UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO–USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

KLEBER ROMERO FELIZARDO

**MODELAGEM E CONTROLE PREDITIVO DE UM
SISTEMA DE PULVERIZAÇÃO COM INJEÇÃO
DIRETA**

São Carlos
2013

Kleber Romero Felizardo

**Modelagem e controle preditivo de um
sistema de pulverização com injeção direta**

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Sistemas Dinâmicos

Orientador: Vilma Alves de Oliveira

São Carlos

2013

Trata-se da versão corrigida da tese. A versão original se encontra disponível na EESC/USP que aloja o Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica.

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

F313m Felizardo, Kleber Romero
Modelagem e controle preditivo de um sistema de
pulverização com injeção direta / Kleber Romero
Felizardo; orientadora Vilma Alves de Oliveira. São
Carlos, 2013.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica e Área de Concentração em Sistemas
Dinâmicos -- Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, 2013.

1. Agricultura de precisão. 2. Controle preditivo
baseado em modelo. 3. Injeção direta de agroquímico. 4.
Taxa variada. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **KLEBER ROMERO FELIZARDO**.

Título da tese: "Modelagem e controle preditivo de um sistema de pulverização com injeção direta".

Data da defesa: 02/08/2013

Comissão Julgadora:

Resultado:

Profa. Titular **Vilma Alves de Oliveira (Orientadora)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Prof. Associado **Carlos Dias Maciel**
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

APROVADO

Dr. **Paulo Estevão Cruvinel**
(EMBRAPA)

APROVADO

Dr. **Victor Bertucci Neto**
(EMBRAPA)

Aprovado

Prof. Dr. **Julio Elias Normey Rico**
(Universidade Federal de Santa Catarina)

Aprovado

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

*Dedico este trabalho aos meus pais Clation e Sueli,
ao meu avô Horácio (em memória) e a minha tia Venus Mara,
com amor e gratidão.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me concedeu saúde física e mental para a realização deste trabalho.

Aos meus pais Claiton e Sueli, aos meus irmãos: Klissia, Katia, Claiton, Karin e Christopher, a minha tia Venus Mara e ao amigo Francisco, pela compreensão, carinho, presença e apoio ao longo do período deste doutorado.

A minha namorada, Adriana, pelo amor, carinho, compreensão e apoio.

A minha orientadora, Profa. Dra. Vilma Alves de Oliveira, por me ter dado a oportunidade de mostrar o meu trabalho, pela confiança, orientação, paciência e pelo tempo dedicado a este trabalho.

Ao meu co-orientador, Dr. Paulo Estevão Cruvinel pelo apoio e contribuições na realização deste trabalho.

Ao Heitor V. Mercaldi, pela amizade, companheirismo e auxílio nas etapas deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Brian L. Steward pelo apoio no desenvolvimento dos modelos matemáticos.

Aos colegas da pós-graduação do LAC: Elenice, Giann, Heitor, Henrique, Michele e Rodolpho e da Embrapa Instrumentação: Marcos, Francisco e Cristiane, pela amizade e companheirismo durante a realização deste trabalho.

Aos funcionários da Escola de Engenharia de São Carlos: César, Odair, Rui e Salvador e da Embrapa Instrumentação: Jorge, Godoy, Márcio e Marcelo, pelo auxílio nas tarefas que possibilitaram o andamento deste trabalho.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de doutorado.

*“Quanto mais aumenta nosso conhecimento,
mais evidente fica nossa ignorância.”
(John F. Kennedy)*

RESUMO

Romero Felizardo, Kleber **Modelagem e controle preditivo de um sistema de pulverização com injeção direta**. 141 p. Tese de doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2013.

Sistemas de pulverização com injeção direta possibilitam o uso de diferentes agrotóxicos em uma mesma aplicação, reduzindo o desperdício de agrotóxicos e minimizando desta forma os impactos toxicológico e ambiental relacionados com o preparo e descarte da calda. Neste trabalho foram desenvolvidos modelos matemáticos para um sistema de pulverização com injeção direta de agrotóxico, incluindo a dinâmica da concentração da calda. Também foi desenvolvida uma estratégia de controle preditivo com antecipação das taxas de aplicação para ajustar as taxas de aplicação do agrotóxico e da calda. Também, uma plataforma flexível para o desenvolvimento de pulverizadores foi projetada e construída. A sua automação foi baseada em um controlador embarcado de tempo real adequado para aplicações de controle, aquisição e temporização. Para obter os parâmetros dos modelos e avaliar a estratégia de controle ensaios de vazão e concentração para diferentes pontas de pulverização foram propostos. Com o emprego da abordagem de controle preditivo, os erros das vazões do agrotóxico e da calda ficaram abaixo do nível admissível de 5%. O uso da estratégia de antecipação das taxas de aplicação permitiu aumentar a eficiência da aplicação, reduzindo em até 40% os erros de aplicação. Resultados experimentais são apresentados para validar os modelos e mostrar a eficiência da estratégia de controle desenvolvida.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Controle preditivo baseado em modelo. Injeção direta de agroquímico. Taxa variada.

ABSTRACT

Romero Felizardo, Kleber **Modeling and predictive control of a chemical injection sprayer system.** 141 p. Ph.D. Thesis – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2013.

Sprayer systems with direct injection allow the use of different pesticides in a single application, reducing the waste of chemicals and thereby minimizing the toxicologic and environmental risks associated with the carrier-chemical mix preparation and discard. In this work, mathematical models for a direct chemical injection sprayer system including the dynamics of the carrier-chemical mix concentration are developed. Also, a predictive control strategy with anticipative reference of application rates was developed to adjust the carrier-chemical mix and chemical flow rates. Also, a flexible platform for the development of sprayers was designed and constructed. The automation of this platform was based on a programmable automation controller suitable for control, acquisition and timing applications. To obtain the models and analyse the control strategy, essays flow and concentration for different spray nozzles were proposed. With the use of predictive control approach, the errors of the carrier-chemical mix and chemical flow rates were lower than the admissible level of 5 %. The use of the advanced references increased the efficiency of the variable rate application, reducing up to 40 % application errors. Practical results are presented to validate the models and show the efficiency of the developed control strategy.

Keywords: Precision agriculture. Model predictive control. Direct chemical injection. Variable rate.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1	Pulverizador tratorizado de barras de pequeno porte, modelo Condorito, da empresa Jacto (Fonte: Jacto (2013)).	33
Figura 2.2	Diagrama simplificado de um pulverizador de barra sem regulação automática da taxa de aplicação (Fonte: adaptado de Ulson (2002)).	34
Figura 2.3	Diagrama simplificado de um pulverizador de barra com regulação automática da taxa de aplicação (Fonte: adaptado de Ulson (2002)).	36
Figura 2.4	Diagrama simplificado de um pulverizador de barra com taxa de aplicação variada baseado em mapa de prescrição (Fonte: adaptado de Ulson (2002)).	37
Figura 2.5	Diagrama simplificado de um pulverizador de barra equipado com um sistema de injeção direta de agrotóxico localizado antes da bomba de pulverização (Fonte: adaptado de Teejet (2013)).	39
Figura 2.6	Diagrama simplificado de um pulverizador de barra equipado com um sistema de injeção direta de agrotóxico localizado depois da bomba de pulverização (Fonte: adaptado de Teejet (2013)).	40
Figura 2.7	Alternativas disponíveis para o controle do tamanho de gotas: (a) comutação automática das pontas, empresa Arag (Fonte: Arag (2013)), (b) comutação automática das pontas, empresa Teejet (Fonte: Teejet (2013)), (c) bico bi-fluido, empresa Airtec (Fonte: Airtec (2013)) e (d) Bico com tecnologia PWM, empresa Capstan Ag System (Fonte: Capstan (2013)).	42
Figura 3.1	Diagrama hidráulico do sistema de pulverização com injeção direta.	43
Figura 3.2	Vista frontal da bancada pulverização onde está montado o sistema de pulverização com injeção direta desenvolvido. Ao fundo está o painel com os componentes elétricos, eletrônicos e hidráulicos, à frente estão as barras de distribuição 1 e 2, com os sete bicos de pulverização, a barra de distribuição central 3, contendo três bicos, e o sistema de deslocamento linear com velocidade ajustável para alojamento de papéis hidrossensíveis.	45

Figura 3.3	Arquitetura usada para o desenvolvimento da automação da bancada de pulverização mostrando os níveis de programação com o LabVIEW PC, LabVIEW RT e LabVIEW FPGA.	46
Figura 3.4	Instrumentação usada no sistema de injeção de agrotóxico. Os módulos NI 9421, NI 9411, NI 9201 e NI 9474 são módulos de E/S do cRIO-9073 e as linhas indicam as variáveis medidas do sistema de injeção.	47
Figura 3.5	Instrumentação usada na bomba de pulverização e no sensor de nível do reservatório de água. O motor trifásico acoplado a bomba de pulverização é acionado por um inversor de frequência e a vazão da bomba de pulverização é proporcional a velocidade de rotação do motor trifásico. .	49
Figura 3.6	Relação entre as tensões: (a) $v'_{mr} \times v_{mr}$ e (b) $v_m \times v'_m$ obtidas experimentalmente.	50
Figura 3.7	Instrumentação usada nas válvulas elétricas e no encoder. As válvulas elétricas são do tipo proporcional e <i>on/off</i> e seus motores são acionados por pontes-H. A válvula proporcional 1 é usada para regular a vazão da calda q_m e a válvula proporcional 2 foi usada apenas para obter a resistência fluídica K_{qv} da válvula proporcional 1.	52
Figura 3.8	Instrumentação usada na bomba de descarte e no sensor de nível. Um amplificador de potência é usado no acionamento do motor CC da bomba de descarte.	53
Figura 3.9	Instrumentação usada nos sensores de pressão. A saída do amplificador de instrumentação fornece a diferença de tensão $v\Delta_p$ entre os sensores de pressão 1 e 2.	53
Figura 3.10	Instrumentação usada no fluxômetro eletromagnético. O resistor de <i>pull-up</i> liga a saída do fluxômetro a tensão de alimentação.	54
Figura 3.11	Instrumentação usada no sensor de condutividade. O transmissor M300 possui saída em corrente e o conversor I/V é usado para fornecer o nível adequado de tensão ao módulo NI 9201.	55
Figura 4.1	Sistema de injeção do agrotóxico.	57
Figura 4.2	Diagrama de blocos do sistema de injeção do agrotóxico.	58
Figura 4.3	Arranjo usado para o ensaio do sistema de injeção. Através de uma interface com o usuário, desenvolvida no LabVIEW PC, são gravados os dados referentes às variáveis i_h , p_h , v_h e ω_h a cada 1 ms.	59
Figura 4.4	Resultados experimentais e de simulação do modelo do sistema de injeção. .	60
Figura 4.5	Circuito equivalente hidráulico do sistema de pulverização.	62
Figura 4.6	Diagrama de blocos do motor CC da válvula proporcional 1.	65
Figura 4.7	Curva $K_{qv} \times \theta_v$ da válvula do tipo proporcional 1 usando a função exponencial (4.25).	66
Figura 4.8	Curva experimental $\Delta p_{pn} \times q_f^2$ usando a função potência (4.13).	67

Figura 4.9	Diagrama de blocos do sistema de pulverização com um controlador proporcional de ganho K_p	68
Figura 4.10	Resultados experimentais e de simulação do sistema de pulverização para: (a) ponta de pulverização 11003 e (b) ponta de pulverização 11005. . . .	69
Figura 4.11	Diagrama de blocos do modelo dinâmico da concentração.	70
Figura 4.12	Respostas da concentração c_o para os casos I a IV.	71
Figura 4.13	Curva experimental $\tau_c \times q_f$ obtida com os dados experimentais via função de potência (4.30).	72
Figura 4.14	Curva experimental $T_c \times q_f$ obtida com os dados experimentais via função de potência (4.31).	72
Figura 4.15	Valores de q_h e q_f utilizados para validação do modelo de concentração. .	73
Figura 4.16	Resultados experimentais e de simulação do modelo da concentração. . .	73
Figura 5.1	Estrutura básica do MPC com seus principais elementos: o modelo de predição e o otimizador.	76
Figura 5.2	Estratégia de atuação do MPC com horizonte de controle N_c e horizonte de predição N_p	77
Figura 5.3	Algoritmo MPC no LabVIEW.	84
Figura 5.4	Estrutura do MPC para regulação da vazão do agrotóxico q_h	85
Figura 5.5	Estrutura do MPC para regulação da vazão do agrotóxico q_h	88
Figura 6.1	Ilustração da estratégia de antecipação das taxas de aplicação.	93
Figura 6.2	Modelo completo do sistema de pulverização com injeção direta com as malhas de controle do tipo MPC, os modelos de injeção, pulverização e concentração e estratégia de antecipação das taxas indicando a geração das referências para os MPCs.	94
Figura 6.3	Exemplo hipotético de um mapa de aplicação utilizado no ambiente de simulação.	95
Figura 6.4	Resultados de simulação e experimentais sem o uso da estratégia de antecipação das referências das taxas de aplicação.	96
Figura 6.5	Resultados de simulação e experimentais com o uso da estratégia de antecipação das referências das taxas de aplicação.	96
Figura 7.1	Resultados experimentais dos MPCs referentes ao ensaio do perfil 1. . . .	101
Figura 7.2	Resultados experimentais dos MPCs referentes ao ensaio do perfil 2. . . .	102
Figura 7.3	Resultados experimentais dos MPCs referentes ao ensaio do perfil 3. . . .	103
Figura 7.4	Resultados experimentais dos MPCs referentes ao ensaio do perfil 4. . . .	104
Figura 7.5	Resultados da aplicação para o mapa 1 para as estratégias: (a) sem antecipação, (b) antecipação 2 e (c) antecipação 1.	106
Figura 7.6	Resultados da aplicação para o mapa 2 para as estratégias: (a) sem antecipação, (b) antecipação 2 e (c) antecipação 1.	107

Figura 7.7	Resultados da aplicação para o mapa 3 para as estratégias: (a) sem antecipação, (b) antecipação 2 e (c) antecipação 1.	108
Figura 7.8	Resultados da aplicação para o mapa 4 para as estratégias: (a) sem antecipação, (b) antecipação 2 e (c) antecipação 1.	109
Figura 7.9	Tempo de resposta do sistema de pulverização com injeção direta para aplicações em taxa variada baseada em mapa, sendo: (a) Mapa 1, (b) Mapa 2, (c) Mapa 3 e (d) Mapa 4.	111
Figura A.1	Conexões entre o cRIO-9073 e os módulos de E/S.	125
Figura B.1	Tela do usuário para visualização gráfica dos dados obtidos experimentalmente na bancada de ensaio, seleção das seções de barras 1 e 2, gravação dos dados e seleção da estratégia de antecipação.	127
Figura B.2	Tela do usuário para criação do mapa de prescrição e do perfil de velocidade.128	
Figura B.3	Tela do usuário para configuração dos parâmetros dos MPCs.	128
Figura C.1	Esquemático do circuito de condicionamento do inversor de frequência. .	129
Figura C.2	Esquemático dos circuitos do amplificador de potência, condicionamento de sinal e alimentação do encoder do sistema de injeção.	130
Figura C.3	Esquemático do circuito de acionamento da bomba de descarte e ligações dos sensores de nível e do fluxômetro.	131
Figura C.4	Esquemático do circuito de condicionamento do sensor de condutividade. 132	
Figura C.5	Esquemático do circuito de condicionamento dos sensores de pressão. . .	132
Figura C.6	Esquemático dos circuitos de acionamento das válvulas elétricas.	133
Figura D.1	Tela do usuário referente ao ambiente de simulação.	135
Figura D.2	Tela do usuário para configuração dos parâmetros dos MPCs.	136
Figura D.3	VI contendo os modelos de injeção, pulverização e concentração.	136
Figura D.4	VI responsável pela antecipação das taxas de aplicação, geração do mapa de prescrição, criação do perfil de velocidade e armazenamento dos dados de simulação.	137
Figura D.5	VI dos MPCs para os sistemas de injeção e pulverização.	138
Figura A.1	Representação gráfica do método proposto por Sundaresan e Krishnaswamy.139	
Figura B.1	Tabela das pontas de pulverização de jato plano com faixa ampliada usadas neste trabalho, sendo: VF (<i>Very Fine</i>), F (<i>Fine</i>) e M (<i>Medium</i>) (Fonte: Arag (2013)).	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1	Tabela verdade para acionamento das válvulas elétricas.	51
Tabela 4.1	Valores dos parâmetros do sistema de injeção.	59
Tabela 4.2	Valores dos índices RMSE das variáveis i_h , ω_h e q_h	61
Tabela 4.3	Valores dos parâmetros do sistema de pulverização.	67
Tabela 4.4	Índices RMSE das variáveis q_f e p_s	68
Tabela 4.5	Valores dos parâmetros do modelo da concentração.	70
Tabela 4.6	Valores médios dos parâmetros K_o , τ_c e T_c	71
Tabela 5.1	Valores dos parâmetros do MPC para regulação de q_h	87
Tabela 5.2	Valores dos parâmetros do MPC para regulação de q_f	90
Tabela 6.1	Índices RMSE das variáveis q_f , q_h , p_s e c_o preditas pelo ambiente de simulação.	97
Tabela 7.1	Erros relativos $E_{IAE_{qf}}$ e $E_{IAE_{qh}}$	100
Tabela 7.2	Índice IAE_{c_o} (Modo antecipativo 1).	111
Tabela 7.3	Índice IAE_{c_o} (Modo antecipativo 2).	111

SUMÁRIO

1	Introdução	25
1.1	Justificativa	31
1.2	Contribuições da tese	31
1.3	Organização do trabalho	32
2	Aplicação a taxa variada com pulverizadores tratorizados	33
2.1	Pulverizador de barra sem regulação automática da taxa de aplicação	34
2.2	Pulverizador de barra com regulação automática da taxa de aplicação	35
2.3	Pulverizador de barra com taxa de aplicação variada	36
2.3.1	Estratégia baseada em mapa	37
2.3.2	Estratégia baseada em sensor	38
2.4	Pulverizador de barra equipado com sistema de injeção direta de agrotóxico	38
2.4.1	Tempo de resposta	40
2.5	Gerenciamento eletrônico do tamanho de gotas	41
3	O sistema de pulverização com injeção direta desenvolvido	43
3.1	Automação da bancada de pulverização	44
3.2	Instrumentação do sistema de injeção	47
3.3	Instrumentação do sistema de pulverização	48
3.3.1	Acionamento da bomba de pulverização e relação entre a vazão e a rotação	48
3.3.2	Acionamento das válvulas proporcionais e <i>on/off</i>	51
3.3.3	Acionamento da bomba de descarte	51
3.3.4	Condicionamento dos sinais dos sensores de pressão, fluxo, nível e encoder	52
3.4	Instrumentação do sensor de condutividade	54
4	Modelagem e validação do sistema de pulverização com injeção direta	57
4.1	Modelagem do sistema de injeção	57

4.1.1	Obtenção dos parâmetros do sistema de injeção	58
4.1.2	Validação do modelo do sistema de injeção	59
4.2	Modelagem do sistema de pulverização	61
4.2.1	Equacionamento da pressão p_s do sistema de pulverização	61
4.2.2	Equacionamento da vazão da calda	64
4.2.3	Obtenção dos parâmetros do sistema de pulverização	65
4.2.4	Validação do modelo do sistema de pulverização	68
4.3	Modelagem da dinâmica da concentração c_o da calda	69
4.3.1	Obtenção dos parâmetros do modelo da concentração	70
4.3.2	Validação do modelo da concentração	72
5	Implementação dos controladores preditivos baseado em modelo	75
5.1	Introdução	75
5.2	Estratégia do MPC	76
5.3	Formulação do MPC	78
5.3.1	Modelo de predição	78
5.3.2	Cálculo de $\hat{y}(k + i k)$ ao longo do horizonte N_p	79
5.3.3	Função custo	80
5.3.4	Solução do problema de otimização na ausência de restrições	81
5.3.5	Solução do problema de otimização com restrições	82
5.4	MPC no LabVIEW	83
5.5	Implementação dos MPCs na plataforma cRIO-9073	85
5.5.1	Usando o MPC para regulação de q_h	85
5.5.2	Usando o MPC para regulação de q_f	87
6	A estratégia de antecipação das taxas de aplicação e o ambiente de simulação	91
6.1	Antecipação das taxas de aplicação	91
6.2	Ambiente de simulação	94
6.2.1	Simulações no ambiente desenvolvido	95
7	Resultados e discussão	99
7.1	Desempenho dos MPCs	99
7.2	Resultados experimentais para aplicações com mapas	105
	Conclusão	113
	Referências	117
	APÊNDICE A Conexões cRIO-9073 e módulos de E/S	125
	APÊNDICE B Telas do sistema de pulverização	127

APÊNDICE C	Esquemáticos dos circuitos elétricos	129
APÊNDICE D	Telas do ambiente de simulação e VIs desenvolvidos	135
APÊNDICE A	Método de Sundaresan e Krishnaswamy	139
ANEXO B	Tabela de pontas	141

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Na agricultura tradicional, a pulverização baseia-se no conceito de aplicação em área total, ou seja, a aplicação do agrotóxico é feita de uma mesma dosagem do produto e do mesmo volume de calda (mistura água e agrotóxico) por hectare (taxa de aplicação) em toda a área trabalhada. Ocorre que nesta área, cujo tamanho pode variar desde dezenas até centenas de hectares, há variabilidade de todos os tipos de pragas, doenças e plantas daninhas. Dessa forma, a não consideração de uma dosagem específica para cada parte do campo pode gerar desperdícios de agrotóxicos, agressões ao meio ambiente, bem como perdas na produtividade agrícola (PEREIRA, 2006; ULSON, 2002).

A partir da década de 90, ocorreu a popularização de duas tecnologias, o GPS (*Global Position System*), que provê informação sobre o posicionamento de equipamentos em coordenadas de latitude, longitude e altitude, e o GIS (*Geographic Information System*), que é um sistema de armazenamento de dados de posições geográficas com os seus atributos (porcentagem de infestação de pragas, doenças e plantas daninhas, por exemplo). A combinação dessas duas tecnologias permitiu a difusão da agricultura de precisão (AP) no Brasil e no mundo.

Segundo Tschiedel e Ferreira (2002) a AP reúne o uso de tecnologias para o manejo de solo, insumos e culturas, de modo adequado às variações espaciais e temporais em fatores que afetam a produtividade das mesmas, com o objetivo de aumentar a eficiência produtiva.

A adoção da AP para a aplicação localizada de agrotóxicos pode reduzir o desperdício de agrotóxicos e a agressão ao meio ambiente, proporcionando uma produção mais eficiente de alimentos em grande escala e aumentando a produtividade agrícola (BAIO; ANTUNIASSI, 2011).

Para Nuspl et al. (1996) é possível uma economia de herbicida na ordem de 30 a 80% quando se realiza a aplicação localizada de agrotóxicos, comparada a aplicação em área total.

A aplicação localizada de herbicidas através do mapeamento de plantas daninhas permi-

tiram reduções significativas de herbicidas em culturas de milho, cereal, trigo e soja. Essas reduções, conforme relatadas respectivamente em Williams et al. (1999), Stafford e Miller (1993), Gerhards et al. (1999) e Tian et al. (1999), foram de 51% para cultura de milho, 60% para cultura de cereal, 70% para cultura de trigo e 48% para cultura de soja.

A aplicação localizada de agrotóxicos pode ser realizada em taxa variável pela detecção instantânea dos alvos (por exemplo, plantas daninhas) através do uso de sensores ou câmeras digitais ou por mapas de prescrição. Na aplicação baseada em mapas, é necessário o mapeamento das infestações das plantas daninhas em uma etapa anterior a pulverização, para geração dos mapas de prescrição contendo os valores das doses do agrotóxico para cada local do campo. No outro tipo de aplicação, a pulverização é feita em tempo real, ou seja, instantes após a identificação das plantas daninhas (BAIO; ANTUNIASSI, 2011).

As variações na dose podem ser obtidas por mudanças do volume aplicado, mantendo-se a concentração constante, ou através de variações na concentração (dose) do agrotóxico na calda, ao longo da pulverização. Nesse último método de variação, a tecnologia empregada é a injeção direta de agrotóxicos (ANTUNIASSI; JÚNIOR, 2000).

Os primeiros sistemas de injeção direta foram desenvolvidos entre os anos 70 e 80 (PECK; ROTH, 1975; VIDRINE et al., 1975; LARSON et al., 1982; REICHARD; LADD, 1983; GEBHARDT et al., 1984; CHO et al., 1985; KOO et al., 1987) e os grandes empecilhos da utilização desses sistemas foram o alto custo, a complexidade de operação e o desempenho. Diversas pesquisas foram realizadas em sistemas de injeção direta visando o aumento da eficácia da aplicação de agrotóxicos. As principais propostas de sistemas de injeção direta, as quais seguem basicamente o conceito de bomba dosadora e injeção do agrotóxico proporcional à velocidade do pulverizador, foram relatadas em Frost (1990), Miller e Smith (1992), Stafford e Miller (1993), Ghate e Perry (1994), Paice et al. (1995), Rockwell e Ayers (1996), Koo e Sumner (1998), Womac et al. (2002); Gillis et al. (2003), Downey et al. (2006); Vondricka et al. (2007), Xue et al. (2010), Doerpmund et al. (2011), Walgenbach et al. (2011) e Doerpmund et al. (2012).

Segundo Baio e Antuniassi (2011), a principal característica dos sistemas de injeção direta está relacionada ao armazenamento do diluente (água) e do agrotóxico em recipientes separados. A mistura é realizada somente no momento da aplicação, através da injeção do agrotóxico na tubulação que leva a calda aos bicos do pulverizador. Nesses sistemas, a quantidade de agrotóxico injetado pode ser realizada, entre outras maneiras, através do controle da rotação das bombas injetoras de pistões ou peristálticas.

As principais vantagens do sistema de injeção são a redução dos riscos envolvidos no preparo e descarte da calda e a possibilidade de aplicar mais de um tipo de agrotóxico numa mesma aplicação (BODE; BRETTHAUER, 2008). No entanto, quando o agrotóxico é injetado na barra de pulverização, é necessário um período de tempo para que a calda formada seja entregue aos bicos de pulverização na concentração correta. O transiente da concentração, caracterizado pelo tempo de resposta, acarreta erros de aplicação (KOO et al., 1987; TOMPKINS

et al., 1990; BUDWIG et al., 1988).

Pulverizadores dotados com sistemas de injeção direta podem apresentar um tempo de resposta entre 4 s e 60 s dependendo da localidade do ponto de injeção. O tempo de resposta será menor quanto mais próximo ao bico for feita a injeção (BUDWIG et al., 1988; TOMPKINS et al., 1990; SUDDUTH et al., 1995; KOO; SUMNER, 1998; ZHU et al., 1998; ANGLUND; AYERS, 2003; HLOBEN, 2007).

O tempo de resposta dos sistemas de injeção direta pode ser minimizado por sistemas DNI (*Direct Nozzle Injection*), pois a injeção do agrotóxico é feita diretamente nos bicos de pulverização (TOMPKINS et al., 1990). Por outro lado, também é reduzido o tempo para a formação da calda, assim são reportados problemas com relação à homogeneidade da calda (ROCKWELL; AYERS, 1996; ZHU et al., 1998).

O tempo de resposta é um dos fatores mais importantes de desempenho para as máquinas de aplicação dotadas de sistemas de injeção direta, principalmente em sistemas de aplicação localizada. O tempo de resposta pode ser avaliado a partir de medidas da concentração da calda formada em um dado instante da pulverização por sensores de condutividade (BAIO; ANTUNIASSI, 2011).

Antuniassi et al. (2002) avaliaram o desempenho de três sistemas de injeção disponíveis no mercado. A manutenção das doses constantes foi avaliada utilizando-se como traçantes corantes e sais diluídos no líquido injetado. A resposta dinâmica a mudanças de dose foi determinada através da medição da concentração de sal na calda após o ponto de injeção, através do monitoramento da condutividade elétrica da solução.

Figueiredo (2003), visando determinar o tempo de resposta de um pulverizador experimental com um sistema de injeção direta, utilizou um sensor de condutividade acoplado na saída do bico de pulverização. Esse sensor, desenvolvido por Antuniassi (1999), não possui compensação de temperatura e é formado por dois eletrodos metálicos conectados no interior de uma tubulação plástica. O aditivo usado pelo sistema de injeção foi uma solução de água contendo NaCl como traçante. Os dados obtidos pelo sensor de condutividade mostraram que o tempo de resposta variou entre 10 e 24 s.

Gillis et al. (2003) avaliaram o tempo de resposta de um pulverizador experimental com injeção direta na linha de sucção da bomba de pulverização utilizando um sensor de condutividade formado por dois eletrodos com compensação automática de temperatura (modelo CS-51, empresa Myron-L) acoplado na saída do bico de pulverização. O reservatório de agrotóxico foi preenchido com água e NaCl.

Crowe et al. (2005) e Hloben (2007) desenvolveram um sensor de condutividade para medir o transiente da concentração de aditivo injetado nos bicos. Os dois eletrodos do sensor estão dispostos no interior de um anel plástico que fica em contato com o fluido. O aditivo usado foi uma solução de água contendo NaCl como traçante.

A seguir, são apresentadas em ordem cronológica as principais pesquisas na área de modelagem e controle voltadas a aplicações em taxas variáveis de agrotóxicos e fertilizantes.

Koo et al. (1987) e Way et al. (1992) desenvolveram modelos matemáticos para estimar os erros de aplicação devido ao tempo de resposta dos sistemas de injeção direta. Os sistemas de pulverização simulados mantêm a vazão da água constante e variam apenas a vazão do agrotóxico proporcionalmente com a velocidade do pulverizador. Esses autores concluíram que os resultados das simulações foram precisos o suficiente para prever os erros de aplicação.

Um sistema de controle em malha fechada, do tipo proporcional-integral-derivativo (PID), para regular a vazão do agrotóxico em um sistema de pulverização com injeção direta foi proposto por Frost (1990). A injeção do agrotóxico foi feita na linha de pressão do sistema de pulverização através de uma bomba de deslocamento positivo do tipo engrenagem. A vazão dessa bomba foi estimada a partir de sua rotação e da queda de pressão. A resposta ao degrau do sistema de injeção para o controlador desenvolvido foi considerada satisfatória dado que o tempo necessário para a resposta do sistema de injeção atingir 90% do seu valor de entrada foi inferior a 1 s.

Way et al. (1993) propuseram um sistema de controle em malha fechada, do tipo proporcional, para regular a vazão do agrotóxico o qual é injetado na linha de pressão do sistema de pulverização através de um tanque com agrotóxico pressurizado por ar comprimido. A vazão do agrotóxico é medida por um fluxômetro, do tipo pistão, e a regulação da vazão é feita por uma válvula de controle acionada por um motor de passo. O sistema de controle proposto foi avaliado através de simulações computacionais. A resposta a uma entrada em degrau do sistema de injeção para o controlador desenvolvido apresentou um sobressinal de apenas 0,42% e o tempo necessário para a resposta do sistema atingir 90% do seu valor de entrada foi inferior a 0,13 s.

Steward e Humburg (2000) desenvolveram um modelo matemático para um sistema de pulverização com injeção direta. O sistema de injeção consiste de uma bomba hidráulica do tipo pistão e a vazão do agrotóxico é estimada a partir da rotação e da queda de pressão nessa bomba hidráulica. Um controlador proporcional-integral (PI) foi utilizado para regular a vazão do agrotóxico injetado na linha de pressão do sistema de pulverização. Um controlador proporcional, desenvolvido para regular a vazão da água do sistema de pulverização, gera o valor da tensão a ser aplicada na armadura do motor da válvula de controle, baseada na medição da vazão. Simulações foram realizadas com e sem o ajuste da vazão da água proporcionalmente com a velocidade do pulverizador. Os resultados de simulação mostraram que as variações de concentração, devido aos atrasos de transporte, são menores quando se utiliza o ajuste simultâneo das vazões da água e do agrotóxico proporcionalmente com a velocidade do pulverizador.

Munack et al. (2001) desenvolveram uma estratégia de controle adaptativo baseado em modelo para aplicação de fertilizantes em taxas variáveis. A estratégia de controle foi avaliada por meio de experimentos em campo e o controlador proposto apresentou resultados satisfatórios.

Ulson (2002) desenvolveu um sistema de controle inteligente de baixo custo baseado em redes neurais artificiais para a aplicação de fertilizantes líquidos em taxas variáveis.

Um sistema de controle de taxa variável para aplicação de fertilizantes foi apresentado por Huang et al. (2007). A malha de controle PID do sistema servo-hidráulico foi avaliada com experimentos em campo e concluiu-se que o controlador projetado obteve um desempenho satisfatório.

Rosseto (2008) utilizou um protótipo de um sistema de pulverização em taxa variada sem injeção direta para a aplicação de agrotóxicos baseada em mapas de prescrição. Foram comparados os desempenhos de um controlador PID convencional e um controlador fuzzy PD+I. Resultados experimentais mostraram que o controlador fuzzy apresentou melhor desempenho.

Shi et al. (2009) desenvolveram um modelo matemático para um sistema de pulverização sem injeção direta com taxa variada ajustada por um controlador PID. Resultados apenas de simulação apresentaram erros admissíveis de aplicação no estado estacionário de apenas 2% e tempo de resposta de 0,208 s. O modelo matemático desenvolvido neste trabalho não foi validado.

Olivi (2009) desenvolveu um modelo matemático para um sistema de pulverização com injeção direta. O sistema de injeção, localizado na linha de pressão da bomba de pulverização, utiliza uma bomba hidráulica do tipo pistão e a vazão do agrotóxico, estimada a partir da rotação dessa bomba hidráulica, é regulada por um controlador preditivo. A vazão da água é regulada através de uma válvula de 3 vias. Entretanto, nesse trabalho não foi desenvolvido o controle do fluxo da água e por isso a vazão da água foi considerada constante. Resultados apenas de simulação comprovaram a eficácia do controlador preditivo proposto. Este trabalho não apresentou resultados de validação do modelo desenvolvido.

Chunying e Xi (2010) desenvolveram um modelo matemático de um sistema de aplicação de fertilizantes a taxa variada. O sistema de controle foi baseado na estratégia de controle fuzzy PD+I. Resultados de simulação mostraram que o sistema com estratégia de controle fuzzy PD+I apresentou um tempo de resposta rápido com pequeno sobressinal.

Aiwu et al. (2010) apresentaram um sistema de injeção direta que utiliza um módulo de injeção eletrônica veicular (modelo UH25) para injetar agrotóxico na linha de pressão do sistema de pulverização. A vazão do agrotóxico é regulada por um controlador PID implementado em uma placa de aquisição da National Instruments (modelo PXI-6221). Resultados experimentais em laboratório mostraram que é possível utilizar este tipo de módulo de injeção em sistemas de pulverização.

Aissaoui et al. (2011) desenvolveram um sistema de pulverização com injeção direta equipado com bomba de pulverização do tipo diafragma (Flojet, 24 VDC, 10 ℓ /min, 3 bar) e bomba de injeção do tipo peristáltica (Watson Marlow 400D/E, 15 VDC, 100 $m\ell$ /min). A injeção do agrotóxico é feita na linha de sucção da bomba de pulverização. O *layout* do sistema hidráulico, composto por duas barras de pulverização contendo cada uma 05 pontas

de pulverização (Teejet XR 11002), foi otimizado para obter um tempo de resposta mínimo do sistema de pulverização desenvolvido (AISSAOUI et al., 2009). A dinâmica da vazão do agrotóxico foi modelada como um sistema de primeira ordem e a dinâmica da vazão da calda formada foi igualmente modelada como um sistema de primeira ordem com atraso de transporte. Esse atraso foi obtido a partir de medidas realizadas com sensores fluorimétricos instalados nas pontas de pulverização. Cinco desses sensores foram projetados e calibrados para detectar a transmitância da fluorescência no comprimento de onda referente a $520\text{ }\mu\text{m}$ (AISSAOUI et al., 2007). O sistema de pulverização com injeção direta foi modelado em Matlab-Simulink. Dois controladores PID foram projetados para regular as vazões do agrotóxico e da calda e ambos foram implementados em um PLC (*Programmable Logic Controller*). Os testes experimentais mostraram a importância de variar ambas as vazões, perante mudanças da velocidade e das taxas de aplicação, a fim de manter o erro da aplicação a níveis admissíveis de 5%.

Needham et al. (2012) desenvolveram o modelo dinâmico da pressão e vazão de uma válvula solenóide utilizada para controle individual do fluxo em bicos de pulverização agrícola. A resposta dinâmica do modelo desenvolvido em espaço de estado apresentou comportamento similar ao da válvula solenóide.

Mercaldi (2012) utilizou o protótipo de um sistema de pulverização com injeção direta para avaliar o desempenho de um controlador PID convencional e um controlador adaptativo do tipo fuzzy PD+I por escalonamento de ganho para ajuste da vazão da calda. A vazão da calda é regulada através de uma válvula de 3 vias. O sistema de injeção, localizado na linha de sucção da bomba de pulverização, utiliza uma bomba hidráulica do tipo pistão e a vazão do agrotóxico, estimada a partir da rotação dessa bomba, é regulada por um controlador do tipo PI. Resultados experimentais mostraram que o controlador fuzzy PD+I por escalonamento de ganho apresentou desempenho superior ao controlador PID convencional e o controlador PI apresentou resultados satisfatórios. O transiente da calda formada não foi abordado neste trabalho.

O uso de controladores preditivos em sistemas de injeção direta de combustível líquido foram reportados por Lino et al. (2006), Giorgetti et al. (2006), Maruyama et al. (2011). Esse tipo de sistema apresenta algumas características semelhantes ao sistema de injeção direta de agrotóxico, tais como: realização da mistura (ar + combustível) em tempo real, uso de válvulas elétricas para regulação da pressão, processos não-lineares (saturação, atraso de transporte, zona-morta) e malhas de controle baseadas na realimentação do fluxo e da pressão.

Os trabalhos mencionados anteriormente mostraram a evolução dos sistemas de pulverização para aplicações em taxa variada e a busca por técnicas de controle mais eficientes visando principalmente a redução dos erros de aplicação. O objetivo geral deste trabalho é a modelagem e o controle preditivo de um sistema de pulverização com injeção direta usando uma estratégia de antecipação das taxas de aplicação para diminuição dos erros de

aplicação de agrotóxicos.

1.1 Justificativa

Ainda hoje, os grandes centros produtores do país não adotaram extensivamente o conceito da agricultura de precisão, desta forma a agricultura ainda é praticada sem considerar os efeitos da variabilidade, refletindo no consumo excessivo de agrotóxicos. Somente no ano 2011, foram consumidos no Brasil por volta de 800 mil toneladas de agrotóxicos, destes; 48% foram de herbicidas. Esse consumo elevado é justificado porque sem a adoção de manejo de plantas invasoras as perdas na produtividade da lavoura podem variar de 10% a 100% (KROPFF; LAAR, 1993; MOLIN, 2004; RESENDE et al., 2010; FERREIRA et al., 2012).

Considerando a necessidade de controle de plantas daninhas através da aplicação localizada de agrotóxicos proporcionados pela adoção da agricultura de precisão, o Laboratório de Controle (LAC) da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo e a Embrapa Instrumentação, unidade São Carlos, formaram um grupo de pesquisa visando a formação de recursos humanos para contribuir com o desenvolvimento dos sistemas de aplicação de agrotóxicos. Com o apoio financeiro do CNPq (Processos 306988/2007-0, 479306/2008-7 e 143452/2008-8) e da Rede de Agricultura de Precisão da Embrapa (Macro Programa 1, processo 01.09.01.002.01), este grupo implantou um laboratório na Embrapa Instrumentação, com uma plataforma flexível para o desenvolvimento de pulverizadores, chamada aqui de bancada de pulverização (CRUVINEL et al., 2011; FELIZARDO et al., 2010).

1.2 Contribuições da tese

A tese trata de uma aplicação prática e inédita envolvendo o uso de controladores preditivos para regulação das taxas de aplicação de agrotóxicos em pulverizadores tratorizados que utilizam a tecnologia de injeção direta. As contribuições decorrentes deste trabalho são sumarizadas a seguir:

- a) Estruturação de um laboratório voltado ao desenvolvimento de pulverizadores, fruto de um contrato estabelecido entre a Embrapa Instrumentação e o Laboratório de Controle da Escola de Engenharia de São Carlos;
- b) Concepção de um sistema de desenvolvimento (bancada e instrumentação) para pulverizadores, aplicadores de fertilizantes líquidos e maturadores;
- c) Obtenção dos modelos matemáticos do sistema de pulverização com injeção direta que descrevem o comportamento dinâmico da vazão, pressão e concentração da calda;
- d) Desenvolvimento de um ambiente de simulação para o sistema de pulverização;

- e) Implementação de controladores preditivos para regulação das taxas de aplicação;
- f) Desenvolvimento de uma estratégia de antecipação das taxas de aplicação, baseada no tempo de resposta do sistema de pulverização com injeção direta desenvolvido.

1.3 Organização do trabalho

O trabalho está organizado em oito capítulos. No Capítulo 2, seguindo esta introdução, são apresentados os sistemas de controle eletrônico utilizados em pulverizadores de barra. No Capítulo 3 é apresentado a automação do sistema de pulverização desenvolvido nesse trabalho para aplicação de agrotóxico a taxa variada usando injeção direta. No Capítulo 4 é apresentado o modelo matemático obtido para o sistema de pulverização desenvolvido. No Capítulo 5 são apresentados as ferramentas e os controladores preditivos implementados para o controle das vazões do agrotóxico e da calda. No Capítulo 6 são apresentados a estratégia de antecipação das taxas de aplicação e o ambiente de simulação desenvolvido. No Capítulo 7 são apresentados os resultados experimentais e a análise desses resultados. No Capítulo 8 são apresentadas as conclusões e as propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

APLICAÇÃO A TAXA VARIADA COM PULVERIZADORES TRATORIZADOS

No Brasil, os pulverizadores tratorizados de barras de pequeno porte são os que atendem às necessidades da maior parte dos produtores. Seu sistema hidráulico é constituído basicamente por um reservatório (tanque) com capacidade de 400 a 600 ℓ com agitadores, uma bomba hidráulica, um circuito de líquido com filtros, mangueiras e válvulas distribuidoras, um sistema de regulação e uma barra de distribuição de 9 a 12 metros com bicos hidráulicos (RAMOS, 2004a).

Figura 2.1: Pulverizador tratorizado de barras de pequeno porte, modelo Condorito, da empresa Jacto (Fonte: Jacto (2013)).

A Figura 2.1 ilustra a foto do pulverizador de barras tratorizado modelo Condorito, da empresa Jacto. Este pulverizador é dotado de 19 bicos, espaçados a 50 cm, tanque em polietileno para armazenamento da calda com capacidade de 400 ℓ , reservatório de água limpa com capacidade de 15 ℓ e bomba de pistão acoplada na tomada de potência (TDP) do trator, modelo JP-401, com capacidade de recalque de 38 ℓ/min a 540 RPM (JACTO, 2013). A bancada de pulverização montada neste projeto (Capítulo 3) foi baseada no pulverizador

Condorito e por isso atende as especificações de um pulverizador tratorizado de barras de pequeno porte.

O mínimo esperado dos controladores eletrônicos de pulverização é que sejam capazes de ajustar automaticamente a vazão com a variação da velocidade do pulverizador e de manter constante o volume de aplicação por unidade de área. Entretanto, devido ao avanço da eletrônica embarcada e da popularização do GPS na agricultura, os controladores eletrônicos de pulverização são capazes de realizar aplicações localizadas em taxas variáveis (BAIO; ANTUNIASI, 2011).

A seguir, são apresentados a evolução e o estágio de desenvolvimento dos sistemas de controle eletrônico para aplicações de agrotóxicos em taxas fixa ou variada empregados em pulverizadores de barra.

2.1 Pulverizador de barra sem regulação automática da taxa de aplicação

Este tipo de pulverizador destina-se à aplicação de agrotóxicos à taxa (volume) de aplicação constante ao longo do campo. O controlador eletrônico de pulverização não faz o ajuste automático de pressão ou vazão e por isso, a taxa de aplicação sofre alterações constantes devido a distúrbios decorridos de variações tanto da velocidade de deslocamento do pulverizador quanto da velocidade angular da bomba hidráulica. Dois modelos comerciais desse tipo de controlador eletrônico são: (a) modelo 744A-3, empresa Teejet (TEEJET, 2013) e (b) modelo 4663, empresa Arag (ARAG, 2013). O esquema típico desse pulverizador é apresentado na Figura 2.2 com seus principais elementos: reservatório, bomba hidráulica, válvula de controle, válvulas de seção, manômetro, barra de distribuição e bicos.

Figura 2.2: Diagrama simplificado de um pulverizador de barra sem regulação automática da taxa de aplicação (Fonte: adaptado de Ulson (2002)).

O reservatório armazena a mistura água e agrotóxico (calda). A bomba hidráulica, normalmente do tipo centrífuga ou pistão, é acionada a uma rotação de 540 RPM via multipli-

cador de velocidade acoplado à TDP do trator. Parte do fluxo gerado pela bomba hidráulica retorna ao reservatório para promover a agitação da calda e a outra parte é conduzida até os bicos de pulverização, sob determinada pressão de trabalho. A pressão de trabalho é ajustada manualmente pelo operador com o auxílio de uma válvula de controle do tipo eletro-hidráulica. A variação dessa pressão¹ afeta a qualidade da pulverização e deve ser devidamente acompanhada pelo operador através da leitura do manômetro (RAMOS, 2004b).

Os bicos, localizados nas extremidades das barras de distribuição, são constituídos de ponta, filtro, corpo e capa. A ponta de pulverização é o elemento mais importante, pois fornece a vazão para a taxa de aplicação escolhida, o tamanho das gotas e a forma do jato emitido (plano, plano duplo, cônico, cônico vazio). Tendo estabelecido a taxa de aplicação, o espaçamento entre os bicos na barra de distribuição e determinada a velocidade de deslocamento do pulverizador no campo, calcula-se a vazão necessária para uma ponta q_b , em ℓ/min , utilizando-se a seguinte relação (BOLLER; RAETANO, 2011):

$$q_b = \frac{D_p v_p e_b}{60000} \quad (2.1)$$

sendo D_p (ℓ/ha) a taxa de aplicação, v_p (km/h) a velocidade de deslocamento do pulverizador no campo e e_b (cm) a distância entre os bicos. Calculada a vazão necessária, localiza-se a ponta adequada e a respectiva pressão de trabalho, em tabelas fornecidas por fabricantes de pontas (Anexo B).

2.2 Pulverizador de barra com regulação automática da taxa de aplicação

Este tipo de pulverizador também se destina a aplicação de agrotóxico à taxa de aplicação constante, contudo o controlador eletrônico busca compensar os distúrbios de velocidade através de uma lei de controle, normalmente do tipo PID, com realimentação da vazão ou pressão² (ULSON, 2002). Três modelos comerciais desse tipo de controlador eletrônico são: (a) modelo 834, empresa Teejet (TEEJET, 2013), (b) modelo ECP401, empresa Enalta (ENALTA, 2013) e (c) modelo Bravo 180, empresa Arag (ARAG, 2013).

O esquema da Figura 2.3 apresenta um exemplo de sistema de controle automático da taxa de aplicação com realimentação da vazão. O controlador eletrônico de pulverização calcula a velocidade instantânea do pulverizador, a partir da leitura dos pulsos do sensor de velocidade, recebe informações da taxa de aplicação desejada, espaçamento entre os

¹Pressão excessiva facilita a ocorrência da deriva e ocasiona desgaste prematuro das pontas de pulverização. Pressão insuficiente resulta jatos irregulares, abertura insuficiente do ângulo de aspersão dos jatos e cobertura desuniforme do alvo (RAMOS, 2001).

²Alguns controladores eletrônicos de pulverização permitem o uso de dois tipos de sensores: pressão e vazão. Neste caso, o sensor de pressão atua como um sensor secundário, informando ao controlador eletrônico a ocorrência de vazamentos ou entupimentos (BAIO; ANTUNIASSI, 2011).

bicos e número de bicos ativos na barra de distribuição e então calcula a vazão desejada (Equação 2.1).

Figura 2.3: Diagrama simplificado de um pulverizador de barra com regulação automática da taxa de aplicação (Fonte: adaptado de Ulson (2002)).

A vazão instantânea, obtida a partir da leitura dos pulsos do fluxômetro (sensor de vazão), é comparada com a vazão desejada e o erro resultante desta comparação é minimizado pelo controlador eletrônico de pulverização mediante a uma ação de controle gerada pela lei de controle PID. A ação de controle faz o ajuste necessário na vazão instantânea alterando a pressão de trabalho na barra de distribuição mediante o acionamento do servo-motor que aciona a válvula de controle. Assim, para uma determinada taxa de aplicação, o aumento da velocidade do pulverizador ocasiona um aumento na vazão (para manter a taxa constante) devido à elevação de pressão. Comportamento oposto ocorre para a desaceleração do pulverizador. Todavia, o aumento ou redução de pressão não pode ultrapassar determinados limites impostos pelas características dos bicos utilizados para não comprometer o tamanho da gota desejada. O projeto do controlador PID deve levar em consideração esses limites (MIALHE, 2002).

2.3 Pulverizador de barra com taxa de aplicação variada

Há duas estratégias para a aplicação de agrotóxico em taxa variada: baseada em mapa e baseada em sensor. Ambas requerem um controlador eletrônico para compensar distúrbios de velocidade e responder rapidamente as mudanças na taxa de aplicação de acordo com a recomendação de um agrotóxico em função das necessidades do solo ou da cultura (ULSON, 2002).

2.3.1 Estratégia baseada em mapa

A aplicação baseada em mapa é realizada em taxa variada com o auxílio de um receptor GPS e um mapa de prescrição (aplicação). O receptor GPS atua como um sensor que envia as coordenadas geográficas (latitude, longitude) em tempo real ao controlador eletrônico de pulverização e sua acurácia é de aproximadamente 10 m. Para um posicionamento mais acurado, da ordem de centímetros, devem ser utilizados correções DGPS (*Differential GPS*), que pode ser via satélite, por bases públicas ou por bases estacionárias privadas. Porém, o custo da grande acurácia no posicionamento é alto e pode inviabilizar o uso da tecnologia. Um GPS de navegação custa hoje aproximadamente U\$ 300 enquanto que um DGPS custa aproximadamente U\$ 5 mil (ANTUNIASSI; JÚNIOR, 2000; BAILO; ANTUNIASSI, 2011).

Os mapas de prescrição contém as taxas de aplicação recomendadas para cada local do campo (talhão, quadrícula ou grade) e são elaborados em uma operação anterior a pulverização, a partir da amostragem de solo em grade. Comumente, esses mapas são interpolados em quadrículas³ de 20 m x 20 m portanto, a cada 400 m², há uma dose diferente a ser aplicada. O mapa de prescrição é basicamente um arquivo de três colunas: X(latitude), Y(longitude) e Z(taxa). A Figura 2.4 mostra o esquema geral de um pulverizador de barra em taxa variada baseado em mapa.

Figura 2.4: Diagrama simplificado de um pulverizador de barra com taxa de aplicação variada baseado em mapa de prescrição (Fonte: adaptado de Ulson (2002)).

O controlador eletrônico de pulverização seleciona a taxa de aplicação desejada naquela coordenada, à partir da leitura do mapa de prescrição, e faz o ajuste necessário na vazão instantânea alterando a pressão na barra de distribuição. Cada controlador eletrônico de pulverização tem a sua forma independente de inserção de arquivos (mapas), podendo ser por mídia compacta (PCMCIA, flash, pendrive), ou através de alguma interface computacional apropriada (geralmente comunicação serial RS232 ou portas USB) com computadores portáteis. Dois modelos comerciais desse tipo de controlador eletrônico são: (a) modelo

³O tamanho da quadrícula utilizada é maior do que a acurácia do GPS.

854, empresa Teejet (TEEJET, 2013) e (b) modelo Bravo 400S, empresa Arag (ARAG, 2013). O modelo 854 obtém as taxas de aplicação através de uma interface computacional (RS232 ou USB) com computadores portáteis e o modelo Bravo 400S obtém as taxas de aplicação a partir da leitura de um cartão de memória SD. Ambos os modelos possuem uma entrada do tipo serial (RS232) para conexão com receptores GPS.

2.3.2 Estratégia baseada em sensor

A aplicação baseada em sensor elimina a necessidade de mapas de prescrição e por isso dispensa o uso do receptor GPS. A aplicação baseada em sensores é realizada em taxa variada pela detecção instantânea dos alvos (por exemplo, plantas daninhas) através de sensores ópticos⁴ ou câmeras de vídeo. Os sinais provenientes desses sensores ou câmeras são processados em tempo real, possibilitando a localização do alvo no campo e promovendo a aplicação do agrotóxico ou a variação da dose aplicada somente nos locais onde são detectados (BAIO; ANTUNIASSI, 2011).

Segundo Saraiva et al. (2000), uma das dificuldades para a viabilização comercial deste tipo de tecnologia é a própria sensibilidade dos sensores, os quais precisam ser recalibrados constantemente em função das características das superfícies de aplicação, como mudanças nas tonalidades das cores das plantas e do solo, por exemplo. Além disso, o próprio tempo de resposta do sistema tornam sua utilização bastante complexa. Quando o objetivo da aplicação inclui a variação da dose do agrotóxico, independente do volume aplicado, a tecnologia empregada é a injeção direta de agrotóxicos.

2.4 Pulverizador de barra equipado com sistema de injeção direta de agrotóxico

A variação da dose (ℓ/ha) e do tipo do agrotóxico, de maneira independente do volume aplicado, é realizada por sistemas de injeção direta. O princípio básico destes sistemas está relacionado ao armazenamento do agrotóxico e do diluente (água) em reservatórios separados, realizando-se a mistura somente no momento da aplicação, através da injeção do agrotóxico na tubulação que leva a calda aos bicos. Esses sistemas evitam a degradação ambiental porque a inexistência da mistura no reservatório reduz consideravelmente os riscos de contaminação do operador e do ambiente, pois as operações de preparo da calda, lavagem e descontaminação do reservatório são simplificadas ou eliminadas (ANTUNIASSI; JÚNIOR, 2000).

A vazão do agrotóxico injetado é regulado pelo controlador eletrônico de pulverização através do controle da rotação das bombas injetoras (pistão ou peristáltica). Um modelo

⁴Segundo Saraiva et al. (2000), os sensores ópticos identificam as diferenças na reflexão da luz pelas diversas superfícies encontradas nas áreas agrícolas, como as plantas daninhas, a cultura, o solo, etc.

comercial deste tipo de controlador eletrônico é o TASC 65000, da empresa Teejet (TEEJET, 2013). Esse modelo aplica até 3 agrotóxicos simultaneamente, cada um a uma taxa de aplicação constante ou variável (mapa de prescrição). A injeção do agrotóxico pode ser feita por uma bomba de pistão (modelo MT600, empresa Teejet), numa faixa de vazão entre $0,015 \text{ l/min}$ a $6,0 \text{ l/min}$; ou pode ser feita por uma bomba peristáltica (modelo MT500, empresa Teejet), numa faixa de vazão entre $0,006 \text{ l/min}$ a $10,35 \text{ l/min}$.

As bombas peristálticas tem por característica a baixa pressão de injeção e por isso, o ponto de injeção está localizado antes da bomba de pulverização (Figura 2.5). As bombas de pistão são caracterizadas pela maior pressão de injeção e por isso, o ponto de injeção pode estar localizado imediatamente após a bomba de pulverização ou mais próximo dos bicos do pulverizador (Figura 2.6).

Figura 2.5: Diagrama simplificado de um pulverizador de barra equipado com um sistema de injeção direta de agrotóxico localizado antes da bomba de pulverização (Fonte: adaptado de Teejet (2013)).

A injeção do agrotóxico antes da bomba de pulverização melhora a homogeneização da calda formada e torna desnecessário o uso de um misturador. A injeção do agrotóxico após a bomba de pulverização diminui consideravelmente o tempo de resposta do sistema, pois o ponto de injeção está mais próximo das pontas pulverização.

O controlador eletrônico de pulverização pode compensar distúrbios de velocidade e mudanças na dose do agrotóxico alterando somente a vazão do agrotóxico e mantendo a vazão da calda constante (volume de aplicação constante). Esse tipo de aplicação não altera o tamanho de gotas (vazão da calda constante), porém causa transientes indesejáveis na concentração da calda. Segundo Steward e Humburg (2000), os transientes de concentração podem ser reduzidos através do ajuste simultâneo das vazões do agrotóxico e da calda.

Figura 2.6: Diagrama simplificado de um pulverizador de barra equipado com um sistema de injeção direta de agrotóxico localizado depois da bomba de pulverização (Fonte: adaptado de Teejet (2013)).

2.4.1 Tempo de resposta

O transiente de concentração está relacionado com o tempo de resposta característico dos pulverizadores que empregam a tecnologia de injeção direta. Há um atraso entre um comando de mudança de dose emitido pelo controlador e a efetiva alteração da dose nas pontas de pulverização. Na prática, a não consideração do tempo de resposta do sistema implica a aplicação da dosagem desejada muito antes ou muito depois do local desejado para aquela dosagem (BAIO; ANTUNIASSI, 2004).

Segundo Saraiva et al. (2000), a resposta do sistema para mudanças em degrau na dose, pode ser aproximada por um sistema de primeira ordem com atraso:

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{e^{-sT}}{\tau s + 1} \quad (2.2)$$

onde T é o atraso de transporte, τ é a constante de tempo, s é o operador de Laplace, $U(s)$ é a transformada de Laplace de referência da dose e $Y(s)$ é a saída do pulverizador.

O atraso de transporte T pode ser determinado pela relação entre o volume do fluido existente entre o ponto de injeção e os bicos e a vazão nesse trecho. Portanto, quanto mais distante do bico for feito a injeção, maior o atraso. A constante de tempo τ é devido ao efeito da elasticidade do sistema fluido-tubulações.

Uma forma de considerar o tempo de resposta é pela antecipação da ação da mudança da dose, de um tempo igual ao tempo de atraso T . Isto é, sabendo-se que a dose terá que ser alterada, antecipa-se a dose em T segundos. Para realizar esse procedimento usa-se a posição e velocidade atuais e o atraso de transporte T para calcular a posição futura e obter,

através do mapa de prescrição, o valor da dose que irá ser utilizada na antecipação da ação da mudança da dose (SARAIVA et al., 2000).

2.5 Gerenciamento eletrônico do tamanho de gotas

Durante a aplicação a taxa variada, o controlador eletrônico compensa as variações de velocidade alterando constantemente a pressão, o que pode levar à formação de um tamanho de gotas inadequado para a aplicação e a deriva, caso a pressão de trabalho estiver fora da faixa que garanta o tamanho de gotas da ponta de pulverização escolhida (BAIO; ANTUNIASSI, 2011). A deriva pode ser considerada como o movimento das partículas da pulverização, ou gotas, formadas durante a pulverização, para fora da área alvo. O desvio da trajetória que impede que as gotas produzidas atinjam o alvo está relacionado, principalmente, ao tamanho de gotas e à velocidade do vento. Nos catálogos de bicos mais modernos já é possível encontrar com frequência a qualidade da pulverização produzida pelos bicos hidráulicos, nas diferentes pressões de trabalho recomendadas para os mesmos. Segundo consta nesses catálogos, os termos Muita Fina (Alta Deriva); Fina (Média Deriva); Média (Baixa Deriva); Grossa (Muito Baixa Deriva) e Muito Grossa (Muito Muito Baixa Deriva) são utilizados para identificar a qualidade da pulverização produzida por um bico a uma dada pressão (CHRISTOFOLETTI, 2005; RAMOS, 2001).

Uma alternativa para a variação da taxa de aplicação sem alterar o tamanho de gotas é a utilização da comutação automática das pontas. O controlador eletrônico de pulverização realiza a abertura e o fechamento das pontas através de válvulas pneumáticas ou elétricas (Figuras 2.7(a) e 2.7(b)) fixadas no corpo do bico. Ao instalar pontas do mesmo modelo com cores diferentes, pode-se alterar a taxa de aplicação mantendo-se o mesmo tamanho de gotas. Por exemplo, se forem selecionadas três pontas com uma razão de vazão 1:2:4, a vazão para uma determinada pressão pode ser variada de 0 a 7 vezes a menor vazão. Dessa forma, pode-se variar a vazão numa faixa interessante, para uma mesma pressão de trabalho. Assim, a pulverização pode ser realizada com uma faixa⁵ de variação de volumes da ordem de 5:1, mas sem afetar o tamanho de gotas. Pode-se também manter a taxa de aplicação constante e variar o tamanho de gotas. Neste caso, deve-se instalar pontas de mesma cor (mesma vazão) porém de modelos diferentes (BAIO; ANTUNIASSI, 2011; SARAIVA et al., 2000; ANTUNIASSI; JÚNIOR, 2000).

Uma outra alternativa para o controle eletrônico do tamanho das gotas mantendo-se o volume de pulverização constante é a utilização de bicos do tipo bi-fluido (Figura 2.7(c)), que utiliza água e ar sob pressão para a formação de gotas. Com a utilização desse tipo de bico é possível variar o tamanho de gotas mantendo-se o volume de pulverização, ou então variar o volume de pulverização mantendo-se o tamanho de gotas, através da alteração na

⁵CA simples variação da pressão em bicos hidráulicos convencionais pode resultar numa flexibilidade de no máximo 20% do volume aplicado (ANTUNIASSI; JÚNIOR, 2000).

Figura 2.7: Alternativas disponíveis para o controle do tamanho de gotas: (a) comutação automática das pontas, empresa Arag (Fonte: Arag (2013)), (b) comutação automática das pontas, empresa Teejet (Fonte: Teejet (2013)), (c) bico bi-fluido, empresa Airtec (Fonte: Airtec (2013)) e (d) Bico com tecnologia PWM, empresa Capstan Ag System (Fonte: Capstan (2013)).

proporção entre os dois fluidos feita pelo controlador eletrônico de pulverização. Este bico permite que a pulverização seja realizada com uma faixa de variação de volumes da ordem de 2:1, mas sem afetar o tamanho de gotas (RAMOS, 2001; SOKEFELD, 2010).

Uma tecnologia recente para a variação do volume de aplicação sem alterar o tamanho das gotas é a tecnologia MSNC (*Modulated Spraying Nozzle Control*). Na tecnologia MSNC, o controle individual do fluxo em cada bico é possível com o emprego de válvulas solenóides acionadas por sinais do tipo PWM (*Pulse Width Modulation*) conectadas diretamente ao corpo do bico (Figura 2.7(d)). Essa válvula trabalha com uma frequência de chaveamento fixa igual a 10 Hz, o que permite a abertura e o fechamento do fluxo em cada ponta até dez vezes por segundo, e ciclo de trabalho variável (período de tempo em que aponta permanece aberta ou fechada em cada ciclo) entre 10 a 90%. Desta maneira, a taxa de fluxo em cada bico é proporcional ao ciclo de trabalho do PWM. O trabalho conjunto da válvula solenóide, ao modificar a vazão com a válvula de controle e alterar a pressão, proporciona uma infinidade de combinações de taxa de aplicação e tamanho de gotas. Devido a existência de pulsos hidráulicos no circuito causados pela modulação, o controlador eletrônico de pulverização mantém a uniformidade da pulverização através do fechamento das pontas ao longo da barra de forma alternada, ou seja, quando uma ponta está fechada, as pontas adjacentes estão abertas (PEREIRA, 2006; WOLF, 2002; BAIO; ANTUNIASSI, 2011; HAN et al., 2001; LEBEAU et al., 2004; PIERCE; AYERS, 2001). Segundo Wolf (2002), esta tecnologia PWM permite que a pulverização seja realizada com uma faixa de variação de volumes da ordem de 8:1, mas sem afetar o tamanho de gotas.

CAPÍTULO 3

O SISTEMA DE PULVERIZAÇÃO COM INJEÇÃO DIRETA DESENVOLVIDO

O sistema de pulverização com injeção direta de agrotóxico desenvolvido neste trabalho faz a injeção do agrotóxico na linha de sucção da bomba de pulverização e seu diagrama hidráulico (Figura 3.1) é composto por dois sistemas: injeção e pulverização.

Figura 3.1: Diagrama hidráulico do sistema de pulverização com injeção direta.

O sistema de injeção contém um reservatório de agrotóxico de 30 ℓ com um sensor de nível mínimo e uma bomba de injeção de agrotóxico. Essa bomba é de pistão com deslocamento variável (ajuste manual) e seu acionamento é feito por um motor CC. A vazão do agrotóxico q_h é proporcional a rotação ω_h do motor CC e um controlador regula ω_h através da tensão média v_h aplicada na armadura desse motor.

O sistema de pulverização contém um reservatório de água de 300 ℓ com sensores de nível máximo e mínimo, uma bomba de pulverização, válvulas elétricas, fluxômetro, sensores de pressão, pontas de pulverização e tubulações de mangueira. A bomba de pulverização é de pistão e seu acionamento é feito por um motor de indução trifásico. A vazão dessa bomba Q_p é proporcional a rotação ω_m do motor trifásico o qual é controlado por um inversor de frequência.

As válvulas elétricas são acionadas por motores CC e são do tipo *on/off* e proporcional. As válvulas *on/off* 1 e 2 são usadas para dividir o fluxo da calda q_f entre as barras de distribuição 1 e 2 (ver Figura 3.1). As barras possuem vazões q_{s1} e q_{s2} e ambas as barras alojam 7 porta-bicos de 5 vias. Essas vias possuem pontas de pulverização do tipo jato plano e leque de 110° (modelos 110 02-03-04-05-06), empresa Arag). Calhas instaladas ao longo das barras de distribuição 1 e 2 coletam as gotas formadas pelas pontas de pulverização e as direcionam para um reservatório de descarte de 300 ℓ com sensores de nível mínimo e máximo. A calda armazenada pode ser descartada ou reciclada novamente para o reservatório de água (caso utilize-se somente água nos reservatórios de agrotóxicos), através de uma bomba de descarte do tipo diafragma.

A leitura da vazão da calda q_f é feita por um fluxômetro e um controlador regula q_f através da tensão média v_v aplicada na armadura do motor CC da válvula proporcional 1. A válvula proporcional 2 foi utilizada na etapa da modelagem da válvula proporcional 1. O sensor de pressão 1 monitora a pressão p_s do sistema hidráulico e o sensor de pressão 2 monitora a pressão p_b no final da barra de distribuição 1.

A concentração da calda é monitorada por um sensor de condutividade instalado ao final da barra de distribuição 1, entre as pontas de pulverização 6 e 7. Este sensor está conectado a um transmissor de sinal e a um conversor de corrente para tensão (I/V) e a condutividade da calda σ lida por esse sensor foi utilizada para obter os dados experimentais necessários na identificação do modelo matemático da concentração da calda c_o .

3.1 Automação da bancada de pulverização

A bancada de pulverização (Figura 3.2) foi desenvolvida para atuar como uma plataforma flexível para o desenvolvimento de pulverizadores e neste trabalho aloja o sistema de pulverização com injeção direta de agrotóxico da Figura 3.1 (CRUVINEL et al., 2011; FELIZARDO et al., 2010).

A automação dessa bancada é realizada com um controlador programável para auto-

mação (PAC) (modelo cRIO-9073, empresa National Instruments). O cRIO-9073 é constituído por um processador industrial de 266 MHz gerenciado por um sistema operacional de tempo real, um chip de lógica reconfigurável FPGA (*Field-Programmable Gate Array*), modelo Spartan-3 2M, e um chassi reconfigurável que aloja até oito módulos de entrada e/ou saída (E/S). O chip FPGA é conectado ao processador através de um barramento PCI de alta velocidade e cada módulo de E/S é conectado diretamente ao chip FPGA (NI, 2010).

Figura 3.2: Vista frontal da bancada pulverização onde está montado o sistema de pulverização com injeção direta desenvolvido. Ao fundo está o painel com os componentes elétricos, eletrônicos e hidráulicos, à frente estão as barras de distribuição 1 e 2, com os sete bicos de pulverização, a barra de distribuição central 3, contendo três bicos, e o sistema de deslocamento linear com velocidade ajustável para alojamento de papéis hidrossensíveis.

As características desse PAC permitem o controle de processos independente de um computador, o monitoramento e desenvolvimento de interfaces com comunicação através de portas *ethernet* ou serial, disponíveis no chassi. A conexão dos módulos de E/S (NI 9263, NI 9421, NI 9411, NI 9201 e NI 9474) do cRIO-9073 com os sinais dos sensores e atuadores utilizados na automação da bancada de pulverização são mostrados na Figura A.1 (Apêndice A).

Para programar o cRIO-9073, utilizam-se os softwares LabVIEW PC, LabVIEW RT (Real-Time) e LabVIEW FPGA (Figura 3.3). O processador do cRIO-9073 executa de forma determinística os VIs¹ criados com o software LabVIEW RT e o chip FPGA executa de forma simultânea os VIs criados com o software LabVIEW FPGA.

Figura 3.3: Arquitetura usada para o desenvolvimento da automação da bancada de pulverização mostrando os níveis de programação com o LabVIEW PC, LabVIEW RT e LabVIEW FPGA.

Neste projeto foi necessário desenvolver três VIs. Dois VIs foram criados no LabVIEW RT e LabVIEW FPGA os quais são executados diretamente no PAC. O outro VI foi criado no LabVIEW PC o qual é executado no PC Host (computador pessoal). O VI implementado com o LabVIEW FPGA faz a leitura dos sensores conectados aos módulos de entrada e a geração dos sinais para os atuadores conectados aos módulos de saída a uma taxa de 100 Hz. O VI implementado com o LabVIEW RT é executado a uma taxa de 20 Hz e realiza as conversões de unidades, supervisiona os estados dos sensores de nível e pressão, executa as malhas dos controladores e antecipa as referências para os controladores. O VI implementado no LabVIEW PC também é executado a cada 20 Hz e permite gerar os mapas de prescrição, gravar e monitorar, através de gráficos, as variáveis do processo (pressão, vazão, concentração), simular os modelos matemáticos desenvolvidos, criar o perfil de velocidade do pulverizador e selecionar as seções de barra ativas. As telas da interface com o usuário são apresentadas no Apêndice B e mais detalhes dessas aplicações encontram-se em Felizardo et al. (2012).

¹Os programas em LabVIEW são chamados de instrumentos virtuais ou, simplesmente, VIs. São compostos pelo painel frontal, que contém a interface, e pelo diagrama de blocos, que contém o código gráfico do programa. A linguagem gráfica do LabVIEW é chamada "G".

3.2 Instrumentação do sistema de injeção

O sistema de injeção é responsável pela injeção do agrotóxico na linha de sucção da bomba de pulverização. A instrumentação desenvolvida para esse sistema (Figura 3.4) envolve o acionamento da bomba de injeção de agrotóxico através de um amplificador de potência e três medições: (i) da corrente desse motor CC através de um sensor de corrente de efeito hall, (ii) da rotação desse motor CC via encoder e (iii) da medição do nível mínimo do reservatório de agrotóxico através de um sensor de nível do tipo *reed-switch*.

Figura 3.4: Instrumentação usada no sistema de injeção de agrotóxico. Os módulos NI 9421, NI 9411, NI 9201 e NI 9474 são módulos de E/S do cRIO-9073 e as linhas indicam as variáveis medidas do sistema de injeção.

A bomba de injeção de agrotóxico (modelo QB-3, empresa Fluid Metering Inc.) possui capacidade de vazão de $2,30 \text{ l/min}$ para uma rotação de 1800 RPM e pressão de trabalho máxima de 172 kPa. A entrada dessa bomba é conectada ao reservatório de agrotóxico de 30 l (Figura 3.4) que contém um sensor de nível mínimo do tipo *reed-switch* (empresa Contech). A leitura da tensão desse sensor de nível vRh_v (módulo NI 9421) indica, através da variável lógica Rh_v , se o reservatório está cheio ou vazio (desligar a bomba de injeção).

O amplificador de potência do motor CC de 12 V/4 A é composto por um transistor (IRZ48N) configurado para operar na saturação e no corte e um acoplador óptico (4N25). O transistor é comandado por um sinal do tipo PWM (módulo NI 9474) com frequência de 500 Hz. O ciclo de trabalho do sinal PWM, denotado por d_h , é ajustado pelo controlador.

Um sensor de efeito hall (modelo ACS712, empresa Allegro Microsystems) é usado para medir a corrente i_h do motor CC. O condicionamento do sinal é feito com um amplifica-

dor operacional (LM358) na configuração amplificador subtrator. A tensão v_{i_h} (módulo NI 9201) é proporcional à corrente i_h do motor CC e é dada por

$$i_h = 0,50v_{i_h}. \quad (3.1)$$

A leitura dos sinais A, B, Z (módulo NI 9411) de um encoder incremental de 1024 pulsos por revolução (modelo HTR-W2-1024-3-PP, empresa Hontko) que está acoplado ao eixo do motor CC fornece a rotação ω_h desse motor CC. O diagrama esquemático dos circuitos do amplificador de potência, de condicionamento de sinal e de alimentação do encoder pode ser visto na Figura C.2 do Apêndice C.

3.3 Instrumentação do sistema de pulverização

O sistema de pulverização é responsável pela controle da vazão da calda q_f que será aplicada a uma determinada taxa de aplicação. A instrumentação desenvolvida para esse sistema (Figura 3.5) envolve três acionamentos: (i) da bomba de pulverização através de um inversor de frequência, (ii) das válvulas proporcionais e *on/off* através de pontes H e (iii) da bomba de descarte através de um relé e cinco medições: (i) das pressões no sistema hidráulico através de sensores de pressão, (iii) da vazão da calda através de um sensor de fluxo do tipo eletromagnético, (iv) dos níveis máximo e mínimo dos reservatórios de água e descarte através de sensores de nível do tipo *reed-switch* e (v) da posição angular e da rotação do êmbolo da válvula proporcional 1 através de um encoder incremental de 1024 pulsos por revolução.

3.3.1 Acionamento da bomba de pulverização e relação entre a vazão e a rotação

A bomba de pulverização (Figura 3.5) do tipo pistão (modelo MB-42, empresa Jacto) está acoplada ao motor de indução trifásico de 2,2 kW, 4 pólos, 60 Hz (modelo 90L, empresa Kohlbach) e faz o bombeamento da calda. O acionamento do motor trifásico e o controle de sua rotação é feito pelo inversor de frequência de 4,2 kVA (modelo VFD022B23A, empresa Delta Electronics). Essa bomba suporta até 4000 kPa e tem uma vazão Q_p de 42 ℓ/min para uma rotação² ω_p de 800 RPM. O motor trifásico tem uma rotação ω_m máxima de 1800 RPM e está acoplado a bomba de pulverização através de polias e correia. Considerando a relação de transmissão entre as polias, tem-se

$$\omega_p = \frac{D}{d} \omega_m \quad (3.2)$$

²O valor de referência para a rotação ω_{mr} do motor foi ajustado em 1800 RPM para obter a vazão máxima da bomba de pulverização.

onde $D=104$ mm é o diâmetro da polia do eixo do motor e $d=250$ mm é o diâmetro da polia do eixo da bomba.

Figura 3.5: Instrumentação usada na bomba de pulverização e no sensor de nível do reservatório de água. O motor trifásico acoplado a bomba de pulverização é acionado por um inversor de frequência e a vazão da bomba de pulverização é proporcional a velocidade de rotação do motor trifásico.

Segundo o fabricante, a relação entre a vazão Q_p da bomba de pulverização e a rotação ω_p em seu eixo é dada por

$$Q_p = 0,0519\omega_p. \quad (3.3)$$

O inversor de frequência tem uma entrada de tensão analógica AVI (*Analog Voltage Input*) cujo valor da tensão v'_{mr} é usada como referência de rotação ω_{mr} para o motor trifásico e uma saída de tensão analógica AFM (*Analog Frequency Meter*) cujo valor de tensão v'_m é usado para medir a rotação atual do motor ω_m . As relações entre v'_{mr} e ω_{mr} e v'_m e ω_m são conhecidas e são dadas por:

$$\omega_{mr} = 225v'_{mr}. \quad (3.4)$$

$$\omega_m = 360v'_m. \quad (3.5)$$

Os terminais AVI e AFM são conectados a um circuito de condicionamento constituído por acopladores ópticos (4N25), conversores tensão-PWM (TL494) e filtros passa-baixa. O diagrama esquemático desse circuito é apresentado na Figura C.1 do Apêndice C. A relação entre as tensões v'_{mr} e v_{mr} (terminal do NI 9263) foi obtida experimentalmente (Figura 3.6(a)) e é descrita por

$$v'_{mr} = -3,48v_{mr} + 9,22. \quad (3.6)$$

A relação entre as tensões v'_m e v_m (terminal do NI 9201) também foi obtida experimentalmente (Figura 3.6(b)) e é descrita por

$$v_m = -1,59v'_m + 8,44. \quad (3.7)$$

Figura 3.6: Relação entre as tensões: (a) $v'_{mr} \times v_{mr}$ e (b) $v_m \times v'_m$ obtidas experimentalmente.

A referência de vazão da bomba de pulverização Q_{pr} é ajustada através da tensão v_{mr} e essa relação, obtida a partir de (3.2), (3.3), (3.4) e (3.6), é

$$Q_{pr} = -16,91v_{mr} + 44,78. \quad (3.8)$$

A vazão da bomba Q_p é monitorada através da tensão v_m e essa relação, obtida a partir de (3.2), (3.3), (3.5) e (3.7), é

$$Q_p = 41,18 - 4,88v_m. \quad (3.9)$$

3.3.2 Acionamento das válvulas proporcionais e on/off

As válvulas proporcionais 1 e 2 (modelo 463020S, empresa Arag) possuem 3 vias e seus êmbolos, do tipo agulha, são acionados por motores CC de 12 V/0,5 A. Essas válvulas, usadas em sistemas de pulverização da Arag, controlam vazões de até 100 ℓ/min a uma pressão de até 2000 kPa e possuem um tempo de resposta de 7 s. A válvula proporcional 2 foi usada na etapa de modelagem da válvula proporcional 1 e foi mantida fechada durante os testes com o sistema de pulverização com injeção direta.

As válvulas on/off 1 e 2 são do tipo agulha com 3 vias (modelo 463001S, empresa Arag) e são acionadas por motores CC de 12 V/0,5 A. Essas válvulas trabalham ou totalmente abertas ou totalmente fechadas e suportam vazões de até 24 ℓ/min a uma pressão de até 2000 kPa e possuem um tempo de resposta de 600 ms.

O circuito de acionamento das válvulas elétricas (Figura 3.7) é composto por pontes H (L298) e isoladores ópticos (4N25). Essas pontes são comandadas por sinais do tipo PWM (módulo NI 9474) com frequência de 500 Hz e os valores dos ciclos de trabalho desses sinais (Tabela 3.1) determinam a ação dessas válvulas (abertura, fechamento ou parada³). O diagrama esquemático desse circuito pode ser visto na Figura C.6 do Apêndice C.

Tabela 3.1: Tabela verdade para acionamento das válvulas elétricas.

Entradas		Função	Saída
d_v	d_{sv}		
0 ~ 100	0	Abertura/parada (válvula proporcional 1)	$v_v = 0 \sim 12\text{ V}$
0 ~ 100	100	Fechamento/parada (válvula proporcional 1)	$v_v = 0 \sim -12\text{ V}$
d_{va}	d_{sva}		
0 ~ 100	0	Abertura/parada (válvula proporcional 2)	$v_{va} = 0 \sim 12\text{ V}$
0 ~ 100	100	Fechamento/parada (válvula proporcional 2)	$v_{va} = 0 \sim -12\text{ V}$
	d_{s1}		
	0	Abertura (válvula on/off 1)	$v_{s1} = 12\text{ V}$
	100	Fechamento (válvula on/off 1)	$v_{s1} = -12\text{ V}$
	d_{s2}		
	0	Abertura (válvula on/off 2)	$v_{s2} = 12\text{ V}$
	100	Fechamento (válvula on/off 2)	$v_{s2} = -12\text{ V}$

3.3.3 Acionamento da bomba de descarte

A bomba de descarte (modelo 8411001, empresa GeoPump) é do tipo diafragma, possui uma capacidade de vazão de 12 ℓ/min para uma pressão máxima de 70 kPa e seu acionamento é feito por um motor CC de 12 V/7 A. O amplificador de potência desse motor (Figura 3.8)

³A parada das válvulas proporcionais 1 e 2 ocorre quando $d_v = 0$ e $d_{va} = 0$. A velocidade da abertura e do fechamento dessas válvulas depende dos valores das tensões v_v e v_{va} e tais valores são proporcionais aos ciclos de trabalho d_v e d_{va} .

Figura 3.7: Instrumentação usada nas válvulas elétricas e no encoder. As válvulas elétricas são do tipo proporcional e *on/off* e seus motores são acionados por pontes-H. A válvula proporcional 1 é usada para regular a vazão da calda q_m e a válvula proporcional 2 foi usada apenas para obter a resistência fluídica K_{qv} da válvula proporcional 1.

é composto por um circuito amplificador de corrente⁴ e um relé com contato NA (normalmente aberto) ligado a uma fonte de tensão v'_{bd} de 12 V/30 A. A bobina do relé é acionada de acordo com a tensão de entrada do circuito amplificador v_{bd} (módulo NI 9263) e seu esquemático pode ser visto na Figura C.5 do Apêndice C.

3.3.4 Condicionamento dos sinais dos sensores de pressão, fluxo, nível e encoder

Os sinais de tensão dos sensores de pressão 1 e 2 (modelo A-10, empresa WICA) possuem saídas de tensões, denotadas respectivamente por v_{ps} e v_{pb} (0~10 V), proporcionais às suas faixas de medida de pressão p_s e p_b (0~16 BAR). Essas relações, segundo o fabricante, são dadas por

$$p_{s,b} = 1,6v_{ps,b}. \quad (3.10)$$

⁴O amplificador de corrente é necessário pois os pinos de saída do módulo NI 9263 fornecem apenas 1 mA de corrente e bobina do relé é acionada com uma corrente de 10 mA.

Figura 3.8: Instrumentação usada na bomba de descarte e no sensor de nível. Um amplificador de potência é usado no acionamento do motor CC da bomba de descarte.

Os sinais de tensão dos sensores de pressão são tratados por um circuito de condicionamento (Figura 3.9) conectado ao módulo NI 9201. O diagrama esquemático desse circuito pode ser visto na Figura C.5 do Apêndice C.

Figura 3.9: Instrumentação usada nos sensores de pressão. A saída do amplificador de instrumentação fornece a diferença de tensão $v_{\Delta p}$ entre os sensores de pressão 1 e 2.

O circuito de condicionamento é composto por um amplificador de instrumentação (INA122P) com ganho G ajustado por um resistor externo. A saída desse amplificador fornece a diferença de tensão $v_{\Delta p}$ entre os sensores de pressão 1 e 2:

$$v_{\Delta p} = G(v_{p_s} - v_{p_b}). \quad (3.11)$$

O fluxômetro eletromagnético (modelo 4621AA30000, empresa ORION) possui uma faixa de medição de 5 a 100 ℓ/min para pressões de até 4000 kPa e temperatura máxima de 50 °C. O fluxômetro possui saída em coletor aberto e por isso necessita de um resistor de

pull-up (Figura 3.10). O diagrama esquemático desse circuito pode ser visto na Figura C.3 do Apêndice C.

A constante de calibração desse fluxômetro, segundo o fabricante, é de 600 pulsos por litro e a vazão da calda q_f , em ℓ/min , é obtida a partir da leitura da frequência f_f (NI 9421) em Hz dos pulsos gerados:

$$q_f = 0,1f_f. \quad (3.12)$$

Figura 3.10: Instrumentação usada no fluxômetro eletromagnético. O resistor de *pull-up* liga a saída do fluxômetro a tensão de alimentação.

O reservatório de descarte de 300 ℓ possui sensores de nível máximo e mínimo (Figura 3.8) do tipo *reed-switch* (empresa Contech). A leitura das tensões desses sensores vRd_v e vRd_c (módulo NI 9421) indica, através das variáveis lógicas Rd_v e Rd_c , se o reservatório está cheio ou vazio.

O reservatório de água de 300 ℓ também possui sensores de nível máximo e mínimo (Figura 3.5) do tipo *reed-switch*. A leitura das tensões desses sensores vRa_v e vRa_c (módulo NI 9421) indica, através das variáveis lógicas Ra_v e Rd_a , se o reservatório está cheio ou vazio.

Um encoder incremental de 1024 pulsos por revolução (modelo HTR-W2-1024-3-PP, empresa Hontko) foi acoplado ao eixo do motor CC da válvula proporcional 1 (Figura 3.7) para obter a posição angular θ_v e a rotação de seu êmbolo ω_v .

3.4 Instrumentação do sensor de condutividade

O sensor de condutividade é responsável pela medição da concentração da calda formada e sua instrumentação (Figura 3.11) possui um circuito de condicionamento do sinal (transmissor M300) e um circuito conversor de corrente para tensão (I/V).

O sensor de condutividade (modelo Inpro-7108, empresa Mettler Toledo) possui 4 eletrodos (constante nominal de sua célula é igual a $0,25 \text{ cm}^{-1}$) para média e alta condutividade e uma termorresistência (PT100) embutida para compensação automática de temperatura. Esse modelo trabalha com pressões de até 700 kPa e suporta temperaturas entre -10°C a 80°C . O sensor de condutividade é ligado ao transmissor M300 (empresa Meller

Figura 3.11: Instrumentação usada no sensor de condutividade. O transmissor M300 possui saída em corrente e o conversor I/V é usado para fornecer o nível adequado de tensão ao módulo NI 9201.

Toledo) que produz duas saídas de correntes i_σ e i_T (0~20 mA) proporcionais aos valores da condutividade σ (0~650 mS/cm) e da temperatura T (0~100 °C):

$$\sigma = 32500i_\sigma. \quad (3.13)$$

$$T = 5000i_T. \quad (3.14)$$

Os sinais de corrente i_σ e i_T são convertidos em tensão (vi_σ e vi_T) através de um circuito conversor I/V (Figura 3.11) composto por dois resistores de precisão de 250 Ω. As tensões vi_σ e vi_T (0~5 V) são lidas pelo módulo NI 9201 e as relações entre as correntes i_σ e i_T (0~20 mA) são dadas por

$$vi_{\sigma,T} = 250i_{\sigma,T}. \quad (3.15)$$

Substituindo (3.15) em (3.13) e (3.14), tem-se

$$\sigma = 130v_\sigma. \quad (3.16)$$

$$T = 20v_T. \quad (3.17)$$

O diagrama esquemático do circuito conversor I/V desenvolvido para o sensor de condutividade pode ser visto na Figura C.4 do Apêndice C.

CAPÍTULO 4

MODELAGEM E VALIDAÇÃO DO SISTEMA DE PULVERIZAÇÃO COM INJEÇÃO DIRETA

O desenvolvimento e parametrização de modelos para a simulação de processos dinâmicos, permite estudar as interações entre as várias partes do sistema, explorar o arranjo físico dos componentes do sistema e projetar a estratégia de controle (GARCIA, 2005). Para fins de modelagem e controle, bem como o desenvolvimento de um ambiente de simulação para o sistema de pulverização com injeção direta, são considerados os modelos dos sistemas de injeção e pulverização. Também, é considerada a dinâmica da concentração da calda.

4.1 Modelagem do sistema de injeção

O sistema de injeção é composto por uma bomba de injeção, do tipo pistão, acoplada a um motor CC e um amplificador de potência (Figura 4.1). Esse sistema é responsável pela injeção do agrotóxico na linha de sucção da bomba de pulverização e seu modelo matemático descreve o comportamento dinâmico da vazão do agrotóxico q_h (MERCALDI et al., 2011a; MERCALDI et al., 2011b).

Figura 4.1: Sistema de injeção do agrotóxico.

O diagrama de blocos desse sistema de injeção, apresentado na Figura 4.2, é descrito através do modelo tradicional de um motor CC, acrescido dos elementos correspondentes à bomba de pistão e ao amplificador de potência. O torque T_h fornecido pela bomba varia linearmente com a pressão p_h na saída da bomba de injeção e a vazão q_h varia linearmente com a rotação do motor CC ω_h (AKERS et al., 2006). O amplificador de potência do motor CC, o qual é acionado por um sinal do tipo PWM denotado por d_h , é descrito por um ganho K_{pt} .

Figura 4.2: Diagrama de blocos do sistema de injeção do agrotóxico.

A partir da Figura 4.2, obtém-se as seguintes relações no tempo:

$$L_h \frac{di_h}{dt} + R_h i_h + K_e \omega_h = K_{pt} d_h \quad (4.1)$$

$$J \frac{d\omega_h}{dt} + b \omega_h + K_b p_h = K_t i_h \quad (4.2)$$

$$q_h = 60000 K_b \omega_h \quad (4.3)$$

onde K_t é a constante de torque, K_e é a constante da força contra-eletromotriz, R_h é a resistência de armadura, L_h é a indutância de armadura, J é o momento de inércia, b é o coeficiente de atrito viscoso e K_b é o volume deslocado pelo pistão a cada revolução completa do eixo do motor.

4.1.1 Obtenção dos parâmetros do sistema de injeção

Para obter os valores dos parâmetros do modelo (Figura 4.2) é montado o arranjo mostrado na Figura 4.3. O experimento é conduzido em duas etapas, na primeira etapa até o tempo 50 s varia-se a tensão v_h com a válvula manual totalmente aberta, após isso são aplicados valores aleatórios de v_h e p_h , através da fonte de tensão e da abertura e fechamento da válvula manual. Uma fonte de tensão CC ajustável é utilizada para variar a tensão v_h e para o ajuste de p_h é utilizada uma válvula de 2 vias conectada na saída da bomba, com abertura e fechamento manual.

Figura 4.3: Arranjo usado para o ensaio do sistema de injeção. Através de uma interface com o usuário, desenvolvida no LabVIEW PC, são gravados os dados referentes às variáveis i_h , p_h , v_h e ω_h a cada 1 ms.

O valor do parâmetro K_b é obtido pelos dados fornecidos pelo fabricante da bomba de injeção, o valor do parâmetro K_{pt} é o valor teórico do ganho do amplificador de potência e os valores dos parâmetros R_h , L_h , K_e , K_t , J e b são estimados pelo método do gradiente descente, através da ferramenta *Simulink Parameter Estimation*. Esta ferramenta permite estimar e ajustar os parâmetros de um modelo desenvolvido em Simulink a partir de dados de entrada/saída reais. Os valores obtidos dos parâmetros do sistema de injeção de agrotóxico são mostrados na Tabela 4.1 para fins de controle e simulação.

Tabela 4.1: Valores dos parâmetros do sistema de injeção.

Parâmetro	Valor
$R_h[\Omega]$	$6,86 \times 10^{-1}$
$L_h[H]$	$1,00 \times 10^{-3}$
$K_t[Nm/A]$	$3,75 \times 10^{-2}$
$K_e[Vs/rad]$	$3,75 \times 10^{-2}$
$J[Kgm^2]$	$4,74 \times 10^{-4}$
$b[Kgm^2/s]$	$4,59 \times 10^{-4}$
$K_b[m^3/rad]$	$2,07 \times 10^{-7}$
$K_{pt}[V]$	$1,20 \times 10^{-1}$

4.1.2 Validação do modelo do sistema de injeção

O modelo matemático do sistema de injeção (Figura 4.2) foi simulado no ambiente Simulink para obtenção dos resultados de simulação. Os valores dos parâmetros utilizados na simulação foram os mesmos apresentados na Tabela 4.1. As respostas obtidas do modelo simulado e as respostas experimentais, referentes ao ensaio preparado conforme a Figura 4.3, podem ser observadas na Figura 4.4.

A análise gráfica mostra boa concordância entre as curvas do modelo simulado e do processo real. O índice RMSE (*Root Mean Square Error*) é usado na quantificação das previsões do modelo matemático e é definido como (AGUIRRE, 2007)

$$RMSE = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^N [y(k) - \hat{y}(k)]^2}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N [y(k) - \bar{y}]^2}} \quad (4.4)$$

onde $\hat{y}(k)$ é o sinal estimado pelo modelo e $\bar{y}$ é o valor médio do sinal medido $y(k)$, sendo que a média é calculada na janela de identificação N . O índice usa a diferença entre as previsões do modelo com a média temporal do sinal medido. Valores menores do que a unidade indicam um melhor desempenho em relação ao preditor padrão considerando a média.

Figura 4.4: Resultados experimentais e de simulação do modelo do sistema de injeção.

Os valores dos índices RMSE das variáveis i_h , ω_h e q_h preditas pelo modelo do sistema de injeção (Tabela 4.2) apresentaram valores menores do que a unidade, indicando um bom desempenho do modelo proposto.

Tabela 4.2: Valores dos índices RMSE das variáveis i_h , ω_h e q_h .

Variável	RMSE
i_h	0,83
ω_h	0,31
q_h	0,31

4.2 Modelagem do sistema de pulverização

O modelo hidráulico do sistema de pulverização descreve o comportamento dinâmico da vazão da calda q_f e da pressão do sistema p_s . Esse sistema possui diferentes componentes hidráulicos como as válvulas do tipo proporcional e *on/off*, as pontas de pulverização e as tubulações de mangueiras. A seguir, os equacionamentos da pressão e da vazão são apresentados.

4.2.1 Equacionamento da pressão p_s do sistema de pulverização

De acordo com Steward e Humburg (2000), a relação pressão-vazão das válvulas, das pontas de pulverização e das tubulações de mangueiras podem ser modelados como orifícios e para um escoamento turbulento, essa relação é dada por (GARCIA, 2005; MERRITT, 1967)

$$q = C_d A_o \sqrt{\frac{2}{\rho} \Delta p} \quad (4.5)$$

onde Δp é a queda de pressão no orifício, q é a vazão, C_d é o coeficiente de descarga do orifício, A_o é a área do orifício e ρ é a densidade do fluido. Assumindo que o fluido é a água ($\rho=1 \text{ kg}/\ell$), (4.5) pode ser escrita como

$$\Delta p = K_q q^2 \quad (4.6)$$

onde $K_q = \frac{1}{2C_d^2 A_o^2}$ a resistência fluídica do orifício. Para as tubulações de mangueira, essa resistência fluídica é dada por (GARCIA, 2005)

$$K_{qp} = \kappa \frac{f_a L \rho}{2d A_i^2}, \quad (4.7)$$

sendo f_a o coeficiente de atrito da tubulação, L o comprimento da tubulação, A_i a área interna da tubulação e κ o fator de conversão de unidades.

A relação pressão-vazão dos componentes hidráulicos do sistema de pulverização são caracterizados pelos parâmetros K_q e K_{qp} . Esses parâmetros são obtidos ou de forma experimental, através das medidas Δp e q ou através de catálogos de fabricantes. Na Figura 4.5 é apresentado o circuito hidráulico do sistema de pulverização com a representação dos componentes hidráulicos através de resistências fluídicas (AKERS et al., 2006). As seguintes suposições são feitas:

- As pontas de pulverização possuem a mesma resistência fluídica K_{qn} ;
- A resistência fluídica K_{qpn} (representa as tubulações de mangueira existentes entre as pontas de pulverização) das barras de distribuição 1 e 2 são iguais;
- A resistência fluídica K_{qvs} de ambas as válvulas *on/off* 1 e 2 são iguais;
- As resistências fluídicas K_{qp} das tubulações que vão da saída da válvula *on/off* 1 ou 2 até a primeira ponta de pulverização de cada barra 1 e 2 são iguais;
- A resistência fluídica K_{qf} do fluxômetro é desprezível.

Figura 4.5: Circuito equivalente hidráulico do sistema de pulverização.

Então, pode-se afirmar que a vazão da calda q_f divide-se igualmente entre as $m = 2$ barras de pulverização e portanto, q_{s1} é

$$q_{s1} = \frac{q_f}{m}. \quad (4.8)$$

De acordo com a configuração do circuito hidráulico mostrado na Figura 4.5, a pressão p_s é dada por uma somatória de pressões, ou seja:

$$p_s = \Delta p_{vs} + \Delta p_p + \Delta p_{pn} + \Delta p_n, \quad (4.9)$$

em que Δp_{vs} é a queda de pressão da válvula *on/off* 1, Δp_p é a queda de pressão no trecho da tubulação que vai da saída da válvula *on/off* 1 até a ponta de pulverização 1, Δp_{pn} é queda

de pressão devido as tubulações de mangueira existentes entre as pontas de pulverização e Δp_n é a queda de pressão das pontas de pulverização.

A vazão que passa através da válvula *on/off* 1 é igual a q_{s1} . Em termos de q_f , a queda de pressão Δp_{vs} é

$$\Delta p_{vs} = K_{qvs} \frac{q_f^2}{m^2} = K_{qvseq} q_f^2. \quad (4.10)$$

O trecho da tubulação entre a saída da válvula *on/off* 1 e a ponta de pulverização 1 apresenta uma resistência fluídica dada por

$$K_{qp} = \frac{\kappa_1 f_{a1} L_1 \rho}{2 d_1 A_1^2} \quad (4.11)$$

sendo L_1 o comprimento desse trecho, d_1 o diâmetro interno dessa tubulação, A_1 a área da seção transversal dessa tubulação, f_{a1} o coeficiente de atrito dessa tubulação e κ_1 o fator de conversão de unidades. A vazão nesse trecho é q_{s1} e portanto, Δp_p é

$$\Delta p_p = K_{qp} \frac{q_f^2}{m^2} = K_{qpeq} q_f^2. \quad (4.12)$$

A queda de pressão Δp_{pn} é dada por

$$\Delta p_{pn} = K_{qp n} \frac{q_f^2}{m^2} = K_{qpneq} q_f^2 \quad (4.13)$$

onde K_{qpneq} é a resistência fluídica equivalente das tubulações de mangueira existentes entre as pontas de pulverização da barra de pulverização 1.

A queda de pressão Δp_n devido as pontas de pulverização é dada por

$$\Delta p_n = \frac{K_{qn}}{n^2} \frac{q_f^2}{m^2} = K_{qneq} q_f^2 \quad (4.14)$$

onde K_{qneq} é a resistência fluídica equivalente das n pontas de pulverização operando em paralelo e é igual a resistência fluídica K_{qn} de cada ponta dividido por n^2 .

Finalmente, a pressão do sistema p_s é obtida substituindo (4.10), (4.12), (4.13) e (4.14) em (4.9) resultando em

$$p_s = (K_{qvseq} + K_{qpeq} + K_{qpneq} + K_{qneq}) q_f^2 = K_{qteq} q_f^2. \quad (4.15)$$

Portanto, a pressão p_s do sistema de pulverização com injeção direta de agrotóxico em (4.15) é função da resistência fluídica equivalente K_{qteq} e da vazão da calda q_f . A seguir é apresentado o equacionamento da vazão q_f da calda.

4.2.2 Equacionamento da vazão da calda

A vazão da calda q_f medida pelo fluxômetro é regulada pela válvula proporcional 1 através da vazão de retorno q_v . Considerando que a vazão Q_p da bomba de pulverização é constante, então

$$q_v = Q_p - q_f. \quad (4.16)$$

A queda de pressão Δp_v da válvula proporcional 1 é dada por

$$\Delta p_v = K_{qv} q_v^2 \quad (4.17)$$

sendo K_{qv} a resistência fluídica da válvula proporcional 1. Substituindo (4.16) em (4.17), obtém-se

$$\Delta p_v = K_{qv} Q_p^2 - 2K_{qv} Q_p q_f + K_{qv} q_f^2. \quad (4.18)$$

De acordo com a configuração do circuito hidráulico (Figura 4.5) têm-se que

$$\Delta p_v = p_s - K_{qf} q_f^2. \quad (4.19)$$

A resistência fluídica K_{qf} do fluxômetro eletromagnético foi considerada desprezível. Portanto

$$\Delta p_v = p_s \quad (4.20)$$

e igualando-se (4.18) e (4.15), obtém-se a seguinte expressão:

$$(K_{qv} - K_{qteq}) q_f^2 - 2K_{qv} Q_p q_f + K_{qv} Q_p^2 = 0. \quad (4.21)$$

A raiz positiva de (4.21) é a solução procurada. Logo:

$$q_f = \frac{Q_p (\sqrt{K_{qteq} K_{qv}} - K_{qv})}{K_{qteq} - K_{qv}} \quad (4.22)$$

em que $K_{qteq} > K_{qv}$. O fluxômetro apresenta um atraso de transporte constante denotado por τ_f e portanto, a resposta q_f terá um atraso fixo de τ_f segundos. Dessa forma, pode-se escrever

$$q_f = \frac{Q_p (\sqrt{K_{qteq} K_{qv}} - K_{qv})}{K_{qteq} - K_{qv}} (t - \tau_f). \quad (4.23)$$

Como a pressão do sistema p_s em (4.15) depende da vazão q_f , então

$$p_s = K_{qteq} q_f^2 (t - \tau_f). \quad (4.24)$$

A característica do comportamento dinâmico da vazão q_f e da pressão p_s é dada pela dinâmica da resistência fluídica K_{qv} da válvula proporcional 1, a qual é apresentada a seguir.

Dinâmica da resistência fluídica K_{qv} da válvula proporcional 1

A vazão da calda em (4.23) depende da resistência fluídica K_{qv} a qual é função da posição θ_v da agulha no interior da via de retorno da válvula proporcional 1. A seguinte função exponencial é proposta:

$$K_{qv} = \alpha_0 + \alpha_1 e^{\frac{\theta_v}{\beta}}. \quad (4.25)$$

A agulha da válvula proporcional 1 é acoplada ao eixo do motor CC o qual é representado por um sistema de primeira ordem mais um integrador (Figura 4.6), com os parâmetros de ganho K_m e constante de tempo T_m .

Figura 4.6: Diagrama de blocos do motor CC da válvula proporcional 1.

O motor responde para uma determinada faixa de d_v . Assim, no modelo do motor CC inclui-se uma não linearidade do tipo zona morta com saturação. Essa não-linearidade é expressa pela função $\mathcal{DZ}(d_v)$:

$$\mathcal{DZ}(d_v) = \begin{cases} D_{max} & \text{se } d_v > D_{max} \\ k_+(d_v - d_+) & \text{se } d_+ < d_v \leq D_{max} \\ 0 & \text{se } d_- \leq d_v \leq d_+ \\ -k_-(d_v - d_-) & \text{se } d_- < d_v \leq D_{min} \\ D_{min} & \text{se } d_v < D_{min} \end{cases} \quad (4.26)$$

onde d_- e d_+ representa o início e o final da zona morta, D_{min} e D_{max} representa os valores mínimo e máximo do ciclo de trabalho d_v do sinal PWM e k_- e k_+ é um ganho.

A partir da Figura 4.6, é obtido o modelo do motor CC da válvula proporcional 1, dado por

$$T_m \frac{d^2}{dt^2} \theta_v + \frac{d}{dt} \theta_v = K_m K_{ph} \mathcal{DZ}(d_v), \quad (4.27)$$

sendo K_{ph} o ganho do amplificador de potência formado pela ponte-H.

4.2.3 Obtenção dos parâmetros do sistema de pulverização

A relação entre K_{qv} e θ_v em (4.25) foi obtida experimentalmente através das medidas da vazão q_f e da pressão p_s para quatorze diferentes posições de θ_v . Durante o experimento, as válvulas *on/off* 1 e 2 (Figura 4.5) permaneceram fechadas, interrompendo o fluxo para

as pontas de pulverização. A válvula proporcional 1 inicia-se na primeira posição de θ_v , ou seja, totalmente aberta. A válvula proporcional 2, inicialmente aberta, vai sendo fechada até a pressão p_s na saída da válvula proporcional 1 atingir 500 kPa. Após atingir essa pressão, a válvula proporcional 2 retorna a posição totalmente aberta e então p_s atinge 0 kPa. Esse processo é repetido para cada uma das quatorze posições de θ_v . Para cada posição foi calculado um valor específico de K_{qv} através do ajuste de curva dos dados de pressão e vazão pelo método dos mínimos quadrados. A Figura 4.7 apresenta a relação entre K_{qv} e θ_v obtida a partir desses ensaios.

Figura 4.7: Curva $K_{qv} \times \theta_v$ da válvula do tipo proporcional 1 usando a função exponencial (4.25).

De acordo com a Figura 4.7, é possível identificar a faixa útil da válvula proporcional 1, situada entre 45 rad e 90 rad. Essa faixa é estreita porque a válvula proporcional 1 controla vazões de até 100 l/min, o dobro da vazão requerida pelo sistema de pulverização desenvolvido. A escolha por uma válvula de 100 l/min, ao invés de 50 l/min, se deu pela sua disponibilidade comercial.

Os valores dos parâmetros K_m , T_m , K_{ph} , d_+ , d_- , k_+ e k_- , referentes as equações (4.26) e (4.27) do modelo do motor CC da válvula proporcional 1, foram obtidos medindo-se a posição angular θ_v da agulha da válvula proporcional 1 cujo motor foi submetido a um degrau correspondente a um ciclo de trabalho de $d_v = 100\%$. Utilizando-se os dados obtidos a cada 50 ms da curva de reação ao degrau, esses parâmetros foram estimados pelo método do gradiente descente, através da ferramenta *Simulink Parameter Estimation*.

O valor do parâmetro K_{qpneq} em (4.13) foi obtido através do ajuste da curva experimental da Figura 4.8. A curva é obtida a partir das medidas da vazão q_f e da queda de pressão¹ Δp_{pn} para cinco diferentes valores de q_f , em l/min: 15, 20, 25, 30 e 35. Nesse ensaio foi utilizado a ponta de pulverização 11005 devido a sua ampla faixa de vazão.

O valor de K_{qvs} em (4.10) foi obtido através da curva de pressão por vazão fornecida pelo fabricante da válvula *on/off*. O valor do parâmetro K_{qn} em (4.14) também foi obtido

¹A queda de pressão Δp_{pn} é a diferença de pressão medida pelos sensores de pressão 1 e 2 (Figura 3.1, Capítulo 3)

Figura 4.8: Curva experimental $\Delta p_{pn} \times q_f^2$ usando a função potência (4.13).

através dos dados fornecidos pelo fabricante das pontas de pulverização. Os valores dos parâmetros L_1 , d_1 , κ_1 em (4.11) são conhecidos. O valor de f_{a1} em (4.11) foi fornecido pelo fabricante da mangueira de pulverização. A partir desses parâmetros foi calculado o valor de K_{qpeq} em (4.12). Os valores dos parâmetros Q_p , τ_f em (4.23) são conhecidos. Os valores obtidos dos parâmetros do sistema de pulverização são mostrados na Tabela 4.3 para fins de controle e simulação.

Tabela 4.3: Valores dos parâmetros do sistema de pulverização.

Parâmetro	Valor
$\alpha_0 [\text{kPa}/(\ell/\text{min})^2]$	$2,99 \times 10^{-2}$
$\beta [\text{rad}]$	6,53
$\alpha_1 [\text{kPa}/(\ell/\text{min})^2]$	$2,81 \times 10^{-6}$
κ_1	$1,67 \times 10^{-11}$
$D_{max}; D_{min}$	100; -100
$d_+; d_-$	20; -20
$k_+; k_-$	1,25; -1,25
$d_1 [\text{m}]$	$1,27 \times 10^{-2}$
f_{a1}	$8,20 \times 10^{-3}$
K_{ph}	$1,20 \times 10^{-1}$
$K_{qvs} [\text{kPa}/(\ell/\text{min})^2]$	$4,08 \times 10^{-2}$
$K_{qn} [\text{kPa}/(\ell/\text{min})^2]$ (11002; 11003; 11004; 11005)	(4,71; 2,07; 1,17; 0,75) $\times 10^2$
$K_{qpneq} [\text{kPa}/(\ell/\text{min})^2]$	$5,45 \times 10^{-2}$
$K_{qv} [\text{kPa}/(\ell/\text{min})^2]$	$2,99 \times 10^{-2}$ a 1,80
$K_m [\text{rad}/\text{V}]$	1,10
$L_1 [\text{m}]$	1,35
m	2
n	7
$Q_p [\ell/\text{min}]$	42
$T_m [\text{s}]$	$5,00 \times 10^{-2}$
$\tau_f [\text{s}]$	$6,50 \times 10^{-1}$

4.2.4 Validação do modelo do sistema de pulverização

Para validação do modelo, devido ao processo em malha aberta desse sistema ser instável, foi implementado um controlador proporcional (Figura 4.9) com ganho $K_p = 20$. O controlador proporcional foi desenvolvido no LabVIEW RT com o auxílio da ferramenta PID Control Toolkit e é executado a cada 50 ms.

Figura 4.9: Diagrama de blocos do sistema de pulverização com um controlador proporcional de ganho K_p .

Os dados do processo, referentes as respostas da vazão q_f e pressão p_s , são gravados a cada 50 ms e comparados com os resultados do modelo em malha fechada. Para isso, tanto no processo quanto no modelo, são aplicadas referências de vazão Q_{fr} . O modelo matemático apresentado na Figura 4.9 foi simulado no ambiente Simulink e os valores dos parâmetros utilizados na simulação são apresentados na Tabela 4.3.

Os resultados do processo e do modelo para as pontas de pulverização 11003 e 11005 são apresentados nas Figuras 4.10(a) e 4.10(b), respectivamente. Nota-se através dos gráficos (Figuras 4.10(a) e 4.10(b)) que existe uma boa aproximação das curvas do modelo simulado e do processo.

Os índices RMSE das variáveis q_f e p_s previstas pelo modelo do sistema de pulverização para as pontas de pulverização 11003 e 11005 (Tabela 4.4) indicaram um bom desempenho do modelo do sistema de pulverização.

Tabela 4.4: Índices RMSE das variáveis q_f e p_s

Variável	RMSE	Ponta de pulverização
q_f	0,13	10003
p_s	0,21	11003
q_f	0,19	11005
p_s	0,26	11005

Figura 4.10: Resultados experimentais e de simulação do sistema de pulverização para: (a) ponta de pulverização 11003 e (b) ponta de pulverização 11005.

4.3 Modelagem da dinâmica da concentração c_o da calda

A dinâmica da concentração da calda c_o pode ser aproximada pela resposta de um modelo linear de primeira ordem com atraso de transporte (OGATA, 2003):

$$T_c \frac{d}{dt} y(t) + y(t) = K_o u(t - \tau_c), \quad (4.28)$$

em que τ_c é o atraso de transporte, T_c é a constante de tempo, $y(t)$ é a saída do modelo representada pela variável c_o e $u(t)$ é a entrada do modelo representada pela variável c_i , dada por

$$c_i = \frac{q_h}{q_f}. \quad (4.29)$$

O parâmetro τ_c corresponde ao tempo em que a concentração permanece inalterada após uma solicitação na mudança da concentração. Esse parâmetro depende de q_f e a seguinte função de potência é proposta:

$$\tau_c = K_1 q_f^{-\varphi_1} \quad (4.30)$$

sendo K_1 e φ_1 constantes. O parâmetro T_c também depende de q_f e usa-se o mesmo tipo de função de potência:

$$T_c = K_2 q_f^{-\varphi_2} \quad (4.31)$$

sendo K_2 e φ_2 constantes. O tempo de resposta t_s do sistema de aplicação de agrotóxicos com injeção direta, definido como o tempo que a concentração c_o na última ponta de pulverização leva para atingir 98,2 % de seu valor de regime, é estimado a partir dos valores dos parâmetros T_c e τ_c do modelo e é dado por (OGATA, 2003):

$$t_s = 4T_c + \tau_c. \quad (4.32)$$

Substituindo (4.30) e (4.31) em (4.32), tem-se que

$$t_s = 4K_1q_f^{-\varphi_1} + K_2q_f^{-\varphi_2}. \quad (4.33)$$

As equações (4.30) a (4.33) são válidas para $q_{fmin} \leq q_f \leq Q_{pmax}$. O valor de q_{fmin} corresponde ao valor mínimo de leitura do fluxômetro (5 ℓ/min) e o valor de Q_{pmax} corresponde ao valor máximo da vazão da bomba de pulverização (42 ℓ/min). A Figura 4.11 apresenta o diagrama de blocos do modelo da concentração.

Figura 4.11: Diagrama de blocos do modelo dinâmico da concentração.

4.3.1 Obtenção dos parâmetros do modelo da concentração

A metodologia utilizada por Antuniassi et al. (2002), a qual é baseada na medida da condutividade da calda pulverizada, foi utilizada nos ensaios para obtenção dos valores dos parâmetros do modelo da concentração (Tabela 4.5).

Tabela 4.5: Valores dos parâmetros do modelo da concentração.

Parâmetro	Valor
$K_o [\text{mS}/\text{cm}]$	5120
K_1	158
K_2	197
φ_1	0,85
φ_2	0,97

Nos ensaios, o reservatório de agrotóxico é preenchido com 16 ℓ de água contendo 50 g de cloreto de sódio (NaCl). Essa solução é injetada na linha de sucção da bomba de pulverização através da bomba de injeção de agrotóxico e faz a condutividade elétrica da calda

variar em função da concentração de sal. A variação dessa condutividade é monitorada pelo sensor de condutividade INPRO-7108.

Tabela 4.6: Valores médios dos parâmetros K_o , τ_c e T_c .

Caso	$q_f[\ell/\text{min}]$	$q_h[\ell/\text{min}]$	c_i	$K_o[\text{mS}/\text{cm}]$	$\tau_c[\text{s}]$	$T_c[\text{s}]$
I	11	0,33-0,66	0,03-0,06	5120	23,04	19,27
II	17	0,51-1,02	0,03-0,06	5120	16,04	12,11
III	23	0,69-1,38	0,03-0,06	5120	10,86	9,50
IV	29	0,87-1,74	0,03-0,06	5120	9,27	7,50

Os parâmetros K_o , τ_c e T_c (Tabela 4.6) foram identificados a partir das respostas obtidas do processo (Figura 4.12), através do método *Sundaresan e Krishnaswamy* (Anexo A). As pontas de pulverização utilizadas nos ensaios foram as seguintes: 11002 (Caso I), 11003 (Caso II), 11004 (Caso III) e 11005 (Caso IV).

Figura 4.12: Respostas da concentração c_o para os casos I a IV.

Os parâmetros K_1 , K_2 , φ_1 e φ_2 foram obtidos a partir do ajuste de curvas das Figuras 4.13 e 4.14 utilizando-se os valores de q_f , τ_c e T_c apresentados na Tabela 4.6.

Figura 4.13: Curva experimental $\tau_c \times q_f$ obtida com os dados experimentais via função de potência (4.30).

Figura 4.14: Curva experimental $T_c \times q_f$ obtida com os dados experimentais via função de potência (4.31).

4.3.2 Validação do modelo da concentração

O cRIO-9073 foi novamente utilizado para a coleta de dados das variáveis c_o , q_h e q_f a cada 50 ms. O modelo matemático apresentado na Figura 4.11 foi simulado no ambiente Simulink para obtenção dos resultados de simulação utilizando-se os valores dos parâmetros apresentados na Tabela 4.5. Os valores das variáveis q_h e q_f utilizados na simulação foram os mesmos valores obtidos nos ensaios (Figura 4.15). Vale ressaltar que a ponta de pulverização modelo 11005 foi utilizada nos ensaios.

Os resultados do processo e do modelo são apresentados na Figura 4.16. Nota-se uma boa aproximação das curvas do modelo simulado e do processo. O valor do índice RMSE da variável c_o predita pelo modelo da concentração foi de 0,062; o que representa um bom desempenho do modelo apresentado por ser bem menor do que a unidade.

Neste trabalho, para reduzir os erros de aplicação e evitar a subaplicação de agrotóxico,

Figura 4.15: Valores de q_h e q_f utilizados para validação do modelo de concentração.

Figura 4.16: Resultados experimentais e de simulação do modelo da concentração.

as referências das taxas de aplicação do agrotóxico e da mistura são antecipadas usando os tempos estimados t_s e τ_c . O modelo dinâmico da concentração da calda c_o apresentado também pode ser utilizado para estimar a concentração devido ao custo elevado do sensor de condutividade. A estimativa dessa concentração permite o projeto de um controlador eletrônico multivariável com realimentação da concentração. Neste caso, o processo a ser controlado consiste de um sistema dinâmico com duas entradas (vazões q_h e q_f) e uma saída (concentração c_o).

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTAÇÃO DOS CONTROLADORES PREDITIVOS BASEADO EM MODELO

5.1 Introdução

O controle preditivo baseado em modelo (MPC, do inglês *Model Predictive Control*) refere-se a uma classe de algoritmos em que há a utilização direta de um modelo do processo (planta) para o cálculo de uma sequência de controle minimizando uma função custo (CAMACHO; BORDONS, 2007; NORMEY-RICO; CAMACHO, 2007).

As primeiras técnicas MPC foram desenvolvidas nos anos 70 pela necessidade de obter o controle especializado para sistemas elétricos de potência e refinarias de petróleo (QIN; BADGWELL, 2003). O interesse por essas técnicas surgiram somente nos anos 80, após a publicação dos trabalhos pioneiros realizados por dois grupos de pesquisa (Shell Oil e Adersa/Gerbios) associados à indústria petroquímica e da primeira exposição ampla do GPC (*Generalized Predictive Control*) (KWONG, 2005). A Shell Oil, em 1979, denominou o seu controle por DMC (*Dynamic Matrix Control*), enquanto uma técnica similar, denominada MAC (*Model Algorithmic Control*) e comercializada como IDCOM, foi publicada por uma companhia francesa, Adersa/Gerbios, em 1978 (KWONG, 2005). Desde então, o MPC vem sendo utilizado com sucesso em muitas áreas de aplicação, incluindo indústrias químicas, processamento de alimentos, automotiva, robótica, aeroespacial (QIN; BADGWELL, 2003) e energia renovável (AYALA et al., 2011). Em relação aos outros métodos de controle, o MPC apresenta diversas vantagens importantes (CAMACHO; BORDONS, 2007):

- a) pode ser usado para controlar muitos processos, desde aqueles com dinâmica simples até os mais complexos, incluindo sistemas não-lineares, de fase não-mínima, multivariáveis e instáveis;
- b) a compensação do tempo morto pode ser feita de modo intrínseco;
- c) é extremamente útil quando as referências futuras são conhecidas (por exemplo, em

robótica e processo *batch*);

- d) o controle de pré-alimentação (*feedforward*) usado para compensar perturbações mensuráveis pode ser inserido de forma natural no projeto do controlador MPC;
- e) se o sistema tiver restrições, estas podem ser inseridas sistematicamente no projeto.

Como desvantagem, tem-se o tempo requerido para o desenvolvimento de um modelo dinâmico a partir de dados de planta, tipicamente da ordem de semanas (KWONG, 2005). Na sequência será descrita a estratégia geral de controle utilizado pelo MPC.

5.2 Estratégia do MPC

A estratégia MPC pode ser representada por meio de diagrama de blocos da Figura 5.1, onde podem ser observados seus elementos mais importantes: o modelo de predição e o otimizador.

Figura 5.1: Estrutura básica do MPC com seus principais elementos: o modelo de predição e o otimizador.

As variáveis de entrada $u(k) \in \Re^p$, saída $y(k) \in \Re^q$ e referência $r(k) \in \Re^q$ representam os valores no instante $k = nT_a$ da variável manipulada (sinal de controle), da variável controlada (saída da planta) e do sinal de referência (*setpoint*), respectivamente; sendo T_a o período de amostragem. O vetor $x(k) \in \Re^n$ representa o valor do estado no instante k e caso não esteja disponível para realimentação deve-se usar um observador de estado para estimá-lo. O sinal de controle incremental $\Delta u(k)$ é dado por

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1). \quad (5.1)$$

As saídas preditas usando o modelo de predição com base nas informações disponíveis até o instante k , são denotadas por $\hat{y}(k+i|k)$ para $i = 1, \dots, N_p$ e dependem do estado $x(k)$ no instante k e do sinal de controle incremental $\Delta \hat{u}(k-1+i|k)$ para $i = 1, \dots, N_c$, com N_p o horizonte de predição e N_c o horizonte de controle, sendo ambos dados em múltiplos

inteiros de T_a . O sinal de controle $\hat{u}(k)$ permanece constante após o horizonte de controle N_c . (MACIEJOWSKI, 2002; CAMACHO; BORDONS, 2007).

A sequência ótima do sinal de controle incremental $\Delta\hat{u}^*(k-1+i|k)$ para $i = 1, \dots, N_c$ é determinada por um algoritmo de otimização de modo a reduzir o erro entre a saída da planta e a trajetória de referência, denotado por $\epsilon(k+i|k)$. Para isso, é usualmente definida uma função custo que leve em conta este erro de seguimento dentro do horizonte de predição e o esforço do sinal de controle incremental no horizonte N_c , atendendo as restrições sobre a entrada, saída ou estado da planta.

Uma vez obtida a sequência ótima $\Delta\hat{u}^*(k-1+i|k)$, para $i = 1, \dots, N_c$, o primeiro valor desta sequência, denotado por $\hat{u}^*(k|k)$, é aplicado à planta no instante k , pois no próximo instante de amostragem $k+1$, uma nova predição é calculada, uma nova trajetória $r(k+i|k+1)$ ($i = 1, 2, \dots$) é definida e um novo processo de otimização é realizado sobre o horizonte de predição $k+1+i$, com $i = 1, 2, \dots, N_p$, obtendo-se uma nova sequência ótima $\Delta\hat{u}^*(k+1+i|k+1)$, com $i = 1, 2, \dots, N_c$; e o próximo valor de controle $\hat{u}^*(k+1|k+1)$ a ser aplicado à planta. Esta estratégia de horizonte retrocedente garante o fechamento da malha de controle, sendo importante para conferir ao controlador certo grau de robustez com respeito a incertezas ou aproximações feitas no modelo de predição (MACIEJOWSKI, 2002; CAMACHO; BORDONS, 2007).

A Figura 5.2 ilustra a estratégia MPC. Observe que $N_c \leq N_p$ e $\Delta\hat{u}(k-1+i|k) = 0$ para $i \geq N_c$; ou seja, o sinal de controle $\hat{u}(k+i|k) = \hat{u}(k+N_c-1|k)$ para $N_c \leq i \leq N_p-1$; permanece constante após o horizonte de controle N_c (MACIEJOWSKI, 2002; CAMACHO; BORDONS, 2007).

Figura 5.2: Estratégia de atuação do MPC com horizonte de controle N_c e horizonte de predição N_p .

Neste trabalho, a formulação do MPC é baseada em um modelo no espaço de estado. Optou-se por usar este modelo de predição devido à simplicidade com que tal formulação trata tanto de processos monovariáveis quanto multivariáveis, devido ao vetor de estados es-

tar disponível para medição e também é a abordagem utilizada pelo aplicativo MPC contido na ferramenta CDSM (*Control Design and Simulation Module*) do LabVIEW.

O CDSM possui um ambiente de simulação para análise de sistemas dinâmicos lineares e não lineares em tempo contínuo ou discreto e diferentes módulos para projeto de controladores para o hardware de destino, aqui o cRIO-9073, incluindo controladores PID, MPC, LQR e fuzzy. Nesse trabalho, o uso do ambiente de simulação reduziu significativamente o tempo necessário para a adaptação dos códigos e parâmetros dos controladores, que vinham sendo desenvolvidos com o auxílio do Matlab/Simulink, para o cRIO-9073.

5.3 Formulação do MPC

A formulação do MPC é baseada em um modelo de predição no espaço de estado, o qual é utilizado no cálculo das predições da variável de saída $\hat{y}(k + i|k)$ ao longo do horizonte de predição N_p .

5.3.1 Modelo de predição

A forma mais utilizada para modelos lineares de predição em controladores MPC é a forma de espaço de estado discreto¹ (CAMACHO; BORDONS, 2007):

$$x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (5.2)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (5.3)$$

onde $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ é a matriz de estado do modelo, $B \in \mathbb{R}^{n \times p}$ é a matriz das entradas do modelo e $C \in \mathbb{R}^{q \times n}$ é a matriz das saídas. O modelo de espaço de estado escrito na forma incremental também pode ser usado. Uma vantagem do modelo incremental é o acréscimo de um integrador na planta de forma natural, possibilitando que o erro seja zerado para referências constantes.

O modelo incremental pode ser escrito combinando-se (5.1) com o modelo representado por (5.2) e (5.3):

$$\begin{bmatrix} x(k + 1) \\ u(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k - 1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B \\ I \end{bmatrix} \Delta u(k) \quad (5.4)$$

$$y(k) = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(k) \\ u(k - 1) \end{bmatrix}. \quad (5.5)$$

¹Como o MPC trabalha em tempo discreto, o modelo de predição também é discreto.

Definindo o vetor de estado $\check{x}(k) = \begin{bmatrix} x(k) & u(k-1) \end{bmatrix}^T$, o modelo incremental assume a seguinte forma (CAMACHO; BORDONS, 2007):

$$\check{x}(k+1) = \check{A}\check{x}(k) + \check{B}\Delta u(k) \quad (5.6)$$

$$y(k) = \check{C}\check{x}(k) \quad (5.7)$$

sendo

$$\check{A} = \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & I \end{bmatrix}, \quad (5.8)$$

$$\check{B} = \begin{bmatrix} B \\ I \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

e

$$\check{C} = \begin{bmatrix} C & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.10)$$

5.3.2 Cálculo de $\hat{y}(k+i|k)$ ao longo do horizonte N_p

As predições da variável de saída $\hat{y}(k+i|k)$ para $i = 1, \dots, N_p$ são obtidas utilizando (5.6) e (5.7) de forma recursiva, resultando em (CAMACHO; BORDONS, 2007):

$$\mathcal{Y}(k) = \begin{bmatrix} \hat{y}(k+1|k) \\ \hat{y}(k+2|k) \\ \vdots \\ \hat{y}(k+N_p|k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \check{C}\check{A}\check{x}(k) + \check{C}\check{B}\Delta\hat{u}(k|k) \\ \check{C}\check{A}^2\check{x}(k) + \sum_{i=0}^1 \check{C}\check{A}^{1-i}\check{B}\Delta\hat{u}(k+i|k) \\ \vdots \\ \check{C}\check{A}^{N_p}\check{x}(k) + \sum_{i=0}^{N_p-1} \check{C}\check{A}^{N_p-1-i}\check{B}\Delta\hat{u}(k+i|k) \end{bmatrix}. \quad (5.11)$$

A expressão (5.11) pode ser escrita na forma matricial (CAMACHO; BORDONS, 2007):

$$\mathcal{Y}(k) = \Psi\check{x}(k) + \Theta\Delta\mathcal{U}(k) \quad (5.12)$$

onde

$$\Psi = \begin{bmatrix} \check{C}\check{A} \\ \check{C}\check{A}^2 \\ \vdots \\ \check{C}\check{A}^{N_p} \end{bmatrix}, \quad (5.13)$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} \check{C}\check{B} & 0 & \cdots & 0 \\ \check{C}\check{A}\check{B} & \check{C}\check{B} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \check{C}\check{A}^{N_p-1}\check{B} & \check{C}\check{A}^{N_p-2}\check{B} & \cdots & \check{C}\check{A}^{N_p-N_c}\check{B} \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

e

$$\Delta \mathcal{U}(k) = \begin{bmatrix} \Delta \hat{u}(k|k) \\ \vdots \\ \Delta \hat{u}(k + N_c - 1|k) \end{bmatrix}. \quad (5.15)$$

Nota-se através de (5.12) que as predições dependem do estado $\check{x}(k)$ no instante atual k , requerendo portanto um estimador de estado, caso não seja disponível, e das entradas futuras obtidas pela minimização da função custo.

5.3.3 Função custo

A seguinte função custo é utilizada na formulação do MPC:

$$J(k) = \sum_{i=N_w}^{N_p} \|\hat{y}(k+i|k) - r(k+i|k)\|_{\mathcal{Q}}^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} \|\Delta \hat{u}(k+i|k)\|_{\mathcal{R}}^2 \quad (5.16)$$

onde $\|\bullet\|_{\mathcal{Q}}^2$ denota norma euclidiana ponderada por $\mathcal{Q}$, $\mathcal{Q}$ e $\mathcal{R}$ são matrizes simétricas semidefinidas positivas de ponderação utilizadas para penalizar o erro de saída e o esforço de controle. Os parâmetros N_w e N_p representam o horizonte mínimo e máximo do horizonte de predição, respectivamente, e o parâmetro N_c representa horizonte de controle. A função custo em (5.16) pode ser escrita na forma matricial (LOPES, 2007; MACIEJOWSKI, 2002):

$$J(k) = \|\mathcal{Y}(k) - \Gamma(k)\|_Q^2 + \|\Delta \mathcal{U}(k)\|_R^2 \quad (5.17)$$

em que

$$\Gamma(k) = \begin{bmatrix} r(k+N_w|k) \\ \vdots \\ r(k+N_p|k) \end{bmatrix}, \quad (5.18)$$

$$Q = \begin{bmatrix} \mathcal{Q} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathcal{Q} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathcal{Q} \end{bmatrix}_{q(N_p-N_w+1) \times q(N_p-N_w+1)} \quad (5.19)$$

e

$$R = \begin{bmatrix} \mathcal{R} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \mathcal{R} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \mathcal{R} \end{bmatrix}_{pN_c \times pN_c}. \quad (5.20)$$

A sintonia do MPC depende dos horizontes N_p e N_c e das matrizes $\mathcal{Q}$ e $\mathcal{R}$. A sequência ótima $\Delta \mathcal{U}^*(k)$ do sinal de controle é obtida através da minimização da função custo, o que envolve a solução de um problema de otimização sujeito a restrições. O erro de seguimento da trajetória de referência será maior quanto menor forem os valores de N_p e N_c . Quanto menor os valores da diagonal dos elementos da matriz $\mathcal{R}$, mais rápido será o transitório da saída, pois o esforço de controle será maior e com isso as ponderações nas ações de controle serão maiores. Quanto maiores os valores da diagonal dos elementos da matriz $\mathcal{Q}$, maiores serão as ponderações do erro (converge para zero mais rapidamente) e, portanto, menor será o tempo de resposta da saída. Entretanto, o sobressinal dessa resposta será maior. O aumento dos valores da diagonal dos elementos da matriz $\mathcal{R}$ compensa o efeito do sobressinal (MACIEJOWSKI, 2002).

5.3.4 Solução do problema de otimização na ausência de restrições

A seguinte função custo é obtida substituindo-se a equação de predição (5.12) na função custo (5.17) (MACIEJOWSKI, 2002):

$$J(k) = \Delta \mathcal{U}(k)^T \mathcal{H} \Delta \mathcal{U}(k) - \Delta \mathcal{U}(k)^T \mathcal{G} + \mathcal{C} \quad (5.21)$$

onde

$$\mathcal{G} = 2\Theta^T Q \mathcal{E}(k), \quad (5.22)$$

$$\mathcal{H} = \Theta^T Q \Theta + R, \quad (5.23)$$

$$\mathcal{C} = \mathcal{E}(k)^T Q \mathcal{E}(k), \quad (5.24)$$

e

$$\mathcal{E}(k) = \Gamma(k) - \Psi \check{x}(k). \quad (5.25)$$

A função custo em (5.21) é quadrática em $\Delta \mathcal{U}(k)$. Desse modo, na ausência de restrições, a minimização de $J(k)$ possui solução analítica exata, uma vez que a matriz $\mathcal{H}$ é definida positiva para $Q \geq 0$ e $R > 0$. A solução analítica é obtida igualando-se o gradiente

$$\frac{\partial J(k)}{\partial \Delta \mathcal{U}(k)} = -\mathcal{G} + 2\mathcal{H} \Delta \mathcal{U}(k) \quad (5.26)$$

a zero, o que resulta na seguinte sequência ótima do sinal de controle $\Delta \mathcal{U}^*(k)$:

$$\Delta \mathcal{U}^*(k) = \frac{1}{2} \mathcal{H}^{-1} \mathcal{G}. \quad (5.27)$$

A minimização da função custo (5.21) sujeita a restrições possui solução numérica somente. Portanto, a solução do problema de otimização com restrições é feita via programação quadrática.

5.3.5 Solução do problema de otimização com restrições

A abordagem MPC é bastante atrativa devido a possibilidade de incorporar restrições de amplitude e variação no sinal de controle, e de amplitude do sinal de saída, na função custo para lidar com restrições de operação do processo e garantir que estejam em determinadas faixas como:

$$\Delta u_{min} \leq \Delta \hat{u}(k-1+i|k) \leq \Delta u_{max}; \quad i = 1, \dots, N_c \quad (5.28)$$

$$u_{min} \leq \hat{u}(k-1+i|k) \leq u_{max}; \quad i = 1, \dots, N_c \quad (5.29)$$

$$y_{min} \leq \hat{y}(k+i|k) \leq y_{max}; \quad i = 1, \dots, N_p \quad (5.30)$$

onde Δu_{min} e Δu_{max} são os limites mínimo e máximo do sinal de controle incremental, u_{min} e u_{max} são os limites mínimo e máximo do sinal de controle e y_{min} e y_{max} são os limites mínimo e máximo do sinal de saída.

As restrições em (5.28)-(5.30) devem ser expressas em função do vetor $\Delta \mathcal{U}(k)$ (função custo em (5.21) depende de $\Delta \mathcal{U}(k)$) em uma única restrição de desigualdade, a qual é dada por (MACIEJOWSKI, 2002):

$$\Omega \Delta \mathcal{U}(k) \leq \varpi \quad (5.31)$$

onde Ω e ϖ são matrizes de dimensões apropriadas. Dessa forma, o problema de otimização consiste em minimizar a função custo quadrática (5.21) sujeito às desigualdades lineares (5.31), ou seja:

$$\text{minimize } \Delta \mathcal{U}(k)^T \mathcal{H} \Delta \mathcal{U}(k) - \Delta \mathcal{U}(k)^T \mathcal{G} + c \quad (5.32)$$

sujeita à

$$\Omega \Delta \mathcal{U}(k) \leq \varpi. \quad (5.33)$$

Tal problema de otimização agora pode ser resolvido em cada período de amostragem via programação quadrática. O MPC disponível no CDSM disponibiliza dois algoritmos de programação quadrática: Dual (opção default) e Barrier. Ambos os algoritmos estão descritos em Wang (2004).

Quando as restrições no MPC estão ativas, a lei de controle torna-se efetivamente um caso de controle não-linear. Além do mais, não é possível determinar uma expressão analítica para a lei de controle pois a mesma é obtida a partir da solução de um problema de otimização. Com isso, o estudo da estabilidade de MPCs só é possível com a utilização de métodos indiretos como os baseados em funções de Lyapunov (WANG, 2004; MAYNE et al., 2000).

Conforme definido em Maciejowski (2002), uma função $V(x,u)$ positiva definida, é dita função de Lyapunov quando as seguintes condições são satisfeitas:

- a) Se $\|x_1^T, u_1^T\| > \|x_2^T, u_2^T\|$ então $V(x_1, u_1) \geq V(x_2, u_2)$;
- b) Ao longo de qualquer trajetória do sistema $x(k+1) = f(x(k), u(k))$ em uma vizinhança da origem, $V(x(k+1), u(k+1)) \leq V(x(k), u(k))$.

Se a função $V(x,u)$ é uma função de Lyapunov, então a origem é um ponto de equilíbrio estável. Se $V(x(k), u(k)) \rightarrow 0$ quando $k \rightarrow \infty$ então a origem é assintoticamente estável.

Segundo Wang (2004), é possível provar a estabilidade de um MPC utilizando a própria função custo do MPC como uma função de Lyapunov. Sujeitando-se a função custo à uma restrição sobre o valor terminal do estado e impondo que o estado esteja na origem ao final do horizonte de predição, a prova de estabilidade decorre naturalmente.

5.4 MPC no LabVIEW

A ferramenta CDSM do LabVIEW possui VIs específicos para projeto de controladores preditivos baseado em modelo. No LabVIEW, esses VIs são inseridos em um *While Loop* temporizado. Dessa forma, cada iteração do *loop* é realizada em um período de amostragem T_a especificado pelo VI denominado **Wait (ms)** (Figura 5.3). A implementação do MPC no LabVIEW (Figura 5.3) é feita através de três VIs:

1. *CD Create MPC Controller.vi* (CDCMPCC): este VI faz a estruturação do controlador MPC requerida pelo VI CDIMPCC. As informações (Figura B.3, Apêndice B) necessárias para esta estruturação são inseridas pelo usuário através de uma tela de interface contendo os seguintes dados:
 - a) Horizontes de predição (N_p e N_w) e controle N_c .
 - b) Matrizes de ponderação $\mathcal{Q}$ e $\mathcal{R}$.
 - c) Modelo de predição em espaço de estado discreto e intervalo de discretização.
 - d) Restrições na saída e no sinal de controle.

Figura 5.3: Algoritmo MPC no LabVIEW.

- e) Escolha da opção ação integral. Ao optar por introduzir a ação integral ao controlador, o VI CDCMPCC converte automaticamente o modelo espaço de estado em sua forma incremental.
 - f) Escolha do algoritmo de programação quadrática: Dual ou Barrier.
2. *CD Update MPC Window.vi* (CDUMPCW): este VI cria um vetor de referências $r(k+i|k)$ ao longo do horizonte de predição N_p ($i = 1, \dots, N_p$) à partir de um sinal de referência futuro conhecido a priori. Este sinal está armazenado em um buffer com capacidade para armazenar até N_{buffer} dados (Figura 5.3). Este VI é requerido pelo VI CDIMPCC.
 3. *CD Implement MPC Controller.vi* (CDIMPCC): este VI calcula o valor ótimo da ação de controle $u^*(k|k)$ e a sequência $\hat{y}(k+i|k)$ ao longo do horizonte de predição N_p para verificação. O valor atual da saída da planta $y(k)$ e o vetor de referências $r(k+i|k)$ ($i = 1, \dots, N_p$), enviado pelo VI CDUMPCW, são requeridos por este VI.

De maneira geral, o algoritmo MPC mostrado na Figura 5.3 é formulado no instante atual k e o sequenciamento de suas ações pode ser resumido da seguinte maneira:

1. O VI CDCMPCC cria a estrutura do MPC requerida pelo VI CDIMPCC para os cálculos da ação de controle ótima e predição da saída.
2. O VI CDUMPCW recebe em sua entrada **Predicted Value** o vetor de referência futuro de comprimento N_{buffer} , denominado aqui por $\mathbf{r}(k)$, e envia, através de sua saída **Predicted Profile Window**, os valores de referência desse mesmo vetor, até o instante de tempo $k + N_p$, para a entrada **Output Reference Window** do VI CDIMPCC.
3. Medida da variável de saída da planta, denominada aqui por $\mathbf{y}(k)$, no instante atual k , e envio deste valor medido para a entrada **Measured Output $\mathbf{y}(k)$** do VI CDIMPCC.

Segundo NI (2009), este VI utiliza $y(k)$ para calcular o erro entre o valor medido e o valor estimado pelo modelo de predição para ser usado na ação integral do MPC.

4. O VI CDIMPCC calcula o valor ótimo da ação de controle $u^*(k/k)$ e através de sua saída **Control Action $u(k)$** , o envia para a variável denominada **$u(k)$** para ser aplicada na planta.
5. Na próxima iteração do *While Loop*, tem-se o próximo instante de amostragem $k + 1$. O VI CDUMPCW recebe um novo elemento correspondente ao sinal de referência futuro e envia, através de sua saída **Predicted Profile Window**, os novos valores de referência desse vetor, até o instante $k + N_p + 1$, para a entrada **Output Reference Window** do VI CDIMPCC.

O algoritmo executa os passos 2-5 enquanto o critério de parada do *While Loop* não ocorrer. A seguir será detalhado a implementação dos MPCs na plataforma cRIO-9073.

5.5 Implementação dos MPCs na plataforma cRIO-9073

O sistema de pulverização com injeção direta utiliza dois MPCs na regulação das vazões do agrotóxico q_h e da calda q_f . A implementação destes controladores na plataforma cRIO-9073 é dada a seguir.

5.5.1 Usando o MPC para regulação de q_h

O MPC utilizado neste trabalho para regular a vazão do agrotóxico q_h pode ser representado por meio de diagrama de blocos da Figura 5.4.

Figura 5.4: Estrutura do MPC para regulação da vazão do agrotóxico q_h .

A planta a ser controlada é o sistema de injeção, descrito em detalhes na Seção 4.1, sendo u o sinal de controle d_h , y o sinal de saída q_h e $x = [i_h \ \omega_h]^T \in \Re^2$ o vetor de estado da planta.

A partir das equações (4.1), (4.2) e (4.3) para $p_h = 0$, pois a injeção do agrotóxico é feita na linha de sucção da bomba de pulverização, e do vetor de estado x , chega-se à seguinte representação no espaço de estado do sistema de injeção:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= A_i x + B_i u \\ y &= C_i x\end{aligned}\tag{5.34}$$

onde

$$A_i = \begin{bmatrix} -\frac{R_h}{L_h} & -\frac{K_e}{L_h} \\ \frac{K_t}{J} & -\frac{b}{J} \end{bmatrix}.\tag{5.35}$$

$$B_i = \begin{bmatrix} \frac{K_{pt}}{L_h} \\ 0 \end{bmatrix}.\tag{5.36}$$

$$C_i = \begin{bmatrix} 0 & 60000K_b \end{bmatrix}.\tag{5.37}$$

O modelo espaço de estado representado em (5.34) foi discretizado na forma

$$\begin{aligned}x(k+1) &= A_{id}x(k) + B_{id}u(k) \\ y(k) &= C_{id}x(k)\end{aligned}\tag{5.38}$$

para ser usado no modelo de predição do MPC. Substituindo-se os valores dos parâmetros do sistema de injeção (Tabela 4.1) nas matrizes A_i , B_i e C_i e utilizando-se a função **c2d** do matlab com um período de amostragem de $T_a=50$ ms, obtém-se as matrizes A_{id} , B_{id} e C_{id} .

$$A_{id} = \begin{bmatrix} -0,004938 & -0,04248 \\ 0,08963 & 0,7711 \end{bmatrix}.\tag{5.39}$$

$$B_{id} = \begin{bmatrix} 0,1432 \\ 0,5956 \end{bmatrix}.\tag{5.40}$$

$$C_{id} = \begin{bmatrix} 0 & 0,01241 \end{bmatrix}.\tag{5.41}$$

Adotou-se o valor de 50 ms para o período de amostragem porque foi constatado, através de experimentos na bancada de pulverização, que valores menores não são adequados para o controle da dinâmica da vazão q_h , que é o modo mais rápido do sistema. Valores menores do que 50 ms não são adequados pois comprometem o desempenho do processador do cRIO-9073 na execução determinística das aplicações criadas com o software LabVIEW RT. Vale ressaltar que os MPCs são executados no processador do cRIO-9073, uma vez que suas aplicações foram criadas no LabVIEW RT.

A sintonia dos parâmetros deste MPC foi realizada inicialmente no ambiente de simulação (Capítulo 6) de forma a atender as especificações referentes à vazão do agrotóxico q_h , como a minimização do tempo de resposta e do sobressinal. Os valores dos parâmetros do MPC (Figura D.2, Apêndice D) obtidos no ambiente de simulação (Seção 6.2) foram usados como ponto de partida na sintonia feita diretamente na bancada de pulverização, através da plataforma cRIO-9073. Os valores finais dos parâmetros desse MPC são mostrados na Tabela 5.1 e podem ser vistos na tela de interface com o usuário criada (Figura B.3, Apêndice B).

Tabela 5.1: Valores dos parâmetros do MPC para regulação de q_h .

Parâmetro	Valor	Tolerância	Penalidade
N_p	20,00	-	-
N_w	0,00	-	-
N_c	5,00	-	-
$\mathcal{Q}$	12,00	-	-
$\mathcal{R}$	0,15	-	-
u_{min}	0,00	1,00	2,00
u_{max}	65,00	1,00	5,00
y_{max}	2,00	2,00	5,00

A etapa de sintonia desse MPC, incluindo a etapa de simulação, demorou aproximadamente 8 horas e os valores de seus parâmetros sofreram pequenas alterações em comparação aos valores obtidos com o ambiente de simulação, destacando portanto, a importância do ambiente de simulação desenvolvido neste trabalho. A ação integral também foi utilizada pelos dois MPCs.

A seguir, é apresentada a implementação do outro MPC utilizado na regulação da vazão da calda q_f .

5.5.2 Usando o MPC para regulação de q_f

O MPC utilizado neste trabalho para regular a vazão da calda q_f pode ser representado por meio de diagrama de blocos da Figura 5.5. A planta a ser controlada é o sistema de pulverização, descrito em detalhes na Seção 4.2, sendo u o sinal de controle d_v , y o sinal de saída q_f e $x = [\theta_v \ \dot{\theta}_v]^T \in \mathbb{R}^2$ o vetor de estado da planta. A partir das equações (4.22), (4.25)-(4.27) e do vetor de estado x , chega-se a seguinte representação não-linear no espaço de estados do sistema de pulverização:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f(x, u) \\ y &= h(x, u)\end{aligned}\tag{5.42}$$

Figura 5.5: Estrutura do MPC para regulação da vazão do agrotóxico q_h .

onde

$$f(x, u) = \begin{bmatrix} x_2 \\ -\frac{1}{T_m}x_2 + \frac{K_m K_{ph}}{T_m} \mathcal{D}\mathcal{Z}(u) \end{bmatrix} \quad (5.43)$$

e

$$h(x, u) = \begin{bmatrix} Q_p \left[\sqrt{K_{qteq} \left(\alpha_0 + \alpha_1 e^{\frac{x_1}{\beta}} \right)} - \left(\alpha_0 + \alpha_1 e^{\frac{x_1}{\beta}} \right) \right] \\ K_{qteq} - \left(\alpha_0 + \alpha_1 e^{\frac{x_1}{\beta}} \right) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.44)$$

são funções vetoriais. Para o projeto do MPC linear, obteve-se um modelo linearizado de (5.42) em torno do ponto de equilíbrio² $\theta_v = 65$ rad e $\dot{\theta}_v = 0$ rad/s. Nessa configuração, os valores de equilíbrio para o estado x , para a entrada u e para a saída y são dados por $\bar{x} = [50 \ 0]^T$, $\bar{u} = 0$ e $\bar{y} = 9,21$. Vale ressaltar que $\bar{u}$ e $\bar{y}$ foram encontrados a partir das soluções numéricas das equações de equilíbrio $f(\bar{x}, \bar{y}) = 0$ e $h(\bar{x}, \bar{y}) = 0$, utilizando-se a função **fsolve** do Matlab e considerando os valores dos parâmetros apresentados na Tabela 4.3.

O modelo linearizado foi obtido com uma aproximação de Taylor de primeira ordem da forma:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= A_p \tilde{x} + B_p \tilde{u} \\ \tilde{y} &= C_p \tilde{x} \end{aligned} \quad (5.45)$$

em que $\tilde{x} = x - \bar{x}$ e $\tilde{u} = u - \bar{u}$. As matrizes A_p , B_p e C_p contêm as derivadas parciais das componentes de $f(x, u)$ e $h(x, u)$ com respeito às variáveis de estado e de controle,

² A válvula proporcional 1 apresenta uma faixa de trabalho útil entre [50-90] rad (Figura 4.7, Seção 4.2.3). O valor $\theta_v = 65$ rad é o ponto médio desta faixa de trabalho e por isso foi escolhido como ponto de equilíbrio.

respectivamente, no ponto de equilíbrio $(\bar{x}, \bar{u})$ considerado, e são dadas a seguir:

$$A_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -\frac{1}{T_m} \end{bmatrix}. \quad (5.46)$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{K_m K_{ph} k_+}{T_m} \end{bmatrix}. \quad (5.47)$$

$$C_p = \begin{bmatrix} K & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.48)$$

O valor de K em (5.48) é dado pela expressão:

$$K = \frac{Q_p \alpha_1 e^{\frac{\bar{x}_1}{\beta}}}{\beta \left(\alpha_0 - K_{qteq} + \alpha_1 e^{\frac{\bar{x}_1}{\beta}} \right)} \left(1 - \alpha_0 + \sqrt{K_{qteq} \left(\alpha_0 + \alpha_1 e^{\frac{\bar{x}_1}{\beta}} \right)} - \alpha_1 e^{\frac{\bar{x}_1}{\beta}} - \frac{K_{qteq}}{2\sqrt{K_{qteq} \left(\alpha_0 + \alpha_1 e^{\frac{\bar{x}_1}{\beta}} \right)}} \right) \quad (5.49)$$

onde $\bar{x}_1$ o ponto de equilíbrio da variável de estado θ_v . O modelo espaço de estado representado em (5.45) foi discretizado na forma

$$\begin{aligned} \tilde{x}(k+1) &= A_{pd} \tilde{x}(k) + B_{pd} \tilde{u}(k) \\ \tilde{y}(k) &= C_{pd} \tilde{x}(k) \end{aligned} \quad (5.50)$$

para ser usado no modelo de predição do MPC. Substituindo-se os valores dos parâmetros do sistema de injeção (Tabela 4.3) nas matrizes A_p , B_p e C_p e utilizando-se a função **c2d** do matlab com um período de amostragem de $T_a=50$ ms, obtém-se as matrizes A_{pd} , B_{pd} e C_{pd} no ponto de equilíbrio $x = [\theta_v \ \dot{\theta}_v]^T$:

$$A_{pd} = \begin{bmatrix} 1 & 0,03161 \\ 0 & 0,3679 \end{bmatrix}. \quad (5.51)$$

$$B_{pd} = \begin{bmatrix} 0,002152 \\ 0,07396 \end{bmatrix}. \quad (5.52)$$

$$C_{pd} = \begin{bmatrix} 0,55 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5.53)$$

De acordo com (4.23), a vazão q_f possui um atraso de transporte τ_f constante estimado em 0,65 s. Portanto, a saída discreta $\tilde{y}(k)$ deve ser atrasada de 13 intervalos de amostragem, e para isso, utilizou-se o VI denominado **CD Set Delays to Model.vi** conforme mostrado na Figura D.5 do Apêndice D.

Tabela 5.2: Valores dos parâmetros do MPC para regulação de q_f .

Parâmetro	Valor	Tolerância	Penalidade
N_p	50,00	-	-
N_w	13,00	-	-
N_c	10,00	-	-
$\mathcal{Q}$	15,00	-	-
$\mathcal{R}$	0,015	-	-
u_{min}	-90,00	1,00	5,00
u_{max}	90,00	1,00	5,00
y_{max}	34,00	0,10	5,00

Os parâmetros de sintonia desse MPC foram encontrados da mesma forma adotada pelo MPC usado na regulação de q_h (Seção 5.5.1). Os valores finais dos parâmetros deste MPC são mostrados na Tabela 5.2 e também podem ser vistos na tela de interface com o usuário criada (Figura B.3, Apêndice B).

Também vale ressaltar que a etapa de sintonia deste MPC demorou aproximadamente 10 horas e os valores de seus parâmetros também sofreram pequenas alterações em comparação aos valores obtidos com o ambiente de simulação.

CAPÍTULO 6

A ESTRATÉGIA DE ANTECIPAÇÃO DAS TAXAS DE APLICAÇÃO E O AMBIENTE DE SIMULAÇÃO

O desenvolvimento de um ambiente de simulação do sistema de pulverização com injeção direta desenvolvido, visa principalmente a etapa de sintonia do MPC. Adicionalmente, o desenvolvimento de um ambiente de simulação criado no LabVIEW PC, o qual possui a mesma linguagem de programação (Linguagem G ou Gráfica) utilizada na automação do sistema (LabVIEW RT, FPGA), permite que os VIs criados no LabVIEW PC sejam transportados para o PAC cRIO-9073 com poucas modificações.

No ambiente de simulação está incluído, além dos modelos referentes aos sistemas de injeção e pulverização, o algoritmo de antecipação das taxas de aplicação, o qual visa principalmente a redução dos erros de aplicação decorrentes do tempo de atraso inerentes aos sistemas de injeção direta.

6.1 Antecipação das taxas de aplicação

Os valores de referência para as taxas de aplicação da mistura e do agrotóxico são obtidas a partir da leitura de um mapa de recomendação (tabela de dados) criado no LabVIEW PC (Figura B.2, Apêndice B). Esse mapa simula uma cultura subdividida em várias células $i = 1, 2, \dots, N_c$ de comprimento L_c , dado em m, sendo os elementos da linha o número de células i e os elementos das colunas as taxas de aplicação da mistura e do agrotóxico na célula i , denotados respectivamente por $D_m(i)$ e $D_h(i)$.

O pulverizador desloca-se em linha reta ao longo das células numa velocidade denotada por v_p . O perfil dessa velocidade, em km/h, é criado pelo usuário no LabVIEW PC (Figura B.2, Apêndice B). A posição atual x_a do pulverizador nessa cultura, em m, é dada pela integral

da velocidade v_p ao longo do tempo t :

$$x_a = \int_0^t v_p dt \quad (6.1)$$

e o quociente da divisão de x_a por L_c , denotado por q , é usado no cálculo da célula atual i através da relação:

$$i = q + 1. \quad (6.2)$$

Os valores estimados dos tempos τ_c (atraso de transporte) e t_s (tempo de resposta) em (4.30) e (4.33) dependem da vazão instantânea da calda q_f e são usados para o cálculo das posições futuras x_c e x_s do pulverizador nesta cultura através das seguintes relações:

$$x_c = x_a + \frac{v_p \tau_{c(i)}}{3,6}, \quad (6.3)$$

$$x_s = x_a + \frac{v_p t_{s(i)}}{3,6}. \quad (6.4)$$

onde o índice (i) nos termos τ_c e t_s indica que esses tempos são estimados na célula atual i . O quociente da divisão de x_s por L_c , denotado por q_s , é usado no cálculo de i_s :

$$i_s = q_s + 1 \quad (6.5)$$

onde i_s é a célula futura em que o pulverizador estará em $t_{s(i)}$ segundos a frente da célula atual i . Da mesma forma, o quociente q_c da divisão de x_c por L_c é usado no cálculo de i_c através da seguinte relação:

$$i_c = q_c + 1 \quad (6.6)$$

sendo i_c a célula futura em que o pulverizador estará em $\tau_{c(i)}$ segundos a frente da célula atual i . A partir dos valores de i , i_c , i_s , $D_h(i)$ e $D_h(i+1)$, é tomada a decisão de antecipar ou não o instante da mudança das taxas $D_m(i)$ e $D_h(i)$ da célula atual i para as taxas da célula seguinte $D_m(i+1)$ e $D_h(i+1)$ ainda na célula atual i usando o Algoritmo 1.

De acordo com a lógica do Algoritmo 1, o instante da antecipação das taxas sempre ocorre na célula atual i e depende do valor da taxa de aplicação do agrotóxico $D_h(i+1)$ da célula seguinte $i+1$ e da célula atual i , $D_h(i)$. A antecipação ocorrerá em $t_{s(i)}$ segundos antes da mudança da próxima célula $i+1$ se $D_h(i+1) > D_h(i)$ e se $i_s == i+1$. A segunda condição ($i_s == i+1$) garante que a escolha das taxas de referências $D_{hr} = D_h(i+1)$ e $D_{mr} = D_m(i+1)$ ocorra $t_{s(i)}$ segundos antes da mudança de células. Caso $D_h(i+1) < D_h(i)$ e $i_c == i+1$, a antecipação das taxas ocorrerá $\tau_{c(i)}$ segundos antes da mudança da próxima célula. A antecipação das taxas não ocorre quando $i_c, i_s < i+1$ e, nesse caso, as taxas escolhidas são as mesmas da célula atual, ou seja, $D_{hr} = D_h(i)$ e $D_{mr} = D_m(i)$. A Figura 6.1 ilustra o uso desta estratégia de antecipação.

sendo e_n a distância entre as pontas de pulverização, em cm, n o número de pontas de pulverização ativas e v_p a velocidade do pulverizador, em km/h.

A partir da divisão de (6.8) por (6.7), tem-se a referência para a vazão da injeção

$$Q_{hr} = Q_{fr} \frac{D_{hr}}{D_{mr}}. \quad (6.9)$$

6.2 Ambiente de simulação

O modelo completo do sistema de aplicação de agrotóxicos com injeção direta, representado em diagrama de blocos na Figura 6.2, foi implementado no LabVIEW PC com o auxílio da ferramenta CDSM e possibilitou a criação de um ambiente de simulação para testes e ajustes de parâmetros dos controladores para os modelos dos sistemas de injeção e pulverização. O VI criado para este ambiente de simulação pode ser visto em detalhes no Apêndice D.

Figura 6.2: Modelo completo do sistema de pulverização com injeção direta com as malhas de controle do tipo MPC, os modelos de injeção, pulverização e concentração e estratégia de antecipação das taxas indicando a geração das referências para os MPCs.

No ambiente de simulação (Figura D.1, Apêndice D) é possível simular uma cultura contendo N_c células de comprimento L_c . A interface gráfica construída permite que o usuário

entre com informações sobre as taxas D_{mr} e D_{hr} e as vazões de referências Q_{fr} e Q_{hr} , crie um perfil da velocidade de aplicação, selecione o tipo de ponta de pulverização, salve os dados de simulação e visualize de forma gráfica tanto os dados de simulação quanto os dados obtidos experimentalmente na bancada de ensaios. O usuário pode optar pelo modo antecipativo para aplicações baseada em mapa. O usuário também tem acesso a tela onde são configurados os parâmetros do controlador (Figura D.2, Apêndice D).

6.2.1 Simulações no ambiente desenvolvido

Um exemplo hipotético de uma cultura contendo $i = 5$ células de comprimento $L_c = 300$ m é utilizado neste trabalho para visualização do ambiente de simulação desenvolvido. Os MPC, sintonizados conforme descrito na Seção 5.5, são utilizados para regular as vazões q_h e q_f . As 14 pontas de pulverização são utilizadas (jato plano com faixa ampliada, código 11004). A velocidade de aplicação escolhida foi de 10 km/h. As doses do agrotóxico D_{hr} entre as células variaram entre 2 a 10 l/ha e a taxa de aplicação da mistura D_{mr} foi mantida em 200 l/ha (Figura 6.3).

Figura 6.3: Exemplo hipotético de um mapa de aplicação utilizado no ambiente de simulação.

Os dados experimentais são obtidos na bancada de pulverização. O reservatório de agrotóxico é preenchido com 16 l de água contendo 50 g de cloreto de sódio (NaCl). Os resultados de simulação e os resultados experimentais são mostrados nas Figuras 6.4 e 6.5.

Figura 6.4: Resultados de simulação e experimentais sem o uso da estratégia de antecipação das referências das taxas de aplicação.

Figura 6.5: Resultados de simulação e experimentais com o uso da estratégia de antecipação das referências das taxas de aplicação.

Observa-se que os resultados de simulação apresentaram uma boa concordância com os resultados obtidos experimentalmente, o que pode ser comprovado pelos valores dos índices RMSE das variáveis q_f , q_h , p_s e c_o (Tabela 6.1), para os modos não-antecipativo e antecipativo das taxas de referências, preditas pelo ambiente de simulação desenvolvido.

Tabela 6.1: Índices RMSE das variáveis q_f , q_h , p_s e c_o preditas pelo ambiente de simulação.

Variável	Modo antecipativo	Modo não-antecipativo
q_f	0,764	0,674
q_h	0,118	0,176
p_s	0,841	0,685
c_o	0,143	0,133

O uso da estratégia de antecipação permitiu aplicar a concentração correta da mistura nas células 3 e 5, como pode ser observado comparando-se as Figuras 6.4 e 6.5.

CAPÍTULO 7

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados experimentais dos MPCs utilizados na regulação das vazões do agrotóxico q_h e da calda q_f e implementados conforme descrito na Seção 5.5. Apresentam-se também os resultados experimentais para diversas aplicações em taxa variada baseada em mapas. Para essas aplicações, utilizaram-se os modos antecipativo e não-antecipativo das referências.

7.1 Desempenho dos MPCs

Os ensaios para avaliar o desempenho dos MPCs foram realizados utilizando-se água em ambos os reservatórios e foram utilizadas as pontas de pulverização modelo 11005, por propiciarem uma pressão de trabalho inferior a 600 kPa para uma ampla faixa da vazão da calda. O formato das curvas de vazão utilizadas como referência para os controladores foi elaborado para simular situações distintas que ocorrem em campo, tais como mudanças abruptas na taxa de aplicação devido a mudanças do grau de infestação por plantas daninhas e variações na velocidade de deslocamento do pulverizador. Desta forma, foram criados 04 perfis para as referências da vazão da calda Q_{fr} e da vazão do agrotóxico Q_{hr} :

- Perfil 1: As referências das vazões Q_{fr} e Q_{hr} simulam uma aplicação em taxa variada com variações de magnitudes elevadas tanto na taxa de aplicação quanto na velocidade de deslocamento do pulverizador (Figura 7.1).
- Perfil 2: As referências das vazões Q_{fr} e Q_{hr} simulam uma aplicação em taxa fixa, entre 5 s e 125 s, e uma aplicação em taxa variada com aumento progressivo nas taxas de aplicação a partir de 125 s. A velocidade de deslocamento do pulverizador é mantida constante (Figura 7.2).
- Perfil 3: As referências das vazões Q_{fr} e Q_{hr} simulam uma aplicação em taxa variada, porém a velocidade de deslocamento do pulverizador é mantida constante (Figura 7.3).

d) Perfil 4: As referências das vazões Q_{fr} e Q_{hr} simulam uma aplicação em taxa variada com variações lentas na velocidade de deslocamento do pulverizador (Figura 7.4).

A referência da vazão do agrotóxico Q_{hr} é calculada em tempo real por $Q_{hr} = 0,055Q_{fr}$. Essa relação é baseada nas recomendações da bula Roundup original da Monsanto, um herbicida não seletivo a base de glifosato, e abrange toda a faixa de vazão da bomba de injeção de agrotóxico (MONSANTO, 2013).

O desempenho dos MPCs é avaliado pelos erros de aplicação relativos $E_{IAE_{qf}}$ e $E_{IAE_{qh}}$ entre os volumes aplicados correspondentes às vazões q_f e q_h e os volumes correspondentes às vazões de referências Q_{fr} e Q_{hr} no período, definidos por:

$$E_{IAE_{qf}} = \frac{\sum_{k=1}^N |Q_{fr} - q_f| \Delta T}{\sum_{k=1}^N |Q_{fr}| \Delta T} \quad (7.1)$$

$$E_{IAE_{qh}} = \frac{\sum_{k=1}^N |Q_{hr} - q_h| \Delta T}{\sum_{k=1}^N |Q_{hr}| \Delta T} \quad (7.2)$$

onde N é o número de amostras e ΔT é o período de amostragem. O numerador em (7.1) e (7.2) é o critério do erro integral absoluto (IAE - *Integral Absolute Error*) (OVIEDO et al., 2006).

Os valores dos erros relativos $E_{IAE_{qf}}$ e $E_{IAE_{qh}}$ (Tabela 7.1) indicaram um bom desempenho dos MPCs propostos. Na média, os erros relativos de aplicação ficaram abaixo de 10,00%, sendo 6,70% para a calda e 1,85% para o agrotóxico.

Tabela 7.1: Erros relativos $E_{IAE_{qf}}$ e $E_{IAE_{qh}}$.

Perfil	IAE (7.1) (ℓ)	$E_{IAE_{qf}}$ (%)	IAE (7.2) (ℓ)	$E_{IAE_{qh}}$ (%)
1	8,74	9,82	0,086	2,56
2	4,66	4,68	0,078	1,45
3	8,15	5,98	0,124	1,68
4	3,45	6,35	0,049	1,71
Média	-	6,70	-	1,85

Segundo Rietz et al. (1997), o valor instantâneo da vazão não pode ultrapassar 10% do valor de referência, devendo este retornar ao valor de referência em um tempo inferior a 5 s após uma variação nas condições de operação¹. Na ausência de tal variação, o valor instantâneo da vazão não deve ultrapassar 5% do valor de referência. Neste caso, os MPCs atenderam as tolerâncias citadas. As vazões instantâneas q_f e q_h , apresentadas nas Figuras 7.1 a 7.4, não apresentaram flutuações maiores que 10% com relação a média, indicando comportamento aceitável dos MPCs. Na ausência de variações das condições de operação do pulverizador, as vazões não apresentaram variações maiores que 5% ao longo do tempo, indicando comportamento aceitável dos MPCs.

¹Variações nas condições de operação são causadas por mudanças nas taxas de aplicação ou por variações na velocidade do pulverizador.

Figura 7.1: Resultados experimentais dos MPCs referentes ao ensaio do perfil 1.

Figura 7.2: Resultados experimentais dos MPCs referentes ao ensaio do perfil 2.

Figura 7.3: Resultados experimentais dos MPCs referentes ao ensaio do perfil 3.

Figura 7.4: Resultados experimentais dos MPCs referentes ao ensaio do perfil 4.

7.2 Resultados experimentais para aplicações com mapas

A precisão da aplicação do modo antecipativo é comparada ao modo não antecipativo através do critério IAE para o erro da concentração da calda, definido por:

$$IAE_{c_o} = \sum_{k=1}^N |C_r - c_o| \Delta T \quad (7.3)$$

onde C_r é a concentração de referência da célula, dado pela razão entre D_{hr} e D_{mr} . Valores pequenos do índice IAE_{c_o} representam menor erro de concentração, e portanto, melhor precisão da aplicação. O objetivo dos ensaios apresentados a seguir é avaliar o desempenho do sistema de aplicação de agrotóxicos com injeção direta desenvolvido neste trabalho através do índice IAE_{c_o} . Os ensaios são realizados na bancada de pulverização utilizando-se água no reservatório de água. O reservatório de agrotóxico é preenchido com 16 ℓ de água contendo 50 g de cloreto de sódio (NaCl).

Os mapas caracterizam um exemplo hipotético de uma cultura de soja infestada por plantas daninhas. A cultura contém $i = 7$ células de comprimento $L_c = 300$ m. As doses de agrotóxico D_{hr} entre as células variam de 2 a 12 ℓ/ha. As taxas de aplicação da calda D_{mr} variam de 100 a 250 ℓ/ha e são mantidas constantes entre as mudanças de células para cada mapa. As recomendações das taxas e doses foram baseadas na bula do herbicida glifosato atamor 48 (ATANOR, 2013). Os 04 mapas de aplicação utilizados nos ensaios são descritos a seguir:

- a) Mapa 1: A velocidade de aplicação v_p escolhida é de 10 km/h, sendo mantida constante ao longo da aplicação. D_{hr} varia de 2 a 10 ℓ/ha e D_{mr} é fixado em 200 ℓ/ha (Figura 7.5).
- b) Mapa 2: A velocidade de aplicação v_p escolhida é de 10 km/h, com variações aleatórias de $\pm 10\%$ em alguns trechos. D_{hr} varia de 2 a 10 ℓ/ha e D_{mr} é fixado em 230 ℓ/ha (Figura 7.6).
- c) Mapa 3: A velocidade de aplicação v_p escolhida é de 10 km/h, porém as variações aleatórias de $\pm 10\%$ na velocidade ocorrem somente nas transições entre as células. D_{hr} varia de 2 a 10 ℓ/ha para D_{mr} fixo em 230 ℓ/ha (Figura 7.7).
- d) Mapa 4: A velocidade de aplicação v_p escolhida é de 12 km/h, com variações aleatórias de $\pm 10\%$ durante toda a aplicação. D_{hr} varia de 2 a 12 ℓ/ha para D_{mr} fixado em 120 ℓ/ha (Figura 7.8).

As Figuras 7.6-7.8 mostram as respostas das vazões instantâneas q_f e q_h em função de variações de velocidade. Observa-se que o comportamento do sistema não apresentou picos ou variações excessivas nos valores das vazões instantâneas ao longo do tempo, em função da alteração da velocidade. As variações observadas nas vazões ficaram abaixo de 5% com relação a média, indicando comportamento aceitável dos MPCs.

Figura 7.5: Resultados da aplicação para o mapa 1 para as estratégias: (a) sem antecipação, (b) antecipação 2 e (c) antecipação 1.

Figura 7.6: Resultados da aplicação para o mapa 2 para as estratégias: (a) sem antecipação, (b) antecipação 2 e (c) antecipação 1.

Figura 7.7: Resultados da aplicação para o mapa 3 para as estratégias: (a) sem antecipação, (b) antecipação 2 e (c) antecipação 1.

Figura 7.8: Resultados da aplicação para o mapa 4 para as estratégias: (a) sem antecipação, (b) antecipação 2 e (c) antecipação 1.

Observa-se também que as vazões atingiram os valores de referências em uma margem de tempo aceitável e com pouco sobressinal. No caso da vazão q_f , este tempo foi menor que o tempo de resposta da válvula de controle proporcional 1, ou seja, menor do que 7 s. Já para a vazão q_h , este tempo foi menor que o tempo de resposta do motor CC da bomba de injeção, estimado em 2 s.

Segundo Miller e Smith (1992) e Steward e Humburg (2000), a alteração da concentração da calda, ocorrida devido a mudanças de dose ou alterações da velocidade do pulverizador, deve ser realizada em um curto intervalo de tempo para manter o erro de concentração em um nível admissível de 5%. Portanto, a acurácia das aplicações pode ser considerada adequada e satisfatória, pois os desvios da concentração instantânea c_o , observados nas Figuras 7.5-7.8, ficaram abaixo de 5% do valor desejado da concentração na célula. Os picos de concentração ficaram abaixo dos 5% devido ao ajuste simultâneo das vazões q_h e q_f realizado pelos MPCs para compensação dos distúrbios de velocidade.

Observa-se também nas Figuras 7.5-7.8 que o tempo dos transientes de concentração são menores para maiores vazões da calda q_f , indicando que a resposta do sistema de pulverização com injeção direta é dependente do fluxo total da calda. Isto pode ser explicado por (4.33) e deve-se ao fato do ponto de injeção ser posicionado na tubulação de sucção da bomba de pulverização, já que o sistema de pulverização regula o fluxo através de uma válvula de controle proporcional de 3 vias (parte do fluxo é desviado de volta para a sucção). Assim, dada a necessidade desta recirculação da calda pela bomba, o tempo de resposta fica dependente do fluxo total da calda.

Os resultados gerais do tempo de resposta t_s do sistema de pulverização com injeção direta desenvolvido neste trabalho (Figura 7.9), mostram que os valores obtidos do tempo de resposta para as aplicações baseadas nos mapas 1-4, são compatíveis com os apresentados por outros pulverizadores comerciais dotados de injeção direta. Novamente, observa-se que a magnitude do tempo de resposta t_s diminui com o aumento da vazão da calda q_f . As variações na magnitude de t_s observadas nas Figuras 7.9(b)-(d) ocorrem devido as variações na vazão q_f em função de variações de v_p . A magnitude do tempo de resposta se torna menos importante, pois a estimativa desse tempo e o uso dos mapas de aplicação possibilitam a minimização do efeito desse tempo na concentração da calda formada, devido ao uso da estratégia de antecipação das taxas de referências.

Os resultados do índice IAE_{c_o} (Tabelas 7.2 e 7.3) mostram que os erros de aplicação podem ser reduzidos através da compensação do atraso com o uso das estratégias dos modos antecipativos 1 e 2. A estratégia do modo antecipativo 1 antecipa as taxas de aplicação a partir dos valores estimados dos tempos τ_c e t_s (Algoritmo 1). Já a estratégia do modo antecipativo 2 antecipa as taxas de aplicação somente a partir do valor estimado do tempo τ_c . Neste caso, o Algoritmo 1 é adaptado automaticamente trocando-se apenas a variável i_s pela variável i_c .

De acordo com aos resultados apresentados nas Figuras 7.5-7.8, nota-se que os tran-

Figura 7.9: Tempo de resposta do sistema de pulverização com injeção direta para aplicações em taxa variada baseada em mapa, sendo: (a) Mapa 1, (b) Mapa 2, (c) Mapa 3 e (d) Mapa 4.

Tabela 7.2: Índice IAE_{c_0} (Modo antecipativo 1)

Mapa	Sem antecipação	Modo antecipativo 1	Melhora (%)
1	5,365	4,720	12,022
2	3,103	2,860	7,831
3	7,059	5,923	16,093
4	10,578	8,450	20,117
Média	6,526	5,488	14,015

Tabela 7.3: Índice IAE_{c_0} (Modo antecipativo 2).

Mapa	Sem antecipação	Modo antecipativo 2	Melhora (%)
1	5,365	2,805	47,716
2	3,103	2,083	32,871
3	7,059	5,515	21,872
4	10,578	5,023	52,514
Média	6,526	3,856	40,907

sientes de concentração, no início das células, para os casos onde as taxas de aplicação aumentam de uma célula para a outra, ocorrem de forma mais rápida para os modos antecipativos 1 e 2 devido a antecipação das taxas de aplicação, o que comprova a eficiência desta estratégia. O modo antecipativo 2, apesar de apresentar menores erros de aplicação,

conforme indicado pelo índice IAE_{c_0} , não evita casos de subaplicação. Porém, melhora em até 40% os erros de aplicação. O modo antecipativo 1 evita casos de subaplicação e o índice IAE_{c_0} mostra ainda que nestes casos, os erros de aplicação são menores que os erros obtidos sem o uso de nenhuma estratégia de antecipação das taxas de aplicação. O modo antecipativo 1 melhora em até 14% os erros de aplicação.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi implementado a automação de um sistema de pulverização em taxa variada com injeção direta de agrotóxicos. Para isto, foi utilizada uma bancada de pulverização que se mostrou como uma importante ferramenta para o desenvolvimento e testes de sistemas de pulverização.

Os circuitos desenvolvidos para a instrumentação do sistema montado na bancada de pulverização, mostraram-se confiáveis durante as etapas de modelagem e testes do sistema, não apresentando problemas como superaquecimento, queima de componentes, ou outros que acarretem em mal funcionamento do sistema. O PAC cRIO-9073 apresentou capacidade de executar diferentes tarefas sem prejuízo às ações de controle, possibilitando ainda ser embarcado para uso em campo.

A representação do circuito hidráulico do sistema de pulverização através de resistências fluídicas permitiu encontrar soluções analíticas para a vazão da calda q_f e para a pressão do sistema p_s . Desse modo foi possível encontrar um modelo matemático para o sistema de pulverização. A utilização dos modelos para o desenvolvimento de um ambiente de simulação, em LabVIEW PC, possibilitou a compreensão da interação entre os diferentes elementos do sistema de pulverização, a implementação e testes dos controladores desenvolvidos, bem como a transferência dos VIs desses controladores para o PAC cRIO-9073 com poucas modificações.

Os resultados de simulação com o modelo dinâmico do sistema de aplicação de agrotóxicos com injeção direta desenvolvido neste trabalho ficaram muito próximos aos resultados experimentais. Deste modo é possível utilizar o ambiente de simulação para projetar outros tipos de controladores e criar novas estratégias para minimização da concentração da calda formada. Apesar do modelo desenvolvido ser específico para o sistema de aplicação de agrotóxicos tratado neste trabalho, a metodologia utilizada para gerar o modelo é aplicável a outros sistemas de pulverização específicos.

Em se tratando de um sistema de controle voltado à aplicação de agrotóxicos, os resultados demonstraram que os MPCs são precisos para as operações de aplicação de agrotóxicos em taxas variáveis, além de serem alternativa aos modelos de controle convencionais que

são usualmente empregados em pulverizadores comerciais. O desempenho do sistema de controle foi comprovado em ensaios de bancada e os erros encontrados para as vazões da calda e do agrotóxico foram compatíveis com as operações de pulverização com agrotóxicos indicando a grande viabilidade e o bom potencial da abordagem de controle proposta neste trabalho.

O emprego dessa abordagem de controle torna-se ainda mais interessante quando é utilizada em conjunto com a estratégia de antecipação das taxas de aplicação apresentada neste trabalho. A estratégia da antecipação das taxas de aplicação baseado no modelo da concentração permitiu aumentar a eficiência da aplicação. A estratégia adotada evitou casos de subaplicação de agrotóxicos e garantiu a aplicação do agrotóxico na concentração correta nas células onde a taxa de aplicação é maior que a taxa de aplicação da célula anterior.

A estratégia antecipativa 1, quando comparada com a aplicação sem estratégia, reduz o erro de concentração em até 14% da área da plantação e evita a subaplicação de agrotóxicos quando há um aumento da dose entre as células. Já a estratégia antecipativa 2 reduz o erro de concentração em até 40%, porém não evita casos de subaplicação. Numa lavoura de, por exemplo, 100 *ha*, o erro de 14% corresponde a 14 *ha* da plantação que receberam concentração errada de calda, área equivalente a 140000 m^2 ou 21 campos de futebol². O erro de 40% corresponde a 40 *ha* da plantação que receberam concentração errada de calda, área equivalente a 400000 m^2 (62 campos de futebol). O sistema proposto cumpre seus objetivos mantendo o compromisso com relação à precisão da quantidade de agrotóxico aplicada no local requisitado. Dessa forma, as consequências da boa atuação do sistema de injeção direta de agrotóxico desenvolvido neste trabalho são a proteção da plantação dos agentes destruidores como as plantas daninhas, preservação do meio ambiente do excesso de agentes tóxicos dispersados que poluem os solos e mananciais e economia de recursos evitando o desperdício de insumos agrícolas que possuem alto custo.

As seguintes sugestões são apresentadas para a continuidade do trabalho:

- a) o uso dos bicos de pulverização PWM visando o controle individual da vazão das pontas aliado ao controle do tamanho das gotas;
- b) a injeção do agrotóxico em um ponto de injeção localizado o mais próximo dos bicos de pulverização;
- c) a construção de um sensor de condutividade de baixo custo para monitoramento da concentração da calda diretamente nos bicos de pulverização;
- d) o uso de um MPC multivariável com realimentação da concentração através de um sensor de condutividade de baixo custo. A planta a ser controlada, neste caso, possui um tempo de atraso elevado e dependente da vazão da calda.

²Medidas oficiais determinadas pela FIFA em partidas internacionais: comprimento mínimo de 100 m e largura mínima de 64 m.

- e) a automação do sistema de deslocamento linear com velocidade ajustável para alojamento dos papéis hidrossensíveis para fazer análise do padrão de gotas formado;
- f) a construção de um sensor para análise de gotas.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, L. A. **Introdução a Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007.

AIRTEC. **Catálogo online da empresa Airtec Australia**. 2013. Acesso em: 25 abr 2013. Disponível em: <<http://www.airtec.com.au>>.

AISSAOUI, A. E.; LEBEAU, F.; ELBAHIR, L.; DESTAIN, M.-F. Development of an optical sensor to measure direct injection spraying system performance. In: AGRICULTURAL ENGINEERING CONFERENCE. Hannover, 2007. p. Não paginado.

_____. Applying control volume finite element for modeling direct injection boom spraying. In: WORLD CONGRESS OF COMPUTER IN AGRICULTURE. Reno, USA, 2009. p. Não paginado.

AISSAOUI, A. E.; LEBEAU, F.; ELBAHIR, L.; DESTAIN, M.-F.; HOUMY, K. A feasibility study of developing direct injection spraying technology for small scale farms. In: SYNERGY 2011. Godollo, Hungary, 2011. p. 9–15.

AIWU, C.; AILIN, L.; ZHIZHUANG, L.; WENZHAO, Z.; XINLING, T. Design of flow control system on sprayer. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER APPLICATION AND SYSTEM MODELING. Taiyuan, 2010. p. 577–580.

AKERS, A.; GASSMAN, M.; SMITH, R. **Hydraulic Power System Analysis**. Broken Sound Parkway: CRC Press, 2006.

ANGLUND, E. A.; AYERS, P. D. Field evaluation of response times for a variable rate (pressured-based and injection) liquid chemical applicator. **Applied Engineering in Agriculture**, 2003. v. 19, p. 273–282, 2003.

ANTUNIASSI, U. R. **Tese de livre docência - Avaliação de sistemas de injeção de defensivos para utilização em agricultura de precisão**. Tese (Doutorado) — Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP, Botucatu, SP, 1999.

ANTUNIASSI, U. R.; JÚNIOR, C. D. G. Aplicação localizada de produtos fitossanitários. In: SIMPÓSIO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO. Viçosa, 2000. p. 181–202.

ANTUNIASSI, U. R.; MILLER, P.; PAICE, M. Performance evaluation of injection metering systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2002. v. 6, n. 1, p. 159–165, 2002.

- ARAG. **Catálogo online da Arag**. 2013. Acesso em: 25 abr 2013. Disponível em: <<http://www.aragnet.com>>.
- ATANOR. **Bula online do herbicida Glifosato Atanor 48**. 2013. Acesso em: 05 mai 2013. Disponível em: <http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/defis/DFI/Bulas-/Herbicidas/GLIFOSATO_ATANOR_48.pdf>.
- AYALA, C. O.; ROCA, L.; GUZMAN, J. L.; NORMEY-RICO, J. E.; BERENGUEL, M.; YEBRA, L. Local model predictive controller in a solar desalination plant collector field. **Renewable Energy**, 2011. v. 36, n. 11, p. 3001 – 3012, 2011.
- BAIO, F. H. R.; ANTUNIASSI, U. R. À procura do alvo. **Cultivar Máquinas**, 2004. v. 34, n. 1, p. 8–12, 2004.
- _____. Sistemas de controle eletrônico e navegação para pulverizadores. In: ANTUNIASSI, U. R.; BOLLER, W. (Ed.). **Tecnologia de Aplicação para Culturas Anuais**. Passo Fundo: Aldeia Norte, 2011.
- BODE, L. E.; BRETTHAUER, S. M. Agricultural chemical application technology: a remarkable past and an amazing future. **Transaction of the ASABE**, 2008. v. 51, n. 2, p. 391–395, 2008.
- BOLLER, W.; RAETANO, C. G. Bicos e pontas de pulverização de energia hidráulica, regulagens e calibração de pulverizadores de barras. In: ANTUNIASSI, U. R.; BOLLER, W. (Ed.). **Tecnologia de Aplicação para Culturas Anuais**. Passo Fundo: Aldeia Norte, 2011.
- BUDWIG, R. S.; MCDONALD, J. M.; KARSKY, T. J. Evaluation of chemical injection system for mobile agricultural spray equipment. **Transaction of the ASAE**, 1988. n. Paper No. 88-1592, 1988.
- CAMACHO, E. F.; BORDONS, C. **Model Predictive Control**. 2. ed. London, United Kingdom: Springer, 2007.
- CAPSTAN. **Catálogo online da empresa Capstan Ag Systems Inc**. 2013. Acesso em: 25 abr 2013. Disponível em: <<http://www.capstanag.com>>.
- CHO, H. K.; MARLEY, S. J.; BAKER, J. L. Injection metering of spray concentrates. **Transaction of the ASAE**, 1985. n. Paper No. MC 85-138, 1985.
- CHRISTOFOLETTI, J. C. Nuvem indesejada. **Cultivar Máquinas**, 2005. v. 7, n. 1, p. 6–9, 2005.
- CHUNYING, L.; XI, W. Variable-rate fertilization control system based on fuzzy pid control strategy. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL AND CONTROL ENGINEERING. Wuhan, 2010. p. 2511–2514.
- CROWE, T. G.; DOWNEY, D.; GILES, D. K.; SLAUGHTER, D. C. An electronic sensor to characterize transient response of nozzle injection for pesticide spraying. **Transaction of the ASAE**, 2005. v. 48, n. 1, p. 73–82, 2005.
- CRUVINEL, P. E.; OLIVEIRA, V. A.; FELIZARDO, K. R.; MERCALDI, H. V. Bancada automatizada para ensaios e desenvolvimento de pulverizadores de agrotóxicos, aplicadores de fertilizantes líquidos e maturadores em culturas agrícolas sob manejo baseado em agricultura de precisão. In: **Agricultura de Precisão: um Novo Olhar**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 96–100.

- DOERPMUND, M.; CAI, X.; VONDRICKA, J.; LAMMERS, P. S. The challenge of cleaning direct-injection systems for pesticide application. **Transaction of the ASABE**, 2012. v. 55, n. 5, p. 1643–1650, 2012.
- DOERPMUND, M.; CAI, X.; WALGENBACH, M.; VONDRICKA, J.; LAMMERS, P. S. Residues and cleaning effects of a direct nozzle injection system for pesticide application. In: ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING. Louisville, Kentucky, 2011. p. Paper No. 1110661.
- DOWNEY, D.; CROWE, T. G.; GILES, D. K.; SLAUGHTER, D. C. Direct nozzle injection of pesticide concentrate into continuous flow for intermittent spray applications. **Transaction of the ASABE**, 2006. v. 49, n. 4, p. 865–873, 2006.
- ENALTA. **Catálogo online da Enalta**. 2013. Acesso em: 25 abr 2013. Disponível em: <<http://www.enalta.net>>.
- FELIZARDO, K. R.; CRUVINEL, P. E.; OLIVEIRA, V. A. Bancada didática para avaliação de sistema de injeção direta de herbicidas agrícolas de interesse em agricultura de precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO - CONBAP 2010. Ribeirão Preto, SP, 2010. p. ID: 048.001.
- FELIZARDO, K. R.; MERCALDI, H. V.; OLIVEIRA, V. A.; CRUVINEL, P. E. Sistema embarcado de tempo real para automação de uma bancada de testes de pulverizadores. In: IEEE/IAS INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRY APPLICATIONS. Fortaleza, CE, 2012. p. iREP: 1623.
- FERREIRA, C. R. R. P. T.; CAMARGO, M. L. B.; VEGRO, C. L. R. Defensivos agrícolas: comercialização recorde em 2011 e expectativas de acréscimo nas vendas em 2012. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, 2012. v. 7, n. 7, p. 5, 2012.
- FIGUEIREDO, Z. N. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema de injeção para aplicação localizada de defensivos**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, SP, 2003.
- FROST, A. R. A pesticide injection metering system for use on agricultural spraying machines. **Journal Agricultural Engineering Research**, 1990. v. 46, p. 55–70, 1990.
- GARCIA, C. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos**. 2. ed. São Paulo, Brasuk: EDUSP, 2005.
- GEBHARDT, M. R.; KLIETHERMES, A. R.; GOERING, C. E. Metering concentrated pesticides. **Transaction of the ASAE**, 1984. v. 27, n. 1, p. 18–23, 1984.
- GERHARDS, R.; SOKEFELD, M.; TIMMERMANN, C.; REICHART, S.; KUNBAUCH, W.; II, M. M. W. Results of a four-year study on site-specific herbicide application. In: SECOND EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE. Odense, DEN, 1999. p. 689–697.
- GHATE, S. R.; PERRY, C. D. Ground speed control of pesticide application rates in a compressed air direct injection sprayers. **Transaction of the ASAE**, 1994. v. 37, n. 1, p. 33–38, 1994.
- GILLIS, K. P.; GILES, D. K.; SLAUGHTER, D. C.; DOWNEY, D. Injection mixing system for booms, target-activated herbicide spraying. **Transaction of the ASAE**, 2003. v. 46, n. 4, p. 997–1008, 2003.

- GIORGETTI, N.; RIPACCIOLI, G.; BEMPORAD, A. Hybrid model predictive control of direct injection stratified charge engines. **IEEE/ASME Transaction on Mechatronics**, 2006. v. 2, n. 5, p. 499–506, 2006.
- HAN, S.; HENDRICKSON, L. L.; NI, B.; ZHANG, Q. Modification and testing of a comercial sprayer with pwm solenoids for precision spraying. **Applied Engineering in Agriculture**, 2001. v. 5, n. 17, p. 591–594, 2001.
- HLOBEN, P. **Study on the response time of direct injection systems for variable rate application of herbicides**. Tese (Doutorado) — University of Bonn, Institute of Agriculture Engineering, NBonn-Germany, 2007.
- HUANG, W.; MENG, Z.; CHEN, L.; ZHAO, C. Design of can-based variable rate fertilizer control system. In: LI, D. (Ed.). **Computer and Computing Technologies in Agriculture, Volume 2**. Boston: Springer US, 2007, (IFIP Advances in Information and Communication Technology, v. 259). p. 1317–1320.
- JACTO. **Catálogo online da Jacto**. 2013. Acesso em: 25 abr 2013. Disponível em: <<http://www.jacto.com.br>>.
- KOO, Y. M.; SUMNER, H. R. Total flow control for a direct injection sprayer. **Applied Engineering in Agriculture**, 1998. v. 14, n. 4, p. 363–367, 1998.
- KOO, Y. M.; YOUNG, S. C.; KUHLMAN, D. K. Flow characteristics of injected concentrates in spray booms. **Transaction of the ASAE**, 1987. n. Paper No. 87-1602, 1987.
- KROPFF, M. J.; LAAR, H. H. van (Ed.). **Modelling Crop-Weed Interactions**. Wallingford: CAB International, 1993.
- KWONG, W. H. **Introdução ao Controle Preditivo com MATLAB**. 1. ed. São Carlos, SP: EdUFSCar, 2005.
- LARSON, G. H.; KUHLMAN, D. K.; TENNEYCK, G. Direct metering of pesticide concentration. **Transaction of the ASAE**, 1982. n. Paper No. MC 82-134, 1982.
- LEBEAU, F.; BAHIR, L. E.; DESTAIN, M. F.; KINNAERT, M.; HANUS, R. Improvement of spray deposit homogeneity using a pwm sprayer controller to compensate horizontal boom speed variations. **Computers and Electronics in Agriculture**, 2004. v. 1, n. 43, p. 149–161, 2004.
- LINO, P.; MAIONE, B.; AMORESE, C.; MATTHAEIS, S. D. Modeling and predictive control of a new injection system for compressed natural gas engines. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONTROL APPLICATIONS. Munich, Germany, 2006. p. 1651–1656.
- LOPES, R. V. **Modelagem e controle preditivo de um helicóptero com três graus de liberdade**. Tese (Doutorado) — Instituto Tecnologia de Aeronáutica, São José dos Campos, SP, 2007.
- MACIEJOWSKI, J. M. **Predictive Control with Constraints**. Essex, England: Prentice Hall, 2002.
- MARUYAMA, T.; SHIMURA, T.; EJIRI, A.; IKAI, Y.; SHIMOTANI, K. Model predictive control applied to a diesel engine air-patch system with dead time. In: SICE ANNUAL CONFERENCE. Tokyo, Japan, 2011. p. 2628–2633.

- MAYNE, D.; RAWLINGS, J.; RAO, C.; SCOKAERT, P. Constrained model predictive control: Stability and optimality. **Automatica**, 2000. v. 36, n. 6, p. 789 – 814, 2000.
- MERCALDI, H. V. **Automação de um sistema de pulverização para aplicação de agroquímicos a taxa variada usando injeção direta**. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 2012.
- MERCALDI, H. V.; FELIZARDO, K. R.; CRUVINEL, P. E.; OLIVEIRA, V. A. Modelo do módulo de injeção direta de herbicidas para aplicação em taxa variada. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE DINÂMICA E CONTROLE - DINCON 2011. Aguas de Lindóia, SP, 2011. p. 511–515.
- MERCALDI, H. V.; FELIZARDO, K. R.; OLIVEIRA, V. A.; CRUVINEL, P. E. Modelagem de um sistema de injeção direta de herbicida em taxa variável para aplicação em culturas agrícolas. In: **Agricultura de Precisão: um Novo Olhar**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 101–105.
- MERRITT, H. E. **Hydraulic Control Systems**. New York, USA: John Wiley, 1967.
- MIALHE, L. G. Eletrônica na pulverização. **Cultivar Máquinas**, 2002. v. 7, n. 1, p. 5–9, 2002.
- MILLER, M. S.; SMITH, D. B. A review of application error for sprayers. **Transactions of the ASAE**, 1992. v. 35, n. 3, p. 787–791, 1992.
- MOLIN, J. Controle minucioso. **Cultivar Máquinas**, 2004. v. 3, p. 18–21, 2004.
- MONSANTO. **Bula online do herbicida Roundup Original**. 2013. Acesso em: 25 abr 2013. Disponível em: <<http://www.monsanto.com.br/produtos/herbicidas/roundup/roundup.asp>>.
- MUNACK, A.; BUNING, E.; SPECKMANN, H. A high-performance control system for spreading liquid manure. **Control Engineering Practice**, 2001. v. 9, n. 4, p. 387 – 391, 2001.
- NATIONAL INSTRUMENTS CORPORATION. **LabVIEW: Control design user manual**. United States of America, Junho 2009. 251 p.
- NEEDHAM, D. L.; HOLTZ, A. J.; GILES, D. K. Modeling dynamic response of an actuator for individual nozzle control of agricultural spray flow rate and droplet size. **Transaction of the ASABE**, 2012. v. 55, n. 2, p. 371–377, 2012.
- NI. **cRIO 9072/3/4 - Operation instruction and specification**. Austin, Texas, 2010.
- NORMEY-RICO, J. E.; CAMACHO, E. F. **Control of Dead-time Process**. London, UK: Springer, 2007.
- NUSPL, S. J.; RUDOLPH, W. W.; GUTHLAND, R. Use of injection for site-specific chemical application. **Precision Agriculture**, 1996. v. 32, n. 1, p. 739–744, 1996.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4. ed. São Paulo, Brasil: Prentice Hall Brasil, 2003.
- OLIVI, L. R. **Aplicação de herbicidas a taxas variáveis utilizando controle preditivo**. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 2009.

- OVIEDO, J.; BOELEN, T.; OVERSCHEE, P. V. Robust advanced pid control (rapid): Pid tuning based on engineering specifications. **Control Systems, IEEE**, 2006. v. 26, n. 1, p. 15–19, 2006.
- PAICE, M. E. R.; MILLER, P. C. H.; BODLE, J. D. An experimental sprayer for the spatially selective application of herbicides. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 1995. v. 60, p. 107–116, 1995.
- PECK, D. R.; ROTH, L. O. Field sprayer induction system development and evaluation. **Transaction of the ASABE**, 1975. n. Paper No. 75-1541, 1975.
- PEREIRA, F. J. de S. **Sistema de comutação de pontas na barra de pulverização para ajuste do tamanho de gotas às condições climáticas e aplicação em taxas variáveis**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Piracicaba, SP, 2006.
- PIERCE, R. A.; AYERS, P. D. Evaluation of deposition and application accuracy of a pulse width modulation variable rate field sprayer. In: ASAE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING. Sacramento, California, 2001. p. Paper No. 01–1077.
- QIN, S.; BADGWELL, T. A. A survey of industrial model predictive control technology. **Control Engineering Practice**, 2003. v. 11, n. 7, p. 733 – 764, 2003.
- RAMOS, H. H. No lugar certo. **Cultivar Máquinas**, 2001. v. 6, n. 1, p. 16–19, 2001.
- _____. Escolha certa. **Cultivar Máquinas**, 2004. v. 29, n. 1, p. 3–10, 2004.
- _____. Qualidade na aplicação. **Cultivar Máquinas**, 2004. v. 3, n. 1, p. 3–7, 2004.
- REICHARD, D. L.; LADD, T. L. Pesticide injection and transfer system for field sprayers. **Transaction of the ASAE**, 1983. v. 26, n. 3, p. 683–686, 1983.
- RESENDE, Á. V.; SHIRATSUCHI, L. S.; COELHO, A. M.; CORAZZA, E. J.; VILELA, M. F.; INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C.; BASSOI, L. H.; NAIME, J. M. Agricultura de precisão no brasil: Avanços, dificuldades e impactos no manejo e conservação do solo, segurança alimentar e sustentabilidade. In: . Teresina: [s.n.], 2010. p. ID:23283.
- RIETZ, S.; PÁLYI, B.; GANZELMEIER, H.; LÁSZLÓ, A. Performance of electronic controls for field sprayers. **Journal of Agricultural Engineering Research**, 1997. v. 68, n. 4, p. 399 – 407, 1997.
- ROCKWELL, A. D.; AYERS, P. D. A variable rate, direct nozzle injection field sprayer. **Applied Engineering in Agriculture**, 1996. v. 12, n. 5, p. 531–538, 1996.
- ROSSETO, F. R. **Controlador fuzzy para um sistema de aplicação de herbicidas a taxa variável**. Dissertação (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, SP, 2008.
- SARAIVA, A. M.; CUGNASCA, C. E.; HIRAKAWA, A. R. Aplicação em taxa variável de fertilizantes e sementes. In: SIMPÓSIO DE AGRICULTURA DE PRECISÃO. Viçosa, 2000. p. 110–145.

- SHI, Y.; LIANG, A.; YUAN, H.; ZHANG, C.; LI, J. Modeling and simulation for a variable sprayerrate system. In: LI, D.; ZHAO, C. (Ed.). **Computer and Computing Technologies in Agriculture II, Volume 1**. Boston: Springer US, 2009, (IFIP Advances in Information and Communication Technology, v. 293). p. 573–584.
- SOKEFELD, M. Variable rate technology for herbicide application. In: **Precision Crop Protection - the Challenge and Use of Heterogeneity**. [S.l.]: Springer Verlag, 2010. p. 335–347.
- STAFFORD, J.; MILLER, P. Spatially selective application of herbicide to cereal crops. **Computers and Electronics in Agriculture**, 1993. v. 9, n. 3, p. 217 – 229, 1993.
- STEWART, B. L.; HUMBURG, D. S. Modeling the raven scs-700 chemical injection system with carrier control with sprayer simulation. **Transactions of the ASAE**, 2000. v. 43, n. 2, p. 231–245, 2000.
- SUDDUTH, K. A.; BORGELT, S. C.; HOU, J. Performance of chemical injection sprayer system. **Applied Engineering in Agriculture**, 1995. v. 11, n. 3, p. 343–348, 1995.
- TEEJET. **Catálogo online da Teejet**. 2013. Acesso em: 25 abr 2013. Disponível em: <<http://www.teejet.com>>.
- TIAN, T.; REID, J. F.; HUMMEL, J. W. Development of a precision sprayer for site-specific weed management. **Transaction of the ASAE**, 1999. v. 42, n. 4, p. 893–900, 1999.
- TOMPKINS, F. D.; HOWARD, K. D.; MOTE, C. R.; FREELAND, R. S. Boom flow characteristics with direct chemical injection. **Transaction of the ASAE**, 1990. v. 33, n. 3, p. 737–743, 1990.
- TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M. F. Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens. **Ciência Rural**, 2002. v. 32, n. 1, p. 159–163, 2002.
- ULSON, J. A. C. **Desenvolvimento de um sistema de controle inteligente a aplicação de fertilizantes líquidos em taxas variáveis**. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, SP, 2002.
- VIDRINE, C. G.; GOERING, C. E.; DAY, C. L.; GEBHARDT, M. R.; SMITH, D. B. A constant pesticide applicatin rate sprayer model. **Transaction of the ASAE**, 1975. v. 18, n. 3, p. 439–443, 1975.
- VONDRICKA, J.; HLOBEN, P.; LAMMERS, P. S. Optimization of direct nozzle injection sysstem for site-specific herbicide application. In: ASABE MEETING PRESENTATION. Mineapolis, Minnesota, 2007. p. Paper No. 071085.
- WALGENBACH, M.; VONDRICKA, J.; DOERPMUND, M.; XAND, C.; LAMMERS, P. S. Construction and investigation of a direct nozzle injection agricultural sprayer for sensor-based application of plant protection products. In: ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING. Louisville, Kentucky, 2011. p. Paper No. 1111241.
- WANG, L. A tutorial on model predictive control: Using a linear velocity-form model. **Developments in Chemical Engineering and Mineral Processing**, 2004. Wiley Subscription Services, Inc., A Wiley Company, v. 12, n. 5-6, p. 573–614, 2004.

WAY, T. R.; BARGEN, K. V.; GRISSE, R. D.; BASHFORD, L. L. Simulation of chemical application accuracy for injection sprayers. **Transaction of the ASAE**, 1992. v. 35, n. 4, p. 1141–1149, 1992.

_____. Feedback system to control chemical flow for injection sprayers. **Computer and Electronics in Agriculture**, 1993. v. 9, p. 123–132, 1993.

WILLIAMS, M. M.; GERHARDS, R.; REICHART, S.; MORTENSEN, D. A.; MARTIN, A. R. Weed seedling population responses to a method of site-specific weed management. In: FOURTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE. Minneapolis, USA, 1999. p. 123–132.

WOLF, R. E. New technologies for the delivery of pesticides in agriculture. In: **Pesticide in agriculture and the environment**. New York: CRC Press, 2002.

WOMAC, A. R.; VALCORE, D. L.; MAYNARD, R. A. Variable-concentration direct injection from fixed-ratio diluent-driven pumps. **Transaction of the ASAE**, 2002. v. 45, n. 6, p. 1721–1728, 2002.

XUE, X.; SUN, Z.; LAN, Y.; CHEN, J.; ZHANG, S. Pesticide injection using micro-synchronization pump in sprayers. In: ASABE ANNUAL INTERNATIONAL MEETING. Pittsburgh, Pennsylvania, 2010. p. Paper No. 1000024.

ZHU, H.; FOX, R. D.; OZKAN, H. E.; BRAZEE, R. D.; DERKSEN, R. C. A system to determine lag time and mixture uniformity for inline injection sprayers. **Applied Engineering in Agriculture**, 1998. v. 14, n. 2, p. 103–110, 1998.

APÊNDICE A

CONEXÕES cRIO-9073 E MÓDULOS DE E/S

Figura A.1: Conexões entre o cRIO-9073 e os módulos de E/S.

APÊNDICE B

TELAS DO SISTEMA DE PULVERIZAÇÃO

Figura B.1: Tela do usuário para visualização gráfica dos dados obtidos experimentalmente na bancada de ensaio, seleção das seções de barras 1 e 2, gravação dos dados e seleção da estratégia de antecipação.

Painel do usuário Mapa de aplicação

Perfil da velocidade

t(s)	v (km/h)
350,00	10,00
360,00	8,00
365,00	7,50
370,00	8,75
375,00	7,75
380,00	7,50
390,00	8,25
400,00	10,75

Mapa?

Mapa de aplicação

	Tm (l/ha)	Th (l/ha)
0	200	8
0	160	6,4
	300	12
	170	6,8
	210	210
	210	210
	210	210
	210	210
	210	210
	210	210
	210	210
	210	210
	210	210
	210	210
	210	210
	210	210
	210	210
	210	210
	210	210
	210	210
	210	210
	210	210

Figura B.2: Tela do usuário para criação do mapa de prescrição e do perfil de velocidade.

Módulo de pulverização

MPC Constraints (Barrier)

u min init	u min final	u min tolerance	u min penalty
0	-90,00	0,0E+0	0,00
u max init	u max final	u max tolerance	u max penalty
0	90,00	0,0E+0	0,00
y min init	y min final	y min tolerance	y min penalty
0	0,00	0,0E+0	0,00
y max init	y max final	y max tolerance	y max penalty
0	34,00	0,0E+0	0,00
du min init	du min final	du min tolerance	du min penalty
0	0,00	0,0E+0	0,00
du max init	du max final	du max tolerance	du max penalty
0	0,00	0,0E+0	0,00

Equation

MPC Controller Parameters

Prediction Horizon: 50

Control Horizon: 10

Initial Window: 13

Integral Action? ☒

MPC Cost Weights

Output Error Weightings	0	15,00	0,00
Control Action Change Weightings	0	0,01	0,00
Control Action Error Weightings	0	0,00	0,00
Output Error Factors	0	0,00	0,00
Control Action Change Factors	0	0,00	0,00
Control Action Error Factors	0	0,00	0,00

State-Space Model

Model name:

Sampling Time: 50m

A	1E+0	3,16E-2	0E+0
B	0E+0	3,68E-1	0E+0
C	5,5E-1	0E+0	0E+0
D	0	0	0

Módulo de injeção

MPC Constraints (Barrier) 2

u min init	u min final	u min tolerance	u min penalty
0	0,00	1,0E+0	2,00
u max init	u max final	u max tolerance	u max penalty
0	65,00	1,0E+0	5,00
y min init	y min final	y min tolerance	y min penalty
0	0,00	0,0E+0	0,00
y max init	y max final	y max tolerance	y max penalty
0	2,00	1,0E-1	5,00
du min init	du min final	du min tolerance	du min penalty
0	0,00	0,0E+0	0,00
du max init	du max final	du max tolerance	du max penalty
0	0,00	0,0E+0	0,00

Equation 2

MPC Controller Parameters 2

Prediction Horizon: 20

Control Horizon: 5

Initial Window: 0

Integral Action? ☒

MPC Cost Weights 2

Output Error Weightings	0	12,00	0,00
Control Action Change Weightings	0	0,15	0,00
Control Action Error Weightings	0	0,00	0,00
Output Error Factors	0	0,00	0,00
Control Action Change Factors	0	0,00	0,00
Control Action Error Factors	0	0,00	0,00

State-Space Model 2

Model name:

Sampling Time: 50m

A	-4,94E-3	-4,25E-2	0E+0
B	8,96E-2	7,71E-1	0E+0
C	0E+0	1,24E-2	0E+0
D	0	0	0

PWM da válvula

Controle Manual da válvula? ☒

PWM da bomba

Controle Manual da bomba? ☒

Figura B.3: Tela do usuário para configuração dos parâmetros dos MPCs.

APÊNDICE C

ESQUEMÁTICOS DOS CIRCUITOS ELÉTRICOS

Figura C.1: Esquemático do circuito de condicionamento do inversor de frequência.

Figura C.2: Esquemático dos circuitos do amplificador de potência, condicionamento de sinal e alimentação do encoder do sistema de injeção.

Figura C.3: Esquemático do circuito de acionamento da bomba de descarte e ligações dos sensores de nível e do fluxômetro.

Figura C.4: Esquemático do circuito de condicionamento do sensor de condutividade.

Figura C.6: Esquemático dos circuitos de acionamento das válvulas elétricas.

APÊNDICE D

TELAS DO AMBIENTE DE SIMULAÇÃO E VIS DESENVOLVIDOS

Figura D.1: Tela do usuário referente ao ambiente de simulação.

Figura D.2: Tela do usuário para configuração dos parâmetros dos MPCs.

Figura D.3: VI contendo os modelos de injeção, pulverização e concentração.

Figura D.4: VI responsável pela antecipação das taxas de aplicação, geração do mapa de prescrição, criação do perfil de velocidade e armazenamento dos dados de simulação.

Figura D.5: VI dos MPCs para os sistemas de injeção e pulverização.

ANEXO A

MÉTODO DE SUNDARESAN E KRISHNASWAMY

Um método simples que evita o ponto de inflexão foi proposta por Sundaresan e Krishnaswamy e consiste na determinação dos tempos t_1 e t_2 (Figura A.1), que correspondem respectivamente aos tempos em que a resposta atinge 35,3% e 85,3% da sua variação final Δy , para estimação dos parâmetros τ e θ (AGUIRRE, 2007).

Figura A.1: Representação gráfica do método proposto por Sundaresan e Krishnaswamy.

Trata-se de um método baseado na resposta do processo para uma variação degrau de magnitude Δu para identificação dos parâmetros τ , θ e K que descrevem uma função de primeira ordem mais tempo morto:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1}. \quad (\text{A.1})$$

Os parâmetros τ e θ e o ganho K podem ser calculados facilmente através das equações:

$$\theta = 1,2t_1 - 0,29t_2, \quad (\text{A.2})$$

$$\tau = 0,67(t_2 - t_1). \quad (\text{A.3})$$

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u}. \quad (\text{A.4})$$

ANEXO B

TABELA DE PONTAS

COD. CODE CÓD.				l/ha (spazio tra gli ugelli: 50 cm) l/ha (nozzle spacing: 50 cm) l/ha (espacio entre las boquillas: 50 cm)							
				6 km/h	8 km/h	10 km/h	12 km/h	14 km/h	16 km/h	18 km/h	20 km/h
422WR11001	2	F	0.33	65	49	39	33	28	24	22	20
	3	F	0.40	80	60	48	40	34	30	27	24
	4	VF	0.46	92	69	55	46	40	35	31	28
	5	VF	0.52	103	77	62	52	44	39	34	31
	6	VF	0.57	113	85	68	57	48	42	38	34
422WR110015	2	F	0.49	98	73	59	49	42	37	33	29
	3	F	0.60	120	90	72	60	51	45	40	36
	4	F	0.69	139	104	83	69	59	52	46	42
	5	VF	0.77	155	116	93	77	66	58	52	46
	6	VF	0.85	170	127	102	85	73	64	57	51
422WR11002	2	F	0.65	131	98	78	65	56	49	44	39
	3	F	0.80	160	120	96	80	69	60	53	48
	4	F	0.92	185	139	111	92	79	69	62	55
	5	F	1.03	207	155	124	103	89	77	69	62
	6	F	1.13	226	170	136	113	97	85	75	68
422WR110025	2	F	0.82	163	122	98	82	70	61	54	49
	3	F	1.00	200	150	120	100	86	75	67	60
	4	F	1.15	231	173	139	115	99	87	77	69
	5	F	1.29	258	194	155	129	111	97	86	77
	6	F	1.41	293	212	170	141	121	106	94	85
422WR11003	2	F	0.98	196	147	118	98	84	73	65	59
	3	F	1.20	240	180	144	120	103	90	80	72
	4	F	1.39	277	208	166	139	119	104	92	83
	5	F	1.55	310	232	186	155	133	116	103	93
	6	F	1.70	339	255	204	170	145	127	113	102
422WR11004	2	F	1.31	261	196	157	131	112	98	87	78
	3	F	1.60	320	240	192	160	137	120	107	96
	4	F	1.85	370	277	222	185	158	139	123	111
	5	F	2.07	413	310	248	207	177	155	138	124
	6	F	2.26	453	339	272	226	194	170	151	136
422WR11005	2	M	1.63	327	245	196	163	140	122	109	98
	3	F	2.00	400	300	240	200	171	150	133	120
	4	F	2.31	462	346	277	231	198	173	154	139
	5	F	2.58	516	387	310	258	221	194	172	155
	6	F	2.83	566	424	339	283	242	212	189	170
422WR11006	2	M	1.96	392	294	235	196	168	147	131	118
	3	M	2.4	480	360	288	240	206	180	160	144
	4	M	2.77	554	416	333	277	238	208	185	166
	5	M	3.10	620	465	372	310	266	232	207	186
	6	M	3.39	679	509	407	339	291	255	226	204

Figura B.1: Tabela das pontas de pulverização de jato plano com faixa ampliada usadas neste trabalho, sendo: VF (Very Fine), F (Fine) e M (Medium) (Fonte: Arag (2013)).