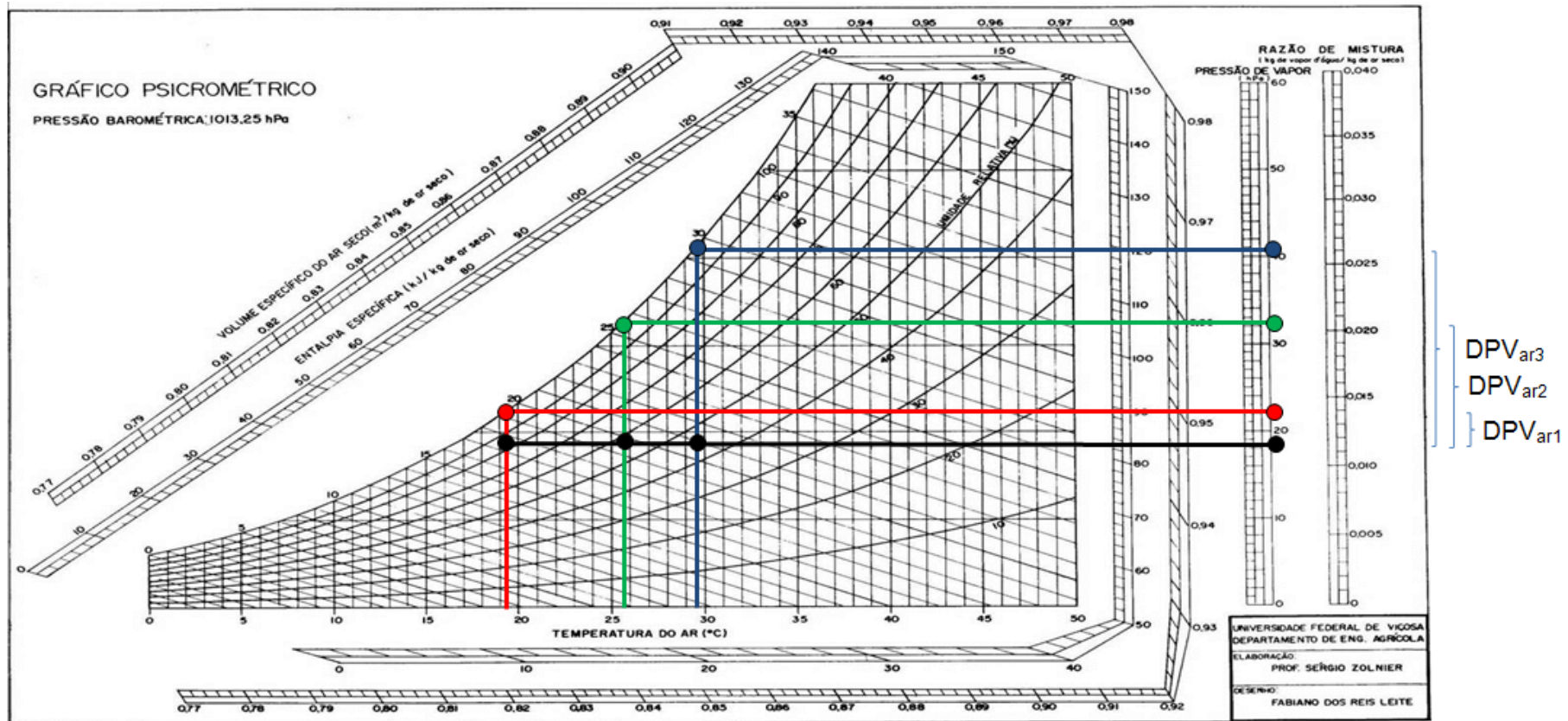


Figura 18 - Representação do aumento do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}) na saída do ventilador das condições ambientes (DPV_{ar1}) para a condição do diafragma na abertura de 100 % (DPV_{ar2}) e 50 % (DPV_{ar3}).

A linha preta identifica a tendência de valor assumido para umidade relativa quando há o aquecimento do ar. Nesta situação, a concentração do vapor d'água presente no ar, representada pela pressão parcial (e), é a mesma tanto no início como no final do processo de aquecimento. No entanto, a umidade relativa do ar ($UR = (e/e_s) \times 100$) é reduzida com o deslocamento horizontal para o lado direito no gráfico psicrométrico. O aumento da temperatura do ar promove o aumento da capacidade do ar em absorver o vapor d'água até a ocorrência da saturação, representada por e_s .

Com a redução da UR, ocorre aumento do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}) o qual é obtido pela relação $DPV_{ar} = e_s - e$. Esta variável representa o potencial de evaporação das gotas pulverizadas. Assim, o aquecimento do ar decorrente da rotação do ventilador intensifica o potencial de evaporação em relação às condições ambientes.

Por outro lado, como mostrado na Figura 19, quando a temperatura ambiente se eleva de 19 para 27 °C e a umidade relativa decresce de 84 para 57 %, o processo de aquecimento se repete. Neste caso, houve um aumento de 5,15 e de 8,9 °C, quando o diafragma foi fechado de 100 % para 50 %, o que gerou valores de DPV_{ar} maiores.

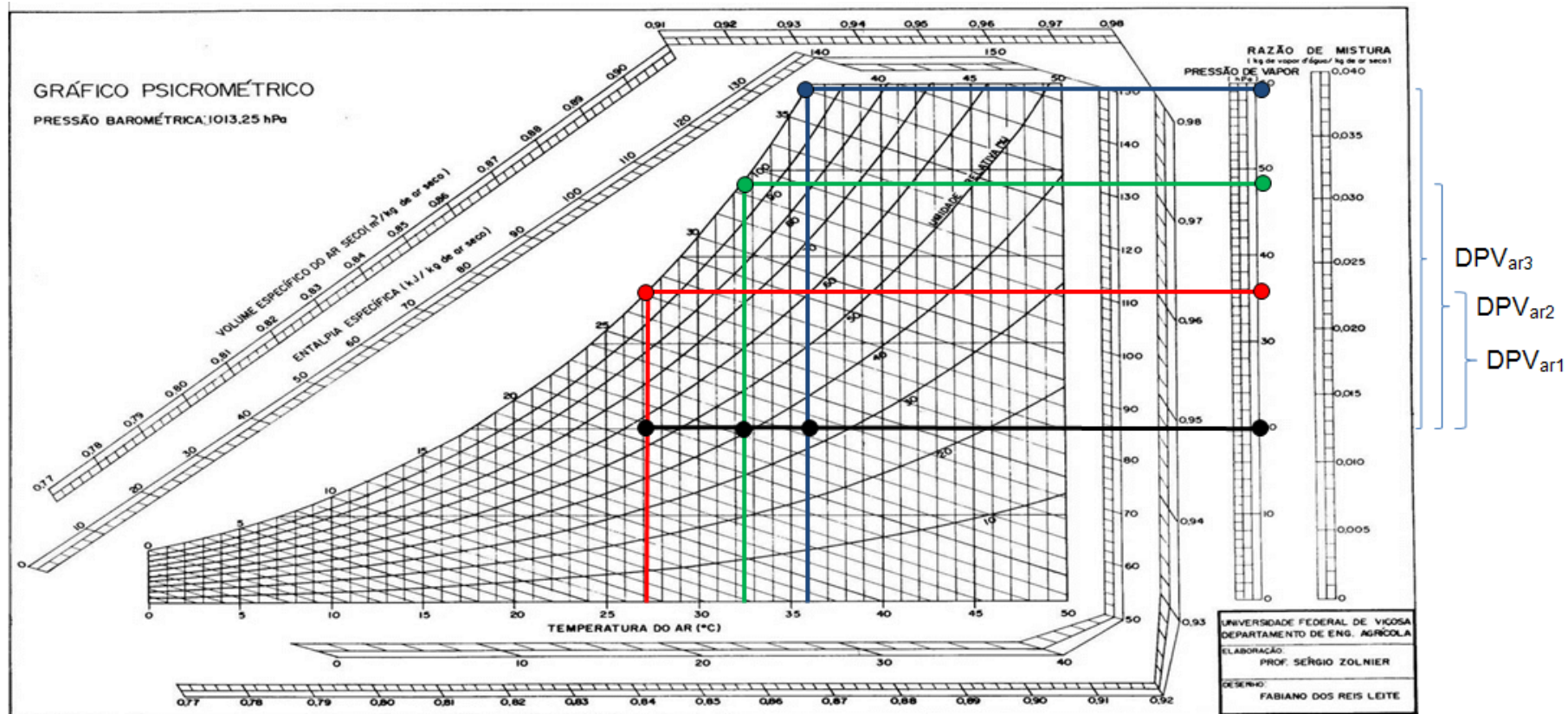


Figura 19 - Representação do aumento do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}) na saída do ventilador das condições ambientes (DPV_{ar1}) para a condição do diafragma na abertura de 100 % (DPV_{ar2}) e 50 % (DPV_{ar3}).

Com o aumento do DPV_{ar} na saída do ventilador do pulverizador, o diâmetro das gotas diminui devido à evaporação precoce. Dependendo das condições ambientes, este fato pode impedir a deposição do produto aplicado sobre o alvo pulverizado, corroborando com os resultados obtidos por Matthews (2000). Utilizando água como diluente, este autor relatou que as gotas de menor diâmetro possuem tempo de vida reduzido e, se a água, como diluente do produto químico evapora, o tamanho diminui consideravelmente.

4.4. Determinação e análise dos parâmetros técnicos da aplicação

Os parâmetros técnicos da aplicação fornecem as informações necessárias para sua avaliação, onde, através dos valores obtidos, é possível analisar os resultados de sua eficiência. Estes são determinados a partir de análises de etiquetas hidrossensíveis.

Na Figura 20 são apresentados os resultados das aplicações em etiquetas hidrossensíveis ocorridas com diafragma nas aberturas de 100 % e 50 %.

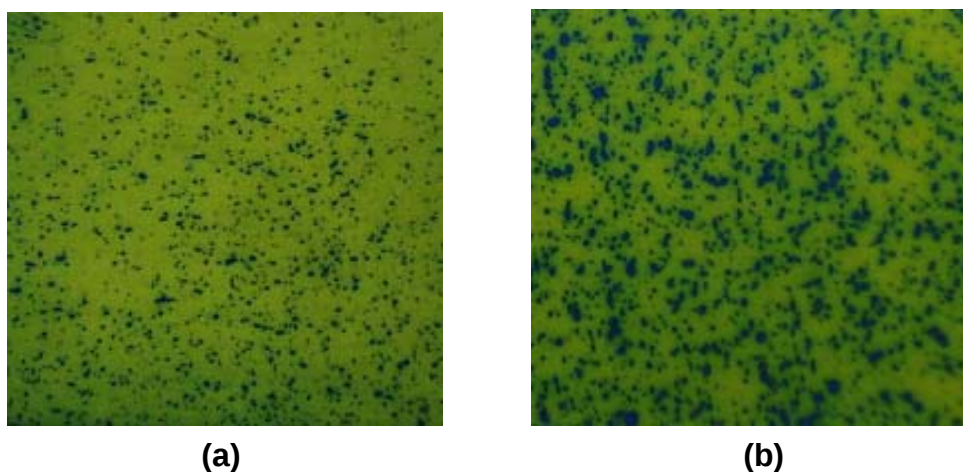


Figura 20 - Resultado da aplicação em etiquetas hidrossensíveis. (a) diafragma na abertura de 100 %, (b) diafragma na abertura de 50 %.

Para o intervalo de DPV_{ar} que corresponde a uma condição de alta capacidade evaporativa do ar, o máximo valor obtido de estudo foi de 21,21 hPa. Os resultados da análise de variância das regressões são apresentados nos Quadros 14, 15 e 16.

Quadro 14 - Resumo da análise de variância dos parâmetros da pulverização para a condição de DPV_{ar} menor que 7,01 hPa

Variável	(GL) QM Regressão	(GL) QM Desvios
DMV	(3) 57978**	(116) 303,0
CH	(3) 4,4533**	(116) 0,0456
COB	(1) 638,56**	(118) 2,08
DENS	(2) 89346**	(117) 832,0
SPAN	(1) 2,6550**	(118) 0,0115

* significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Quadro 15 - Resumo da análise de variância dos parâmetros da pulverização para a condição de DPV_{ar} entre 7,01 e 12,67 hPa

Variável	(GL) QM Regressão	(GL) QM Desvios
DMV	(3) 118034**	(116) 958
CH	(3) 9,3254**	(116) 0,1164
COB	(2) 336,63**	(117) 2,37
DENS	(4) 54024**	(115) 644
SPAN	(4) 1,8853**	(115) 0,0236

* significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Quadro 16 - Resumo da análise de variância dos parâmetros da pulverização para a condição de DPV_{ar} entre 12,67 e 21,21 hPa

Variável	(GL) QM Regressão	(GL) QM Desvios
DMV	(3) 96939**	(116) 909
CH	(4) 6,6725**	(115) 0,1205
COB	(4) 108,70**	(115) 0,99
DENS	(2) 85523**	(117) 450
SPAN	(4) 2,2472**	(115) 0,0259

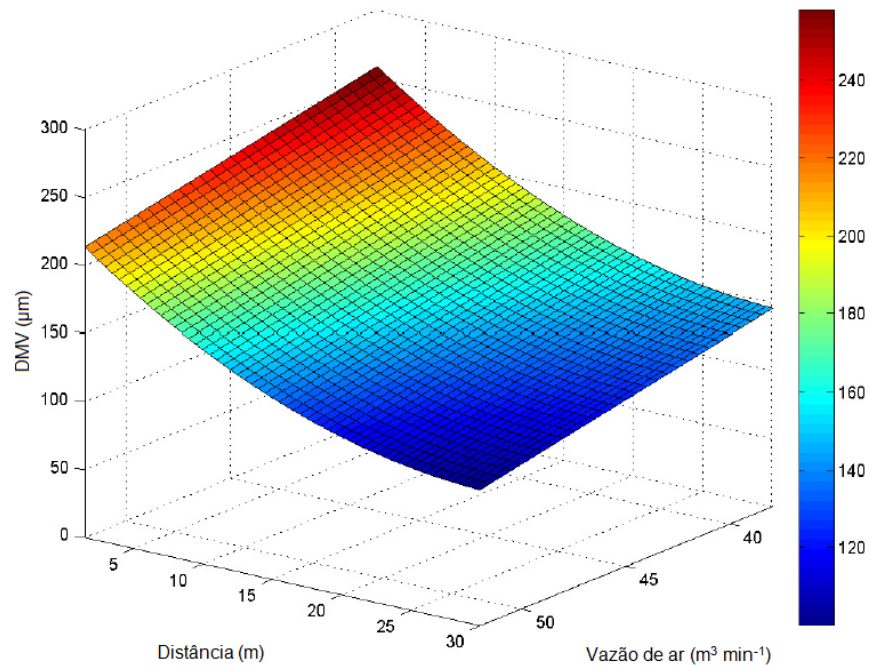
* significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

4.4.1. Diâmetro da mediana volumétrica

Em uma pulverização penumática, para variar o diâmetro das gotas, recorre-se a modificação da relação entre os fluxos de líquido e de ar. Portanto,

se há o desejo de aumentar o tamanho das gotas, uma alternativa seria a redução da velocidade do ar e, conseqüentemente, a sua vazão.

Nas Figuras 21 a 23 são apresentadas a superfícies de resposta dos parâmetros diâmetro da mediana volumétrica em função da vazão de ar do pulverizador e distância dentro da faixa de aplicação para os intervalos de DPV_{ar} .

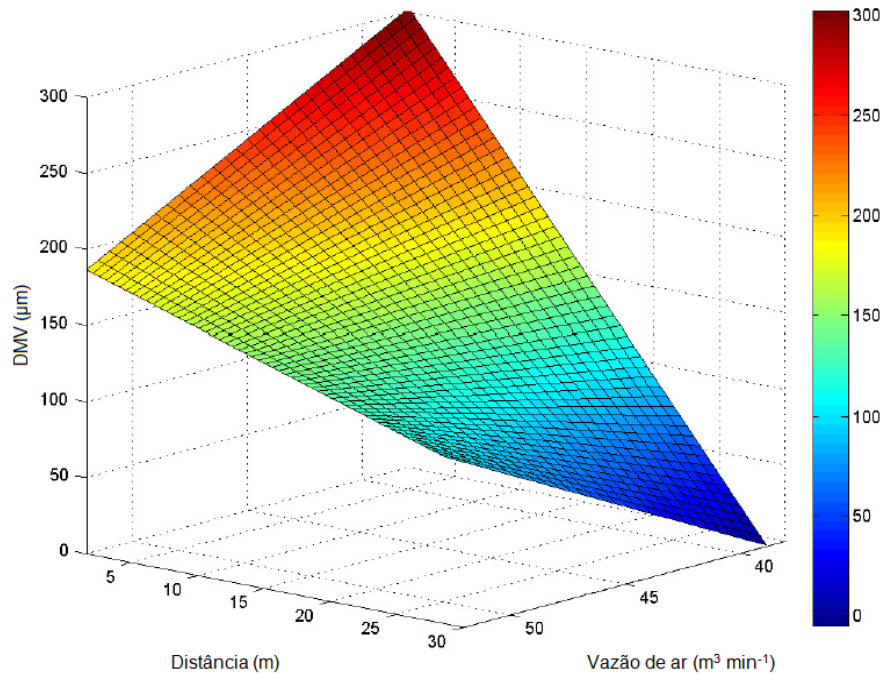


$$\hat{DMV} = 392 - 3,22^{**}VAZ - 7,96^{**}DIST + 0,127^{**}DIST^2 \quad R^2 = 0,83$$

****** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste t

Figura 21 - Diâmetro da mediana volumétrica em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV_{ar} menor que 7,01 hPa.

Observando-se a Figura 21, verifica-se um DMV máximo de 254,86 μm para uma menor distância em relação ao pulverizador, obtido com a vazão de 37,98 $m^3 \text{ min}^{-1}$. Com o aumento da distância, obteve-se o menor valor de DMV, 102,4 μm , com a vazão de ar de 51,28 $m^3 \text{ min}^{-1}$, a uma distância de 30 metros.



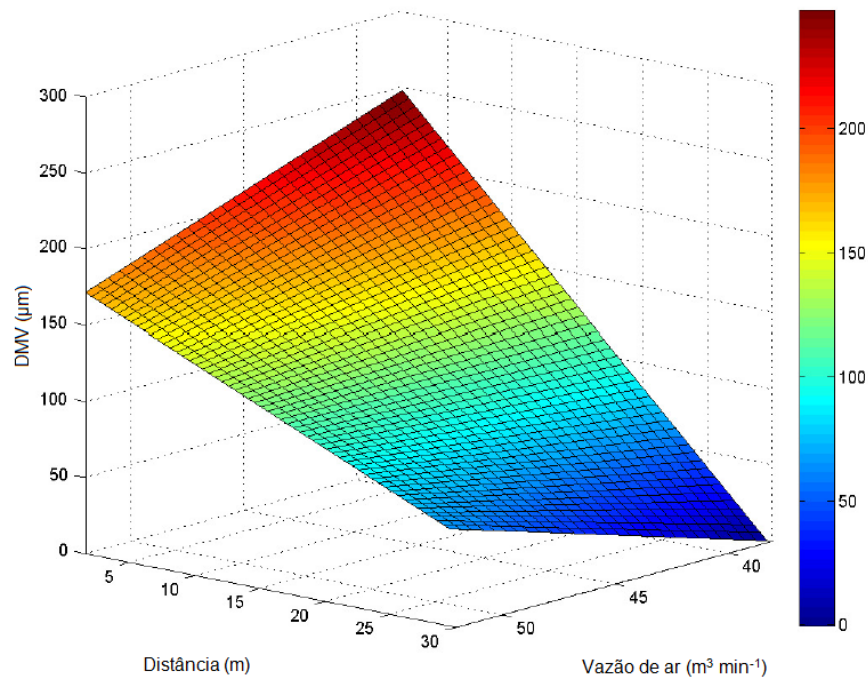
$$\hat{DMV} = 668 - 9,18^{**}VAZ - 34,6^{**}DIST + 0,611^{**}VAZ \times DIST \quad R^2 = 0,76$$

****** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste t

Figura 22 - Diâmetro da mediana volumétrica em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV_{ar} entre 7,01 e 12,67 hPa.

Na Figura 22, observa-se um DMV máximo de 294,07 μm próximo ao pulverizador, alcançado com a vazão de 38,97 $m^3 \text{ min}^{-1}$ e menores valores de DMV são obtidos nas maiores distâncias alcançadas dentro de cada vazão de ar.

O esperado era que os gráficos das Figuras 22 e 23 assumissem o mesmo comportamento quadrático para a variável independente distância, porém, devido à depressão ocorrida quando das maiores distâncias com as menores vazões, o modelo não mais apresenta o comportamento quadrático. Este fato é explicado pela estimativa do modelo proposto de regressão, pois, devido à evaporação, as gotas produzidas atingiram distâncias menores em relação ao DPV_{ar} menor que 7,01 hPa .



$$\hat{DMV} = 488 - 5,98^{**}VAZ - 22,5^{**}DIST + 0,359^{**}VAZ \times DIST \quad R^2 = 0,73$$

****** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste t

Figura 23 - Diâmetro da mediana volumétrica em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV_{ar} entre 12,67 e 21,21 hPa.

Na Figura 23, observa-se um DMV máximo de 242,19 μm próximo ao pulverizador, alcançado com a vazão de 37,98 $m^3 \text{ min}^{-1}$, estando os menores valores de DMV nas maiores distâncias alcançadas dentro de cada faixa de aplicação.

Os maiores valores de DMV nas distâncias mais próximas do pulverizador devem-se ao posicionamento do bocal secundário. Para as vazões de ar de 44,06 e 37,98 $m^3 \text{ min}^{-1}$, maior é o DMV em uma mesma distância, fato esse explicado pelo menor fracionamento das gotas. Este resultado corrobora com o que foi mencionado por Di Prinzio et al. (2010). Os valores de DMV obtidos estão de acordo com aqueles descritos por Minguela e Cunha (2010).

As gotas formadas por um pulverizador pneumático são depositadas através do processo de sedimentação e seguem um movimento balístico onde as gotas de maiores diâmetros, com maior peso e inércia, não acompanham a corrente de ar a longas distâncias, depositando-se assim em alvos mais próximos;

por outro lado, gotas menores, com menor peso e inércia, continuarão sendo movimentadas através da corrente de ar até o momento em que seu peso e velocidade sejam maiores que a força de arraste, depositando-se assim nas superfícies mais distantes, corroborando com o descrito por Fox et al. (2008). Isto explica os menores valores de DMV encontrados a longas distâncias. Estes resultados concordam com o que foi verificado por Zhu et al. (2007) no qual o pico de velocidade de ar tende a decair conforme a distância, o que diminui a força de arraste da corrente de ar.

Através da análise dos gráficos e do modelo de regressão, verifica-se o mesmo comportamento de DMV para as aberturas do diafragma de 100 a 70 %, na condição de baixa e média capacidade evaporativa do ar. Essa variação do DPV_{ar} não foi suficiente para reduzir o diâmetro das gotas de pulverização para essas aberturas. Nas aberturas de 60 e 50 % houve redução do DMV, podendo este resultado ser atribuído principalmente à condição evaporante no bocal do canhão, fato esse que é agravado sob menores vazões de ar.

Em condições de alta capacidade evaporativa do ar, percebeu-se uma queda do DMV ao longo da faixa para as vazões de ar estudadas. Esse comportamento é uma consequência do aumento do poder evaporativo do ar no canhão e no ambiente. A redução do DMV com o aumento do DPV_{ar} é causada pela evaporação do volume de uma gota, pois a mesma possui uma elevada área de superfície em relação ao seu volume, o que corrobora com os resultados apresentados por Fritz e Hoffmann (2007).

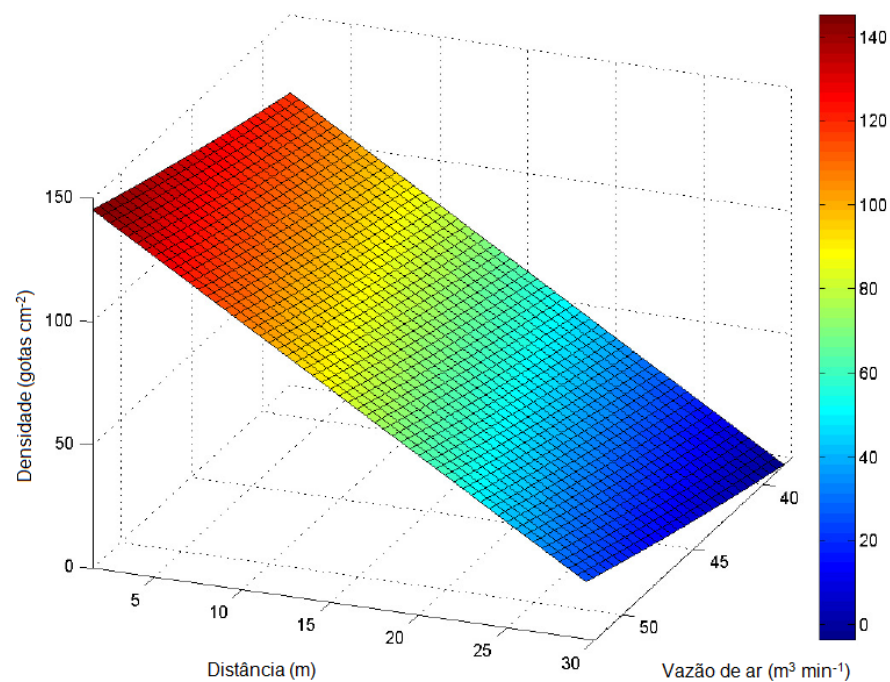
Considerando a alta capacidade evaporativa do ambiente, a redução de 24 % do volume de ar, vazão de ar de $37,98 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, com a mesma vazão de líquido, foi capaz de produzir uma população de gotas com DMV maior em relação às demais vazões, embora não apresentando valores elevados para esse parâmetro. O baixo volume de líquido, utilizado na pulverização pneumática, associado ao aquecimento do ar pelo conjunto de pás radiais do ventilador, podem ter levado aos resultados encontrados.

Resultado semelhante obteve Queiroz (2009) avaliando a relação entre elevação da temperatura do ar ambiente próximo de uma ponta de pulverização hidráulica e o seu DMV resultante. Suas análises mostraram uma redução de 260,96 para 158,88 μm do tamanho das gotas formadas quando a temperatura

aumentou de 16 para 36°C, respectivamente. A redução do diâmetro de gotas em elevado déficit de pressão de saturação de vapor d'água corrobora com resultados obtidos por Matthews (2000).

4.4.2. Densidade da população de gotas

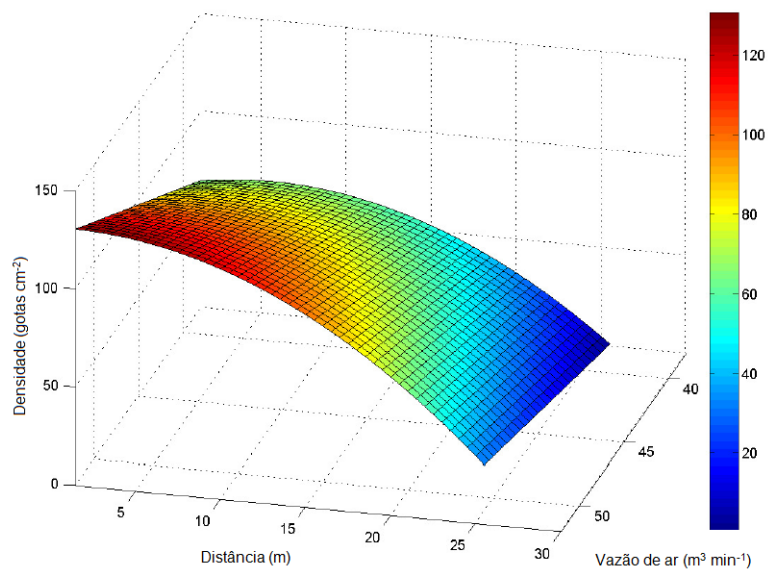
Nas Figuras 24, 25 e 26 são apresentadas as superfícies de resposta da densidade de gotas em função da distância e da vazão de ar do pulverizador.



$$\hat{DENS} = 94,6 - 4,35^{**}D + 0,0213^{**}V^2 \quad R^2 = 0,65$$

****** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste t

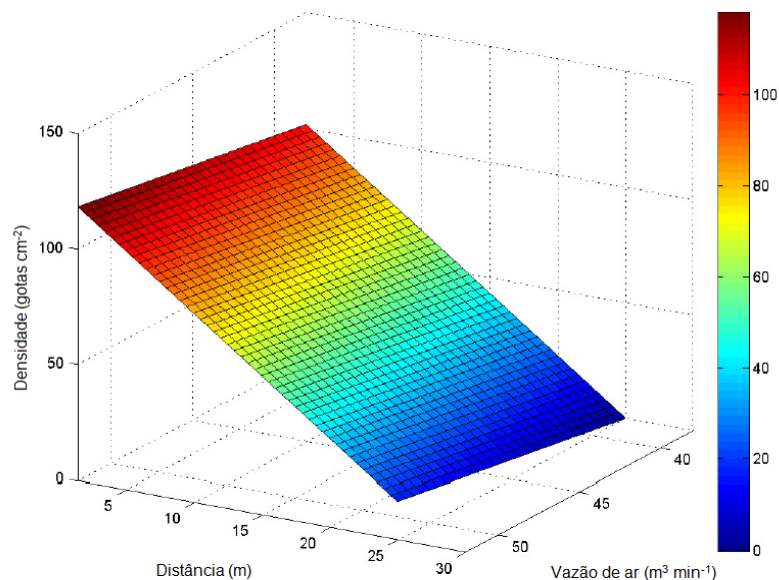
Figura 24 - Densidade de gotas em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV_{ar} menor que 7,01 hPa.



$$\hat{DENS} = -123 + 4,87^{**}V + 6,05 \cdot D - 0,169^{**}D^2 - 0,109^{\Delta}V \times D \quad R^2 = 0,75$$

Δ , *, **: significativo a 15%, 5% e a 1% de probabilidade pelo teste t, respectivamente

Figura 25 - Densidade de gotas em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV_{ar} entre 7,01 e 12,67 hPa.



$$\hat{DENS} = 62,6 + 1,19^{**}V - 4,32^{**}D \quad R^2 = 0,77$$

** : significativo a 1% de probabilidade pelo teste t

Figura 26 - Densidade de gotas em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV_{ar} entre 12,67 e 21,21 hPa.

Pelas figuras nota-se que as maiores densidades estão na menor distância em relação ao pulverizador, e sob a maior vazão de ar estudada, 51, 28 m³ min⁻¹. Na Figura 24, 25 e 26 os maiores valores foram de 144, 127 e 117 gotas cm⁻², respectivamente. Conforme se aumentava a distância do pulverizador, constatou-se uma redução na população de gotas.

A densidade das gotas também foi menor à medida que o diafragma era fechado, reduzindo a entrada de ar e consequentemente a vazão de ar. Devido à menor intensidade de fracionamento da calda pela redução da vazão de ar, houve a formação de gotas com diâmetros maiores, porém em menor número, o que representou nas etiquetas a queda da densidade populacional. Outra razão é o aumento da temperatura do ar na saída do ventilador, o que resulta no aumento do déficit de pressão, elevando a tendência à evaporação.

O aumento do DPV_{ar} do ambiente aumenta a tendência de evaporação das gotas, principalmente devido ao DMV obtido. Porém, observou-se que os valores de densidade de gotas, para as condições de baixa e média capacidade evaporativa do ar, se aproximavam para as maiores vazões de ar (aberturas de 100 a 70 %). Nas aberturas de 60 e 50 %, houve maior efeito das diferenças entre densidades para os referidos déficits, principalmente devido ao efeito do aumento do DPV_{ar} na saída do ventilador. Na condição de alta capacidade evaporante do ar, obteve-se a redução da densidade de gotas para todas as vazões estudadas, fato este relacionado com o maior poder evaporante do ar na saída do ventilador e no ambiente.

A faixa útil de aplicação é determinada pela mínima densidade de gotas necessária para o controle de um determinado agente patológico de plantas. No Quadro 17 é representada a faixa útil de aplicação, segundo a recomendação de densidade populacional para um tratamento específico, proposta por Barthelemy et al. (1990).

Quadro 17 - Faixa útil de aplicação para as vazões de ar do pulverizador nas diferentes condições de déficit de pressão e tratamentos

Intervalos de DPV _{ar} (hPa)	Faixa útil de aplicação (m)			
	Vazão de ar (m ³ min ⁻¹)	Herbicidas	Inseticidas	Fungicidas
0 a 7,01	51,28	27,7	30,0	23,0
	50,20	27,1	29,5	22,6
	50,47	27,3	29,6	22,7
	48,94	26,5	28,8	22,0
	44,06	24,3	26,6	19,7
	38,97	22,2	24,5	17,7
7,01 a 12,67	51,28	25,3	26,5	22,7
	50,20	25,0	26,2	22,3
	50,47	25,1	26,3	22,4
	48,94	24,6	25,9	21,8
	44,06	23,1	24,5	19,8
	38,97	21,0	22,8	16,6
12,72 a 21,21	51,28	21,6	23,9	17,0
	50,20	21,3	23,6	16,7
	50,47	21,4	23,7	16,8
	48,94	21,0	23,3	16,3
	44,06	19,6	21,9	15,0
	38,97	18,2	20,5	13,6

Observou-se no Quadro 17 uma redução na faixa útil de aplicação à medida que se reduziu a vazão de ar do pulverizador. Esta queda fez com que a corrente de ar produzida não fosse capaz de carregar as gotas a longas distâncias em número suficiente para um dado tratamento fitossanitário, pelo próprio fato do decréscimo da velocidade de saída do ar no canhão.

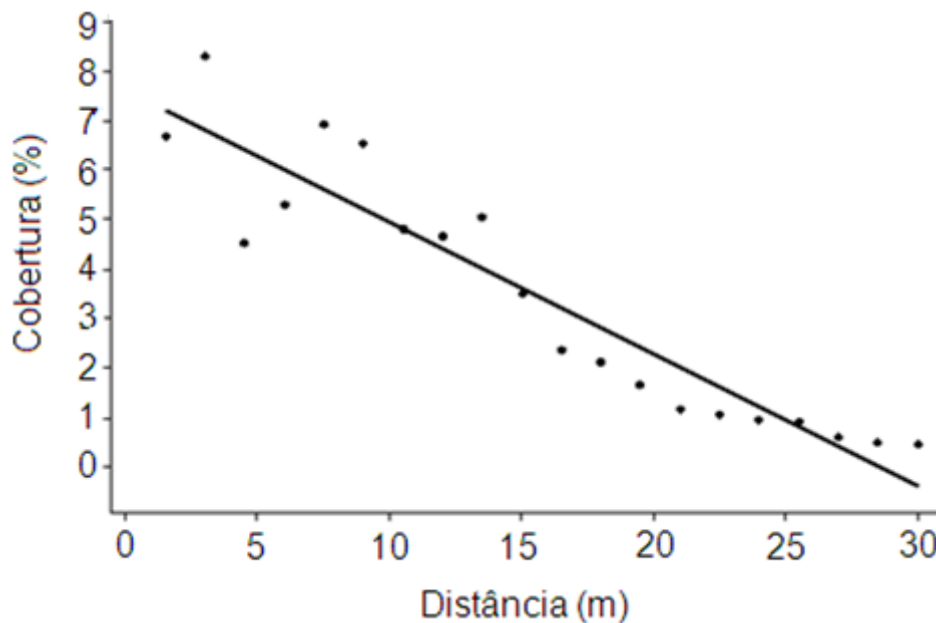
O aumento do potencial de evaporação do ar ambiente e dentro do canhão reduz o volume de uma gota e consequentemente o seu tempo de vida, fazendo com que as gotas de menor diâmetro evaporem, não possibilitando que essas

gotas atinjam longas distâncias, corroborando com os resultados obtidos por Xu et al. (2010) ao estudarem o tempo de vida de uma gota.

Ao analisar os modelos de regressão obtidos, nota-se uma oscilação grande entre os valores de densidade de gotas dentro da faixa de aplicação para as vazões de ar estudadas. Os valores obtidos para o coeficiente de variação foram de 55,81 a 90,17%; 69,32 a 103,54 % e 75,41 a 121,67 % para os intervalos de DPV_{ar} menor que 7,01 hPa, entre 7,01 e 12,67 hPa e entre 12,67 e 21,21 hPa, respectivamente. Os altos coeficientes de variação obtidos evidenciam a desuniformidade da deposição para uma aplicação dessa natureza. Resultados semelhantes foram obtidos por Zhu et al. (2007). Estes autores obtiveram valores de 109 % de coeficiente de variação de densidade de gotas dentro da faixa de aplicação alcançada. A desuniformidade de aplicação dos pulverizadores tipo “canhão” também foi mencionada por Schroder (2009). O autor comenta que o uso deste equipamento não tem crescido devido à desuniformidade de deposição e a sua grande dependência das condições meteorológicas.

4.4.3. Cobertura

Nas Figuras 27, 28 e 29 são representados os estudos do comportamento do parâmetro percentagem de cobertura. Verifica-se que a variável independente vazão de ar não obteve uma significância estatística no modelo de regressão para o DPV_{ar} menor que 7,01 hPa, sendo, deste modo, que somente a distância teve influência na cobertura obtida (Figura 27).

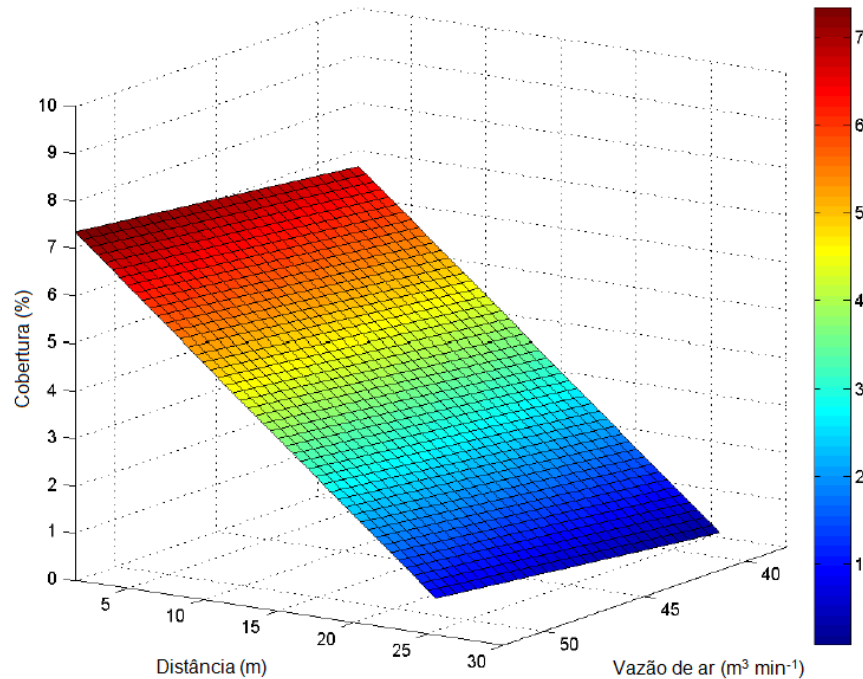


$$\hat{CÔB} = 7,58 - 0,267^{**}DIST \quad r^2 = 0,72$$

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste t

Figura 27 - Percentual de cobertura em função da faixa de aplicação para condição de DPV_{ar} menor que 7,01 hPa.

Esse resultado pode ser explicado através de uma compensação na formação de gotas entre as vazões de ar sob este déficit de pressão, ou seja, nas maiores vazões, pelo princípio do fracionamento do líquido, há a formação de gotas de menor diâmetro, porém em maior número e, nas menores vazões, há a formação de gotas de diâmetros maiores, porém em menor quantidade, o que provoca uma equidade aproximada entre as coberturas geradas pela diferentes vazões de ar, podendo ser atribuída ao mencionado o fato da variável não apresentar significância no modelo de regressão estabelecido para explicação do parâmetro cobertura, no DPV_{ar} menor que 7,01 hPa.



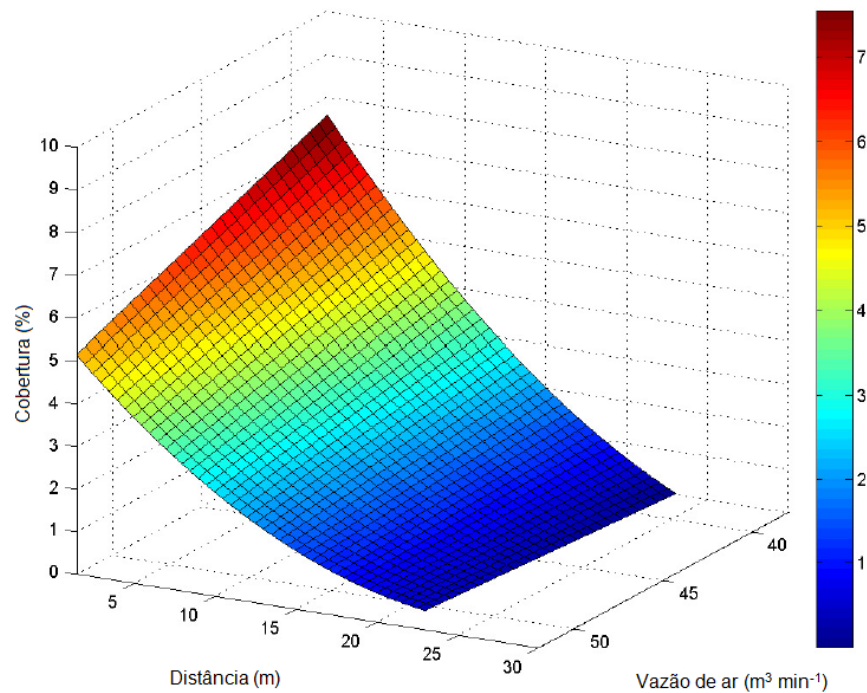
$$\hat{COB} = 5,15 + 0,0498^{\Delta}V - 0,273^{**}D \quad R^2 = 0,71$$

^Δ, **: Significativo a 15 % e a 1 % de probabilidade pelo teste t, respectivamente

Figura 28 - Percentual de cobertura em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV_{ar} entre 7,01 e 12,67 hPa.

Para o intervalo de DPV_{ar} entre 7,01 e 12,67 hPa o valor da variável independente vazão de ar foi significativo à 15 % pelo teste t. Considerando que no modelo de regressão para este parâmetro, correspondente à primeira condição estudada, a mesma variável não foi significativa, a condição de aumento do déficit de pressão pode estar determinando a influência da vazão de ar do pulverizador nos resultados de cobertura obtidos, fato esse observado para o modelo regressão estabelecido para o déficit de pressão acima de 12,67 hPa, onde a variável vazão de ar foi significativa a 1 % pelo teste t.

O valor de 15 % de variabilidade atribuído à variável vazão de ar no modelo de regressão é devido, possivelmente, à proximidade dos valores de coberturas obtidos, para diferentes vazões de ar, em uma mesma distância, principalmente entre as maiores vazões.



$$\hat{COB} = 15,4 - 0,186^{**}V - 0,898^{**}D + 0,0076^{**}D^2 + 0,0095^{**}VxD \quad R^2 = 0,74$$

****** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste t

Figura 29 - Percentual de cobertura em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV_{ar} entre 12,67 e 21,21 hPa.

O comportamento quadrático para a variável independente distância no modelo da Figura 29 é atribuída à pequena redução das diferenças dos valores de coberturas estimadas conforme se afasta do pulverizador. Fato esse explicado pelos menores valores de DMV e densidade encontrados nestas posições.

Considerando a capacidade evaporativa do ar mais elevada, na vazão de ar de $51,28 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, a calda é fracionada com maior intensidade, produzindo gotas de menor diâmetro, que sofrem a ação do déficit de pressão tanto no bocal do canhão como no ambiente, ocasionando a evaporação precoce das gotas e reduzindo assim a sua densidade. Na vazão de ar de $38,97 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ a intensidade do fracionamento é menor, produzindo gotas de maior diâmetro, porém estas gotas sofrem a ação de um maior déficit de pressão na saída do ventilador, o que reduz o diâmetro destas gotas e sua densidade. Quando comparado as densidades entre as duas vazões de ar mencionadas, verifica-se que houve valores próximos deste parâmetro para ambas em uma mesma distância. Isto fez

com que as gotas de maior diâmetro depositadas na menor vazão de ar apresentassem maiores valores de cobertura.

Nas Figuras 28 e 29, nota-se uma depressão quando são atingidos valores maiores em distância com as menores vazões. Este fato é explicado pelas diferentes distâncias alcançadas pelas gotas produzidas sob diferentes vazões de ar. Apesar de a depressão ser menor pela proximidade dos valores de cobertura às longas distâncias, este fato é explicado pela estimativa do modelo proposto de regressão, pois, devido a evaporação na saída do ventilador, as gotas produzidas atingiram distâncias menores em relação à condição de DPV_{ar} menor que 7,01 hPa.

Os maiores valores de cobertura foram obtidos nas proximidades do pulverizador, devido à ação do bocal secundário. De maneira geral, para todos os intervalos de DPV_{ar} , conforme os alvos se distanciavam menores foram os valores de cobertura obtidos.

Os valores de cobertura, para os dois primeiros intervalos de DPV_{ar} analisados, assemelham-se para uma mesma distância, representando a baixa contribuição da vazão de ar para a estimativa deste parâmetro, nestas condições. Quando os valores obtidos foram analisados para o DPV_{ar} mais elevado, constatou-se um menor percentual de cobertura. Este resultado corrobora com o obtido por Queiroz (2009) e Sugisawa et al. (2007). Estes últimos concluíram que o aumento da temperatura ambiente e redução da umidade relativa do ar no decorrer do dia podem contribuir para a redução do percentual de cobertura em aplicação de herbicidas em lavouras de trigo.

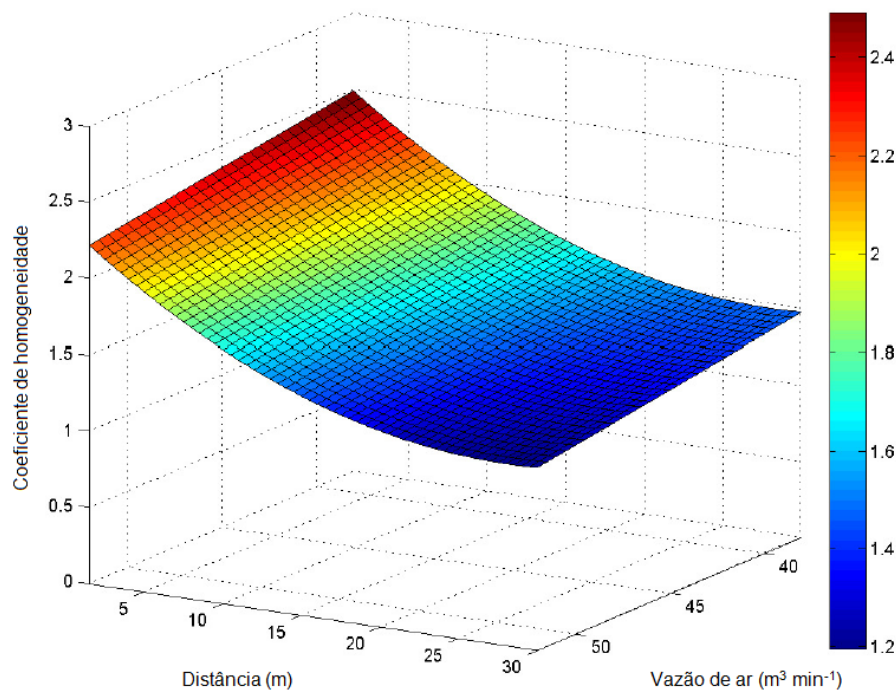
Altos valores de coeficiente de variação foram encontrados para as condições meteorológicas, demonstrando novamente a baixa uniformidade de deposição ao longo da faixa de aplicação, corroborando com Chen (2010) que mencionou que os pulverizadores pneumáticos podem não produzir deposição e cobertura uniforme ao longo da faixa de aplicação. Os valores de coeficiente de variação obtidos foram de 71,67 a 109,39 %; 86,06 a 121,44 % e 92,89 a 139,53 %, nos déficits de pressão de vapor menor que 7,01 hPa, entre 7,01 e 12,67 hPa e entre 12,67 e 21,21 hPa, respectivamente. Esta desuniformidade de cobertura ao longo da faixa de aplicação também foi obtida por Zhu et al. (2007) trabalhando com pulverização pneumática em casa de vegetação. Estes autores

obtiveram valores de 71 % de coeficiente de variação para o parâmetro cobertura na mesma faixa de aplicação estudada.

4.4.4. Coeficiente de homogeneidade

O coeficiente de homogeneidade é um parâmetro que analisa a relação entre os valores de diâmetro da mediana volumétrica e diâmetro da mediana numérica de uma população de gotas. Este parâmetro qualifica o espectro de gotas de uma pulverização quanto a sua homogeneidade, onde quanto mais próximo de 1,0 for seu valor de resultado, mais homogêneo é o espectro.

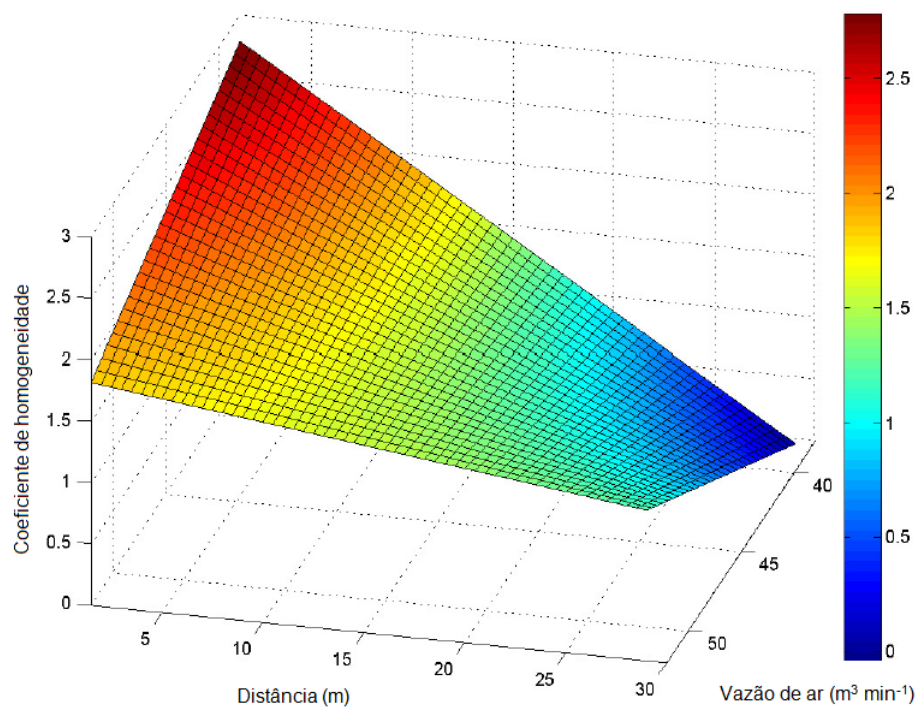
Nas figuras 30, 31 e 32 é analisado o comportamento do coeficiente de homogeneidade sob diferentes condições de déficit de pressão de vapor d'água no ar.



$$\hat{CH} = 3,35 - 0,0195^{**}VAZ - 0,0816^{**}DIST + 0,00146^{**}DIST^2 \quad R^2 = 0,72$$

****** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste t

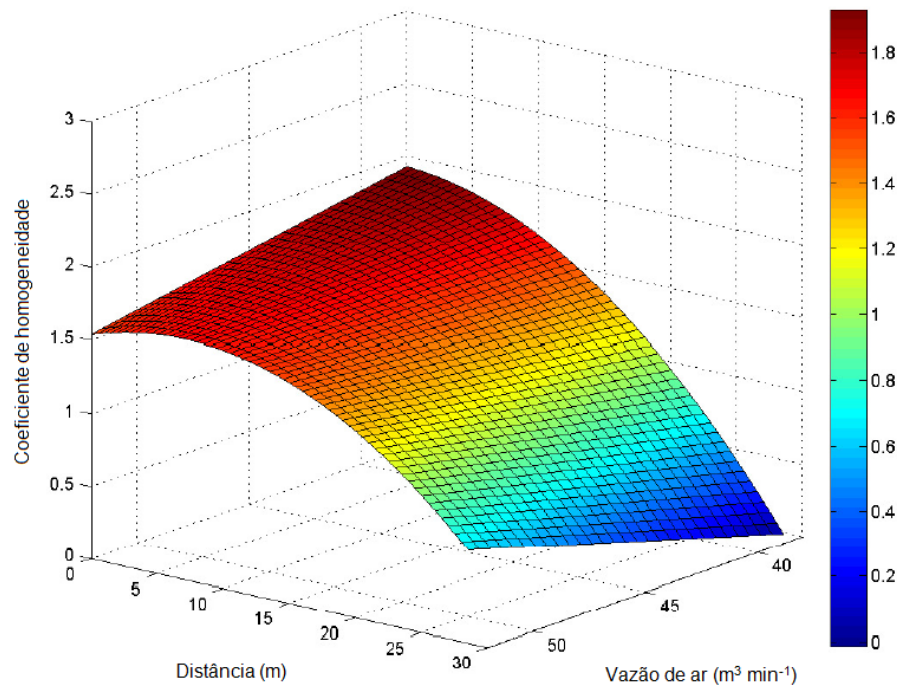
Figura 30 - Coeficiente de homogeneidade em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV_{ar} menor que 7,01 hPa.



$$\hat{CH} = 5,87 - 0,0773^{**}V - 0,323^{**}D + 0,0058^{**}V \times D \quad R^2 = 0,68$$

****** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste t

Figura 31 - Coeficiente de homogeneidade em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV_{ar} entre 7,01 e 12,67 hPa.



$$\hat{CH} = 2,98 - 0,0277*V - 0,104*D - 0,00222**D^2 + 0,00261**VxD \quad R^2 = 0,66$$

*, ** Significativo a 5% e a 1 % de probabilidade pelo teste t, respectivamente

Figura 32 - Coeficiente de homogeneidade em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV_{ar} entre 12,67 e 21,21 hPa.

Para as três faixas de capacidade evaporativa do ar o coeficiente de homogeneidade apresentou valores decrescentes com aumento da distância das etiquetas hidrossensíveis em relação ao pulverizador. Isso é explicado pela redução do DMV ao longo da faixa de aplicação, o que faz com que as gotas depositadas na etiqueta amostradora não apresentem diferenças elevadas entre seus diâmetros, reduzindo o coeficiente de homogeneidade.

Os maiores valores CH foram encontrados nas etiquetas mais próximas do pulverizador, sendo 2,47; 2,71 e 1,89 para os intervalos de DPV_{ar} até 7,01 hPa, entre 7,01 e 12,67 hPa e de 12,67 a 21,21 hPa, respectivamente, ocorrendo tal fato sempre na vazão de ar de $38,97 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$. Os maiores valores de CH obtidos nesta distância são atribuídos ao efeito do bocal secundário, promovendo o coalescimento de gotas de diâmetros menores, elevando a variação do tamanho das mesmas em torno de um diâmetro médio.

Desconsiderando o efeito do bocal secundário, os valores de CH obtidos se situaram entre 1,0 e 2,0 dentro da faixa de aplicação correspondente às vazões de ar estudadas em cada intervalo de DPV_{ar} , evidenciando o estreito espectro de gotas desta pulverização. Estes resultados concordam com o que foi descrito por Ferreira et al. (2007) que classificam o espectro de gotas como estreito quando os valores de CH situam-se entre 1,4 e 2,0. Os valores de CH encontrados são, por exemplo, semelhantes ou menores daqueles estabelecidos para pontas hidráulicas propostos por Carrero (1996).

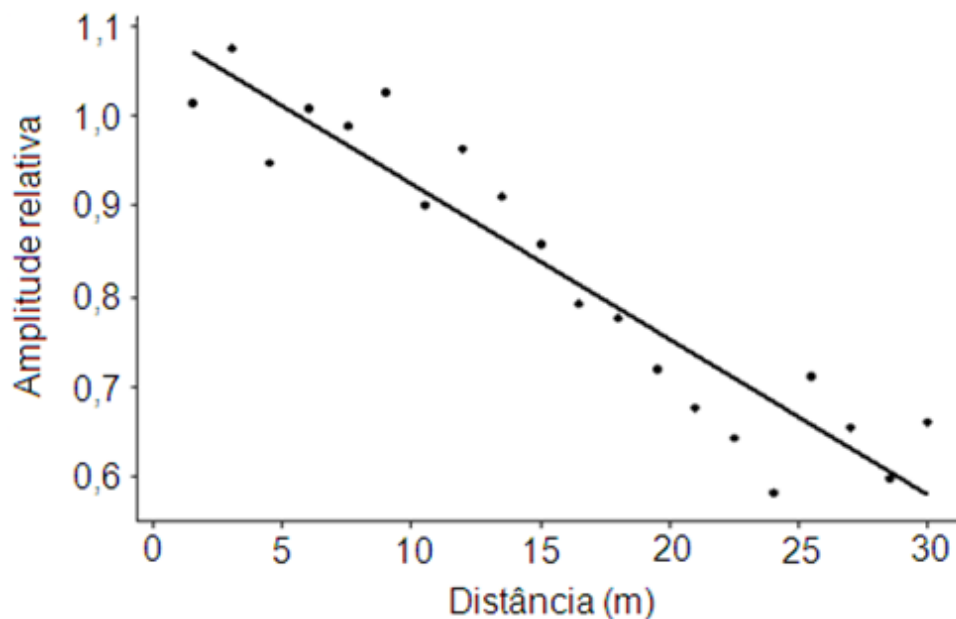
Notam-se as depressões nas Figuras 31 e 32, novamente, quando são atingidos maiores valores em distância com as menores vazões. Considerando-se a equação para a determinação do coeficiente de homogeneidade, verifica-se que não há possibilidade de resultados menores que 1,0. Porém, pelas figuras acima tal fato não ocorre. O ocorrido é explicado pelas estimativas do modelo proposto de regressão devido às diferentes distâncias alcançadas pelas gotas produzidas nas vazões de ar estudadas, fato esse atribuído à maior evaporação na saída do ventilador, em relação à condição de DPV_{ar} menor que 7,01 hPa.

4.4.5. Amplitude relativa

Amplitude relativa ou SPAN é um importante parâmetro para avaliação da qualidade de uma pulverização e avalia a amplitude da diferença entre os valores de diâmetros das gotas produzidas, onde maiores valores indicam uma maior heterogeneidade do tamanho de gotas.

Ns Figuras 33, 34 e 35 são representados os estudos da amplitude relativa em função da vazão de ar do pulverizador e distância dentro da faixa de aplicação para os intervalos de DPV_{ar} .

É possível notar pela Figura 33, que o modelo de regressão que explica o parâmetro estudado não apresentou significância para a variável independente vazão de ar.

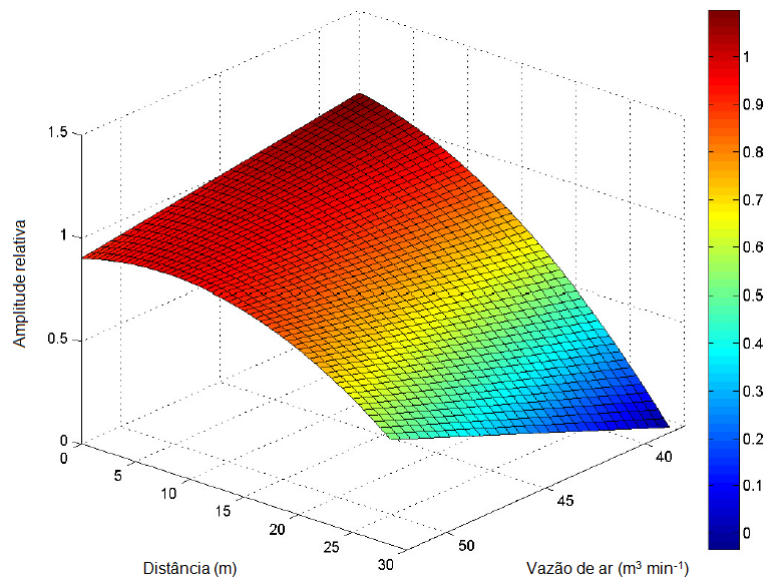


$$\hat{AR} = 1,10 - 0,0172^{**}D \quad r^2 = 0,66$$

** Significativo a 1 % de probabilidade pelo teste t

Figura 33 - Amplitude relativa em função da faixa de aplicação para condição de DPV_{ar} menor que 7,01 hPa.

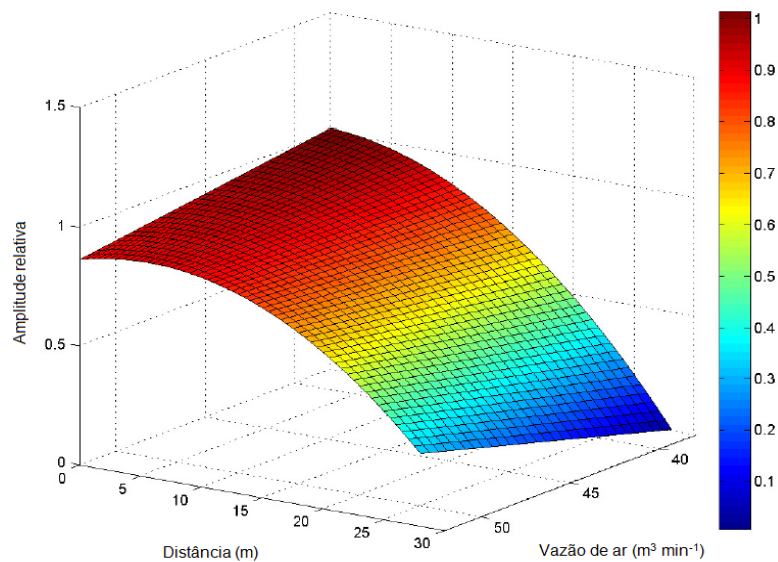
Este resultado pode ser explicado pela redução do poder evaporativo do ambiente para este déficit de pressão. Para a vazão de ar de $51,28 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$ houve produção de uma maior quantidade de gotas de menor diâmetro em relação às outras vazões. Porém, como a capacidade de evaporação deste ambiente é baixa, ele reduz a evaporação das gotas com tais diâmetros, aumentando a quantidade das mesmas na população, reduzindo, conseqüentemente, o $Dv 0,1$. Neste caso, o $Dv 0,9$ é também reduzido, devido à pequena quantidade de gotas de diâmetros maiores, pelo maior fracionamento da calda. Na menor vazão de ar, $38,97 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, pelo menor fracionamento, os valores de $Dv 0,9$ e $Dv 0,1$ são maiores que nas demais vazões de ar estudadas. Essa equidade aproximada da diferença entre os valores de $Dv 0,1$ e $Dv 0,9$, para os extremos de vazão de ar pode estar contribuindo para que esta variável não apresente valores significativos no modelo de regressão estabelecido.



$$\hat{AR} = 1,64 - 0,0143*V - 0,0811**D - 0,00104**D^2 + 0,00187**VxD \quad R^2 = 0,74$$

*, ** Significativo a 5% e a 1 % de probabilidade pelo teste t, respectivamente

Figura 34 - Amplitude relativa em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV_{ar} entre 7,01 e 12,67 hPa.



$$\hat{AR} = 1,42 - 0,0107^{\Delta}V - 0,0461*D - 0,00120**D^2 + 0,00115**VxD \quad R^2 = 0,75$$

Δ , *, **: significativo a 15%, 5% e a 1% de probabilidade pelo teste t, respectivamente.

Figura 35 - Amplitude relativa em função da vazão de ar do pulverizador e da faixa de aplicação para condição de DPV_{ar} entre 12,67 e 21,21 hPa.

Os valores de amplitude relativa apresentaram um comportamento decrescente conforme houve aumento da distância da etiqueta hidrossensível em relação ao pulverizador, sendo que, os maiores valores foram encontrados nas menores distâncias, atribuindo este resultado, à ação do bocal secundário.

Os valores máximos de SPAN foram encontrados na menor vazão de ar, sendo os resultados de 1,07; 1,06 e 0,99, para os intervalos de DPV_{ar} menor que 7,01 hPa, entre 7,01 e 12,67 hPa e entre 12,67 e 21,21 hPa, respectivamente. Os valores de amplitude relativa encontrados indicaram que para as diferentes vazões de ar e distâncias, as pulverizações apresentaram espectro de gotas relativamente homogêneo.

Os resultados de SPAN apresentaram valores aproximados para os dois primeiros intervalos de DPV_{ar} , porém menores valores foram encontrados para a condição de alta capacidade evaporativa do ar. O processo evaporativo, na saída de ar do ventilador, eleva a perda de volume das gotas produzidas, reduzindo o Dv 0,9, e, conseqüentemente, a amplitude entre os valores de Dv 0,9 e Dv 0,1.

4.5. Automação do pulverizador pneumático

Após as análises dos parâmetros técnicos sob diferentes vazões de ar e diferentes condições meteorológicas de aplicação, verificaram-se resultados semelhantes entre as faixas de DPV_{ar} menor que 7,01 hPa e entre 7,01 e 12,67 hPa, para uma mesma vazão de ar. Isso ocorreu devido à estreita diferença entre estas faixas.

Na condição de maior capacidade evaporativa do ar foi possível observar uma redução da faixa útil de aplicação para todas as aberturas do diafragma. Houve um aumento do diâmetro das gotas para a abertura de 50 % através da menor intensidade de fracionamento do líquido, porém este aumento não se apresentou satisfatório para a condição meteorológica avaliada. Embora mesmo ocorrendo tais fatos, optou-se pela automaização do pulverizador pneumático.

Como todos os testes foram feitos manualmente a automaização resulta no correto posicionamento planejado, posicionamento este que muitas vezes poderia estar errado caso fosse deixado a cargo do operador.

Como foram estudados três faixas de DPV_{ar} , três posições do diafragma foram selecionadas, embora mesmo não se obtendo resultados que comprovem

que as aberturas selecionadas eram as ideais para os intervalos de DPV_{ar} de 7,01 a 12,67 hPa e de 12,67 a 30,00 hPa.

A automatização ocorreu como validação da possibilidade de posicionamento do diafragma em qualquer abertura desejada de forma automática. A ideia passa a ser lançar e difundir o mecanismo, de modo que possa ser testado em pulverizadores pneumáticos de maior vazão de ar, em outros volumes de líquido, com ventiladores possuindo outros formatos de pás, e a consequente resposta dentro de intervalos de DPV_{ar} .

4.5.1. Avaliação do tempo de resposta de posicionamento do diafragma

Nas Figuras 36 e 37 é apresentada a sequência que foi utilizada para o estabelecimento do tempo de resposta de mudança de posição do diafragma em função do déficit de pressão momentâneo.

Observa-se na Figura 36 que o LED amarelo permanece continuamente aceso, representando o momento de acionamento do atuador e a consequente transição do diafragma, no caso, da abertura de 100 para 70 %. A imagem ao lado representa o momento em que o LED verde é acionado e permanece aceso, indicando o sinal enviado do sensor de posição, localizado na abertura de 70 % ao microcontrolador, este interpretando que o diafragma atingiu a posição desejada e realizando a interrupção da emissão de sinal elétrico ao atuador, paralisando o sistema.



(a)



(b)

Figura 36 - Sequência de operação de posicionamento do diafragma. (a) LED amarelo aceso indicando acionamento do atuador, (b) LED verde aceso indicando que o diafragma atinge a posição desejada.

Na Figura 37 é mostrada a sinalização representativa do sistema eletrônico para valores de DPV_{ar} acima de 30,00 hPa, através do LED vermelho. Nessas condições, o microcontrolador interrompe o sinal elétrico enviado ao atuador e, conseqüentemente, ao sistema. O LED vermelho permanece aceso, representando que o sensor está em constante processo de monitoramento das condições meteorológicas do ambiente circundante.



Figura 37 - Sinalização do sistema eletrônico para altos valores de déficit de pressão.

O modelo de aquisição dos dados via USB é representado na Figura 38. Nota-se que o tempo de resposta é calculado pela diferença entre os horários em que o microcontrolador recebe o sinal para o reposicionamento do diafragma, indicado na figura pelos comandos abrindo ou fechando o diafragma, e o momento que o sistema retoma o monitoramento contínuo após ter atingido a abertura desejada.

G1 Arduino Reader 0.3b

Arquivo Configurações Dados Ajuda

Conectado Desconectar

Entrada	Horário	Temperatura	Umidade	DPV	Status
1	13:23:21	19.57	95.703	0.978	Diafragma em 100%
2	13:23:51	20.058	95.703	1.008	Diafragma em 100%
3	13:24:22	19.082	56.152	9.683	Fechando diafragma ...
4	13:25:27	19.082	56.152	9.683	Diafragma em 70%
5	13:25:57	18.593	54.687	9.706	Diafragma em 70%
6	13:26:27	18.593	55.175	9.602	Diafragma em 70%
7	13:26:57	23.964	34.667	19.451	Fechando diafragma ...
8	13:27:49	23.964	34.667	19.451	Diafragma em 50%
9	13:28:19	29.824	24.414	31.746	DPV Alto. Não aplicar.
10	13:28:49	29.335	25.39	30.468	DPV Alto. Não aplicar.
11	13:29:19	27.382	38.085	22.572	Diafragma em 50%
12	13:29:49	26.894	81.054	6.712	Abrindo diafragma pa...
13	13:30:20	26.894	81.054	6.712	Diafragma em 70%
14	13:30:50	25.917	92.773	2.417	Abrindo diafragma pa...
15	13:31:39	25.917	92.773	2.417	Diafragma em 100%

Temperatura (°C); umidade relativa (%); DPV: déficit de pressão de vapor (hPa).

Figura 38 - Modelo de aquisição de dados via USB.

No Quadro 18 estão apresentados os valores médios de tempo de resposta de seus componentes baseado nas mudanças das condições meteorológicas e as respectivas análises descritivas dos dados.

Quadro 18 - Estatística descritiva da variável tempo de resposta de posicionamento do diafragma

Posicionamento do diafragma (%)	Tempo de resposta (s)			
	N	Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
100 para 70	10	66,3	1,7670	2,67
70 para 50	10	53,4	1,8379	3,44
50 para 70	10	39,3	1,8886	4,81
70 para 100	10	62,0	1,8257	2,94

N: Número de observações

De acordo com o Quadro 18, nota-se que os valores de desvio padrão são baixos para um mesmo componente, indicando baixa dispersão entre os dados. Os valores de coeficiente de variação apresentam-se todos abaixo de 5 % representando baixa variabilidade e boa precisão do sistema eletrônico e eletromecânico no automático posicionamento do diafragma.

No Quadro 18 observa-se que os maiores tempos médios de resposta ocorreram no momento do fechamento do diafragma. Este fato é explicado devido ao sentido de rotação do eixo do motor, que operou na rotação otimizada de trabalho durante o movimento de abertura do diafragma. Por isso, menores valores de tempo de resposta são encontrados para este sentido de movimento.

O maior valor médio de tempo de resposta foi de 66,3 segundos ocorrendo no momento de fechamento do diafragma de 100 para 70 %. Considerando o conjunto trator-pulverizador operando à $2,6 \text{ km h}^{-1}$, isto proporcionaria um

deslocamento de 47,88 metros. Isto demonstra a importância do operador para a atenção nas informações representativas dos LEDs, evitando que ocorram faixas de aplicação com espectro de gotas não recomendado.

4.5.2. Avaliação da precisão de resposta do sistema

O déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar (DPV_{ar}) identificado pelo sensor durante as tomadas de vazão de ar foi de 10,39 hPa, estando na faixa pré-determinada de 7,01 a 12,67 hPa.

O Quadro 19 apresenta a análise descritiva dos dados de vazão de ar do pulverizador nas diferentes condições de DPV_{ar} .

Quadro 19 - Estatística descritiva da variável vazão de ar do pulverizador automatizado

Intervalo de déficit de pressão (hPa)	Vazão de ar ($m^3 \text{ min}^{-1}$)			
	N	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
$DPV_{ar} \leq 7,01$	10	52,26	1,79	3,43
$7,01 < DPV_{ar} \leq 12,67$	10	47,69	0,79	1,66
$12,67 < DPV_{ar} \leq 30,00$	10	38,52	1,34	3,48

N: Número de observações

No Quadro 19, nota-se que as médias de vazões de ar obtidas após o posicionamento automático do diafragma, de acordo com o DPV_{ar} , apresentam valores próximos em relação às médias obtidas manualmente. É possível afirmar, por estes dados, que o sistema eletrônico e eletromecânico responde positivamente para obtenção da vazão de ar estabelecida para uma determinada condição meteorológica.

Para todos os intervalos de DPV_{ar} , verificam-se valores de coeficiente de variação abaixo de 5 %, o que evidencia a precisão do sistema em obter a vazão de ar previamente estabelecida.

No Quadro 20, encontra-se o quadro da análise de variância das vazões de ar do pulverizador obtidas nos intervalos de DPV_{ar} estudados. No Quadro 21 são apresentados os valores médios obtidos de vazão de ar para os déficits de pressão avaliados.

Quadro 20 - Análise de variância das vazões de ar do pulverizador automatizado obtidas de acordo com as condições meteorológicas avaliadas

FV	GL	QM
Vazão de ar	2	489,281903*
Resíduo	27	1,876457

* $P < 0,05$; $F_{5\%}(2;27) = 3,35$

Quadro 21 - Médias de volume de ar do pulverizador automatizado em função de três intervalos de déficit de pressão de vapor d'água no ar

Intervalo de déficit de pressão (hPa)	Vazão de ar ($m^3 \text{ min}^{-1}$)*
$DPV_{ar} \leq 7,01$	52,26a
$7,01 < DPV_{ar} \leq 12,67$	47,69b
$12,67 < DPV_{ar} \leq 30,00$	38,52c

*Médias seguidas por letras diferentes diferem entre si, a 5 % de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Verifica-se pelo Quadro 21 que o pulverizador automatizado é capaz de produzir vazões de ar estatisticamente diferentes, o que era o propósito do projeto.

A menor vazão de ar proporcionada pelo pulverizador automatizado na condição meteorológica mais crítica responde positivamente ao objetivo proposto, uma vez que é necessário um menor volume de ar, e por consequência, menor fracionamento das gotas. Outro ponto é a capacidade do pulverizador automatizado em posicionar o diafragma para maior vazão de ar possível nas condições meteorológicas de menor capacidade evaporativa do ar, onde um maior fracionamento é desejado.

Conforme o Quadro 21, há a possibilidade do pulverizador automatizado produzir uma vazão de ar intermediária e estatisticamente diferente das demais.

Devido à estreita faixa com que foi assumida essa condição, são necessários estudos adicionais no comportamento da população de gotas para uma condição meteorológica intermediária, com a possibilidade de uma extensão do período de aplicação e redução da faixa de déficit de pressão mais crítica.

5. CONCLUSÕES

O diafragma posicionado na entrada do ventilador foi capaz de produzir vazões de ar que variaram de 51,28 a 27,13 m³ min⁻¹.

O fechamento do diafragma resultou em menor potência demandada na tomada de potência, variando de 14,8 a 8,96 kW, entre as aberturas de 100 e 30 %, respectivamente.

As aberturas de 60 e 50 % do diafragma promoveram maiores diferenças na qualidade da pulverização.

O maior déficit de pressão de vapor d' água no ar (DPV_{ar}) reduziu o tamanho de gotas, a densidade, a faixa útil de aplicação, o percentual de cobertura, o coeficiente de homogeneidade e a amplitude relativa.

O pulverizador pneumático automatizado respondeu à variação da demanda evaporativa do ar, avaliada pelo cálculo do déficit de pressão de saturação de vapor d'água no ar.

A automatização possibilitou a obtenção da vazão de ar, com uma interpretação simples do sistema através da ação dos LEDs.

Novas pesquisas, utilizando o diafragma, devem ser realizadas em pulverizadores pneumáticos com maior vazão de ar, outras vazões de líquido e com tipos de rotores de ventiladores com outros formatos de pás.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDEF – Associação Nacional de Defesa Vegetal. **Manual de tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários**. Campinas: Línea Creativa, 2004. 50p.

ANGNES, D. L. **Introdução ao microcontrolador BASIC step**. 2003. Disponível em:
<<http://www.radiopoint.com.br/microcontroladores/microcontroladoresbasicstep.pdf>>. Acesso em 28 maio 2011.

ANTUNIASI, U. R.; BAIO, F. H. R. Tecnologia de aplicação de defensivos. In: Vargas, L.; Roman, E. S. (Org.). **Manual de manejo e controle de plantas daninhas**. Bento Gonçalves: Embrapa Uva e Vinho, v.1, p.145-184, 2004.

ANTUNIASI, U. R.; BAIO F. H. R.; BIZARI, I. R. Sistema de suporte a decisão para seleção de pontas de pulverização em sistemas de aplicação de defensivos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA, 5., 2005, Londrina. **Anais...** Londrina: FAPEAGRO, 2005, 2p. 1 CD-Rom.

ARDUINO 2011. **Arduino Duemilanove**. Disponível em: <<http://www.arduino.cc>>. Acesso em: 16 abril 2011.

AUBERTOT, J.; BARBIER, J.; CARPENTIER, A.; GRIL, J.; GUICHARD, L.; LUCAS, P.; SAVARY, S.; SAVINI, I.; VOLTZ, M. Pesticides, Agriculture and Environment: **Expert Report INRA-Cemagref**, 2006.

BALSARI, P.; MARUCCO, P. TAMAGNONE, M. A test bench for the classification of boom sprayers according to drift risk. **Crop Protection** , v. 26, p. 1482–1489, 2007.

BALSARI, P.; MARUCCO, P.; TAMAGNONE, M. A crop identification system (CIS) to optimize pesticide applications in orchards. **Journal of Horticultural Science & Biotechnology**, ISAFRUIT Special Issue, 113-116, 2009.

BARTHELEMY, P.; BOISGOINTER, D.; JOUY, L.; LAJOUX, P. **Choisir les outils de pulverisation**. Paris: Institut Technique des Céréales et des Fourrages, 160p, 1990.

BATTE, M. T.; EHSANI, M. R. The economics of precision guidance with auto-boom control for farmer-owned agricultural sprayers. **Computers and Eletronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 53, 28-44, 2006.

BEDOS, C., CELLIER, P., CALVET, R., BARRIUSO, E. Occurrence of pesticides in the atmosphere in France. **Agronomie**, v. 22, p. 35–49, 2002.

BELFORTE, G.; EULA, G.; RAPARELLI, T. Analysis of pneumatic techniques for pesticides spraying in greenhouses. **Experimental Techniques**, novembro/dezembro, 2009.

BÉZIAT, P.; CESHIA, E.; DEDIEU, B. Carbon balance of a three crop succession over two cropland sites in South West France. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 1628–1645, 2009.

CALDAS, E. D.; SOUZA, L. C. Avaliação de risco crônico da ingestão de resíduos de pesticidas na dieta brasileira. **Revista Saúde Pública**, v. 34, n.5, p. 529-537, 2000.

CANTARUTTI, T. F. P.; ARAÚJO, S. L.; ROSSI, S. C.; DALSENTER, P. R. Resíduos de pesticidas em alimentos. **Pesticidas: Revista de Ecotoxicologia e meio ambiente**, Curitiba, v. 18, p. 9-16, jan./dez. 2008

CARRERO, J. M. **Maquinaria para tratamientos fitosanitarios**. Carrero, J.M. Maquinaria para tratamientos fitosanitarios. Madrid: Mundi-Prensa, 1996. 159p.

CHEN, Y. Development of an Intelligent Sprayer to Optimize Pesticide Applications in Nurseries and Orchards. 2010. 193 f. **Tese** (Doutorado em Engenharia Agrícola e Biológica)-Ohio State University, Ohio, 2010.

CROSS, J. V.; WALKLATE, P. J.; MURRAY, L. A.; RICHARDSON, G. M. Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer:2. Effects of spray quality. **Crop Protection** , v.20, p. 333-343, 2001.

CROSS, J. V.; WALKLATE, P. J.; MURRAY, R. A.; RICHARDSON, G. M. Spray deposits and losses in different sized apple trees from an axial fan orchard sprayer:3. Effects of air volumetric flow rate. **Crop Protection**, v.22, p. 381-394, 2003.

CHAIM, A.; MAIA, A. H. N.; PESSOA, M. C. P. Y. Estimativa da deposição de agrotóxicos por análise de gotas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n. 6, p.963-969, 1999.

CHRISTOFOLETTI, J. C.: Considerações sobre tecnologia de aplicação de defensivos agrícolas. São paulo: **Teejet**, 15 p., 1999.

CROWE, T. G.; DOWNEY, D.; GILES, D. K. Digital device and technique for sensing distribution of spray deposition. **Transactions of the ASAE** ,Vol. 48(6): 2085–2093, 2005.

CUNHA, J. P. A. R.; TEIXEIRA, M. M. Escolha a dedo. **Cultivar Máquinas**, Pelotas, n.18, p.8-11, 2003.

CUNHA, J. P. A. R.; TEIXEIRA, M. M.; COURY, J. R.; FERREIRA, L. R. Avaliação de estratégias para redução da deriva de agrotóxicos em pulverizações hidráulicas. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v.21, n.2, p.325-332, 2003.

DARGIER, W.; POELLABAUER, C. **Fundamental of wireless sensor networks: theory and practice**. John Wiley & Sons Ltd. 2010. 313 p.

DE SCHAMPHELEIRE, M.; SPANOGHE, P.; BRUSSELMAN, E.; SONCK, S. Risk assessment of pesticide spray drift damage in Belgium. **Crop Protection**, v. 26, p. 602–611, 2007.

DE SCHAMPHELEIRE, M.; BAETENS, K.; NUYTTENS, D.; SPANOGHE, P. Spray drift measurements to evaluate the Belgian drift mitigation measures in field crops. **Crop Protection**, v. 27, p. 577–589, 2008.

DI PRINZIO, A.; BEHMER, S.; MAGADALENA, J. C. Equipos pulverizadores terrestres. In: _____. **Tecnología de aplicación de agroquímicos**. Argentina: Área de comunicaciones del INTA Alto Valle, 2010. cap. 9, p. 107-120.

DORUCHOWSKI, G.; SWIECHOWSKI, R.; HOLOWNICKI, R.; GODYN, A. Environmentally-dependent application system (EDAS) for safer spray application in fruit growing. **Journal of Horticultural Science & Biotechnology**. ISAFRUIT Special Issue, 107-112, 2009.

ESCOLÁ, A.; CAMP, F.; SOLANELLES, F.; PLANAS, S.; GRACIA, F.; ROSELL, R.; GIL, E.; VAL, L. Spray application volume test in apple and pear orchards in Catalonia (Spain) and variable rate technology for dose adjustment. **Transactions of the ASABE**. Paper Number: 061120, 2006.

FAROOQ, M.; BALACHANDAR, D. W.; WOLF, T. M. Agricultural sprays in cross-flow and drift. **Journal of Agriculture Engineering Research**, London, v.78, n.4, p.347-358, 2001.

FERREIRA, L. R.; FERREIRA, F. A.; MACHADO, A. F. L. In: Silva, A. A.; Silva, J. F. **Tópico em manejo de plantas daninhas**. Viçosa: Editora UFV, 2007. p. 325-367.

FONTES, I. R.; CAGNON, J. A. Sistema de supervisão e controle para aplicação em viveiros de mudas. In: _____. **ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL**, 4., 2002, Campinas. Procedimentos online...Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022002000200055&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 20 Jan. 2011

FOX, R. D.; DERKSEN, R. C.; ZHU, H.; BRAZEE, R. D.; SVENSSON, S. A. A history of air-blast sprayer development and future prospects. **Transactions of the ASABE**, vol. 51(2), p. 405-410, 2008.

FRITZ, B. K.; HOFFMANN, W. C. Meteorological Influences on Mass Accountability of Aerially Applied Sprays. **Transactions of the ASABE**, 10 p, 2007. (ASABE Paper n. AA07-003).

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

GIL, Y.; SINFORT, C.; BEUNET, Y.; POLVECHE, V.; BONICELLI, B. Atmospheric loss of pesticides above an artificial vineyard during air-assisted spraying. **Atmospheric Environment**, v. 41, p. 2945–2957, 2007.

GIL, Y.; SINFORT, C.; GUILLAUME, S.; BRUNET, Y.; PALAGOS, B. Influence of micrometeorological factors on pesticide loss to the air during vine spraying: data analysis with statistical and fuzzy inference models. **Biosystems Engineering**, v. 100, 184–197, 2008.

GULER, H.; ZHU, H.; OZKAN, H. E.; DERKSEN, R. C.; YU, Y.; KRAUSE, C. R. Spray characteristics and drift reduction potential with air induction and conventional flat-fan nozzles. **Transactions of the ASABE**, vol. 50(3), p. 745-754, 2007.

HERBST, A. Pesticide formulation and drift potential. **The BCPC Conference**, pp. 255–260, 2003.

HOFFMAN, W. C.; HEWITT, A. J.; BARBER, J. A. S.; KIRK, I. W.; BROWN, J. R. Field swath and drift analyses techniques. **Transactions of the ASAE**. Paper Number: AA03-007, 2003.

HOLOWNICKI, R.; DUROCHOWSKI, G.; GODYN, A.; SWIECHOWSKI, W. Effects of air jet adjustment on spray losses in orchard. **Aspects of Applied Biology**, n.57. p.357-62, 2000.

HOLOWNICKI, R., G. DORUCHOWSKI, W. SWIECHOWSKI, AND P. JAEKEN. Methods of evaluation of spray deposit and coverage on artificial targets.

Electronic Journal of Polish Agricultural, Universities 5(1), p.1-9, 2002.

JOHANN, A. L. Projeto, construção e avaliação de uma servo-válvula dosadora para sistemas de aplicação de fertilizantes líquidos a taxas variáveis. 2004. 154 f. **Dissertação** (Mestrado em Máquinas Agrícolas)– Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, 2004.

KAMUNDA, C.; CARELSE, X. F. Design and construction of microclimate monitoring system. **Review of Scientific Instruments**, 78, 086104, 2007.

KIRK, I. W. Measurement and prediction of atomization parameters from fixed-wing aircraft spray nozzles. **Transactions of the ASABE**, Vol. 50(3), p. 693–703, 2007.

KÖPPEN, W. **Climatologia como um estúdio de los climas de tierra**. México: Fondo de Cultura Econômica, 1948. 478p.

LARYEA, G. N.; NO, S. Y. Effect of fan speed and electrostatic charge on deposition of orchard canopy sprays. **Atomization and Sprays**, v. 15, p. 133-144, 2005.

MAGDALENA, J. C. Efecto de la utilización de pulverizadores de flujo transversal e hidroneumático tradicional sobre la calidad de los tratamientos fitosanitarios en manzanos (*Malus domestica*, Borkh). 2004. **Tese** (Doutorado). Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Espanha, 2004.

MAGDALENA, J. C.; FERNÁNDEZ, D.; DI PRINZIO, A.; BEHMER, S. Pasado y presente de la aplicación de agroquímicos em agricultural. In _____. **Tecnología de aplicación e agroquímicos**. Argentina: Área de comunicaciones del INTA Alto Valle, 2010. cap. 1, p. 17-26.

MAIA, J. C. S.; BORGES, P. H. M.; BIANCHINI, A.; DAMIANI, C. L.; BEDIN, E. Uniformidade de distribuição de produtos fitossanitários. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v.15, n.1, p.55-65, Jan./Mar., 2007.

MAPA 2010. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento**. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/portal/page/portal/Internet-MAPA/pagina-inicial/vegetal/mercado-interno/agrotoxicos>>. Acesso em 12 jan. 2011.

MARÇAL, A. R. S.; CUNHA, M. Image processing of artificial targets for automatic evaluation of spray quality. **Transactions of the ASABE**, Vol. 51(3): 811-821, 2008.

MATTHEWS, G. A. Pesticide application methods. 3.ed. Oxford: **Blackwell Science**, 432p, 2000.

MATTHEWS, G. A. The applications of chemicals for plant disease control. In. WALLER, J. M.; LENNÉ, J. M.; WALLER, S. J. **Plant pathologist's pocketbook**. London: CAB, p. 345-353, 2002.

MELLO, B. A.; CAIMI, L. L. Simulação na validação de sistemas computacionais para a agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.6, p.666–675, 2008.

MENEZES, D.; MARTINS, D. S. Automação e controle de pulverização em máquinas agrícolas. **Regrad**, Marília-SP, v.1, ano 2, p. 23--34, 2009.

MESQUITA, A. L. S.; GUIMARÃES, F. A.; NEFUSSI, N. **Engenharia de ventilação industrial**. São Paulo: Convênio Cetesb/Ascetesb, 1985. 442 p.

MILLER, P. C. H.; HEWITT, A. J.; BAGLEY, W. E. Adjuvant effects on spray characteristics and drift potential. In **Pesticide Formulations and Application**

Systems, (vol. 21). ASTM STP 1414. West Conshohocken, Pa.: American Society for Testing and Materials, 2001.

MINGUELA, J. V.; CUNHA, J. P. A. R. **Manual de aplicação de produtos fitossanitários**. Viçosa, MG: Aprenda Fácil, 2010. 588 p.

PALMIERI, A. M. Desenvolvimento de um sistema automatizado de baixo custo para coleta e armazenamento de dados de variáveis climáticas: aplicações no ambiente agrícola. 2009. 100 f. **Dissertação** (Mestrado em Física do ambiente Agrícola). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009.

PALLADINI, L. A.; SOUZA, R. T. Deposição obtida nas pulverizações de macieira com diferentes volumes de calda e temperaturas. In: XVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 2004, Florianópolis. **Anais ...** Florianópolis. 2004.

PEREIRA, F. J. S. Sistema de comutação de pontas na barra de pulverização para ajuste do tamanho de gotas às condições climáticas e aplicação em taxas variáveis. 2006. 125 f. **Tese** (Doutorado em Agronomia). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2006.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTIELHAS, P. C. **Meteorologia agrícola**. Piracicaba: Edição revisada e ampliada, 2007. 202 p.

QUEIROZ, H. S. Sistema alternativo para redução da evaporação e deriva em aplicações de calda de pulverização baseado na utilização de tubo de vórtice. 2009. 62 f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, 2009.

RAMOS, H. H. No lugar certo. **Cultivar Máquinas**, Pelotas, n.6, p.16-19, 2001

REYNALDO, E. F. Avaliação de controlador automático de seções e pulverização. 2009. 90 f. **Dissertação** (Mestrado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2009.

RIBAS, P. P.; MATSUMURA, A. T. S. A química dos agrotóxicos: impacto sobre a saúde e ensino. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 10, n. 14, p. 149-158, jul./dez. 2009.

RIBEIRO, M. L.; LOURENCETTI, C.; PEREIRA, S. Y.; MARCHI, M. R. R. Contaminação de águas subterrâneas por pesticidas: avaliação preliminar. **Química Nova**, São Paulo, SP, v. 30, n. 3, p. 688-694, 2007.

ROMÁN, R. A. A.; CORTEZ, J. W.; FERREIRA, M. C.; di OLIVEIRA, J. R. G. Cobertura da cultura da soja pela calda fungicida em função de pontas de pulverização e volumes de aplicação. **Scientia Agraria**, Curitiba, v.10, n.3, p.223-232, 2009.

RUEDELL, J. Tecnologia de aplicação de defensivos. **Plantio Direto**, Brasília, v.19, n.6, p.9-11, 2002.

SARAIVA, A. M. Eletrônica Embarcada e ISOBUS. In:____**Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão**. São Pedro, SP, p.4-5, 2006.

SALYANI, M., SWEEB, R. D., AND FAROOQ, M. Comparison of string and ribbon samplers in orchard spray applications. **Transactions of the ASABE**, Vol. 49, No. 6, p. 1705–1710, 2006.

SCARLET, A. J. Integrated control of agricultural tractors and implements: a review of potential, opportunities relating to cultivation and crop establishment machinery. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 30, n. 1/3, p. 167-191, 2001.

SCHRODER, E. P. **Proteção com tecnologia**. 2009. Disponível em: <http://www.megabio.com.br/ambiente_2.html>. Acesso em 26 maio 2011.

SENAI. **Introdução à programação de microcontroladores Microship PIC**. SENAI - RS. Centro Tecnológico de Mecatrônica, 2006. 28 p.

SILVA, K. O. Desenvolvimento de sistema automatizado de baixo custo para aquisição de dados, de umidade relativa e temperatura do ar. 2000. 70 f. **Dissertação** (Mestrado em Física do Ambiente Agrícola) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2000.

SILVA, K. O.; MORAES, S. O.; MIRANDA, J. H.; PALMIERI, A. M. Sistema automatizado para aquisição de dados de umidade relativa do ar. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v.27, n.3, p.630-638, 2007.

SINDAG 2010. **O setor de defensivos agrícolas no Brasil**. Disponível em: http://www.sindag.com.br/dados_mercado.php. Acesso em 12 jan. 2011.

SUGISAWA, J. M.; FRANCO, F. N.; SILVA, S. S. S.; PECHE FILHO, A. Qualidade de aplicação de herbicida em lavoura de trigo. **Engenharia Agrícola, Jaboticabal**, v.27, n.esp., p.41-47, jan. 2007.

TOMAZELA, M. S.; MARTINS, D.; MARCHI, S. R.; NEGRISOLI, E. Avaliação da deposição da calda de pulverização em função da densidade populacional de *brachiaria plantaginea*, do volume e do ângulo de aplicação. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 24, n. 1, p. 183-189, 2006.

TSAY, J.; FOX, R. D.; OZKAN, H. E.; BRAZEE, R. D.; DERKSEN, R. C. Evaluation of a pneumatic-shielded spraying system by cfd simulation **Transactions of the ASAE**, VI. 45, n. 1, p. 47–54, 2002.

UMEZU, C. K.; CAPPELLI, N. L. Desenvolvimento e avaliação de um controlador eletrônico para equipamentos de aplicação de insumos. **Revista Brasileira de Engenharia agrícola e ambiental**, v. 10, n. 1, p. 225-230, 2006.

VAISALA, 2011. Sensor de Umidade e Temperatura Vaisala modelo Humitter 50Y. Disponível em: <<http://www.vaisala.com>>. Acesso em: 16 abril 2011.

VIEIRA, L. **Meteorologia e climatologia agrícola: notas de aula**. 2009. Disponível em: <<http://www.dea.uem.br/disciplinas/meteorologia/meteorologiaagricola.pdf>>. Acesso em 18 de janeiro de 2010.

VILLALBA, J.; HETZ, E. Deriva de productos agroquímicos - Efecto de las condiciones ambientales. In_____. **Tecnología de aplicación de agroquímicos**. Argentina: Área de comunicaciones del INTA Alto Valle, 2010. cap. 3, p. 45-54.

WAN ISHAK, W. I.; YIN, T. M.; HUDZARI, R. M. Development of a control program for plant growth parameter analysis in lowland tropical greenhouse. **Journal of Applied Sciences**, 11 (3): 592-598, 2011.

WANG, N.; ZHANG, N. WANG, M. Wireless sensors in agriculture and food industry—recent development and future perspective. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 50, p. 1-14, 2006.

WOLF, R. E.; FROHBERG, D. D. Comparison of drift for four drift-reducing flat-fan nozzle types measured in a wind tunnel and evaluated using dropletscan software. St. Joseph: ASAE Annual Meeting. Paper number: 021101, 2002.

WOLF, R. E.. Assessing the ability of Dropletscan™ to analyze spray droplets from a ground operated sprayer. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 19, n. 5, p. 525-530, 2003.

XU, L.; ZHU, H.; OZKAN, H. E.; THISTLE, H. W. Evaporation rate and development of wetted area of water droplets with and without surfactant at different locations on waxy leaf surfaces. **Biosystems Engineering**, v. 106, n. 4, p. 440-447, 2010.

YU, Y.; OZKAN, H. E.; DERKSEN, R. C.; KRAUSE, C. R. Evaporation and deposition coverage area of droplets containing insecticides and spray additives on hydrophilic, hydrophobic, and crabapple leaf surfaces. **Transactions of the ASABE**, Vol. 52(1): 39-49, 2009a.

YU, Y.; ZHU, H.; FRANTZ, J. M.; REDING, M. E.; CHAN, K. C.; OZKAN, H. E. Evaporation and coverage area of pesticide droplets on hairy and waxy leaves. **Biosystems Engineering**, v. 104, n. 3, p. 324-334, 2009b.

ZANDE, J. C. van de; PORSKAMP, H. A. J.; MICHIELSEN, J. M. G. P.; HOLTERMAN, H. J.; HUIJSMANS, J. F. M. Classifications of spray applications for driftability, to protect surface water. *Aspects of Applied Biology* 57. **Pesticide Application**, p. 57–65, 2000.

ZANDE, J. C. van de; HUIJSMANS, J. F. M.; PORSKAMP, H. A. J.; MICHIELSEN, J. M. G. P.; STALLINGA, H.; HOLTERMAN, H. J.; de JONG, A. Spray techniques: how to optimise spray deposition and minimise spray drift. **Environmentalist**, v. 28, p. 9–17, 2008.

ZABKIEWICZ, J. A. Spray formulation efficacy—holistic and futuristic perspectives. **Crop Protection**. New Zeland, v. 26, p. 312–319, 2007.

ZHAO, S.; CASTLE, G. S. P.; ADAMIAK, K. Factors affecting deposition in electrostatic pesticide spraying. **Journal of Electrostatics**. London, v. xxx, p. 1–8, 2008.

ZHU, H.; YU, Y.; DERKSEN, R. C.; OZKAN, H. E.; KRAUSE, C. R. Wide-swath spray application in ornamental nurseries with cannon air jet sprayer. **ASABE Annual International Meeting**. Paper number: 071069, 2007.

ZOLNIER, S. **Psicrometria II**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1994. 9 p. (Caderno didático, 14).