FÁBIO ROBERTO ROSSETO

Controlador fuzzy para um sistema de aplicação de herbicidas a taxa variável

Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistemas Dinâmicos Orientador: Profa. Dra. Vilma Alves de Oliveira

São Carlos 2008

Aos meus pais, Antônio e Dirce, ao meu irmão Flávio, e a Deus acima de tudo.

À Deus, por estar presente em todos os momentos da minha vida, por guiar meus caminhos e me conceder sabedoria e saúde;

À Universidade de São Paulo (USP), por oferecer toda a estrutura necessária para o desenvolvimento deste trabalho;

À Fapesp, pelo apoio financeiro e pela bolsa concedida;

À Enalta, em especial ao Ivan e a todos os funcionários que me apoiaram e cederam equipamentos essenciais para a conclusão deste trabalho;

À minha orientadora Profa. Vilma Alves de Oliveira por ter me concedido a oportunidade de realizar este trabalho, pela orientação e pela amizade;

Aos meus pais e ao meu irmão Flávio por todo esforço que realizaram para que eu chegasse até aqui;

Aos docentes e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia de São Carlos e Embrapa, em especial Rui Bertho, Alexander Munaiar, professores Ivan Nunes da Silva, Paulo Estevão Cruvinel e Décio Karam;

Aos amigos do laboratório de controle (LAC) Leonardo, Wilson, Marcel, e em especial Gláucia.

À todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

viii

Lista de Figuras

FIGURA 2.1	Representação do processo de aplicação em tempo real	9	
FIGURA 2.2	Geração de mapa com níveis de infestação através de amostra-		
gens e pr	ocessamento das amostras	10	
FIGURA 2.3	Diagrama (corte) de uma válvula solenóide	14	
FIGURA 2.4	Representação simplificada de uma válvula - contração brusca.	16	
FIGURA 2.5	Diagrama apresentando a área de passagem de válvulas esféricas.	17	
FIGURA 2.6	Cortes da agulha utilizada no controle de vazão da válvula		
regulador	a	18	
FIGURA 2.7	(a) Elipse referente ao corte diagonal da agulha (b) triângulo formado		
por h , $2a \in$	e 2b. ($\hat{x} \in \hat{y}$ referem-se ao eixo de coordenadas definido sobre a elipse)	19	
FIGURA 2.8	Seção do orifício de passagem com agulha na posição $x_c.$	20	
FIGURA 2.9	Diagrama de blocos simplificado do sistema de aplicação de		
herbicidas			
FIGURA 3.1	Sistema de inferência fuzzy	32	
FIGURA 3.2	Sinais contendo todas as condições possíveis de entrada necessárias		
para cons	struir uma base de regras	35	
FIGURA 3.3	Pontos de equilíbrio (Jantzen 2007)	38	
FIGURA 3.4	Controlador fuzzy proporcional.	40	
FIGURA 3.5	Regiões do plano de fase (Jantzen 2007)	44	
FIGURA 3.6	Controlador fuzzy proporcional derivativo.	44	

FIGURA 37	Superfície linear (a) e superfície saturada (c) com as funções	
de pertine	ência de entrada que as geraram (Jantzen 2007)	47
FIGURA 3.8	Superfícies com zona morta (a) superfície quantizadora (c) e	
respective	as funções de pertinência que as geraram (Jantzen 2007)	48
FIGURA 3.9	Controlador fuzzy proporcional derivativo integrativo	48
FIGURA 3.10	Controlador fuzzy proporcional incremental.	51
FIGURA 3.11	Mapeamento entrada-saída de controladores proporcionais com	
diferentes	configurações de funções de pertinência (Jantzen 1999)	52
FIGURA 4.1	Diagrama apresentando o sistema completo de aplicação de	
herbicidas	s (Bizari et al. 2003-2005)	57
FIGURA 4.2	Bomba hidráulica presente no protótipo (Bizari et al. 2003-2005).	57
FIGURA 4.3	Válvula reguladora (esquerda) e válvula de seção (direita) pre-	
sentes no	protótipo (Bizari et al. 2003-2005)	57
FIGURA 4.4	Conexões entre o módulo USB e o protótipo do sistema de	
aplicação	de herbicidas.	59
FIGURA 4.5	Diagrama em linguagem G (LabView) para a medida de fre-	
qüência.		62
FIGURA 4.6	Circuito com optoacopladores utilizado na recepção dos sinais	
do fluxôn	netro e do simulador de velocidade	64
FIGURA 4.7	Diagrama em linguagem LabView utilizado para gerar o sinal	
de PWM.		65
FIGURA 4.8	Ponte H utilizada em conjunto com a válvula reguladora	66
FIGURA 4.9	Circuito de acionamento das válvulas de seção	67
FIGURA 5.1	Diagrama do sistema de aplicações de herbicidas controlado	69
FIGURA 5.2	Válvula com potenciômetro acoplado junto a agulha	70
FIGURA 5.3	Resposta do sensor de posição	71
FIGURA 5.4	Limites de atuação da agulha.	71

FIGURA 5.5	Resposta do motor c c com o conjunto mecânico da válvula		
regulador	a de agulha	72	
FIGURA 5.6	Diagrama em LabView responsável pelo atraso de tempo condi-		
cional		73	
FIGURA 5.7	Diagrama em LabView com a função de transferência (inclue		
motor cc,	redutores e parte da mecânica da válvula agulha). \ldots .	75	
FIGURA 5.8	Diagrama em LabView com a função de transferência (inclue		
motor cc,	redutores e parte da mecânica da válvula esfera)	75	
FIGURA 5.9	Diagrama utilizado para a obtenção da vazão de saída	76	
FIGURA 5.10	Diagrama utilizado para o cálculo da vazão de saída - subvi		
cvalve		77	
FIGURA 5.11	Obtenção da vazão de referência	78	
FIGURA 5.12	Resposta utilizada para obtenção do ganho em malha aberta e		
atraso do	protótipo.	79	
FIGURA 5.13	Resposta obtida através do ensaio e resposta da planta ajustada		
através da ferramenta <i>ident</i>			
FIGURA 6.1	Entrada v s saída do controlador fuzzy (entrada $de/dt=0).$.	83	
FIGURA 6.2	Funções de pertinência das entradas do controlador fuzzy	84	
FIGURA 6.3	Funções de pertinência da saída do controlador fuzzy	85	
FIGURA 6.4	Diagrama do controlador PID	85	
FIGURA 6.5	Diagrama do controlador PD+I fuzzy	85	
FIGURA 6.6	Cálculo dos parâmetros do controlador fuzzy	87	
FIGURA 6.7	Painel para cálculo dos parâmetros do controlador fuzzy	88	
FIGURA 6.8	(a) e (b) Lugar geométrico das raízes - root locus e (c) resposta		
ao degrau	a para o controlador obtido	89	

FIGURA 7.1 Painel do simulador do sistema de aplicação de herbicida. . . . 93

FIGURA 7.2 Sinal de controle para a simulação da resposta com referência	
variável para a válvula esfera com os controladores (a) PID e (b) fuzzy e	
válvula agulha para os controladores (c) PID e (d) fuzzy. $\ldots\ldots\ldots$	94
FIGURA 7.3 Saída do sistema para a simulação da resposta com referência	
variável para a válvula esfera com os controladores (a) PID e (b) fuzzy e	
válvula agulha para os controladores PID (c) e fuzzy (d)	95
FIGURA 7.4 Saída do sistema para a resposta a uma perturbação (desliga-	
mento de uma das seções no intervalo $\left[20,35\right]$ s para os casos válvula	
esférica para os controladores (a) PID e (b) fuzzy e válvula agulha para	
os controladores (c) PID e (d) fuzzy	96
FIGURA 7.5 Pulverizador estático utilizado neste projeto	97
FIGURA 7.6 Painel do aplicativo utilizado em conjunto com o protótipo $$	98
FIGURA 7.7 Interface utilizada em conjunto com o protótipo	99
FIGURA 7.8 Saída do sistema para uma resposta a uma referência variável	
para os controladores (a) PID e (b) fuzzy	100
FIGURA 7.9 Saída do controlador para uma resposta a uma referência var-	
iável para os controladores (a) PID e (b) fuzzy \hdots	100
FIGURA 7.10 Saída do sistema obtida para a resposta a uma perturbação	
(desligamento de uma das seções no intervalo $\left[20,35\right]$ s para os contro-	
ladores (a) PID e (b) fuzzy	101
FIGURA 7.11 Saída do sistema para a resposta a uma referência variável para	
os controladores (a) PID e (b) fuzzy	101
FIGURA 7.12 Sinal de controle para a resposta a uma referência variável para	
o controlador (a) PID e (b) fuzzy	102
FIGURA 7.13 Saída do sistema obtida para a resposta a uma perturbação	
(desligamento de uma das seções no intervalo $\left[20,35\right]$ s para os contro-	
ladores (a) PID e (b) fuzzy	102
FIGURA B.1 Laço enquanto - com temporizador.	110
FIGURA B.2 Laço enquanto - com VI's polimórficas - entradas / saídas	110

FIGURA B.3	Controlador fuzzy
FIGURA B.4	Controlador PID
FIGURA C.1	Painel do novo simulador - condições de operação, seleção do
modelo d	e válvula, seleção do controlador
FIGURA C.2	Painel do novo simulador - saída do protótipo, sinal de controle.115

Lista de Tabelas

TABELA 2.1	Alguns sistemas de pulverização nacionais	13
TABELA 2.2	Parâmetros e variáveis	14
TABELA 2.3	Parâmetros do PWM	15
TABELA 2.4	Parâmetro K_L para alguns componentes hidráulicos	22
TABELA 2.5	Parâmetros e variáveis	24
TABELA 3.1	Extração de regras	35
TABELA 3.2	Base de regras obtida	35
TABELA 4.1	Condições de acionamento da ponte H	66
TABELA 6.1	Parâmetros dos controladores PID sintonizados para diversos	
pontos de	e operação	83
TABELA 6.2	Base de regras do controlador PD+I fuzzy 5 x 5	83
TABELA 6.3	Parâmetros do controlador PID	86
TABELA 6.4	Controlador fuzzy	86
TABELA 6.5	Parâmetros do controlador PID obtido através da ferramenta	
rltool		87
TABELA 6.6	Controlador fuzzy	88
TABELA 7.1	Parâmetros de simulação	92
TABELA 7.2	Valores da referência	92

Resumo

Este trabalho tem como principal objetivo o projeto de um controlador fuzzy para o controle da taxa de aplicação de herbicidas de acordo com mapas de infestação de plantas daninhas georeferenciados usando válvulas reguladoras comerciais. São consideradas dois tipos de válvulas reguladoras para o controle da vazão de saída. No primeiro tipo a área de passagem é controlada por meio de uma agulha e no segundo por meio de um perfil esférico. O projeto do controlador fuzzy foi baseado nos ganhos de um controlador PID obtidos a partir de modelos do sistema de aplicação de defensivos agrícolas considerando 3 pontos de operação e ensaios realizados em um protótipo estático de um sistema de pulverização. Foram elaboradas uma interface para o acionamento da válvula reguladora e das válvulas de seção da barra de aplicação e um simulador em ambiente LabView para testar os algoritmos de controle desenvolvidos e efetuar testes preliminares de desempenho. Resultados de ensaios com o simulador e com o protótipo foram obtidos para dois casos: no primeiro variou-se a referência e no segundo introduziu-se uma perturbação com o desligamento de válvulas de seções da barra de aplicação. Finalmente, as respostas para os controladores PID e fuzzy obtidos foram avaliadas e comparadas. Resultados de ensaios com o simulador e protótipo mostram a eficiência do controlador fuzzy obtido para a mudança de referência e introdução de perturbação com o desligamento de uma das válvulas de seção.

Palavras-chave: Controle fuzzy, agricultura de precisão, pulverizadores, válvulas reguladoras

xviii

Abstract

The main goal of this work is the design of fuzzy controllers for a rate herbicide application control according to an infestation map of georeferenced weeds using comercial regulator valves. To control the out flow two types of valves are considered. In the first type the crossing area is controlled through a needle and in the second type through a spheric profile. The fuzzy control design was based on PID controllers obtained from the sprayer system models and tests in a static sprayer prototype. An interface and a simulator in LabView environment were built to implement and test the performance of the developed control algoritms. Simulation and experimental results were obtained for two cases. In the first, the set point was varied and in the second a perturbation was applied by disconnecting sections valves of the application bar. Finally, the obtained results for the PID and fuzzy controllers are evaluated and compared. Results of tests and simulator showed the efficiency of the obtained fuzzy controler in respect to reference changes and to a perturbation input when a section bar was turned off.

Keywords: fuzzy control, precision agriculture, sprayers, regulator valves

Sumário

Lista de Figuras ix				
Lista de Tabelas xv				
Re	Resumo xvi			
A	Abstract xix			
1	Intr	rodução	1	
	1.1	Gerenciamento localizado	3	
	1.2	Aplicação de herbicidas	3	
	1.3	Sistemas de controle PID e fuzzy	5	
	1.4	Objetivos	5	
	1.5	Organização do trabalho	6	
2	\mathbf{Sist}	ema de aplicação de herbicidas	7	
	2.1	Aplicação em tempo real	8	
	2.2	Aplicação por mapeamento	9	
		2.2.1 Krigagem	10	
	2.3	Concepção do sistema de aplicação de herbicidas	12	
	2.4	Válvulas reguladoras	13	
		2.4.1 Válvulas solenóides biestáveis	13	
		2.4.2 Válvulas controladas pela variação da área de passagem	16	
		2.4.3 Válvula esférica	17	
		2.4.4 Válvula agulha	18	
2.5 Equacionamento do sistema de controle de vazão		Equacionamento do sistema de controle de vazão	21	
		2.5.1 Sistema de controle de vazão	21	
3	Con	atroladores	27	
	3.1	Controladores PID	27	

8	Con	nclusão	e propostas para trabalho futuro	103
	7.2	Result	ados experimentais	97
	7.1	Result	ados de simulação	91
7	Res	ultado	S	91
		6.1.2	Projeto de controladores utilizando lugar geométrico das raízes .	88
		6.1.1	Projeto de controladores usando ajuste manual	86
	6.1	Projet	o de controladores	86
6	Con	ntrole o	lo sistema de aplicação de herbicidas	81
		degrau		78
	5.4	Obten	ção dos parâmetros do modelo do protótipo usando a resposta ao	-
	5.3	Cálcul	o da referência	78
	5.2	Corpo	das válvulas	73
	5.1	Obten abertur	ção dos parâmetros do modelo utilizado para obter o ângulo de a e a posição da agulha das válvulas estudadas	70
5	Ob herb	tenção icidas	dos modelos para simulação do sistema de aplicação de	e 69
		4.2.3	Acionamento das válvulas de seção	66
		4.2.2	Acionamento da válvula reguladora	64
		4.2.1	Medida de vazão e velocidade	59
	4.2	Aquisi	ção e acionamento do protótipo	59
		4.1.1	Velocidade do trator e vazão de referência	58
	4.1	Descri	ção do protótipo	55
4	Des herb	scrição vicidas	e acionamento do protótipo do sistema de aplicação de	e 55
		3.2.6	Ajuste dos ganhos de entrada e saída	53
		3.2.5	Ajuste das funções de pertinência	51
		3.2.4	Topologias de controladores fuzzy	39
		3.2.3	Projeto de controladores fuzzy	38
		3.2.2	Análise através de plano de fase \hdots	35
		3.2.1	Sistemas de inferência fuzzy	30
	3.2	Contro	bladores fuzzy	29
		3.1.3	Sintonia manual de controladores PID	29
		3.1.2	Algoritmo avançado	28
		3.1.1	Algoritmo básico	27

	8.1	Conclusão	103
	8.2	Proposta para trabalho futuro	104
\mathbf{A}	A Conjuntos fuzzy		
	A.1	Funções de pertinência $\ldots \ldots \ldots$	105
	A.2	Relações entre conjuntos fuzzy \hdots	106
в	B Labview aplicado a sistemas de controle		
	B.1	Laços temporizados	109
	B.2	Interfaces digitais de entrada / saída - NIDaqmax $\ \ . \ . \ . \ . \ . \ .$	110
	B.3	PID Toolkit	110
		B.3.1 Controladores PID e controladores fuzzy $\ldots \ldots \ldots \ldots$	111
С	Sim	ulador do aplicador de herbicidas a taxa variável	113
Re	Referências bibliográficas 1		

Capítulo 1

Introdução

As principais atividades de produção agrícola são baseadas na distribuição espacial e temporal de recursos. Tecnologias de informação espaciais, como o sistema de posicionamento global (GPS) e sistemas de informação geográficas e sensoriamento remoto, têm sido aplicados na agricultura. A disseminação da tecnologia da informação é o mais importante fator para países em desenvolvimento estender muitas descobertas tecnológicas ao campo (Maohua 1999).

A agricultura de precisão inclui todas as práticas de produção agrícola que utilizam tecnologia de informação para alcançar o resultado desejado ou monitorar os resultados do uso de técnicas como aplicação a taxa variável, monitoramento de produção e sensoriamento remoto (Tschiedel e Ferreira 2002). A agricultura de precisão pode ser subdividida em diversas fases: mapeamento dos atributos do solo e das plantas, mapeamento da produtividade das culturas e aplicação localizada de insumos. Todos estes processos são gerenciados pelo chamado Sistema de Informação Geográfica (SIG)(Esquerdo 2002).

A variabilidade das propriedades do solo, condições da safra e produção dentro de uma região, prescrição e gerencialmente das decisões agrícolas baseadas na variabilidade da produção e conhecimento, implementação de sistemas de aplicação localizada, validação da eficiência do tratamento e acúmulo de informações são considerados na agricultura de precisão para posterior auxílio na tomada de decisões.

A força motriz da agricultura de precisão é a variabilidade espacial e temporal, a chave para o seu sucesso é a informação, sendo necessária a utilização de tecnologias avançadas para obtenção e interpretação da maior quantidade possível de informações sobre o processo produtivo (Baio 2001).

Pulverizando-se somente nas regiões onde existem plantas daninhas com uma quantidade adequada reduz a poluição ambiental, aumenta a eficiência na aplicação de herbicidas reduzindo custos e aumentando da produção (GopalaPillai et al. 1999).

O descuido relacionado à aplicação excessiva faz com que os produtos ao serem levados por meios naturais, como as chuvas por exemplo, tornem-se fonte de poluição de solos e águas. O uso de sistemas de aplicação de herbicidas a taxa variável são uma forma de reduzir a poluição gerada (Landers 1993, Maxwell; Luschei 2005).

Sistemas de aplicação a taxa variável podem fazer uso de mapas de aplicação ou ainda utilizar-se de sistemas de aquisição de informações sobre a distribuição das plantas daninhas em tempo real (Pernomian 2002, Yang et al. 2002, Tian 2002, Tian et al. 1997, Shearer; Holmes 1990, Woebbecke et al. 1992, Zhang; Chaisattapagon 1995).

A detecção e o mapa das áreas de ocorrência de plantas daninhas possibilita a tomada de decisão sobre o melhor manejo para cada local do campo pela identificação da variabilidade espacial e temporal das plantas daninhas, permitindo o controle somente nas áreas de infestação das mesmas, com aplicações de herbicida de forma mais racional quando comparada com pulverizações que se baseiam na média das infestações, sem considerar o grau de distribuição das plantas daninhas na área (Shiratsuchi 2001).

Os conceitos de agricultura de precisão permitem que várias ações sejam tomadas com a finalidade de aumentar a produção, assim como tornar o processo mais eficiente. Este projeto apresenta um sistema de aplicação de herbicidas a taxa variável, que permite que o herbicida seja aplicado em quantidade adequada dependendo da densidade de plantas daninhas, bem como da competitividade dos principais tipos presentes em culturas evitando assim desperdícios.

A aplicação de defensivos agrícolas representam grande parcela nos custos de produção. A minimização deste custo depende basicamente da utilização racional de defensivos. Sistemas de aplicação de herbicidas em conjunto com ferramentas de análise e previsão são ferramentas essenciais para atingir este objetivo. Este trabalho insere-se no projeto multidisciplinar "Modelagem Matemática e Computacional Aplicada na Agricultura de Precisão", em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa). Neste capítulo são apresentados os principais temas abordados no desenvolvimento deste trabalho.

1.1 Gerenciamento localizado

Sistemas de informações geográficas (SIGs) representam um conjunto de ferramentas computacionais que permitem o armazenamento, o processamento, a análise e a sintetização de dados georreferenciados, bem como a produção de informação derivada de sua aplicação. Na aplicação localizada de defensivos, os SIGs possuem papel fundamental na geração dos mapas de plantas daninhas, geração dos mapas de prescrição, assim como no estudo das correlações entre os mapas gerados (Baio 2001). Sistemas de informação fornecem a guarnição necessária para um gerenciamento localizado específico (SSM¹).

O gerenciamento localizado específico refere-se a tomada de ações (como aplicação de defensivos, fertilizantes, etc) no momento correto. Esta é uma antiga idéia presente na agricultura, e principalmente durante a mecanização da agricultura no século 20, esteve constantemente presente para viabilizar o manejo de grandes áreas que requeriam práticas agronômicas uniformes.

A agricultura de precisão fornece guarnição necessária para automatizar o processo de aplicação de herbicidas utilizando tecnologias de informação tornando a idéia de SSM prática. Pode-se definir SSM, como o controle e monitoramento eletrônico aplicado à coleta e processamento de dados que fornece suporte à tomada de decisão na alocação temporal e espacial de recursos em sistemas de produção agrícola (Bongiovanni; Lowenberg-Deboer 2004).

1.2 Aplicação de herbicidas

O preço de produtos agrícolas varia em função da oferta e da procura, não sendo possível ao agricultor elevar o preço do produto conforme o seu desejo. Desta forma, a única maneira do agricultor elevar o lucro obtido com o seu produto é diminuindo os seus custos de produção (Baio 2001).

Modelos de competição plantas daninha - cultura têm sido utilizados para determinar o limiar bio-econômico para aplicação de herbicidas. Muitos herbicidas pós-

¹do inglês Site-Specific Management

emergentes que são utilizados em uma tradicional área no meio oeste dos Estados Unidos chamada cinturão do milho poderiam ser aplicados a taxas reduzidas sem um significante impacto na produção. Alguns pesquisadores tentaram até mesmo promover a redução de dosagens e encontraram uma taxa de 1/8 dos valores tabelados como suficientes para suprimir as daninhas sem consideráveis perdas de produção. A razão de serem consideradas altas taxas de aplicação deve-se principalmente porque em campo a informação sobre a infestação de plantas daninhas não está disponível e o pior cenário é sempre considerado. Estudos sobre os efeitos da variabilidade espacial de daninhas em aplicações localizadas podem ser encontrados em Tian (2002).

Usualmente, herbicidas são pulverizados em taxas uniformes sobre toda a plantação. Esta prática resulta na aplicação de herbicidas em regiões onde não existem ou existem poucas plantas daninhas ou ainda aplicação insuficiente em regiões de alta densidade de plantas daninhas. A aplicação de taxas mais altas que necessárias em áreas com baixa densidade de plantas daninhas aumentam os problemas ambientais como poluição do solo e poluição de água. Além disso, grande parte do custo de uma lavoura refere-se ao uso de herbicidas. Desta forma, visando reduzir os custos de produção, faz-se necessário fazer uso deste tipo de defensivo agrícola de forma racional.

Mapas de infestação obtidos a partir de técnicas de Krigagem e sistemas de decisão podem ser utilizados no controle da dosagem na aplicação de herbicidas através da correlação entre o grau de infestação em uma determinada região e a dosagem de herbicida (Wiles 2005). Através de um estudo detalhado da infestação de plantas daninhas em uma cultura é possível reduzir os custos referentes à aplicação de herbicidas (Swinton 2005). Na literatura são encontrados diversos equipamentos de aplicação de herbicidas (Paice et al. 1995, Rietz et al. 1997, Ammons et al. 2000). Em geral, são utilizadas válvulas reguladoras elétricas no controle da taxa de aplicação. Várias arquiteturas de válvulas podem ser utilizadas. Neste trabalho, válvulas esféricas, válvulas de agulha e válvulas solenóides são consideradas com a finalidade de regular a taxa de aplicação.

1.3 Sistemas de controle PID e fuzzy

A habilidade para controlar um sistema com incertezas ou pouco conhecido é uma das mais importantes características de qualquer sistema de controle inteligente. Procedimentos de inferência fuzzy têm permitido um aumento crucial no gerenciamento e provêm uma sistemática para lidar com diferentes tipos de incerteza. Considerando que muitas aplicações envolvem conhecimento e ações de um especialista humano que é invariavelmente impreciso, incompleto e não totalmente fiel, sistemas inteligentes devem combinar conhecimento baseado em técnicas de mineração e processamento de informações com métodos de aproximação de raciocínio. Isso possibilita o sistema de controle melhor simular uma decisão humana sob um processo assim como permitir o uso de informações imprecisas e incertezas do ambiente (Kandel; Langholz 1994). A estrutura geral de um controlador fuzzy é derivada da estrutura de um controlador proporcional integrativo derivativo (PID). Mandani e Assilian (1974) definiram as entradas de controladores fuzzy como sendo o erro e a variação do erro e como saída um incremental, similar ao controlador PID (Kazemian 2005). Neste trabalho considera-se o uso de um controlador PID, e a partir dos ganhos deste controlador, um controlador fuzzy PD+I é especificado. Controladores PID são comumente utilizados na indústria e possui a vantagem de poder ter seus parâmetros ajustados de forma simples e apresentar boa robustez.

1.4 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é apresentar a concepção, modelagem e controle de um sistema de aplicação de herbicidas que permita que a taxa de aplicação de herbicidas possa ser variada no decorrer de uma aplicação. O sistema de controle foi testado em um protótipo construído pela Enalta². Inicialmente foram obtidos controladores PID e utilizando o conhecimento gerado na elaboração destes foram obtidos controladores fuzzy. Os controladores PID e fuzzy foram implementados em linguagem gráfica na plataforma NI³ Labview.

 $^{^2 \}rm Enalta Inovações Tecnológicas para Agricultura, localizada na Rua Bento Carlos, 734 sala 04, Centreville - São Carlos - SP$

³National Instruments

1.5 Organização do trabalho

Este trabalho está dividido em 8 capítulos e 2 apêndices. O Capítulo 2 descreve e apresenta a modelagem de um sistema de aplicação de herbicidas. No Capítulo 3, os controladores utilizados neste trabalho em conjunto com o sistema de aplicação são apresentados em conjunto com metodologias de projeto. As conexões, descrição da interface elétrica, aplicativo utilizado no controle são apresentados no Capítulo 4. Finalmente o modelo do sistema de aplicação de herbicidas é apresentado no Capítulo 5. Em seguida o projeto dos controladores são apresentados no Capítulo 6. Os resultados de simulação e resultados práticos são apresentados no Capítulo 7, seguido da conclusão no Capítulo 8.

Capítulo 2

Sistema de aplicação de herbicidas

Utilizando os modernos conceitos de agricultura, há necessidade de desenvolver novos equipamentos capazes de realizar a aplicação de herbicidas nos locais desejados e nas dosagens necessárias para estes locais. Uma das características de maior importância neste tipo de equipamento é o seu tempo de resposta (Baio 2001).

Sistemas de aplicação a taxa variável de herbicidas vêm sendo muito estudados para reduzir custos de produção e efetuar aplicações destes produtos de forma racional (Rietz et al. 1997, Tian 2002). As infestações das plantas daninhas normalmente não ocorrem de modo uniforme nas áreas agrícolas, mas, é possível mapear a sua variabilidade espacial com a utilização de processamento de imagens. Esta variabilidade espacial pode ser associada a mapas, gerados através de classificadores (Yang et al. 2000, Shahin et al. 2001, Bressan 2007). Assim, obtém-se mapas de infestação que são utilizados como referência no controle da aplicação de herbicidas.

Diversas topologias de sistemas de aplicação podem ser encontradas na literatura. GopalaPillai et al. (1999) apresenta e valida um sistema onde a variação da taxa de aplicação é feita diretamente nos bicos, através da inserção de válvula solenóide e modulação por largura de pulso (PWM).

Esquerdo (2002) faz a adaptação de um sistema de pulverização convencional, no qual adiciona um sistema de controle visando a aplicação localizada de herbicidas, além disso, para aumentar a resolução espacial do sistema de pulverização, válvulas de seção são adicionadas nas duas seções de barra. A variação da taxa de aplicação pode ser feita de duas formas possíveis:

- Através da variação da vazão: O tanque principal contém uma mistura de água e herbicidas e usando de bombas e válvulas, a taxa de aplicação é configurada via o controle da vazão ou da pressão de saída do sistema.
- Através de injeção: Injeção direta de herbicidas é feita em uma câmara com fluxo constante de solvente (água) utilizando uma bomba para controlar a taxa de injeção de herbicidas.

Além disso, como relata Esquerdo (2002), pode-se adotar duas estratégias distintas:

- Aplicação em tempo real,
- Aplicação por mapeamento.

2.1 Aplicação em tempo real

Nesta estratégia, são utilizados pulverizadores munidos de sensores e câmeras que detectam a presença das plantas daninhas e simultaneamente fazem a aplicação. Um diagrama representando o sistema de aplicação em tempo real é apresentado na Figura 2.1. Tian (2002) apresenta um exemplo de sistema baseado neste conceito.

Em Maohua (1999), o autor apresenta um sistema de aplicação baseado em um sistema de visão composto de múltiplas câmeras, um sensor de velocidade e um controlador de bicos. A taxa de aplicação para cada bico utilizado na pulverização é controlado separadamente com base nas condições locais de infestação de plantas daninhas. Nestes sistemas, com a finalidade de efetuar o reconhecimento de imagens, processá-las e associá-las com informações agrícolas utilizam-se redes neurais artificiais, algoritmos genéticos, controle fuzzy e wavelet em conjunto com DSP's¹. Sistemas de aplicação em tempo real precisam de imagens em resolução relativamente alta, e possuem algoritmos complexos e por necessitarem ser processados em tempo real, são computacionalmente caros (Mayer et al. 1998). A idéia baseia-se em determinar a densidade de plantas daninhas utilizando processamento de imagens. Após isso a uma certa quantidade de

¹Do inglês Digital Signal Processor.

herbicida pode ser aplicado de forma controlada. Neste tipo de aplicação um sistema multitarefa e em tempo real é utilizado com a finalidade de tratar o sistema de visão artificial e simultaneamente efetuar o controle da taxa de aplicação. Tian (2002) apresenta um sistema integrado a um sistema de visão em tempo real com controle individual de bicos em conjunto com um sistema de aplicação clássico para criar um sistema inteligente de aplicação de herbicidas. A máquina de visão foi projetado para trabalhar em diferentes condições de iluminação. Múltiplos sensores visuais são utilizados para cobrir a área alvo. Ao invés de tentar identificar cada planta individualmente no campo, infestações na região de controle atual são detectadas. Para aumentar a acurácia da aplicação, cada bico aplicador individual é controlado separadamente.



Figura 2.1: Representação do processo de aplicação em tempo real.

2.2 Aplicação por mapeamento

Stafford; Miller (1993) discutem os conceitos de variação espacial de doses e misturas utilizando informações presentes em mapas de distribuição de plantas daninhas. Também são discutidos detalhes de projeto e validação de desempenho de um sistema de aplicação localizada construído. Para desenvolver uma máquina para aplicação variável de herbicida utilizando um mapa é necessário definir a resolução espacial requerida pelo sistema de aplicação, a faixa de dosagens em que a máquina deve trabalhar e a acuracidade mínima aceitável. A detecção e o controle da planta daninha são efetuados em momentos diferentes. Inicialmente é gerado um mapa de infestação, e em função deste mapa é feita a pulverização. A Figura 2.2 apresenta o processo utilizado na geração de mapas a partir da amostragem da densidade de plantas daninhas. Esta aplicação pode ser considerada mais precisa, uma vez que existe um intervalo de tempo entre o levantamento das informações no campo e aplicação, permitindo a análise dos dados e a escolha do herbicida.



Figura 2.2: Geração de mapa com níveis de infestação através de amostragens e processamento das amostras.

Neste trabalho este tipo de aplicação é considerado. A seguir é descrito o método de estimação por Krigagem, utilizado na obtenção de mapas de infestação.

2.2.1 Krigagem

A agricultura de precisão fundamenta-se na coleta sistemática e no processamento de dados georreferenciados para produzir informações que permitam manter os processos produtivos sob controle, orientando-os ao aprimoramento contínuo. Na prática para obter de forma rápida e eficiente um mapa que descreva a distribuição de plantas daninhas são coletadas amostras e em seguida são utilizados métodos de interpolação.

Atualmente, diversas técnicas de interpolação têm sido utilizadas em agricultura de precisão para inferir valores em locais não amostrados. Utiliza-se técnicas de estimação a partir de elementos pontuais de localização conhecida para inferir valores para localizações não amostradas com a finalidade de obter mapas, fornecendo, assim, uma ferramenta precisa de auxílio ao processo de tomada de decisão.

Quando uma determinada propriedade ou parâmetro varia de um local para outro com algum grau de organização ou continuidade, expresso através de dependência espacial, a estatística tradicional, que considera as amostras como independentes, deve ser complementada pela geoestatística (Vieira 2000). A geoestatística estima valores cujo objeto em estudo apresenta distribuição no espaço e, desse modo, supõe que os valores das variáveis, consideradas como regionalizadas, sejam espacialmente correlacionados. De uma forma geral, a metodologia geoestatística procura extrair, de uma aparente aleatoriedade dos dados, as características estruturais probabilísticas do fenômeno regionalizado, ou seja, uma função de correlação entre os valores situados numa determinada vizinhança e direção no espaço amostral. O método de estimativa básico utilizado é o da *Krigagem* (Isaaks; Srivastana 1989).

O método de Krigagem foi nomeado em homenagem a Danie Krige, que formulou pela primeira vez esta metodologia em 1951 (Brooker 1979). A Krigagem é um método fundamentado na teoria das variáveis regionalizadas, que usa informações a partir do variograma para encontrar os pesos ótimos a serem associados aos dados com valores conhecidos os quais irão estimar pontos desconhecidos. Em outras palavras, a Krigagem é um processo de estimativa semelhante ao de interpolação por média móvel ponderada, porém, na Krigagem os pesos dados a cada dado são determinados a partir de uma pré-análise espacial utilizando os variogramas, que determinam a dependência espacial entre as amostras. Desta forma, a Krigagem leva em consideração as características espaciais de autocorrelação de variáveis regionalizadas, as quais devem apresentar uma certa continuidade espacial, permitindo que os dados obtidos por amostragem de certos pontos possam ser usados para parametrizar a estimativa de pontos onde o valor da variável seja desconhecido. Os passos num estudo empregando técnicas de Krigagem incluem: análise exploratória dos dados; análise estrutural (modelagem da estrutura de correlação espacial) e interpolação estatística da superfície.

Os mapas gerados por métodos convencionais de estimação podem oferecer resultados diferentes, dependendo do método utilizado. Alguns destes métodos foram comparados em Tieppo et al. (2007), e constatou-se que o método do vizinho mais próximo é o que pior representa a variabilidade espacial de uma determinada variável; por isso, não é aconselhável utilizá-lo para estimativa de variáveis. Concluiu-se também que o método do inverso da distância ao quadrado pode ser uma opção de interpolador a ser utilizado em monitores de colheita, uma vez que os dados são coletados em pequenos intervalos de tempo, com pontos amostrais bem próximos entre si, mas não é indicado para ser utilizado com pontos amostrais mais distantes. A Krigagem apresenta melhores resultados de estimação para valores de variáveis em locais não amostrados do que as técnicas normalmente usadas para classificação de solo, devido à maneira pela qual as variáveis regionalizadas interpretam a natureza da variação dos atributos do solo (Carvalho; Vieira 2001). As principais características que fazem a Krigagem ser um método de estimação superior aos tradicionais são:

- Os métodos convencionais utilizam o conceito Euclidiano da distância para o cálculo dos pesos atribuídos aos dados, enquanto a Krigagem considera tanto a distância como a geometria da localização dos dados. Assim, os vizinhos agrupados têm importância individual relativamente menor do que aqueles isolados.
- Mediante a Krigagem, é minimizada a variância do erro esperado (diferença entre o valor real e o valor estimado).
- Os métodos geoestatísticos mostram uma grande flexibilidade para a interpolação, podendo-se estimar valores pontuais ou em blocos. Todos estes métodos dão lugar a superfícies suaves e a estimação da variância em todos os pontos, o que não pode ser realizado com outros métodos de interpolação.
- A Krigagem estima uma matriz de covariância espacial que determina os pesos atribuídos às diferentes amostras. Os pesos são atribuídos de acordo com a variabilidade espacial expressa no variograma. No entanto, o que torna a Krigagem um interpolador ótimo é a maneira como os pesos são distribuídos e a minimização da variância (Vieira 1995). A partir dos pontos dados, estima-se o ponto não amostrado por meio da média móvel ponderada dos valores vizinhos observados, obtendo-se diferentes pesos para os dados. A modelagem matemática do método de estimação de Krigagem pode ser visto em Isaaks; Srivastana (1989) e Bressan et al. (2008).

Desta forma, a Krigagem é uma técnica usada na geoestatística com o objetivo de estimar valores de variáveis para locais onde as mesmas não foram medidas a partir de valores adjacentes interdependentes. Para que esta ferramenta seja usada é necessário que exista a dependência espacial definida pelo variograma (Bressan 2007).

2.3 Concepção do sistema de aplicação de herbicidas

Para obter uniformidade na distribuição da calda aplicada (mistura de água e herbicidas), em pulverizações, devem ser consideradas as condições de montagem e de
operação do bicos aplicadores (Peressin; Perecin 2001), o espaçamento entre bicos, altura da barra, ângulo de abertura dos bicos e a pressão de trabalho. O objetivo da pulverização é de distribuir o produto de forma uniforme em toda a área a ser tratada (Peressin; Perecin 2001). O tamanho das gotas durante a aplicação é um problema a ser considerado. A queda de pressão na barra de aplicação torna o tamanho das gotas variável em diferentes pontos barra que contém os bicos aplicadores. O tamanho das gotas é um aspecto a ser observado na aplicação uma vez que influencia na qualidade da aplicação.

No desenvolvimento de sistemas de aplicação deve-se também escolher adequadamente as bombas de pressão e o sistema de bicos aplicadores. Na Tabela 2.1 são listados alguns sistemas de pulverização comerciais encontrados atualmente. As características dos sistemas comerciais apresentados, como a vazão da bomba e o tamanho da barra (que está relacionado ao número de bicos) foram considerados pela Enalta como referência na montagem do protótipo.

Fabricante: Jacto					
Modelo	Comprimento da barra	Altura de trabalho	Tanque	Bomba	
CONDOR 800 AM 12/14	12 ou 14 m	0,65-1,42m	800 1	$75/100 \ l/min$	
CONDOR AM12	12 m	0,50-1,30 m	600 1	$75 \ l/min$	
CONDORITO	10 m	até 3.5m	400 1	$38 \ l/min$	
Fabricante: Case, KO - Cereal					
KO 2000 IH 14x12 Cross	13 m	0,50-1,50m	2000 1	$65/80 \; l/min$	
KO 3000 IH 18 Cross	20 m	0,50-1,50m	3000 1	$100-150 \ l/min$	
KO 3000 Express 21	20 m	0,45-1,50m	3000 1	100-150 l/min	
Fabricante: Case, KO - Cana de açúcar					
KO 1200 Herbicana Trampulo	12/14 m	n.e.	$2 \ge 600 \ l$	65/80 l/min	

Tabela 2.1: Alguns sistemas de pulverização nacionais.

2.4 Válvulas reguladoras

2.4.1 Válvulas solenóides biestáveis

O princípio de funcionamento de uma válvula solenóide de um estágio é bastante simples. Uma diferença de potencial elétrico é aplicada entre os terminais de um solenóide, que através do campo magnético move um núcleo metálico ferromagnético, causando alteração do estado da válvula. O núcleo comprime uma mola que no caso do interrompimento da alimentação do solenóide desloca o núcleo para a sua posição original. A Figura 2.3 representa uma válvula solenóide típica. A definição dos parâmetros e variáveis do sistema encontra-se na Tabela 2.2.



Figura 2.3: Diagrama (corte) de uma válvula solenóide.

Tabela 2.2: Parâmetros e variáveis			
Q_c	Vazão sobre a válvula		
ρ	Densidade do fluído, positivo, não nulo		
C_0	Constante de perdas do orifício		
F_p	Força induzida pela pressão hidráulica		
ΔP_c	Variação de pressão da válvula aberta		
F_B	Força induzida no obturador pelo campo magnético da bobina		
N	Número de voltas da bobina		
Ι	Corrente através da bobina		
A_c	Área da secção do núcleo da bobina		
D_g	Espaçamento entre o circuito magnético e a válvula desenergizada		

A relação entre a variação de pressão, vazão sobre a válvula e a área da seção é apresentada a seguir

$$\Delta P_c = \frac{\rho}{2} \left(\frac{Q_c}{C_0 A_c} \right)^2, \qquad (2.1)$$

e as relações para a força induzida pela pressão e força induzida pelo campo magnético sobre o obturador são dadas respectivamente por

$$F_p = \Delta P_c \ A_c \quad \mathbf{e} \tag{2.2}$$

$$F_B = \frac{NIA_c}{2D_q},\tag{2.3}$$

onde ΔP_c é determinado considerando a pressão adequada a ser utilizada no bico de aplicação (entrada da qual a saída válvula deve ser conectada). A abertura da válvula é determinada no momento em que F_B supera F_P .

Outra forma de efetuar o controle de vazão com este tipo de válvula é utilizar o fato de a mesma apresentar alta velocidade e atuar através da técnica de modulação de largura de pulsos (PWM) ou seja, através do controle do tempo em que a válvula permanece fechada ou aberta é possível obter uma vazão de saída proporcional ao valor médio do sinal de entrada da válvula (sinal modulado através de PWM). Características da válvula como tempo de abertura e fechamento devem ser considerados. Estas considerações são importantes no projeto, uma vez que a válvula irá falhar se o tempo em que estiver atuando for inferior ao tempo em que a mesma necessita para abrir ou fechar. Assim, deve-se considerar que a largura de pulso do PWM deve ter um valor mínimo. Neste caso, o ciclo de trabalho do PWM será dado como na seguinte expressão

$$t_{s1}(k) = \begin{cases} \frac{|u(k)|}{u_{max}}T + t_{DZ}, & 0 < |u(k)| \le u_{max}(1 - t_{DZ}/T) \\ T, & |u(k)| > u_{max}(1 - t_{DZ}/T) \end{cases}$$
(2.4)

em que os parâmetros e variáveis são apresentados na Tabela 2.3.

Tabela 2.3: Parâmetros do PWM			
T	Período do PWM		
t_{DZ}	Valor mínimo do tempo de atuação da válvula		
u(k)	Sinal de controle (entrada do PWM)		
u_{max}	Tensão de entrada em que ocorre saturação do PWM		

O sinal de controle denotado u(k), desta forma, é aplicado à válvula através de um bloco que modula a abertura da válvula com a lei (2.4)(Ahn; Yokota 2005).

Válvulas solenóides proporcionais acionadas por piloto são descritas em Zung; Perng (2002) e Dasgupta; Watton (2005). Estas válvulas podem apresentar um ou dois estágios. Quando trabalham com fluxos baixos usualmente tratam-se de válvulas de um único estágio. Válvulas acionadas por piloto (compostas por dóis estágios) permitem o controle de fluxos maiores.

No início do desenvolvimento do presente trabalho válvulas solenóides foram consideradas para o controle de vazão. Neste trabalho válvulas solenóides são utilizadas exclusivamente para ligar e desligar as seções, sendo apresentadas como válvulas de seção. Neste caso os gastos energéticos são baixos, uma vez que as válvulas são abertas ou fechadas com um grande intervalo de tempo, o que inclusive aumenta a vida útil deste componente. Outras válvulas elétricas, como válvulas esféricas e de agulha são consideradas para o controle de fluxo, o que permite a variação de vazão de uma forma eficiente a um baixo custo energético.

2.4.2 Válvulas controladas pela variação da área de passagem

As perdas em válvulas dependem de diversas variáveis geométricas e do escoamento. A Figura 2.4 apresenta uma contração brusca a partir da qual pode-se modelar uma válvula reguladora de forma simplificada.



Figura 2.4: Representação simplificada de uma válvula - contração brusca.

Os dados para válvulas são, em geral, apresentados em termos de um coeficiente de recuperação de pressão, denotado C_p (Munson et al. 1997), definido como a razão entre o aumento da pressão estática e a pressão dinâmica de entrada. As perdas em difusores dependem de diversas variáveis geométricas e do escoamento. Os dados para difusores são, em geral, apresentados em termos de C_p definido por

$$C_p = \frac{P_2 - P_1}{\frac{1}{2}\rho V_1^2} \tag{2.5}$$

onde P_1 e P_2 representam a pressão nos pontos (1) e (2), respectivamente, e V_1 e V_2 representam a velocidade do fluído nos pontos (1) e (2), respectivamente. Isto indica qual a fração da energia cinética do escoamento de entrada se transforma em aumento de pressão. Usando as equações de continuidade e de Bernoulli, o coeficiente de recuperação de pressão ideal (sem atrito) é dado por

$$C_p = 1 - \frac{1}{\frac{A_2^2}{A_1^2}} \tag{2.6}$$

em que A_1 e A_2 são a área no ponto (1) e (2) respectivamente (Bergadà 2000). A vazão sobre a contração é calculada através de

$$Q = \bar{K} \sqrt{\frac{P_1 - P_2}{\rho}},\tag{2.7}$$

onde

$$\bar{K} = \frac{C_d}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}.$$
(2.8)

2.4.3 Válvula esférica

Para uma válvula com esfera de raio r, a área do orifício é dada pela intersecção de dois círculos, como ilustrado na Figura 2.5. Para um ângulo θ , tem-se triângulos retângulos com hipotenusa r. De cada círculo, extraindo estes dois triângulos de uma seção com abertura igual a 2θ tem-se metade da área do orifício. A área do orifício é então dada por

$$A_o(\theta) = 2 \left(\theta R^2 - R^2 \sin(\theta) \cos(\theta)\right)$$
(2.9)

e a vazão da válvula esférica é dada portanto por

$$Q = \bar{K}A_o(\theta)\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}}$$
(2.10)

onde \bar{K} é calculado através de (2.8), e ΔP representa a diferença de pressão entre a entrada e a saída da válvula. Um motor é acoplado ao eixo da válvula controlada através da posição do eixo do motor refletindo em um ângulo de abertura θ . Uma caracterização completa de válvulas esféricas pode ser encontrada em Walters (1991).



Figura 2.5: Diagrama apresentando a área de passagem de válvulas esféricas.

2.4.4 Válvula agulha

O controle da área de passagem para a válvula de agulha é feito através do posicionamento da agulha em um orifício circular por meio de um motor CC. A agulha presente na válvula é ilustrada na Figura 2.6.



Figura 2.6: Cortes da agulha utilizada no controle de vazão da válvula reguladora.

A agulha é formada basicamente de um cilindro com um corte diagonal. Com a finalidade de calcular a área da seção considera-se inicialmente o plano sob o corte. A seção do corte refere-se a uma elipse. Na Figura 2.7a esta elipse é apresentada em um plano cartesiano.

A área de passagem é obtida a partir da área da seção circular subtraída da área da seção da agulha na posição x_c . Considerando o diâmetro da agulha a, tem-se o valor do parâmetro a da elipse, o parâmetro b pode ser calculado a partir da altura h do corte e do diâmetro 2a da agulha, uma vez que 2a, 2b e h formam o triângulo retângulo apresentado na Figura 2.7b.



Figura 2.7: (a) Elipse referente ao corte diagonal da agulha (b) triângulo formado por h, 2a e 2b. ($\hat{x} e \hat{y}$ referem-se ao eixo de coordenadas definido sobre a elipse).

Para o triângulo mostrado na Figura 2.7b, formado por $h,\,2a$ têm-se

$$b = \frac{\left|\sqrt{(2a)^2 + h^2}\right|}{2}.$$
 (2.11)

Com x_c a posição atual da agulha, considerando-se que na posição $x_c = h$ a agulha obstrui totalmente a área de passagem, no plano da elipse tem-se a posição (encontrada através de semelhança de triângulos):

$$y(x_c) = x_c \frac{2b}{h}.$$
(2.12)

A distância entre a extremidade da agulha e seção diagonal nesta posição é encontrada por

$$k(x_c) = x_c \frac{2a}{h}.$$
(2.13)

Na elipse (a,b)os pontos (x_p,y)
e (x_n,y) são calculados por

$$x_p(x_c) = \left| a \sqrt{1 - \frac{(y(x_c) - b)^2}{b^2}} \right|$$
(2.14)

$$x_n = -x_p. \tag{2.15}$$

A Figura 2.8 apresenta o orifício de passagem. A area da seção 2θ é calculada através de

$$A_{2\theta}(x_c) = \theta(x_c)a^2 \tag{2.16}$$

onde

$$\theta(x_c) = a\cos\left(\frac{a - k(x_c)}{a}\right). \tag{2.17}$$

A área do triângulo formado por 2m e a é obtida através de

$$A_{\Delta}(x_c) = \frac{(a - k(x_c)) m(x_c)}{2}, \qquad (2.18)$$

onde m é calculado por

$$m(x_c) = \frac{|x_p(x_c) - x_n(x_c)|}{2}.$$
(2.19)

Subtraindo da área do círculo, a área da seção e área do triângulo a - 2m, tem-se a área do oríficio dada por

$$A_o(x_c) = \pi a^2 - \left(\theta(x_c)a^2 - 2A_{\Delta}(x_c)\right).$$
 (2.20)



Figura 2.8: Seção do orifício de passagem com agulha na posição $x_c.$

2.5 Equacionamento do sistema de controle de vazão

Considerando escoamento laminar nos dutos horizontais, a queda de pressão pode ser calculada analiticamente para o escoamento completamente desenvolvido por

$$\Delta P = \frac{128\mu LQ}{\pi D^4},\tag{2.21}$$

onde ΔP representa a variação de pressão entre as extremidades do duto, L o comprimento do tubo, D o diâmetro μ a viscosidade absoluta (ou dinâmica) e Q a vazão.

Para um tubo com área constante através do balanço de energia é possível chegar a perda de carga

$$h_l = \frac{\Delta P}{\rho},\tag{2.22}$$

onde ρ é a massa específica (massa por unidade de volume), positivo, não nulo.

Em cotovelos, o escoamento é turbulento e a perda de carga é calculada por

$$h_l = f \frac{L}{D} \frac{\bar{V}^2}{2},\tag{2.23}$$

onde \bar{V} é a velocidade média do escoamento
ef é o fator de atrito obtido experimentalmente. No caso do escoamento turbulento
 $V = \bar{V}$ médio.

As perdas de carga podem ser calculadas de forma aproximada por Munson et al. (1997)

$$h = K_L \frac{V^2}{2g},\tag{2.24}$$

onde K_L é obtido através das expressões apresentadas na Tabela 2.4.

Comparando a perda de carga da válvula em conjunto com os bicos com a perda de carga do restante do conjunto hidráulico, pode-se verificar que a dinâmica da válvula e do conjunto de bicos predomina sobre o restante do sistema.

2.5.1 Sistema de controle de vazão

Considerando a válvula de alívio e a bomba como dispositivos ideais, pode-se representar o sistema de aplicação de herbicidas pelo diagrama da Figura 2.9. As constantes e parâmetros são encontrados na Tabela 2.5.

Componente	K_L
a. Curvas	
90^o (raio normal), flangeada	0,3
90^o (raio normal), rosqueada	1,5
90^o (raio longo), flangeada	0,2
90^o (raio longo), rosqueada	0,7
45^o (raio longo), flangeada	0,2
45^{o} (raio normal)	0,4
b. Retornos (curvas com $180^o)$	
flangeados	0,2
rosqueados	1, 5
c. Tês	
Escoamento alinhado, flangeado	0,2
Escoamento alinhado, rosqueado	0, 9
Escoamento derivado, flangeado	1,0
Escoamento derivado, rosqueado	2, 0

Tabela 2.4: Parâmetro K_L para alguns componentes hidráulicos

Para a válvula reguladora (que é colocada no retorno do sistema de aplicação) a vazão é dada por

$$Q_v = \bar{K} A_o \left(\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \right), \qquad (2.25)$$

onde \bar{K} e a área de passagem para válvula com A_o dado por (2.10) para a válvula esférica e (2.20) para a válvula agulha.

$$\Delta P = P_{bomba} - P_{tanque}, \qquad (2.26)$$

e a vazão de saída é dada por

$$Q_s = Q_b - Q_a - Q_v. (2.27)$$

e a vazão na válvula de alívio, por sua vez é calculada através de

$$Q_a = k \sqrt{\frac{P_s - P_{atm}}{\rho}},\tag{2.28}$$

onde k é uma constante para uma válvula com área de passagem constante. A vazão que retorna ao tanque Q_r é referente a

$$Q_r = Q_a + Q_v. \tag{2.29}$$

Assim, pode-se escrever a vazão de saída da bomba como

$$Q_b = Q_r + Q_s \tag{2.30}$$

ou ainda a vazão de saída por

$$Q_s = Q_b - Q_r. (2.31)$$

Considera-se que o sistema tenha n bicos de pulverização em funcionamento. Para os bicos de pulverização

$$Q_{bico} = \frac{Q_s}{n}.$$
(2.32)

Em regime turbulento, os bicos podem ser modelados através da relação

$$\frac{Q_{bico}}{Q_{ref}} = \frac{\sqrt{P_{bico}}}{\sqrt{P_{ref}}}.$$
(2.33)

A pressão de saída equivale à pressão sobre os bicos e pode ser calculada como se segue:

$$P_s = P_{bico} = \frac{Q_{bico}^2}{Q_{ref}^2} P_{ref}$$

$$\tag{2.34}$$

onde P_{ref} e Q_{ref} representam um valor de pressão e vazão de referência para os bicos pulverizadores e são obtidos da folha de dados fornecido pelo fabricante.



Figura 2.9: Diagrama de blocos simplificado do sistema de aplicação de herbicidas.

Tabela 2.5: Parâmetros e variáveis			
n	Número de bicos		
Q_r	Vazão no retorno		
Q_{ref}	Vazão de referência		
Q_{bico}	Vazão em cada bico		
Q_v	Vazão na válvula reguladora		
Q_b	Vazão na bomba		
Q_a	Vazão no agitador		
Q_s	Vazão de saída		
P_{ref}	Pressão de referência		
P_{tanque}	Pressão no tanque		
P_{bomba}	Pressão na saída da bomba		
P_{atm}	Pressão atmosférica		
P_{bico}	Pressão na saída do bico		
v	Entrada do motor CC - válvula		
heta	Posição do eixo do motor CC		
A_o	Área de passagem		
θ	Posição do eixo do motor CC		

Subtituindo (2.32) em (2.34) obtém-se

$$P_s = P_{bico} = \frac{\left(\frac{Q_s}{n}\right)^2}{Q_{ref}^2} P_{ref}.$$
(2.35)

Finalmente, definindo

$$Q_c = Q_b - Q_a \tag{2.36}$$

е

$$Q_s = Q_c - Q_v, \tag{2.37}$$

obtém-se

$$P_s = P_{bico} = \frac{\left(\frac{Q_c - Q_v}{n}\right)^2}{Q_{ref}^2} P_{ref}.$$
(2.38)

Assim, pode-se calcular a vazão Q_v conhecendo P_s cujo valor depende da área de passagem que é função da posição do motor presente na válvula reguladora.

Capítulo 3

Controladores

É desejável que com os controladores considerados, obtenha-se uma saída com sobressinal e subsinal minímos, uma resposta amortecida e com boa velocidade. A seguir a estrutura básica dos controladores PID e fuzzy é apresentada.

3.1 Controladores PID

O controlador PID utilizado neste trabalho é descrito no manual referente ao tookit PID Control, National Instruments (2007). A seguir o algoritmo é apresentado.

3.1.1 Algoritmo básico

O controlador compara o valor de referência r (valor de saída desejável) com a variável do processo referente a saída y. O erro é dado por

$$e = r - y. \tag{3.1}$$

A ação de controle PID u(t) é então dada através da expressão

$$u(t) = K_p \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + T_d \frac{de}{dt} \right)$$
(3.2)

onde K_p refere-se ao ganho do controlador. T_i é o tempo de integração em minutos, e T_d é a taxa de amostragem. A ação proporcional é implementada através de

$$u_P(n) = K_p e(n). \tag{3.3}$$

A integração é utilizada para que não haja mudanças bruscas na ação integrativa quando ocorrer uma mudança abrupta em y(t) ou em r(t). É utilizado um ajuste não linear da ação integrativa para atenuar o sobressinal. Quanto maior o erro, menor será a ação integrativa. A implementação da ação integrativa é feita através da aproximação trapezoidal

$$u_I = \frac{K_p}{T_i} \sum_{i=1}^n \frac{e(i) + e(i-1)}{2} \Delta t.$$
(3.4)

Devido as variações bruscas em r(t), a ação derivativa é aplicada a y(t), não ao erro e(t), evitando picos derivativos. A expressão seguinte apresenta a ação derivativa utilizada na implementação

$$u_D(n) = -K_p \frac{T_d}{\Delta t} \left(y_f(n) - y_f(n-1) \right).$$
(3.5)

A saída do controlador PID será dada portanto por

$$u(n) = u_P(n) + u_I(n) + u_D(n).$$
(3.6)

A saída do controlador é limitada para a faixa especificada para a saída do controlador da seguinte forma. Se $u(n) \ge u_{max}$ então $u(n) = u_{max}$, e se $u(n) \le u_{min}$ então $u(n) = u_{min}$.

3.1.2 Algoritmo avançado

Este algoritmo usa a saída filtrada e uma ponderação no cálculo do erro e(n). A seguinte fórmula representa o erro usado no cálculo da ação proporcional, integrativa e derivativa

$$e(n) = (r - y_{filtrado}) \left(L + (1 - L) \frac{|r - y_{filtrado}|}{faixa_r} \right).$$
(3.7)

O erro para calculo da ação proporcional é dado por

$$e_b(n) = \left(\beta r - y_{filtrado}\right) \left(L + (1 - L)\right) \frac{\left|\beta r - y_{filtrado}\right|}{faixa_r} \tag{3.8}$$

onde $faixa_r$ define a faixa de valores da referência r, β é um parâmetro de ponderação da referência para dois graus de liberdade e L é um fator de linearidade, este fator produz um ganho não linear e utilizando este parâmetro tem-se o ganho do controlador aumentado de acordo com a magnitude do erro. Se L é igual a 1 o controlador é linear. O fator β quando configurado para um valor menor que um, reduz o sobressinal da resposta de r(t), Intuitivamente, β é um índice da importância da resposta r(t), podendo ter valores de zero a um. Ao se considerar como importante o desempenho da malha, configura-se β para zero. Se é necessário que a variável de processo siga rapidamente r(t), β deve ser igual a 1. A ação proporcional é calculada através de

$$u_P(n) = K_p e_b(n). \tag{3.9}$$

A integração trapezoidal é calculada através de

$$u_I(n) = \frac{K_p}{T_i} \sum_{i=1}^n \left[\frac{e(i) + e(i-1)}{2} \right] \cdot \Delta t \left[\frac{1}{1 + \frac{10e(i)^2}{r(i)^2}} \right].$$
 (3.10)

3.1.3 Sintonia manual de controladores PID

Para efetuar o ajuste dos controladores PID utilizou-se o método de ajuste manual proposto por Jantzen (2007). O procedimento de ajuste manual somente é válido para o caso em que o sistema é estável com um controlador proporcional. O método é apresentado a seguir.

- 1. Remova todas as ações integrais e derivativas, fazendo $T_d=0$ e $1/T_i=0.$
- 2. Incremente o ganho proporcional K_p para obter uma resposta próxima à resposta desejada, ignorando qualquer erro de regime e sobressinal no valor final da saída.
- 3. Incremente ainda mais o ganho proporcional e adicione e ajuste o ganho derivativo T_d , permitindo assim a atenuação do sobressinal
- 4. Incremente o ganho integrativo $1/T_i$ para remover qualquer erro de regime do valor final da saída.
- 5. Repita o passo 3 até que o ganho proporcional K_p seja tão grande quanto possível.

3.2 Controladores fuzzy

O conceito de lógica e conjuntos fuzzy foi apresentado inicialmente por Zadeh (1965). Conjuntos fuzzy envolvem a representação e o trabalho com notações lingüísticas, com limites não definidos de acordo com os conjuntos clássicos. Aplicações de lógica fuzzy espalharam-se através de diferentes áreas, do controle, reconhecimento de padrões a sistemas baseados em conhecimento a visão computacional e inteligência artificial (Pedrycz; Gomide 1998).

Sistemas de inferência fuzzy vêm sendo utilizados em larga escala, principalmente no Japão, tendo como exemplos práticos fábricas de cimento, trem subterrâneos de Sendai, produtos eletrônicos como máquinas de arroz, máquinas de lavar, geladeiras, ar condicionados, aspiradores de pó, câmeras e aparelhos para medição de pressão arterial (Lewis III 1997).

Se controladores PID se mostram inadequados, por exemplo, em plantas de altas ordens, sistemas com grande tempo morto, ou sistemas com modos oscilatórios, o controle fuzzy é uma opção. Sistemas fuzzy tem mais parâmetros de sintonia que controladores clássicos. Sistemas fuzzy são em geral não lineares, ou seja não existe uma equação simples como no caso do PID para representá-lo e é mais difícil analisá-lo matematicamente. Desta forma aproximações são requeridas e a estabilidade é mais difícil de ser garantida. Controladores fuzzy requerem conhecimento de lógica fuzzy e envolvem a escolha arbitrária de funções de pertinência, enquanto controladores PID são fáceis de serem entendidos e fáceis de serem implementados.

Controladores fuzzy consistem de estratégias compostas por regras se-então, o que é fácil para leitura do operador. As regras podem ser construídas a partir do vocabulário contendo palavras do dia a dia como alta, baixo ou aumentando. Além disso, operadores podem adicionar sua experiência diretamente no controlado de forma bastante simples.

Controladores fuzzy podem acomodar muitas entradas e muitas saídas. Regras podem ser executadas em paralelo, implicando uma ação recomendada para cada regra. A lógica fuzzy permite a não especialistas projetar controladores o que pode ser considerada a principal razão do seu sucesso (Jantzen 2007).

3.2.1 Sistemas de inferência fuzzy

Há dois tipos de sistemas de inferência fuzzy: Mamdani e Sugeno. O método de inferência fuzzy de Mamdani é o mais comumente visto na metodologia fuzzy. Proposto por Mamdani em 1975, foi um dos primeiros sistemas de controle construído utilizando a teoria dos conjuntos fuzzy. Este sistema espera que as funções de pertinência de saída sejam conjuntos fuzzy. Já os sistemas do tipo Sugeno podem ser usados para modelar qualquer sistema de inferência no qual as saídas são lineares ou constantes. Este sistema de inferência fuzzy foi introduzido em 1985 e pode também ser chamado de Takagi-Sugeno-Kang.

O processo de inferência fuzzy permite o mapeamento do conhecimento a respeito de um sistema através de regras fuzzy do tipo se-então. Através de um conjunto finito dessas regras pode-se determinar, por intermédio do processo de inferência, o comportamento das variáveis de saída do sistema. As regras associadas ao processo de inferência fuzzy são expressões linguísticas que descrevem a relação entre as variáveis de entrada e a de saída. As regras possuem a seguinte forma:

Se [condição] então [consequência].

em que a parte SE da regra é chamada de premissa e a parte ENTÃO é chamada de consequente.

Estas regras se-então são usadas para formular as condições da lógica fuzzy. Mais formalmente, uma regra fuzzy simples se-então assume a forma: se $x \in A$ então $y \in B$, onde $A \in B$ são valores linguísticos definidos por conjuntos fuzzy nos espaços entrada Xe Y, respectivamente. A parte "se" é chamada de antecedente, que retorna um número entre 0 e 1 e a parte "então" é a conclusão ou consequente, que transfere o conjunto fuzzy B para a variável de saída y. Em geral, a entrada para uma regra se-então é o valor corrente da variável de entrada e a saída é um conjunto fuzzy, o qual é *defuzzyficado*, designando um valor para a saída.

Os principais componentes que formam um sistema fuzzy são fuzzificação, máquina de inferência, base de regras e defuzzificação. A fuzzificação consiste em caracterizar as variáveis de entrada em termos de um conjunto fuzzy. Para fuzzificar uma variável é necessário estabelecer uma relação entre os valores numéricos associados a termos linguísticos de conjuntos fuzzy. A base de regras caracteriza os objetivos e a estratégia de controle utilizada e contém todas as situações possíveis relativas às entradas e saídas. A máquina de inferência processa os dados fuzzy de entrada, junto com as regras, de modo a inferir as ações de saída fuzzy, aplicando um operador de implicação fuzzy e as respectivas regras. O principal operador de implicação fuzzy utilizado é o de Mamdani: dadas duas variáveis linguísticas x e y com valores A e B, respectivamente, a função de pertinência $\mu_{R_{A\to B}}(x, y)$ é obtida por $\mu_{R_{A\to B}}(x, y) = min\{\mu_A(x), \mu_B(y)\}$, onde $R_{A\to B}$ é uma relação de implicação do conjunto A para B. Finalmente, a defuzzificação realiza transformações de ações fuzzy em ações não fuzzy, ou seja, obtém um único valor discreto (Bressan 2007).

Um sistema de inferência fuzzy pode ser descrito através do diagrama de blocos apresentado na Figura 3.1. Os blocos apresentados são detalhados na seqüência.



Figura 3.1: Sistema de inferência fuzzy.

Pré-processamento e pós-processamento: Os blocos de pré e pósprocessamento são externos ao sistema fuzzy, e são responsáveis por condicionar e modificar as entradas e saídas através da adição de ganhos, por exemplo. Antes de aplicar os sinais no sistema fuzzy, deve-se considerar que inicialmente os dados precisam ser processados através de filtragem, ou ainda se considerado o uso de um universo padrão através da adição de ganhos.

- Quantização/Discretização: Como o sistema fuzzy é implementado por meios computacionais, os dados precisam inicialmente serem quantizados e discretizados.
- Normalização: Para que os valores de entrada estejam dentro do úniverso de discurso, um ganho é aplicado a cada valor de tal forma que o valor máximo possível de entrada seja equivalente ao máximo valor presente no universo de discurso.

- Média: Pode-se aplicar um filtro de média móvel na entrada versão digital simplificada de um filtro passa baixas com a finalidade de amenizar o ruído (se presente) na entrada.
- Combinação de várias medidas Diferenciação / Integração: Se a entrada for a variação ou a soma no tempo blocos derivativos e integrativos devem ser adicionados.

Fuzzificação: Representa o primeiro bloco dentro de um sistema fuzzy, este converte cada amostra de entrada em graus de pertinência através da busca/pesquisa de várias funções de pertinência.

Base de regras: Em problemas de controle é usual um sinal de controle baseado em um sinal de erro. O controlador pode utilizar como entrada o erro e a variação do erro. Para simplificar, assume-se que o objetivo do controle fuzzy é regular os processos em torno de uma referência ou *setpoint* prescrito/desejável. A base de regras em interfaces de usuário são em geral apresentadas na forma de uma lista, contendo as funções de pertinências das entradas e para cada condição, as respectivas saídas. No entanto é mais prático representar a base de regras através de uma tabela. Em geral uma base de regras é obtida através da experiência de um especialista em conjunto com o conhecimento de engenharia de controle, podendo ainda ser baseada nas ações de controle do operador, modelo fuzzy do processo (obtido através do modelo inverso do processo) ou ainda obtida através de aprendizado (controlador auto-organizável, neurofuzzy).

Máquina de inferência:A máquina de inferência processa os dados fuzzy deentrada e em conjunto com a base de regras infere o valor da saída fuzzy.

Defuzzificação: O objetivo da defuzzificação é traduzir os conjuntos fuzzy de saída em valores reais ('crisp' em inglês). Existem vários métodos de defuzzificação. A seguir são listados alguns. Em controle o principal método utilizado é a defuzzificação por **centro de área** ou **centro de gravidade**. O valor 'crisp' do centro denotado u_{COG} é apresentado como sendo a abscissa do centro de gravidade do sistema fuzzy resultante. Para sistemas discretos, o centro de gravidade dos 'singletons' é calculado

através de

$$u_{COG} = \frac{\sum_{k} \mu x_k}{\sum_{k} \mu_k} \tag{3.11}$$

onde x_k representam os pontos no universo de discurso. Outro método utilizado é a **média dos máximos** ('Mean of maxima - MOM'). Este método consiste em escolher o ponto do universo de discurso com o mais alto grau de pertinência. Vários pontos de máximo podem existir, portanto é comum utilizar a média de vários máximos. O cálculo é feito através de

$$u_{MOM} = \frac{\sum_{i \in X} x_i}{X}, X = \{i \ tal \ que \ \mu_c(x_i) = \mu_{max}\}$$
(3.12)

onde X é o conjunto de índices i, e $\mu_c(x_i)$ tem como máximo $\mu_m ax$). Outro método é o **bisector de área**, onde é encontrado a abscissa x que particiona a área sobre a função de pertinência em duas áreas de igual tamanho. Para conjuntos discretos, o bisector denotado u_{BOA} é a abscissa x_j que minimiza

$$\left| \sum_{i=1}^{j} \mu_c(x_i) - \sum_{i_{max}}^{i=j+1} \mu_c(x_i) \right|, 1 < j < i_{max}.$$
(3.13)

A complexidade matemática é relativamente alta e pode haver várias soluções (Jantzen 2007).

Em controle em geral são utilizados os seguintes conectivos: Conectivo e ('and'): Mínimo ou produto algébrico Conectivo ou ('or'): Máximo ou soma probabilística $(u_i + u_j - u_i * u_j)$ em conjunto com o complemento 'not'.

A seguir apresenta-se um procedimento de obtenção intuitiva de uma base de regras. Considera-se um sistema fuzzy com as seguintes características: duas entradas, representadas pelo erro e pela variação do erro, três funções de pertinência para cada entrada, três funções de pertinência para a saída. São consideradas todas as condições possíveis para este controlador, para isso faz-se uso da Figura 3.2. Para cada situação, são verificadas as condições de operação e são estabelecidas saídas fuzzy que possibilitem a correção da saída, obtém-se assim a Tabela 3.1.



Figura 3.2: Sinais contendo todas as condições possíveis de entrada necessárias para construir uma base de regras.

Tabela 3.1: Extração de regras				
	e(t) < 0	e(t) = 0	e(t) > 0	
	${\rm Saída}>{\rm Ref}.$	Saída = Ref.	${\rm Saída} < {\rm Ref}.$	
$\frac{de(t)}{dt} < 0$	Erro aumentando	Erro diminuindo	Erro diminuindo	
$\frac{de(t)}{dt} = 0$	Máximo / Mínimo	Máximo / Mínimo	Máximo / Mínimo	
$\frac{de(t)}{dt} > 0$	Erro diminuindo	Erro aumentando	Erro aumentando	

A base de regras poderia ser apresentada através de uma lista, no entanto o modo mais prático é representar as regras através de uma tabela. A Tabela 3.2 apresenta a tabela com a base de regras para o caso considerado.

Tabela 3.2: Base de regras obtida				
	Variação do Erro			
		Negativo	Zero	Positivo
	Negativo	Negativo	Zero	Zero
Erro	Zero	Negativo	Zero	Positivo
	Positivo	Zero	Positivo	Positivo

3.2.2 Análise através de plano de fase

Sistemas de controle fuzzy usualmente operam através de duas variáveis, o erro e a variação do erro. Nestas condições o uso da plotagem destas variáveis no tempo, conhecida também como plano de fase torna-se interessante na análise desta classe de controladores. O plano de fase é um método de análise gráfica limitado a duas dimensões. Uma vantagem desta técnica é que ela pode ser aplicada sem resolver as equações diferenciais do sistema, além disso este método de análise é válido também para sistemas não lineares. A análise através de plano de fase permite obter informações sobre como o erro influencia a saída. Desta forma utilizando esta ferramenta pode-se obter informações de como manipular as funções de pertinência para obter uma resposta desejada.

Trajetória do plano de faseConsidera-se um sistema de segunda ordemautônomo como a seguir

$$\dot{x} = Ax \tag{3.14}$$

 $\operatorname{com} x = [x_1 \ x_2]^T$ vetor de estado.

A representa a matriz do sistema. Um sistema autônomo é um sistema sem entradas. Geometricamente, as variáveis $x_1 e x_2$ podem ser plotadas em um espaço bidimensional chamado plano de fase. A solução no tempo de x(t) para (3.14), dado um valor inicial x(0) do vetor de estado, é uma curva no plano de fase com x_1 no eixo $x e x_2$ no eixo y. A curva é chamada trajetória de fase.

Ponto de equilíbrio Se o sistema converge para um ponto de equilíbrio a partir de algum estado inicial, o equilíbrio é caracterizado pela ausência de movimento no plano de fase.

Se uma matriz A é não singular (determinante diferente de zero), então a origem x = 0 é um ponto de equilíbrio. De outra forma, podem existir vários pontos de equilíbrio ao longo de uma linha que passa pela origem. A razão de x_1)por x_2 descreve a forma da trajetória de fase, desde que

$$\frac{\dot{x_2}}{\dot{x_1}} = \frac{\frac{dx_2}{dt}}{\frac{dx_1}{dt}} = \frac{dx_2}{dx_1}$$
(3.15)

A curva S num dado ponto (x_1, x_2) é obtida através de

$$S = \frac{dx_2}{dx_1} \tag{3.16}$$

Geometricamente, o vetor equações diferenciais (3.14) representam a taxa de mudança

 \dot{x} no tempo t do estado x(t) do sistema. Esta visão geométrica permite visualizar o plano de fase como um campo vetorial.

Estabilidade Para que o sistema seja estável, o o ângulo φ entre o vetor x e o vetor velocidade \dot{x} deve ser maior que 90 graus assim como a velocidade deve ter um componente que aponta para a origem. Matematicamente, isso pode ser expresso por

$$\frac{x^T \dot{x}}{|x||\dot{x}|} = \cos\varphi < 0 \tag{3.17}$$

Desde que $\dot{x} = Ax$, a condição deve ser satisfeita $x^T A x < 0$, que é equivalente ao critério usual em que todos os autovalores de A devem ter parte real negativa.

A partir de um instante particular (x_1^*, x_2^*) , o vetor de estado x permite encontrar a direção do movimento $(\dot{x}_1^*, \dot{x}_2^*)$, desde que tomando um número de pontos discretos (x_1^*, x_2^*) distribuídos no plano de fase de tal maneira, que plotando o vetor velocidade em cada ponto, o projetista pode adquirir uma visão geral do comportamento do sistema na região considerada.

A Figura 3.3 apresenta diferentes tipos de comportamento ao redor do ponto de equilíbrio de várias matrizes A.

- Nó: Se todos os autovalores da matriz A são reais e negativos, o ponto de equilíbrio é um nó estável. x(t) converge para 0 em um decaimento exponencial. Se ambos os autovalores são positivos, o equilíbrio é um nó instável. x(t) diverge exponencialmente. Desde que os autovalores sejam reais, não existem oscilações no movimento. Esta condição é apresentada na primeira linha da Figura 3.3.
- Foco: Se todos os autovalores da matriz A são complexos conjugados, com parte real negativa, o equilíbrio é um foco estável. O vetor de estado x(t) converge para 0 de forma oscilatória. A trajetória no plano de fase, gira ao redor da origem uma ou mais vezes, ao redor de um nó estável. Se ambos os autovalores tem parte real positiva, o equilíbrio é um foco instável. x(t) diverge de forma oscilatória. Esta condição é apresentada na segunda linha da Figura 3.3.
- Centro: Se os autovalores da matriz A são complexos conjugados, com parte real nula, o equilíbrio é um centro, x(t) gira ao redor do ponto de equilíbrio, sem convergir ou divergir. No tempo esta situação representa uma oscilação sustentada,

um sistema marginalmente estável. Esta condição é apresentada na terceira linha da Figura 3.3 nas colunas 1 e 2.

Sela: Se os autovalores da matriz A são reais, mas um é negativo e o outro é positivo, o equilíbrio é descrito por uma sela. Devido aos autovalores positivos instáveis, quase todas as trajetórias divergem para o infinito. Esta situação é descrita nas colunas 3 e 4 da terceira linha da Figura 3.3.

Os autovalores determinam completamente o tipo de ponto de equilíbrio, e o plano de fase fornece características do comportamento ao redor do ponto de equilíbrio.



Figura 3.3: Pontos de equilíbrio (Jantzen 2007).

3.2.3 Projeto de controladores fuzzy

Controladores fuzzy são em geral não lineares, e usualmente construídos através de tentativa e erro. Jantzen (2007) introduz uma metodologia que utiliza a teoria clássica de controle para explicar o comportamento de sistemas controlados usando sistemas fuzzy. Estas idéias são também utilizadas neste trabalho como ferramentas no projeto de controladores fuzzy.

Controladores fuzzy lineares

Existem três fontes de não linearidade em um controlador fuzzy:

- Base de regras, posição, número e forma das funções de pertinência.
- Máquina de inferência: Uso de conectivos não lineares, como max e min.
- Método de defuzzificação.

E possível construir uma base de regras com característica linear: O universo de discurso precisa ser amplo o suficiente garantindo que as entradas estejam dentro dos limites, evitando assim saturação, além disso a soma dos valores das funções de pertinência sobrepostas para qualquer valor deve ser igual a um. Isso pode ser garantido utilizando conjuntos triangulares que cortem seus vizinhos sempre em $\mu = 0, 5$. Seus picos devem desta forma estar eqüidistantes. Qualquer entrada deve pertencer a duas funções pertinência simultaneamente.

O número de termos em cada família deve determinar o número de regras, desde que a base de regras consista da combinação 'and' de todos os termos para garantir que todas as condições de entradas sejam tratadas. Funções de pertinências de saída devem consistir de singletons regularmente espaçados. Como conectivo 'and' deve-se utilizar o produto, e soma probabilística para o conectivo 'ou'.

Em resumo, para fazer com que um sistema fuzzy representado por u = F(E, CE)seja equivalente a u = E + CE, deve-se satisfazer as seguintes condições:

- 1. Utilizar funções triangulares para as entradas com cruzamento em $\mu = 0, 5$.
- Construir uma base de regras contendo todas as combinações possíveis de premissas.
- Uso de singletons para funções de pertinência da saída, posicionado na posição referente a soma das posições dos picos dos conjuntos de entrada.

3.2.4 Topologias de controladores fuzzy

Algumas topologias de controladores fuzzy são apresentadas a seguir.

Controlador fuzzy P

Um controlador proporcional discreto é definido por

$$u(n) = K_p e(n).$$

O controlador proporcional fuzzy apresentado na Figura 3.4 atua sobre o erro e(n) e fornece o sinal de controle U(n). Possui portanto dois ganhos para ajuste, GE e GU. O sinal de controle U(n) no instante n é geralmente uma função não linear da entrada e(n)

$$U(n) = f(GE \times e(n)) \times GU \tag{3.18}$$

em que f denota o mapeamento da base de regras, que é geralmente não linear. Fazendo uso de um sistema fuzzy linear, podemos aproximar

$$f(GE \times e(n)) \approx GE \times e(n). \tag{3.19}$$

Substituindo (3.19) em (3.18) tem-se

$$U(n) = GE \times e(n) \times GU = GE \times GU \times e(n).$$
(3.20)

Comparando (3.20) com o controlador proporcional (3.18), chega-se a

$$GE \times GU = K_p. \tag{3.21}$$



Figura 3.4: Controlador fuzzy proporcional.

Controlador fuzzy PD

Controladores proporcionais podem levar algum tempo até que a mudança do sinal de controle possa ser observada na saída da planta, desta forma o controlador poderá tardiamente corrigir o erro da planta. Ações derivativas ajudam a predizer o erro futuro e melhorar a estabilidade em malha fechada. A Figura 3.6 apresenta a topologia de um controlador PD fuzzy. O sinal de controle U(n) no instante n é geralmente uma função não linear das entradas e(n) e $\frac{de(n)}{dt}$. Controladores proporcionais derivativos (PD) discretos podem ser equacionados como se segue:

$$u(n) = K_p \left(e(n) + T_d \frac{e(n) - e(n-1)}{Ts} \right).$$
 (3.22)

O segundo termo entre parenteses é proporcional a estimação do erro T_d segundos a frente do instante de tempo n, ou seja é obtido uma estimação linear por extrapolação da linha conectando e(n-1) e e(n). Quando T_d é gradualmente incrementado é possível amortecer oscilações. Se T_d é incrementado muito o a resposta ao degrau da planta em malha fechada pode oscilar novamente. A entrada do sistema fuzzy proporcional derivativo (FPD) é e(n) e $\dot{e}(n)$, onde

$$\dot{e}(n) = \frac{e(n) - e(n-1)}{T_s}$$
(3.23)

e a saída é

$$U(n) = f(GCE \times e(n), GCE \times \dot{e}(n)) \times GU.$$
(3.24)

A função f representa o mapeamento referente a base de regras. Considerando o caso do sistema fuzzy linear, pode-se aproximar

$$f(GE \times e(n), GCE \times \dot{e}(n)) \approx GE \times e(n) + GCE\dot{e}(n)$$
(3.25)

Substituindo (3.25) em (3.24), tem-se

$$U(n) = (GE \times e(n) + GCE \times \dot{e}(n)) \times GU = GE \times GU \times \left(e(n) + \frac{GCE}{GE}\dot{e}(n)\right).$$
(3.26)

Comparando (3.26) com a equação que representa o controlador clássico PD, tem-se as relações

$$GE \times GU = K_p, \frac{GCE}{GE} = T_d$$
 (3.27)

O controlador fuzzy PD pode ser aplicado quando o controle proporcional é inadequado. O fator derivativo reduz o sobressinal mas torna o controlador sensível a ruído e a mudanças bruscas de referência.

O controlador fuzzy PD pode ser analisado através de uma plano de fase. O controlador tem apenas duas entradas, o que o torna ideal para plotar em duas dimensões. O ponto de partida é o modelo espaço de estado a seguir:

$$\dot{x} = Ax + bu \tag{3.28}$$

$$y = Cx + du. \tag{3.29}$$

O controlador fuzzy é em geral não linear, e o sinal de controle U é o resultado de uma função F do erro e da mudança no erro,

$$U = F(E, CE)GU \tag{3.30}$$

O sistema a malha fechada com a lei de controle (3.30) pode ser descrito por

$$\dot{x} = Ax + bF(E, CE)GU \tag{3.31}$$

Deve-se investigar como o componente bF(E, CE)GU afeta o campo vetorial do plano de fase.

Análise pelo plano de fase Com duas entradas e uma saída a base de regras é o relacionamento entre erro e variação do erro no lado da premissa e a ação de controle no lado da saída, retratados através de uma superfície de controle.

Sistemas fuzzy PD possuem duas entradas e uma saída. Uma base de regras que relaciona as entradas referentes ao erro e a variação do erro e a ação de controle pode ser representado também através de uma superfície de controle. A superfície de controle apresenta os sinais $E \ e \ CE$ depois dos ganhos $GE \ e \ GCE$ em função da saída u antes do ganho GU. As variáveis E e CE configuram um plano a partir do qual escalonando-se por GE e GCE pode-se obter um plano de fase entre $e \ e \ e$ respectivamente. Através da resposta dinâmica do sistema fuzzy, um conjunto de pontos referentes ao erro E(t)e a variação do erro CE(t) podem ser plotados para formar uma trajetória de fase. O plano (E, CE) é limitado pelos universos de discurso das entradas, portanto a trajetória irá sempre ficar dentro destes limites. Em um controlador baseado em uma tabela de regras, a trajetória aponta para células na tabela de controle referente ao controlador. Tem-se três variantes do plano de fase: (1) o original, (x1, x2), referente ao plano entre duas variáveis de estado,(2) (e, \dot{e}) plano entre o erro e a sua derivada e (3) (E,CE) plano correspondente a uma tabela de controle. Todos os três são equivalentes, podendo ser transformados em outros através de transformações lineares baseadas nas relações

$$e = Ref - x_1 \tag{3.32}$$

$$E = GE \times e \tag{3.33}$$

$$GE = GCE \times \dot{e} \tag{3.34}$$

A Figura 3.5 apresenta uma típica resposta a um degrau com sobressinal. São apresentadas através de pontos quatro estágios típicos. Estes estágios são detalhadas a seguir.

- Estágio 1: E > 0, CE < 0. Inicialmente o erro é grande e positivo, e a saída da planta move-se para a referência. O erro E = GE × e = GE × (Ref − y) é positivo(para GE > 0) tão grande quanto a saída é abaixo da referência. Em seguida, a variação do erro é positiva (para GCE >0), enquanto a saída da planta está abaixo da referência. Adiante, a variação do erro é negativa, desde que ė = −ý enquanto a saída da planta é incrementada. Esta situação corresponde ao quarto quadrante do plano de fase. A trajetória de fase espirala no sentido horário.
- Estágio 2: E < 0, CE < 0. A saída da planta possui sobressinal e move-se para longe da referência. O erro é negativo, desde que a saída da planta esteja acima da referência. Em seguida, a variação do erro é negativa, desde que a saída da planta esteja aumentando. Esta situação corresponde ao terceiro quadrante do plano de fase.
- Estágio 3: E < 0, CE > 0 A saída da planta está retornando para a referência.
 O erro é negativo, desde que a saída da planta esteja maior que a referência.
 Adiante a mudança no erro é positiva, e a saída da planta está diminuindo. Esta situação corresponde ao segundo quadrante do plano de fase.
- Estágio 4: E > 0, CE > 0 A saída da planta está se afastando da referência. O erro é positivo e a saída da planta está abaixo da referência. Em seguida, a mudança no erro é positiva, e a saída da planta está decrescendo. A situação corresponde ao primeiro quadrante do plano de fase.



Figura 3.5: Regiões do plano de fase (Jantzen 2007).



Figura 3.6: Controlador fuzzy proporcional derivativo.

Cada estágio corresponde a um quadrante no plano de fase, e a trajetória da resposta pode ser afetada ou moldada por um conjunto de regras locais em cada quadrante. Considere a seguinte base de regras para um controlador PID:

- 1. Se erro é Neg e mudança no erro é Neg então saída é NB
- 2. Se erro é Neg e mudança no erro é Zero então saída é NM
- 3. Se erro é Neg e mudança no erro é Pos então saída é Zero
- 4. Se erro é Zero e mudança no erro é Neg então saída é NM
- 5. Se erro é Zero e mudança no erro é Zero então saída é Zero

- 6. Se erro é Zero e mudança no erro é Pos então saída é PM
- 7. Se erro é Pos e mudança no erro é Neg então saída é Zero
- 8. Se erro é Pos e mudança no erro é Zero então saída é PM
- 9. Se erro é Pos e mudança no erro é Pos então saída é PB

A regra um refere-se ao erro negativo e variação do erro negativa, essa é uma regra para o estágio 2 ou acima. Um projetista pode ajustar o valor de negativo grande (NB) para conseguir ajustar o controle na região de influência referente ao terceiro quadrante do plano de fase. De forma similar para as outras regras: a regra 3 afeta o terceiro estágio e refere-se ao segundo quadrante; a regra 7 afeta o primeiro estágio e refere-se ao quadrante 4; a regra 9 afeta ao estágio 4 e refere-se ao primeiro quadrante e a regra 5 afeta o centro. As regras remanescentes referem-se as regiões nos limites entre os quadrantes. Na Figura 3.5 a trajetória de fase (direita acima) é a projeção da trajetória na superfície de controle (direita abaixo) no plano de fase. Por comparação a diagonal na direção noroeste-sudeste do plano de fase corresponde ao sinal de controle nulo, e os pontos acima desta diagonal correspondem a sinais de controle positivos, enquanto os pontos abaixo correspondem ao s sinais de controle negativo. A diagonal pode ser considerada uma linha de chaveamento, isso é o sinal do sinal de controle muda quando a trajetória atravessa a linha. Se a trajetória termina em um centro (origem), a planta está na referência e não está se movendo; isto é, está em equilíbrio. Mas a planta não precisa estar necessariamente no centro: em regime permanente o erro pode resultar em um ponto no eixo CE = 0 fora do centro.

Forma da superfície Se as funções de pertinência da entrada consistem das funções de pertinência Pos, Zero e Neg, então a combinação completa de duas entrada (erro e variação do erro) consiste em $3 \times 3 = 9$ regras. A forma dos conjuntos afetam a dinâmica do sistema em malha fechada. As Figuras 3.7 e 3.8 apresentam exemplos de quatro tipos de superfícies. Três superfícies não lineares são versões suaves de não linearidades como saturação, zona morta e quantizadores, para apenas duas dimensões.

• Linear: Uma superfície linear apresentada nas Figuras 3.7 (a) e (b) resultantes da base de regras apresentada anteriormente, utilizando apenas as regras 1, 3, 7 e 9, com funções de pertinência triangulares. A superfície é equivalente a soma E+CE. Desde que a superfície seja equivalente a um somatório o controlador é similar a um controlador PD crisp

- Saturação: A superfície de saturação apresentada nas Figuras 3.7 (c) e (d) é construída utilizando apenas as regras 1, 3, 7 e 9, juntas com as funções de pertinência apresentados na em (d). Nota-se que a ausência da regra central (número 5). Quando o erro está próximo de zero, o seu incremento irá aumentar o sinal de controle; mas quando o erro alcança certo limite, um incremento no erro causa pouco ou nenhum incremento no sinal de controle. O mesmo pode ser dito para a mudança no erro. A superfície tem como forma degraus representando altos ganhos, próximos do centro.
- Zona morta: A superfície zona morta apresentada nas Figuras 3.8 (a) e (b) é construída utilizando todas as regras. Quando o erro é próximo a zero o sinal de controle é pouco afetado até mesmo se o erro excede um determinado valor.
- Quantizador: A superfície quantizador apresentada nas Figuras 3.8 (c) e (e) é uma mistura das duas superfícies anteriores. Ela é construída usando todas as nove regras, com funções de pertinência não lineares. Ela tem um platô próximo ao centro e outros platôs em vários lugares.

Controlador fuzzy PD+I

No caso discreto tem-se a seguinte função definida para o controlador PID:

$$u(n) = K_p\left(e(n) + \frac{1}{T_i}\sum_{j=1}^n e(j)T_s + T_d\frac{e(n) - e(n-1)}{T_s}\right).$$
 (3.35)

O controlador PD+I fuzzy consiste em um bloco PD com um somador na saída que acresce a esta uma entrada integrativa. Para o controlador fuzzy apresentado na Figura 3.9, tem-se

$$U(n) = \left[f(GE \times e(n), GCE \times \dot{e}(n)) + GIE \sum_{j=1}^{n} e(j)T_s \right] \times GU$$
(3.36)

e para o caso onde f é linear

$$U(n) = \left[GE \times e(n) + GCE \times \dot{e}(n) + GIE \sum_{j=1}^{n} e(j)T_s \right] \times GU$$
$$= GE \times GU \times \left[e(n) + \frac{GCE}{GE} \times \dot{e}(n) + \frac{GIE}{GE} \sum_{j=1}^{n} e(j)T_s \right]$$
(3.37)

Comparando com (3.35), tem-se

$$GE \times GU = K_p,$$

$$\frac{GCE}{GE} = T_d \quad e$$

$$\frac{GIE}{GE} = \frac{1}{T_i}$$
(3.38)



Figura 3.7: Superfície linear (a), e superfície saturada (c) com as funções de pertinência de entrada que as geraram (Jantzen 2007).



Figura 3.8: Superfícies com zona morta (a) superfície quantizadora (c) e respectivas funções de pertinência que as geraram (Jantzen 2007).



Figura 3.9: Controlador fuzzy proporcional derivativo integrativo.

Análise pelo plano de fase O integrador aumenta a ordem do sistema em malha fechada, desta forma são necessárias plotagens com três ou mais dimensões para descrever o sistema. Novamente o ponto de partida é um modelo linear no espaço de estados (3.29). O controlador refere-se nesse caso a uma função da integral do erro IE, e substituindo

$$U = (F(E, CE) + IE) \times GU \tag{3.39}$$
em (3.29) tem-se

$$\dot{x} = Ax + b(F(E, CE) + IE) \times GU \tag{3.40}$$

Pode-se a princípio desenhar o campo vetorial no plano (e, \dot{e}) , mas há dependência da ação integrativa IE. Duas estratégias são possíveis são descritas a seguir.

- Plotagem do campo vetorial: Faça IE = k em (3.40), onde k é uma constante arbitrária, assim como 0, faça uma estimativa do valor médio de IE(t) no tempo t, ou uma estimativa do valor final de IE(t) A plotagem bidimensional do campo vetorial pode então ser aproximada. No entanto para uma resposta no tempo particular, a trajetória de fase e o valor de IE(t) é conhecido apenas nos instantes amostrados, e o erro pode ser calculado e avaliado. Geometricamente, a plotagem é uma seção do campo vetorial tridimensional paralelo ao plano de fase. A estratégia acarreta perda da acuracidade, mas provê uma visão geral. (e, \dot{e})
- Plotagem da trajetória dos componentes: Para cada passo de tempo na resposta, desenha-se os componentes vetoriais. A plotagem irá mostrar o efeito do vetor de controle localmente ao longo da trajetória. Esta estratégia acarreta em perda na visão geral, mas provê acuracidade completa localmente.

Ajuste manual do controlador fuzzy PD+I O procedimento de ajuste manual somente é válido para o caso em que o sistema é estável com um controlador proporcional.

- 1. Ajustar GE (ou GCE) passo a passo tentando explorar toda a faixa do universo de discurso de E (ou CE).
- 2. Remover as ações integrativas e a ação derivativa, configurando GIE = GCE = 0. Ajuste GU até conseguir a resposta desejada a menos de sobressinal ou erro na saída em regime permanente.
- 3. Incrementar os ganhos proporcionais por meio de GU, e a juste o ganho derivativo por meio de GCE para minimizar o sobressinal.
- Ajustar o ganho integrativo por meio de GIE para remover qualquer erro da saída em regime.
- 5. Repetir o passo 3 até obter GU tão grande quanto possível

Controlador fuzzy incremental

Um controlador incremental utiliza-se de um integrador para adicionar uma variação no sinal ao sinal de controle corrente. Este é o análogo ao controlador PI clássico:

$$u(n) = u(n-1) = \Delta u(n)T_s \tag{3.41}$$

e, portanto,

$$\Delta u(n) = K_p \left(\frac{e(n) - e(n-1)}{T_s} + \frac{1}{T_i} e(n) \right).$$
(3.42)

O controlador fuzzy incremental é apresentado na Figura 3.10. Nota-se que esta topologia possui praticamente a mesma configuração do controlador PD fuzzy exceto pela adição do integrador. A parte integrativa do controlador fuzzy discreto pode ser aproximada por

$$U(n) = \sum_{j=1}^{n} (cu(j) \times GCU \times T_s)$$

=
$$\sum_{j=1}^{n} (f(GE \times e(j), GCE \times \dot{e}(j)) \times GCU \times T_s).$$
(3.43)

Considerando f aproximadamente linear, chega-se a

$$U(n) \approx \sum_{j=1}^{n} (GE \times e(j) + GCE \times \dot{e}(j)) \times GCU \times Ts$$

$$= GCU \times \sum_{j=1}^{n} \left[GE \times e(j) + GCE \times \frac{e(j) - e(j-1)}{T_s} \right] \times T_s$$

$$= GCU \times \left[GE \times \sum_{j=1}^{n} e(j) \times T_s + GCE \times \sum_{j=1}^{n} (e(j) - e(j-1)) \right]$$

$$= GCE \times GCU \times \left[\frac{GE}{GCE} \sum_{j=1}^{n} (e(j) \times T_s) + e(n)) \right].$$
(3.44)

Por comparação

$$GCE \times GCU = K_p \tag{3.45}$$

$$\frac{GE}{GCE} = \frac{1}{T_i}.$$
(3.46)



Figura 3.10: Controlador fuzzy proporcional incremental.

3.2.5 Ajuste das funções de pertinência

Uma possibilidade de ajuste é o posicionamento dos centros das funções de pertinência. Pode-se por exemplo utilizar um espaçamento pequeno entre os centros próximos a origem e espaçamentos maiores para funções distantes da origem. Considere que os centros das funções de pertinência possam ser representados através de um vetor e que cada centro esteja indexada através de um índice i, referente a posição no vetor. Pode-se utilizar funções não lineares, para obter os centros, como por exemplo

$$c_i = k \times sign(i)i^2 \quad \text{ou} \tag{3.47}$$

$$c_i = k \times 5i^3 \tag{3.48}$$

onde c_i é o centro referente à função de pertinência i.

O efeito do uso deste tipo de espaçamento pode ser interpretado da forma seguinte: se o erro e a variação do erro são grandes, a saída será também muito grande, no entanto se o erro ou variação do erro são pequenos o sistema fuzzy fornecerá um sinal também pequeno como saída. Isto permite que o sistema fuzzy apresente grande robustez a grandes perturbações (Passino; Yurkovich 1997).

A resposta de um sistema fuzzy pode ser modificada através da manipulação das funções de pertinência. Para ilustrar o efeito desta manipulação, considere um sistema fuzzy com a seguinte base de regras:

- 1. Se entrada é Negativa então a saída é Negativa
- 2. Se entrada é Zero então a saída é Zero
- 3. Se entrada é Positiva então a saída é Positiva.

A Figura 3.11 apresenta o mapeamento entrada-saída para diversas configurações de funções de pertinência. Este mapeamento mostra a forma como a saída é modificada de acordo com a forma, a posição e o número das funções de pertinência das entradas. Este mapeamento fornece uma ferramenta para a escolha e manipulação das funções de pertinência das entradas com o objetivo de obter uma resposta desejada para um sistema fuzzy. A curva pontilhada corresponde ao caso linear. Pode-se tirar algumas



Figura 3.11: Mapeamento entrada-saída de controladores proporcionais com diferentes configurações de funções de pertinência (Jantzen 1999).

conclusões para cada caso:

- Triangular: Ganho varia, a saída não utiliza todo o universo de discurso, e o ganho local sempre igual ou menor que o ganho do controlador linear.
- Singleton: Caso linear, em que a saída é mapeada em todo o seu universo de discurso da saída.
- 3. Trapezoidais: apresenta uma zona morta e saturação, aumentando a largura do topo do trapézio há aumento da região plana da saída. A diminuição da sobreposição entre vizinhos resultam em aumento da inclinação.
- 4. Gaussiana: É possível suavizar a resposta da saída substituindo as funções de pertinência por funções suaves como gaussianas.

- Adição de mais funções de pertinência: Deixa a resposta chanfrada aproxima-se da resposta linear.
- Através da manipulação dos conjuntos é possível variar o ganho controladamente em função do valor da entrada.

Isto mostra que é possível controlar a variação do ganho. O uso de singletons como saída torna isso mais fácil além de ser computacionalmente mais simples. As regiões planas apresentadas em alguns casos apresentam baixa sensibilidade a mudanças, como fato positivo a sensibilidade a ruído é baixa quando o processo está próximo da referência. Algo que deve ser considerado é o fato de que, caso o processo seja instável é necessário aumentar o ganho ao redor da origem (Jantzen 2007).

3.2.6 Ajuste dos ganhos de entrada e saída

Sistemas com altas taxas de amostragem podem apresentar alta sensibilidade ao ruído, mas, é possível compensar isso através do aumento do ganho GCE. A seguir são listadas as principais características inerentes aos ganho de entrada e saída, e como isso pode ajudar no refinamento do controlador.

- GE: A o ajuste deste parâmetro deve maximizar o uso do universo de discurso. Em controladores fuzzy PD FPD afeta ganhos proporcionais e derivativos. A escolha de GE tão grande quanto possível reduz problemas com ruído. Em controladores fuzzy Proporcionais Incrementais, a escolha de GE grande torna o sistema menos estável (aumenta o ganho integrativo). Em controladores fuzzy PD+I, o aumento de GE melhora o sistema ao custo do aumento do ganho integrativo
- GCE: Também deve ser ajustado de tal forma que seja maximizado o uso do universo de discurso. Em controladores fuzzy PD GCE deve ser tão pequeno quanto possível para evitar problemas com ruído. Também pode ser utilizado para aumentar o ganho derivativo sem afetar o ganho proporcional. O aumento de *GCE* diminui a ação integrativa em controlador fuzzy Incrementais e incremente o ganho proporcional, deve-se neste caso ajustar GCE para um valor tão grande quanto possível para preservar a estabilidade. Em controladores fuzzy PD+I, o aumento de GCE também aumenta o ganho derivativo, devendo portanto ser um valor tão pequeno quanto possível.

 GCU/GU: Afetam o ganho proporcional, deve ser tão grande quanto possível sem criar muito sobressinal, se pequeno o sistema pode apresentar-se lento, se o valor de GCU/GU for muito grande, o sistema pode apresentar-se instável.

Capítulo 4

Descrição e acionamento do protótipo do sistema de aplicação de herbicidas

Neste trabalho é utilizado um protótipo de aplicação de herbicidas construído pela Enalta Inovações Tecnológicas para Agricultura. O projeto do protótipo baseou-se em uma prévia pesquisa de produtos comerciais existentes como já apresentados na Tabela 2.1. A seguir o protótipo é descrito e são detalhados os circuitos de acionamento a serem utilizados em conjunto com o protótipo.

4.1 Descrição do protótipo

Na Figura 4.1 é apresentado um diagrama descrevendo o protótipo utilizado pela Enalta. A saída do protótipo tem uma barra de aplicação onde estão presentes os bicos aplicadores subdividida em diversas seções, que podem ser controladas individualmente através do uso de válvulas. Os componentes do sistema são apresentados a seguir:

Tanque Reservatório onde a calda (herbicida diluído) é armazenada. As características de volume do tanque e comprimento da barra dependem das condições de aplicação, a região e o volume de herbicida a ser aplicado. **Registro** Chave hidráulica que permite o bloqueio/desbloqueio de um duto.

Filtro Dispositivo responsável pela filtragem da saída do tanque.

Bomba hidráulica Dispositivo responsável por gerar uma diferença de pressão gerando um fluxo. A bomba presente no protótipo é uma bomba de pistão com vazão de $104 \ l/min$. A Figura 4.2 apresenta a bomba hidráulica utilizada a qual apresenta as seguintes características: Modelo BP 105 do fabricante Comet com vazão máxima de 104 l/min - 20 bar e velocidade de 550 rpm. O fluxo transmitido por esse tipo de bomba não é perfeitamente contínuo, pois contém oscilações devido ao seu princípio de funcionamento.

Válvula de alívio Válvula usada como um agente protetor. Se a diferença de pressão entre seus terminais assume determinado valor, muda de estado (aberta para fechada, ou de fechada para aberta).

Válvula reguladora Dispositivo responsável por controlar o fluxo através do controle da abertura pelo qual passa o fluído. A válvula de regulagem utilizada é esférica e permite o controle de vazões de 0 a 102L/min com tempo de 12s entre o fechamento total e a abertura total. O modelo da válvula encontrada no protótipo é o AA(B)344AE-2RL, produzido pela Teejet, e suporta uma vazão de 102 l/min a uma queda de pressão de 5 bar. Esta válvula consegue ir do estado totalmente fechado para o estado totalmente aberta em 12 s. A válvula reguladora presente no protótipo é apresentada na Figura 4.3.

Válvula de seção Válvula solenóide biestável que permite o desligamento/ligamento das seções da barra de aplicação individualmente. O tempo entre abertura e fechamento dessa válvula é de 0,75s. A válvula solenóide presente no protótipo é apresentada na Figura 4.3.



Figura 4.1: Diagrama apresentando o sistema completo de aplicação de herbicidas (Bizari et al. 2003-2005).



Figura 4.2: Bomba hidráulica presente no protótipo (Bizari et al. 2003-2005).



Figura 4.3: Válvula reguladora (esquerda) e válvula de seção (direita) presentes no protótipo (Bizari et al. 2003-2005).

Fluxômetro Dispositivo responsável pela medida de vazão em um duto. O fluxômetro utilizado no protótipo faz a medida da vazão através de uma turbina presente no fluxômetro gerando um sinal elétrico com uma freqüência proporcional a esta vazão. Em geral fluxômetros fornecem a medida de vazão através de uma pressão diferencial, como apresentado em Garcia (2005). Para água, a saída do fluxômetro presente no protótipo gera 650 pulsos / litro. Deve-se ainda considerar que a densidade da calda influência na leitura do sensor de fluxo como avaliado por Bizari et al. (2003-2005).

4.1.1 Velocidade do trator e vazão de referência

Outro parâmetro importante a ser considerado é a velocidade do trator, utilizada no cálculo do valor de referência de fluxo, calculada a partir do valor pontual da taxa de aplicação obtida através de um mapa de aplicação em conjunto com um sistema de posicionamento e das características do produto a ser aplicado, como concentração da calda, fluxo de calda possível de ser aplicado, e características do sistema de aplicação, como largura da barra de aplicação e espaçamento entre os bicos.

Será utilizado um simulador de velocidade confeccionado para reproduzir sinais similares aos provenientes de sensores de proximidade, geralmente colocados junto a roda do pulverizador. A saída deste sensor é um sinal retangular com freqüência proporcional à freqüência de rotação da roda do sistema de aplicação de herbicidas. O sinal do simulador é uma onda quadrada de amplitude 12V e freqüência variando entre 0 e 10Hz o qual reproduz velocidades de 0 a 20 Km/h (Bizari et al. 2003-2005).

O valor da vazão desejada no sistema é calculado como se segue. Para uma barra composta por n seções, sendo b bicos por seção, com espaçamento entre bicos e. tem-se que para varrer 1 ha (10000 m^2) o pulverizador deve percorrer k metros:

$$k = \frac{10000}{n \times b \times e}.\tag{4.1}$$

A uma velocidade v_t em km/h, a velocidade v em m/min dada por $v = v_t 1000/60$ o pulverizador em k/v h entrega herbicidas a uma vazão igual a

$$Q = \frac{T/v}{k}.\tag{4.2}$$

4.2 Aquisição e acionamento do protótipo

Com a finalidade de obter os parâmetros do protótipo e efetuar o seu acionamento, será utilizado um módulo de aquisição da National Instruments USB NI-6008 em conjunto com um microcomputador móvel. Para compatibilizar os sinais entre o protótipo e o sistema de aquisição da National Instruments, e permitir o acionamento das válvulas de seção e da válvula reguladora uma interface eletrônica foi confeccionada. Os circuitos de acionamento das valvulas utilizados são circuitos usuais e permitiram a conexão do módulo USB em conjunto com o protótipo permitindo ainda fazer testes especificos de acordo com a necessidade com a agulha quanto no prototipo, assim como ensaios especificos e acionamento do prototipo.

Após a sua confecção a mesma foi testada utilizando o aplicativo LabView 7.1^1 e um gerador de sinais para simulação das entradas.

A Figura 4.4 apresenta todas as conexões entre o módulo USB, uma placa contendo a interface elétrica entre o módulo e o protótipo propriamente dito.



Figura 4.4: Conexões entre o módulo USB e o protótipo do sistema de aplicação de herbicidas.

4.2.1 Medida de vazão e velocidade

A saída do fluxômetro e do simulador de velocidade são apresentados na forma de trem de pulsos. Os valores reais da vazão e velocidade são obtidos através da medida de freqüência deste trem de pulsos. Várias formas de se medir a freqüência de um sinal digital são apresentados a seguir:

¹da National Instruments.

• Fazendo uso de um contador.

A diferença entre o número de contagens entre o final e o inicio de um determinado intervalo de tempo permite calcular a freqüência. É um método melhor para altas freqüências. A resolução é determinada pelo tempo entre as contagens, assim para uma resolução de X Hz é necessário esperar 1/X s entre as contagens do contador.

- Medindo o intervalo de tempo entre dois pulsos consecutivos. É ideal para baixas freqüências. A taxa de amostragem determina a resolução da medida.
- Utilizando o VCO² e simplesmente fazendo a leitura da freqüência do sinal de forma indireta através de um VCO.

As faixas de freqüência consideradas foram de no máximo 10 Hz para a velocidade (compatível com simulador de velocidade) e 1 kHz para o fluxômetro (compatível com o cálculo de vazão apresentado na Seção 4.1.1 para o trator guiado a uma velocidade de 20 km/h).

O módulo USB NI-6800 possui apenas um contador que permite a contagem de sinais com freqüências de até 100 MHz. Desta forma atribuiu-se a entrada do contador ao fluxômetro e considerou-se como entrada para o sinal de velocidade uma entrada digital. A implementação dos aplicativos será feita em LabView.

Inicialmente, para a medida da velocidade do trator mediu-se a freqüência através da medida de tempo entre duas bordas de subida consecutivas, no entanto, como as medidas não são feitas em tempo real o valor medido apresentou oscilações. Optou-se desta forma por efetuar múltiplas contagens e através da medida do intervalo de tempo entre n contagens obter o valor de freqüência como segue: através de

$$f_{vmedida} = \frac{ncontagens}{t(k) - t(k-1)}.$$
(4.3)

Para o sinal proveniente do fluxômetro foi utilizado um contador e a mesma metodologia abordada para a medida da velocidade. Desta forma calcula-se a diferença da saída do contador em dois instantes dividida pelo respectivo intervalo de tempo como:

$$f_{fmedida} = \frac{scontador(k) - scontador(k-1)}{t(k) - t(k-1)}.$$
(4.4)

²do inglês Voltage Controlled Oscilator.

Na Figura 4.5 é apresentado a implementação em LabView utilizada para efetuar a medida de freqüência dos sinais. O Algoritmo 1 apresenta a estrutura utilizada para efetuar a medida de freqüência. *vtimer* representa o instante de tempo corrente. Os sinais provenientes do protótipo possuem amplitudes iguais a 12 V, desta forma, com a finalidade de converter os sinais para valores compatíveis com o sistema de controle e aquisição foi utilizado o circuito apresentado na Figura 4.6. Utilizou-se para o aplicativo uma taxa de amostragem igual a 5 ms. Para obter uma resposta em tempo real utilizouse um laço temporizado ("Timed loop").



Figura 4.5: Diagrama em linguagem G (LabView) para a medida de freqüência.

Algoritmo 1 Medida de freqüência

```
T_{ant} \leftarrow 0
Contador P0.0 \leftarrow 0
i \leftarrow 0
Contador CTR0_{ant} \leftarrow 0
TCtr_{ant} \leftarrow 0
loop
        i \leftarrow i + 1
        P0.0_{ant} = P0.0
        Ler P0.0
        if (P0.0_{ant} = True) \lor (P0.0 = False) then
                 T_{ant} \leftarrow T
                 T \leftarrow vtimer
                 FreqP0.0_{ant} \leftarrow FreqP0.0
                 FreqP0.0 \leftarrow \frac{1}{T-T_ent}
                 Freq \leftarrow (FreqP0.0 + FreqP0.0_{ant})/2
                 Contador P0.0 \leftarrow Contador P0.0 + 1
        end if
        if Resto(i, n_c) = 0 then
                 Contador P0.0_{ant} \leftarrow Contador P0.0 {Contagem anterior}
                 Contador CTR0_{ant} \leftarrow Contador CTR0 {Contagem anterior}
                 TCtr_{ant} \leftarrow TCtr {Instante anterior}
                 TCtr \leftarrow vTCtr {Instante atual}
                 Contador CTR0 \leftarrow vContador CTR0 {Contagem atual}
                 FreqCTR0 \leftarrow \frac{Contador CTR0 - COntador CTR0_{ant}}{TCtr - TCtr_{ant}}  {Frequencia calculada}
FreqP0.0<sub>II</sub> \leftarrow \frac{Contador P0.0 - Contador P0.0_{ant}}{TCtr - TCtr_{ant}}
        end if
end loop
```

4.2.2 Acionamento da válvula reguladora

Para acionar a válvula será feito uso da técnica PWM em conjunto com uma ponte H permitindo assim atuar na válvula nos dois sentidos com uma resolução satisfatória. O PWM foi implementado em LabView. Como o menor intervalo de tempo disponível para o temporizador presente no LabView é de 1 ms, o maior valor de freqüência possível de ser gerado para ser utilizado com a técnica de PWM é de 500 Hz. O número de iterações necessárias para gerar um ciclo determina a resolução do PWM. Para 500 Hz, por exemplo, são necessários pelo menos 2 ciclos, desta forma, apenas três estados são possíveis: ciclo de trabalho = 0, 0,5 e 1. O diagrama contendo a implementação é apresentado na Figura 4.7.



Figura 4.6: Circuito com optoacopladores utilizado na recepção dos sinais do fluxômetro e do simulador de velocidade.

Utilizou-se da estrutura apresentada no Algoritmo 2 a seguir para obter o sinal de PWM. A saída do controlador determina a saída do PWM. O PWM é aplicado nas saídas referentes a direção (dois canais da ponte H). O sentido do motor é determinado pela Tabela 4.1. Para uma determinada direção, um dos canais é mantido constante. Ao outro canal é aplicado o sinal de PWM, cuja freqüência e constante e o ciclo de trabalho é regulado de acordo com o Algoritmo 2.



Figura 4.7: Diagrama em linguagem LabView utilizado para gerar o sinal de PWM.

Algoritmo 2 Implementação do PWM

```
Estado_{PWM} \leftarrow True
i \leftarrow 0
duty
loop
       i \leftarrow i + 1
        Wait \ 1 \ ms
        Periodo \leftarrow 1000 \times 1/Freq
        Periodo_{True} \leftarrow 1000 \times duty \times Periodo
       if i \neq Periodo then
               if i = Periodo_{True} then
                       Estado_{PWM} \leftarrow False
               end if
       else
               i \leftarrow 0
               Estado_{PWM} \leftarrow True
       end if
       if duty = 0 then
               SaidaP1.0 \leftarrow False
       else
               SaidaP1.0 \leftarrow Estado_{PWM}
       end if
end loop
```

O circuito contendo a ponte H utilizada é apresentado na Figura 4.8. A ponte H utilizada foi a L298 da STMicroeletronics. A ponte H permite inverter o sentido da válvula e atua como um driver fornecendo ao atuador da válvula (um motor CC) potência para a sua operação.



Figura 4.8: Ponte H utilizada em conjunto com a válvula reguladora.

A Tabela 4.1 apresenta a tabela verdade para as entradas Cana
1-4 e Canal 2-3. A entrada Enable habilita (5 V) ou desabilita (0 V) as saí
das E_{VALV}^1 e E_{VALV}^2 . A saída Sensor de corrente permite medir a corrente entre os terminais E_{VALV}^1 e E_{VALV}^2 .

Tabela 4.1: Condições de acionamento da ponte H					
Canal1-4	Canal2-3	E_{VALV}^1	E_{VALV}^2	$E_{VALV}^1 - E_{VALV}^2$	
0 V	0 V	0 V	0 V	0 V	
0 V	$5 \mathrm{V}$	0 V	$12 \mathrm{V}$	-12 V	
5 V	0 V	$12 \mathrm{V}$	0 V	12 V	
$5 \mathrm{V}$	$5 \mathrm{V}$	$12 \mathrm{V}$	$12 \mathrm{V}$	0 V	

Para validação utilizou-se da válvula agulha apresentada no Capítulo 5.

4.2.3 Acionamento das válvulas de seção

O acionamento das válvulas de seção é feito como apresenta a Figura 4.9. O acionamento faz uso do driver de corrente ULN2004 em conjunto com relés do tipo SPDT.



Figura 4.9: Circuito de acionamento das válvulas de seção.

No próximo capítulo é apresentada a modelagem do sistema de aplicação de herbicidas, permitindo assim a obtenção de um simulador para o sistema de aplicação de herbicidas.

Capítulo 5

Obtenção dos modelos para simulação do sistema de aplicação de herbicidas

Propôs-se um simulador para o sistema de aplicação de herbicidas com o intuito de permitir que testes que possibilitem a melhoria e a escolha de um bom algoritmo de controle pudesse ser feito previamente aos testes com o protótipo. O uso do simulador permite ainda validar o algoritmo de controle de forma ágil e fornecer garantias de um bom desempenho antes da aplicação do controlador ao protótipo. Para o simulador considerou-se a topologia apresentada na Figura 5.1.



Figura 5.1: Diagrama do sistema de aplicações de herbicidas controlado.

5.1 Obtenção dos parâmetros do modelo utilizado para obter o ângulo de abertura e a posição da agulha das válvulas estudadas

Para as válvulas consideradas um motor cc modifica a área de passagem da válvula atuando através do posicionamento de uma agulha ou através da variação do ângulo de abertura. O motor cc tem como saída um ângulo θ e tem seu eixo acoplado a um redutor com um conjunto mecânico (engrenagens, molas, etc) que acoplam e permitem a translação de uma agulha ou rotação de uma semiesfera (presente na válvula esférica). Inicialmente foi obtida a resposta do conjunto composto pelo motor cc, redutores e conjunto mecânico presente na válvula em função da tensão de entrada do motor cc em relação a saída referente a posição da agulha (para a válvula agulha) e para o ângulo de abertura (para a válvula esférica). Para isso incluiu-se na válvula um potenciômetro acoplado junto a agulha que regula a área de passagem da válvula como apresentado na Figura 5.2.



Figura 5.2: Válvula com potenciômetro acoplado junto a agulha.

Para determinar a resposta do sensor de posição utilizou-se um potenciômetro linear de 10 $k\Omega$ cujas extremidades foram ligadas a uma diferença de potencial igual a 5 V, foram efetuadas diversas medidas de posição e resposta do sensor. A resposta do sensor é apresentada na Figura 5.3. Em seguida utilizando o método dos mínimos quadrados, foi obtida a função correspondente apresentada a seguir

$$x = -0,5343V + 2,7153. \tag{5.1}$$

Em seguida foram medidos os limites de posicionamento no qual a agulha atua sobre a variação da área de passagem. A faixa obtida para a agulha foi de 0, 3845 cm a 1, 7272 cm. A Figura 5.4 apresenta estes limites.



Figura 5.3: Resposta do sensor de posição.



Figura 5.4: Limites de atuação da agulha.

Finalmente foi aplicado um degrau de tensão sobre a válvula. A sua curva correspondente é apresentada na Figura 5.5.



Figura 5.5: Resposta do motor cc com o conjunto mecânico da válvula reguladora de agulha.

Para compatibilizar a resposta com o modelo apresentado na Seção 2.2, onde foi obtida a relação entre a área de passagem da válvula e a posição da agulha x_c , foi feita a seguinte mudança de coordenadas

$$x_c = 3,0758 - x. \tag{5.2}$$

Utilizando a ferramenta de identificação de sistemas 'Ident' do Matlab, ajustou-se um modelo ao motor cc com o conjunto mecânico. O modelo obtido é apresentado a seguir:

$$G(s) = \frac{K}{1 + T_p s} e^{-T_d s}$$
(5.3)

onde $K=5,4028\times 10^{-4}\ m/V,\, T_p=278,21\ s$ e $T_d=0,44254\ s.$

Os parâmetros do motor utilizado na válvula esférica baseia-se nos dados presentes na folha de dados do fabricante (12 segundos para ir do estado totalmente aberta para o estado totalmente fechado, quando uma diferença de potencial de 12 V é utilizado para alimentar o motor, o que permitiu assim calcular o ganho). A válvula desenvolve no máximo 90°, então tem-se que o modelo para a válvula considerada é de

$$G(s) = K = 0,010908rad/V.$$
(5.4)

O atraso pode ser obtido através de ensaios práticos, através da identificação do atraso do sistema. O atraso ocorre quando há mudança de direção do motor. Para a simulação considerou-se um atraso constante igual a $T_d = 0,44254 \ s$ para as duas topologias de válvula.

5.2 Corpo das válvulas

Verificou-se que a resposta das válvulas apresenta matraso quando ocorre mudança de direção. A Figura 5.6 apresenta o diagrama em LabView utilizado para verificar a mudança de direção e adicionar um atraso condicional à variação de tensão.



Figura 5.6: Diagrama em LabView responsável pelo atraso de tempo condicional.

O Algoritmo 3 apresenta a estrutura utilizada na geração do sinal de saída com atraso condicional de tempo. A variável Sentido representa o sentido atual da válvula

Algoritmo 3 Atraso condicional

```
loop
```

```
if \neg (-0, 5 < Tensao < 0, 5) then
             Sentido = Sentido
      else
             Sentido_{ant} = Sentido
             if Tensao > 0, 5 then
                   Sentido = True
             end if
             if TENSAO < -0,5 then
                   Sentido = False
             end if
      end if
      if Sentido_{ant} \neq Sentido then
             t_{change} = vtimer
      end if
      if t_{change} + t_{atraso} > vtimer then
             V_{saida} \leftarrow 0
      else
             V_{saida} \leftarrow Tensao
      end if
end loop
```

(representado através de uma variável booleana). A variável vtimer representa o instante atual obtido através de um contador presente no aplicativo. Quando o sentido é invertido, o instante atual (vtimer) é guardado na variável t_{change} . Enquanto o instante de tempo atual for menor que o instante referente ao atraso $t_{change} + t_{atraso}$, a saída (entrada do motor - tensão) é colocado em 0 V. Quando o instante atual supera o atraso a tensão de saída V_{saida} passa a ser a tensão de entrada do atraso condicional. A variação de sentido é considerada apenas quando a tensão referente a posição da agulha (em módulo) muda de sentido em mais de 0,5 V (mudanças bruscas e diminutas são desprezadas - o atraso condicional só ocorre quando a variação de sentido é evidente).

Para obter as respostas das válvulas em função da posição da agulha e do ângulo de abertura da válvula esfera utilizou-se o bloco 'Transfer Function' presente na ferramenta 'control'. A função de transferência engloba o motor cc e parte da mecânica das válvulas (a função de transferência inclui redutores e fornece a posição da agulha para a válvula agulha ou o ângulo de abertura para a válvula esférica). As Figuras 5.7 e 5.8 apresentam o diagrama em LabView responsável por gerar a resposta do corpo da válvula apresentada através de uma área de passagem.

O Algoritmo 4 apresenta a estrutura utilizada para a válvula agulha e o Algoritmo 5 apresenta a estrutura utilizada para a válvula esférica.



Figura 5.7: Diagrama em LabView com a função de transferência (inclue motor cc, redutores e parte da mecânica da válvula agulha).

Algoritmo 4 Área - Válvula agulha		
loop		
$x = ft \left(Tensao, x_0, T_d \right)$		
if $x < lim_{inf}$ then		
$x_c = lim_{inf}$		
else		
if $x > lim_{sup}$ then		
$x_c = lim_{sup}$		
end if		
end if		
$Area = f\left(x_c, h, b, a\right)$		
end loop		
return Area		



Figura 5.8: Diagrama em LabView com a função de transferência (inclue motor cc, redutores e parte da mecânica da válvula esfera).

Para ambas as válvulas foram calculados de forma aproximada o coeficiente de descarga C_d o qual pode ser calculado a partir de (2.10). Para as válvulas estudadas na condição de máxima abertura, fazendo uso dos parâmetros presentes nas folhas de dados

Algoritmo 5 Área - Válvula esférica

```
loop

x = ft (Tensao, \theta_0, Td)
if \theta < 0 then

\theta_c = 0

else

if \theta > \pi/2 then

\theta_c = \pi/2

end if

Area = f (\theta_c, R)

end loop

return Area
```

do fabricante, obteve-se para a válvula esférica na condição de retorno $Q_r = 102 \ l/min$ e $\Delta P = 5 \ bar$, $\bar{C}_d = 0,0067$, para a válvula de agulha operando a $Q_r = 150 \ l/min$ e $\Delta P = 40 \ bar$, $\bar{C}_d = 0,1671$.

Através da malha do sistema é obtida a vazão de saída. A saída da subvi referente ao corpo da válvula segue através do bloco 'cvalve' onde o valor da vazão de saída é calculado. A Figura 5.9 apresenta o diagrama em LabView responsável pela simulação desta malha. Partindo do diagrama apresentado na Figura 2.9, através da solução do sistema é possível calcular a vazão de saída, um bloco 'Formula Node' é utilizado com esta finalidade. O Algoritmo 6 apresenta a estrutura utilizada na obtenção da vazão de saída em l/min. Inicialmente a área da válvula escolhida é selecionada, esta área, especificada para a válvula agulha em (2.20) e para a válvula esférica em (2.9), serve de entrada para a subvi cvalve, onde a vazão de saída é calculada.



Figura 5.9: Diagrama utilizado para a obtenção da vazão de saída.

Algoritmo 6 Vazão de Saída

 $\begin{array}{c} \textbf{if Agulha then} \\ Area \leftarrow Area_{agulha} \\ \textbf{else} \\ Area \leftarrow Area_{esfera} \\ \textbf{end if} \\ Q_s \leftarrow cvalve (Area) \\ Vazao_{saida} \leftarrow 60000 \times Q_s \end{array}$

O diagrama em LabView apresentado na Figura 5.10 apresenta o subvi cvalve responsável pela simulação da malha do sistema de aplicação. A vazão de saída é calculada de acordo com a Seção 2.5.1. O Algoritmo 7 apresenta a estrutura utilizada na subvi cvalve utilizada no cálculo de Q_s no final do algoritmo 6. Inicialmente o parâmetro \bar{K} é calculado para a válvula selecionada através de (2.8) e em seguida obtém-se a vazão de saída através da composição das expressões apresentadas na Seção 2.5.1.



Figura 5.10: Diagrama utilizado para o cálculo da vazão de saída - subvi cvalve.

Algoritmo 7 Subvi cvalve	
if Agulha then	
$Calcular \bar{K}_{aqulha}$	
else	
$Calcular \bar{K}_{esfera}$	
end if	
$Q_s \leftarrow f\left(Area \times \bar{K}, n_{bicos}, P_{ref}, Q_{ref}, k, Q_b, P_{tanque}, \rho\right)$	
$\mathbf{return} \ Q_s$	

Para calcular a vazão da válvula de alívio, utilizou-se (2.28). O parâmetro k constante foi configurado para k = 0,001, que constituí uma condição de operação.

5.3 Cálculo da referência

Partindo da taxa de aplicação é possível obter a vazão instantânea a ser aplicada. O diagrama apresentado na Figura 5.11 apresenta o laço principal do aplicativo em LabView, onde este cálculo é efetuado.

É considerada a possibilidade de uma taxa de aplicação variável (feita através da inserção de um bloco condicional 'case', permitindo a inserção futura de componentes que permitam utilizar valores pontuais da vazão). No estado atual é possível ainda selecionar entre simulação e protótipo.



Figura 5.11: Obtenção da vazão de referência.

5.4 Obtenção dos parâmetros do modelo do protótipo usando a resposta ao degrau

Para obter a função de transferência e o atraso do protótipo a malha aberta, considerou-se como saída, a vazão que chega aos bicos, e como entrada, a tensão aplicada no motor da válvula. O sistema foi colocado em um ponto de operação, e uma vez neste ponto, um degrau de tensão de módulo igual a 8 V foi aplicado na entrada. A resposta a este degrau é apresentada na Figura 5.12. Inicialmente foi feita uma mudança de coordenadas de tal forma que em t = 0 (e nos instantes anteriores a t = 0), a saída fosse igual a 0. O modelo do sistema considerado para identificação foi um sistema de segunda ordem com atraso. Utilizou-se para a identificação a ferramenta *ident*. O modelo obtido é mostrado a seguir.

$$G_r(s) = e^{-0.169s} \frac{0,02691}{s^2 + 1,529s + 0,581}$$
(5.5)

Utilizando o comando *dcgain* do Matlab, que fornece o limite para s=0, obteve-se o ganho do protótipo. O valor encontrado equivale a 0,0463 l/min / V. Aproximou-se o termo referente ao atraso a uma função racional de segunda ordem utilizando a aproximação de Pade, através da seguinte função do Matlab [num,den]=pade(-0.169,2). Obteve-se a função de transferência para a aproximação

$$e^{-0,169s} \cong \frac{s^2 - 35.5s + 420.2}{s^2 + 35.5s + 420.2}$$
 (5.6)



Figura 5.12: Resposta utilizada para obtenção do ganho em malha aberta e atraso do protótipo.



Figura 5.13: Resposta obtida através do ensaio e resposta da planta ajustada através da ferramenta *ident*.

Capítulo 6

Controle do sistema de aplicação de herbicidas

Para obter o controlador fuzzy PD+I utilizou-se a metodologia apresentada a seguir. Considerou-se um modelo preliminar do simulador, e o modelo de válvula agulha. Foram considerados 3 pontos de operação equidistantes. Para cada um destes pontos, foi ajustado um controlador PID. Para auxiliar no projeto considerou-se o caso em que o controlador atua a partir da condição em que a válvula está totalmente aberta e o sistema está em regime. Utilizou-se de ajuste manual apresentado na Seção 3.1.3 com a finalidade de obter os controladores PID. Utilizou-se a ferramenta PID toolkit 6.0 do LabView para a implementação e validação dos controladores. A Tabela 6.1 apresenta as configurações de controladores obtidas para três diferentes situações. Os controladores foram obtidos considerando a taxa de aplicação apresentada na Tabela 6.1, na seguinte situação: velocidade do veículo igual a 10 km/h, taxa de aplicação igual a 250 l/ha, 3 seções, 10 bicos por seção e espaçamento entre bicos de 30*cm*. Em seguida baseando-se nos controladores PID obtidos, as funções de pertinência da saída foram delineadas. Considerou-se inicialmente um sistema fuzzy consistindo apenas da entrada referente ao erro e a saída. Verificou-se que são necessários ganhos cada vez menores na medida em que o erro cresce. As funções de pertinência foram ajustadas seguindo os procedimentos apresentados na Seção 3.2.5 de tal forma que a resposta do sistema fuzzy tivesse ganhos grandes para pequenas amplitudes de erro e um ganho decrescente em relação ao aumento do erro. A Figura 6.1 apresenta a relação entre a entrada e a saída do controlador fuzzy para as funções de pertinência da saída ajustadas, para o caso em que a entrada derivativa é zerada. Para completar a arquitetura do controlador fuzzy PD+I, foi também adicionado uma entrada derivativa e os blocos responsáveis pela operação de integração. Universos de discurso normalizados foram utilizados para as entradas, desta forma ganhos foram adicionados para ajustar o universo de discurso de tal forma que fosse possível obter a resposta desejada. Os ganhos para a entrada derivativa e integrativa foram configurados manualmente considerando as diretivas apresentadas na Seção 3.2.6. A base de regras utilizada foi configurada através da interface da ferramenta. As funções de pertinência foram configuradas através do ferramenta PID. A ferramenta PID permite o uso apenas de funções triangulares ou trapezoidais. Considera-se funções de pertinência triangulares, que possuem modelo linear e simplicidade computacional. Além disso, a metodogia utilizada exige que inicialmente o sistema fuzzy tenha características lineares, desta forma as funções de pertinência deverão ser triangulares. Inicialmente considerou-se apenas três funções de pertinência para cada entrada e para a saída. Considerou-se em seguida cinco funções de pertinência para cada entrada e para a saída. Obteve-se melhor resultado para o caso com cinco funções de pertinência para cada entrada e para a saída, assim este número de funções foi considerado. As funções de pertinência para as entradas são apresentadas na Figura 6.2. Baseando-se na Tabela 6.1, obteve-se a forma das funções de pertinência para a saída. Para a saída utilizou-se a configuração apresentada na Figura 6.3. Os diagramas apresentados nas Figuras 6.4 e 6.5 apresentam os blocos dos controladores PID e fuzzy PD+I utilizados no simulador. Estes diagramas são também utilizados no controle do protótipo. Neste momento não haviam sido aplicados os ganhos em malha aberta e o atraso do protótipo obtidos na Seção 5.4. Estes controladores resultantes foram utilizados para delinear as formas das funções de pertinência e estimar a curva característica do sistema de controle desejada para regular o sistema de aplicação de herbicidas.

Utilizou-se como método de defuzzificação o centro de área, três funções de pertinência triangulares para a entrada e três funções 'singletons' para a saída. O método de inferência utilizado foi o max-min.



Figura 6.1: Entrada v
s saída do controlador fuzzy (entrada de/dt = 0).

 Tabela 6.1: Parâmetros dos controladores PID sintonizados para diversos pontos de operação

	$50 \ l/ha$	$150 \ l/ha$	$250\ l/ha$
K_P	8×10^4	6×10^4	3×10^4
K_I	0,04	0,01	0,01
K_D	0,001	0,001	-

Tabela 6.2: Base de regras do controlador PD+I fuzzy 5 x 5

"saída"		"variação do erro" de/dt					
u		NG	NM	Ζ	\mathbf{PM}	\mathbf{PG}	
	NG	PG	\mathbf{PG}	PG	PM	Ζ	
	NM	\mathbf{PG}	\mathbf{PG}	\mathbf{PM}	Ζ	NM	
"erro"	Ζ	PG	\mathbf{PM}	Ζ	NM	NG	
e	\mathbf{PM}	$_{\rm PM}$	Ζ	NM	NG	NG	
	\mathbf{PG}	Ζ	NM	NG	NG	NG	



Figura 6.2: Funções de pertinência das entradas do controlador fuzzy.


Figura 6.3: Funções de pertinência da saída do controlador fuzzy.



Figura 6.4: Diagrama do controlador PID.



Figura 6.5: Diagrama do controlador PD+I fuzzy.

6.1 Projeto de controladores

O desenvolvimento dos controladores são detalhados a seguir. Considerou-se a velocidade do trator constante. O protótipo utilizado apresenta a seguinte configuração: três seções, 5 válvulas por seção.

6.1.1 Projeto de controladores usando ajuste manual

O projeto do controlador apresentado nesta seção foi feito diretamente no protótipo. Para isso utilizou-se a a metodologia de projeto apresentada na Seção 3.1.3, obtendo-se assim o controlador PID apresentado na Tabela 6.3.

Tabela 6.3:	Parân	netros o	<u>do contr</u>	olador	PID
	K_c	T_i	T_d		
	0,01	$0,\!050$	0,100		

Em conjunto com o controlador PID, um filtro FIR de quinta ordem é utilizado para suavizar a vazão medida. Os coeficientes do filtro FIR utilizado são apresentados a seguir: [0,14442600 0,23564900 0,23985000 0,23564900 0,14442600]. O filtro é projetado para ter uma freqüência de corte de um décimo da freqüência da entrada.

Em seguida obteve-se os ganhos para um controlador PD+I fuzzy. Os ganhos foram obtidos de acordo com os procedimentos apresentados na Seção 3.2.3. A Figura 6.7 apresenta o painel do vi utilizado no cálculo dos parâmetros do controlador e a Figura 6.6 apresenta o diagrama em LabView utilizado para efetuar os cálculos dos parâmetros, estes cálculos são apresentados na Seção 3.2.4. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 6.4.

Tabela 6.4: Controlador fuzzy				
Controlador	GE	GU	GCE	GIE
	0,002	5	0,0002	0,04



Figura 6.6: Cálculo dos parâmetros do controlador fuzzy.

Os parâmetros obtidos, são apresentados na Tabela 6.5. Em seguida estes ganhos foram transferidos para um controlador PD+I fuzzy. Os ganhos obtidos para o controlador fuzzy PD+I são apresentados na Tabela 6.6.

Tabela 6.5: Parâmetros do controlador PID obtido a
través da ferramenta r
ltool $$K_c$$ $T_i$$ T_d

<u>File</u> <u>E</u> dit <u>O</u> perate	<u>Tools</u> rowse <u>Name</u> 15pt Applicatio	Mindow Help In Font T
Entradas		Saída
Кр	P	GU
() 0	()0	0
Td	I	GCE
÷)0	() 0	0
Ti	D	GIE
0	÷)0	0
FALSE	TRUE	
GE	Formato	
30		

Figura 6.7: Painel para cálculo dos parâmetros do controlador fuzzy.

Tabela 6.6: Controlador fuzzy				
Controlador	GE	GU	GCE	GIE
	.002	42,1660	0,0146	0,0070

6.1.2 Projeto de controladores utilizando lugar geométrico das raízes

Utilizando-se a função de transferência do protótipo apresentada na Seção 5.4, obteve-se utilizando-se a ferramenta *rltool* (do Matlab) um novo controlador PID. O lugar geométrico das raízes (contendo o respectivo controlador) e a resposta ao degrau do protótipo controlado são apresentados na Figura 6.8. Os parâmetros do controlador PID são apresentados na Tabela 6.5 fornecendo a função de transferência

$$C(s) = \frac{1,624s^2 + 11,86s + 3,411}{s}.$$
(6.1)



Figura 6.8: (a) e (b) Lugar geométrico das raízes - root locus e (c) resposta ao degrau para o controlador obtido. 89

Capítulo 7

Resultados

7.1 Resultados de simulação

O painel do simulador é apresentado na Figura 7.1. Através do painel é possível selecionar entre os modelos de válvulas, selecionar controladores e o tipo de ensaio. Os controladores fuzzy PD+I e PID foram implementados de acordo com as Seções 3.2.4 e 3.1 respectivamente. Os diagramas em Labview referentes a implementações dos controladores PID e fuzzy PD+I são apresentados nas Figuras 6.4 e 6.5, respectivamente. Através do diagrama em Labview apresentado na Figura 5.9, que utiliza a subvi evalve representada na Figura 5.10 para selecionar os parâmetros do modelo de válvula selecionado e obter a área de passagem, a vazão de saída é calculada. Foram utilizados os modelos de válvulas esférica e agulha apresentados na Seção 5.1. Para obter a vazão de saída foram utilizados os algoritimos e diagramas apresentados na Seção 5.2.

Os parâmetros utilizados no simulador são apresentados na Tabela 7.1. Para obter a resposta do sistema com controlador, as entradas correspondentes a parte derivativa e integrativa são zeradas inicialmente.

Os projetos dos controladores tiveram como foco a válvula esférica, uma vez que este é o modelo de válvula utilizado pelo protótipo neste trabalho. Foram feitas simulações com estes controladores utilizando os modelos de válvula agulha, apresentado em (5.3) e o modelo de válvula esférica apresentado em (5.4). Para os controladores obtidos através do projeto via lugar geométrico das raízes, apresentados na Seção 6.1.2, foram obtidas respostas para uma mudança de referencial de acordo com a Tabela 7.2. Os resultados

_	Tabela 7.1: Parâmetros de simulação		
Parâmetro	Descrição	Unidade	Valor
-	Atraso da válvula	s	0,2580
P_{tanque}	Pressão no tanque	atm	1
Q_{bomba}	Vazão da bomba	m^3/s	0,0017
P_{ref}	Pressão de referência - bicos	N/m^2	$2,07 imes 10^{-5}$
Q_{ref}	Vazão de referência - bicos	m^3/s	$2,71\times 10^{-5}$
b	Número de bicos por seção	-	5
n	Número de seções	-	3
e	Espaçamento entre bicos	m	0,3
T_a	Taxa de amostragem	ms	5
-	Valor inicial da vazão de referência - 'Set point'	l/min	30
R	Raio da esfera - válvula esférica	pol	1
a	Parâmetro da válvula agulha	m	0,0080
b	Parâmetro da válvula agulha	m	0,0113
h	Parâmetro da válvula agulha	m	0,0160
x_{ci}	Posição inicial da agulha - Válvula agulha	m	0,0038
x_{cinf}	Limite inferior da agulha - Válvula agulha	m	0,0038
x_{csup}	Limite superior da agulha - Válvula agulha	m	0,0173
C_d	Coeficiente de descarga - Válvula esférica	-	0,0067
C_d	Coeficiente de descarga - Válvula agulha	-	0,1671
A_2	Área do orifício de entrada	pol	1
A_1	Área do orifíco de saída - Área de passagem da válvula	m^2	A_o
ho	Densidade do fluído	g/cm^3	1
k	Constante - válvula de alívio		0,001

são apresentados nas Figuras 7.2 e 7.3. Obteve-se ainda, para os mesmos controladores, mantendo-se como referência uma vazão de 22 l/min, a resposta para o desligamento de uma das seção no intervalo [20,35] s. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 7.4.

Tabela 7.2: Valores	da referência
Intervalo de tempo (s)	Vazão (l/min)
0-10	30
10-20	22
20-30	18
30-50	30



Figura 7.1: Painel do simulador do sistema de aplicação de herbicida.



Figura 7.2: Sinal de controle para a simulação da resposta com referência variável para a válvula esfera com os controladores (a) PID e (b) fuzzy e válvula agulha para os controladores (c) PID e (d) fuzzy.



Figura 7.3: Saída do sistema para a simulação da resposta com referência variável para a válvula esfera com os controladores (a) PID e (b) fuzzy e válvula agulha para os controladores PID (c) e fuzzy (d).



Figura 7.4: Saída do sistema para a resposta a uma perturbação (desligamento de uma das seções no intervalo [20,35] s para os casos válvula esférica para os controladores (a) PID e (b) fuzzy e válvula agulha para os controladores (c) PID e (d) fuzzy.

7.2 Resultados experimentais

Nesta etapa utilizou-se o protótipo existente na Enalta para obter as respostas do aplicador com os controladores obtidos. O protótipo é apresentado na Figura 7.5 e o painel da vi utilizada para obter os resultados experimentais é apresentada na Figura 7.6. Na Figura 7.7 é apresentada a interface utilizada em conjunto com o protótipo. Para selecionar o tipo de ensaio a ser realizado a seleção é feita através do botão B1. Para ativar a coleta de dados e interromper a coleta e salvar os resultados utilizam-se respectivamente os botões B2 e B3.



Figura 7.5: Pulverizador estático utilizado neste projeto.



Figura 7.6: Painel do aplicativo utilizado em conjunto com o protótipo.



Figura 7.7: Interface utilizada em conjunto com o protótipo.

Foram validados os controladores obtidos através do projeto via lugar geométrico das raízes, apresentados na Seção 6.1.2. No primeiro ensaio foram obtidas as respostas apresentadas na Figura 7.8 e 7.9, para uma variação da referência de acordo com a Tabela 7.2. No segundo ensaio obteve-se a resposta para o desligamento de uma das válvulas de seções no intervalo [20,35] s mantendo uma referência constante em 22 l/min. As respostas são apresentadas na Figura 7.10. Em seguida os mesmos ensaios foram repetidos para os dois controladores obtidos através de ajuste manual, apresentados na Seção 6.1.1. As Figuras 7.11 e 7.12 apresentam a resposta a referência variável. Para o teste referente ao desligamento de uma das seções durante o intervalo de tempo [20,35] s foram obtidas as respostas apresentadas na Figura 7.13.



Figura 7.8: Saída do sistema para uma resposta a uma referência variável para os controladores (a) PID e (b) fuzzy .



Figura 7.9: Saída do controlador para uma resposta a uma referência variável para os controladores (a) PID e (b) fuzzy



Figura 7.10: Saída do sistema obtida para a resposta a uma perturbação (desligamento de uma das seções no intervalo [20,35] s para os controladores (a) PID e (b) fuzzy .



Figura 7.11: Saída do sistema para a resposta a uma referência variável para os controladores (a) PID e (b) fuzzy.



Figura 7.12: Sinal de controle para a resposta a uma referência variável para o controlador (a) PID e (b) fuzzy .



Figura 7.13: Saída do sistema obtida para a resposta a uma perturbação (desligamento de uma das seções no intervalo [20,35] s para os controladores (a) PID e (b) fuzzy .

Capítulo 8

Conclusão e propostas para trabalho futuro

8.1 Conclusão

Neste trabalho, um sistema de aplicação de herbicidas foi apresentado. Foram obtidos modelos individuais para cada componente e utilizando estes modelos um simulador foi construído. Utilizando técnicas de ajuste manual e a ferramenta rltool foram inicialmente obtidos controladores PID para o simulador e para o protótipo. E, em seguida, utilizando a metodologia apresentada em Jantzen (2007) foram obtidas as funções de pertinência e a base de regras do controlador fuzzy por transferência de ganhos do controlador PID.

Com os controladores PID obtidos utilizando a ferramenta *rltool*, o controlador fuzzy apresentou a melhor resposta para o caso em que a referência foi variada no tempo e o controlador PID para o caso em que uma uma seção foi desligada. Com os controladores PID obtidos por ajuste manual, o controlador fuzzy apresentou uma boa resposta para ambos os casos. Entretanto, utilizando-se o controlador fuzzy PD+I obtém-se um controlador mais versátil, uma vez que vários parâmetros podem ser ajustados para obter a resposta desejada.

Os controladores foram implementados utilizando o aplicativo LabView. Utilizouse a ferramenta PID para implementar os controladores fuzzy e PID. Para especificar o controlador fuzzy utilizou-se a ferramenta de projeto Fuzzy Logic Controller Design, através desta as funções de pertinência foram especificadas e a base de regras construída. A saída desta ferramenta foi utilizado como entrada no bloco referente ao sistema fuzzy (apresentado no Apêndice B.3.1). O aplicativo criado para utilização na Enalta foi feito com a finalidade de obter os resultados apresentados, isto é, para obter a resposta a uma referência variável e obter a resposta do protótipo a perturbações.

O principal problema encontrado foi o ruído na medida da vazão de saída. O módulo USB utilizado para aquisição de dados e controle não possuía freqüêncimetro, desta forma foi necessário adicionar ao aplicativo esta funcionalidade. A limitação de taxa de amostragem de 1 ms do laço em LabView limitou a precisão desta medida acarretando em erro (observado nos resultados).

8.2 Proposta para trabalho futuro

Como proposta de trabalho futuro propõe-se o melhoramento do controlador fuzzy utilizando-se a análise através de plano de fase apresentado na Seção 4.2.3. Propõe-se ainda a validação de outra forma de controle de taxa de aplicação de defensivos usando um sistema de injeção. Nessa configuração de controle, a taxa de aplicação é associada à concentração de herbicida aplicada em um duto com determinada vazão mantida constante. A concentração de herbicida em um solvente é variada através da injeção de herbicida concentrado. Propõe-se que outras investigações sejam feitas, como por exemplo, o uso de redes neurais artificiais ou ainda sistemas neuro-fuzzy aplicado ao sistema de controle apresentado nesse trabalho. A aplicação de outras técnicas visam avaliar qual a técnica de controle é mais adequada ao sistema em estudo.

Apêndice A

Conjuntos fuzzy

Na lógica clássica uma função de inclusão especifica se um elemento está incluso ou não em um conjunto. Considere um conjunto A, contido em um universo X. Pode-se denotar por 1 o fato de um elemento x pertencer a A e 0 caso este não pertença. Pode-se representar esta classificação através da função característica, normalmente referenciada como função de pertinência (Pedrycz; Gomide 1998, Zadeh 1965)

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & se \ x \ \in \ A \\ 0, & se \ x \ \notin \ A \end{cases}$$
(A.1)

Um conjunto fuzzy é definido em um Universo de Discurso, conjunto este que contém todos os elementos que são possíveis deste conjunto. Conjuntos fuzzy, podem ser considerados como uma generalização dos correspondentes conjuntos da lógica clássica.

A.1 Funções de pertinência

A função de inclusão no caso dos conjuntos fuzzy é flexibilizada e definida através de uma função de pertinência, ou seja, uma função da forma $\mu_A : X \to [0, 1]$. Algumas funções de pertinência usuais são apresentadas abaixo.

Funções triangulares

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \le a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a,m] \\ \frac{b-x}{b-m}, & \text{se } x \in [m,b] \\ 0, & \text{se } x \ge b \end{cases}$$

onde m é um valor modal, e a e b denotam o menor e o maior limitantes, respectivamente, para valores não nulos de $\mu_A(x)$.

Função trapezoidal

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a,m] \\ 1, & \text{se } x \in [m,n] \\ \frac{b-x}{b-n}, & \text{se } x \in [n,b] \\ 0, & \text{se } x > b \end{cases}$$

Função gaussiana

 $\mu_A(x) = e^{-k(x-m)^2}, k > 0$

A.2 Relações entre conjuntos fuzzy

Uma relação fuzzy indica como estão associados os elementos de um conjunto em relação aos elementos de um outro conjunto. O nível de associação entre dois conjuntos fuzzy é fornecida através de graus de associação que possuem valores entre 0 e 1. Uma relação entre conjuntos fuzzy indica o grau de pertinência existente entre os elementos pertencentes aos conjuntos. Este relacionamento é definido no subespaço constituído pelo produto cartesiano dos respectivos universos de discurso. Os valores atribuídos aos relacionamentos entre os elementos $\mu_R(x, y)$ estão sempre entre 0 e 1. As relações fuzzy podem ser representadas por:

$$R(x,y) = \sum_{(x,y)\in X\times Y} \mu_R(x,y)/(x,y).$$

Dadas duas relações fuzzy R(x,y) e S(x,y) onde $x \in X$ e $y \in Y$, as principais

operações efetuadas entre estas são:

- União: $\mu_{R(x,y)\cup S(x,y)} = max_{(x,y)\in X\times Y} \{\mu_{R(x,y)}, \mu_{S(x,y)}\}$
- Intersecção: $\mu_{R(x,y)\cap S(x,y)} = \min_{(x,y)\in X\times Y} \left\{ \mu_{R(x,y)}, \mu_{S(x,y)} \right\}$
- Complemento: $\mu_{\bar{R}(x,y)} = 1 \mu_{R(x,y)}$

A combinação de duas ou mais relações fuzzy, definidas em espaços distintos, podem ser feitas através de operadores que permitem a composição das respectivas relações. Deve-se ressaltar que a composição de relações fuzzy possui um papel fundamental nos precedimentos envolvendo a computação baseada em regras. Sejam duas relações R(x, y), S(y, z), definidas respectivamente nos produtos cartesianos discretos $X \times Y$ e $Y \times Z$. As principais técnicas de composição de relações fuzzy são dadas por (Pedrycz; Gomide 1998):

- max-min: A composição max-min efetuada entre as matrizes R(x, y) e S(y, z), denotada por $R \circ S(x, z)$ é definida por $R \circ S(x, z) = max\{min(\mu_R(x, y), \mu_s(y, z))\}$.
- max-prod: A composição max-prod efetuada entre as matrizes R(x, y) e S(y, z), denotada por $R \bullet S(x, z)$ é definida por $R \bullet S(x, z) = max\{\mu_R(x, y) * \mu_s(y, z)\}.$
- Complemento: A composição max-média efetuada entre as matrizes R(x, y) e S(y, z), denotada por $R \oplus S(x, z)$ é definida por $R \oplus S(x, z) = max\{1/2(\mu_R(x, y) + \mu_s(y, z))\}.$

Apêndice B

Labview aplicado a sistemas de controle

O aplicativo Labview é desenvolvido pela empresa National Instruments. É utilizada uma linguagem baseada em diagramas (chamada também de linguagem G (National Instruments 2003)) que possui características que permitem a sua utilização em diversas áreas (sistemas de controle, instrumentação e processamento de sinais). Nas seções sequentes são apresentadas os principais blocos utilizados neste projeto.

B.1 Laços temporizados

Em sistemas de controle digital, controladores são discretizados com tempo de amostragem t_a . Para garantir que o controlador mantenha suas características constantes, o intervalo de tempo de amostragem das entradas e saídas deve ser constante. O ideal é trabalhar com sistema em tempo real (que possuam controle da temporização). O Labview possui um laço que fornece esta característica e no caso de processamento de multíplos laços rodando simultaneamente (threads) ainda permite a configuração de níveis de prioridade. Este laço permite definir também o tempo entre cada iteração. A Figura B.1 apresenta o diagrama referente a este laço.



Figura B.1: Laço enquanto - com temporizador.

B.2 Interfaces digitais de entrada / saída - NIDaqmax

No primeiro diagrama da Figura B.2 é apresentada a rotina para iniciar, configurar e escrever na porta P0 (8 bits) de um dispositivo de IO da NI. No segundo diagrama, é apresentada uma estrutura para ler um bit da porta P1. Para o exemplo apresentado a porta é iniciada, configura e em seguida o bit 0 é lido.



Figura B.2: Laço enquanto - com VI's polimórficas - entradas / saídas.

B.3 PID Toolkit

A toolkit PID apresenta ferramentas de projeto e aplicação de sistemas de controle PID e sistemas fuzzy.

B.3.1 Controladores PID e controladores fuzzy

A Figura B.3 apresenta um diagrama em labview com um sistema fuzzy. O sistema fuzzy é especificado utilizando a ferramenta "Fuzzy Logic Controller Design", que permite escolher o número e as características das funções de pertinência, assim como a base de regras. O sistema é salvo em um arquivo ".fc" e é utilizado na configuração dos blocos referentes ao sistema fuzzy.



Figura B.3: Controlador fuzzy.

A Figura B.4 apresenta um diagrama em labview com um controlador PID. As características do controlador (ganhos, taxa de amostragem e faixa da saída) são especificados diretamente através da entrada da subvi apresentada.

A Figura B.4



Figura B.4: Controlador PID.

Apêndice C

Simulador do aplicador de herbicidas a taxa variável

Construiu-se um painel melhorado para o simulador. Através do painel pode-se visualizar a atuação do controlador e a saída do sistema. Todos os componentes do sistema são exibidos de forma intuitiva e as condições dos mesmos são apresentados em tempo real. O painel é apresentado através das Figuras C.2 e C.1.



Figura C.1: Painel do novo simulador - condições de operação, seleção do modelo de válvula, seleção do controlador.



Figura C.2: Painel do novo simulador - saída do protótipo, sinal de controle.

Referências bibliográficas

AHN, K.; YOKOTA, S. (2005). Intelligent switching control of pneumatic actuator using on/off solenoid valves. **Mechatronics**, Oxford, v.15, n.6, p.683–702.

AMMONS, R.; THISTLE, H.; BARRY, J. (2000). Optimized pesticide application, Journal of Agricultural Engineering Research, New York, v.75, n.2, p.155–166.

BAIO, F. H. R. (2001). Aplicação localizada de defensivos baseada na variabilidade espacial das plantas daninhas. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

BERGADÀ, J. M. (2000). Curva característica de una válvula. Disponível em: http://www.mf-ct.upc.es/JMBergada/mf/practicas.htm>. Acesso em: 20 jul 2007.

BIZARI, I. R.; WATANABE, F. M.; MANZONI, C. R. (2003-2005). Sistema de gerenciamento da atividade de pulverização de precisão, *Relatório técnico*, Relatórios técnicos submetidos a Fapesp.

BONGIOVANNI, R.; LOWENBERG-DEBOER, J. (2004). Precision agriculture and sustainability, **Precision Agriculture**, New York, v.5, n.4, p.359–387.

BRESSAN, G. M. (2007). Classificação do Risco de Infestação de Regiões por Plantas Daninhas Utilizando Modelagem Fuzzy e Análise de Imagens. 211f. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2007.

BRESSAN, G. M. et al. (2008). A classification metodology for the risk of weed infestation using fuzzy logic, Weed Research, Hoboken, v. 48, n. 5, p.470–479.

BROOKER, P. I. (1979). Kriging, EeMJ - Engineering and Mining Journal, New York, v.180, n.9, p.148–153. CARVALHO, J. R. P.; VIEIRA, S. R. (2001). Avaliação e comparação de estimadores de krigagem para variáveis agronômicas - uma proposta, Embrapa Informática Agropecuária, p.1–20. Documento 3.

DASGUPTA, K.; WATTON, J. (2005). Dynamic analysis of proportional solenoid controlled piloted relief valve by bondgraph. Simulation Modelling Practice and Theory v.13, n.1, p.21–38.

ESQUERDO, J. C. D. M. (2002). Adaptação de um pulverizador convencional para a aplicação localizada de defensivos. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

GARCIA, C. (2005). Modelagem e Simulação. São Paulo: EDUSP.

GOPALAPILLAI, S.; TIAN, L.; ZHENG, J. (1999). Evaluation of a flow control system for site-specific herbicide applications, **Transactions of the ASAE**, Nova York, v.42, n.4, p.863–870.

LEWIS III, H. W. (1997). The Foundations of Fuzzy Control. New York: Plenum Press.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTANA, R. M. (1989). An Introduction to Applied Geostatistics, New York: Oxford University Press.

JANTZEN, J. (1999). **Design of fuzzy controllers**, *Relatório técnico*, Technical University of Denmark. Disponível em: www.iau.dtu.dk/jj/pubs/design.pdf>. Acesso em: 20 jan 2008.

JANTZEN, J. (2007). Foundations of Fuzzy Control. Denmark: John Wiley & Sons.

KANDEL, A.; LANGHOLZ, G. (1994). Fuzzy Control Systems. Tampa, FL: CRC Press.

KAZEMIAN, H. B. (2005). Developments of fuzzy PID controllers, **Expert Systems**, Tonbridge Kent, v.22, n.5, p.254–264.

LANDERS, A. J. (1993). Direct injection sprayers - a method of reducing evironmental pollution. In: ANPP-BCPC SECOND INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON PESTICIDE APPLICATION TECHNIQUES, 2., Proceedings... Thornton Heath: British Crop Protection Council, Strasbourg, France, p. 305–312.

MANDANI, E. H. E ASSILIAN, S. (1974). Application of fuzzy algorithm for control of simple dynamic plant. In **Proceedings of the IEEE**, v.121, n.12, p.1585–1588.

MAOHUA, W. (1999). Possible adoption of precision agriculture for developing countries at the threshold of the new millennium. In: **Proceedings of 99th International Conference on Agricultural Engineering, SBMAC**, 99th., Proceedings...Beijing, China, pp. 44–48.

MAXWELL, B. D.; LUSCHEI, E. C. (2005). Justification for site-specific weed management based on ecology and economics, Weed Science, Ithaca, v.53, p.221–227.

MAYER, G. E. et al. (1998). Textural imaging and discriminant analysis for disdinguishing weeds for spot spraying, **Transactions of the ASAE** v.41, n.4, p.1189–1197.

MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. (1997). Fundamentos da Mecânica dos Fluídos, Brasil: Edgard Blücher.

NATIONAL INSTRUMENTS (2007). PID control toolkit user manual, p.2–1 – 2–7.

NATIONAL INSTRUMENTS (2003). Labview - user manual.

PAICE, M. E. R.; MILLER, P. C. H.; BODLE, J. D. (1995). An experimental sprayer for the spacially selective application of herbicides, **Journal of Agricultural Engineering Research**, New York, v.60, n.2, p.107–116.

PASSINO, K. M.; YURKOVICH, S. (1997). Fuzzy Control. USA: Addison Wesley Longman.

PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. (1998). An Introduction to Fuzzy Sets. Cambridge: MIT Press.

PERESSIN, V. A.; PERECIN, D. (2001). Avaliação do desempenho de bicos para aplicação de herbicidas: Efeitos da altura do alvo nos padrões de distribuição. In: SIMPÓ-SIO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO DE AGROTÓXICOS: EFICIÊNCIA, ECONOMIA E PRESERVAÇÃO DA SAÚDE HUMANA E DO AM-BIENTE, 2., **Anais...** Campinas: Bragantia. PERNOMIAN, V. A. (2002). Identificação de plantas invasoras em tempo real.
126f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação,
Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

RIETZ, S.et al. (1997). Performance of electronic controls for field sprayers, **Journal** of Agricultural Engineering Research, New York, v.68, n.4, p.399–407.

SHAHIN, M. A.; TOLLNER, E. W.; MCCLENDON, R. W. (2001). Artificial intelligence classifiers for sorting apples based on watercore, **Journal of Agricultural Engineering Research**, New York, v.79, n.3, p.265–274.

SHEARER, S. A.; HOLMES, R. G. (1990). Plant identification using color cooccurrence matrices. **Transactions of the ASAE**, New York, v.33, n.6, p.2037–2044.

SHIRATSUCHI, L. S. (2001). Mapeamento da Variabilidade Espacial das Plantas Daninhas com a Utilização de Ferramentas da Agricultura de Precisão, Dissertação (Mestrado), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

STAFFORD, J. V.; MILLER, P. C. H. (1993). Spatially selective application of herbicide to cereal crops, **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v.9, p.217–229.

SWINTON, S. M. (2005). Economics of site-specific weed management, Weed Science, Ithaca, v.53, n.2, p.259–263.

TSCHIEDEL, M. E FERREIRA, M. F. (2002). Introdução à agricultura de precisão: Conceitos e vantagens, **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.1, p.159–163.

TIAN, L. (2002). Development of a sensor-based precision herbicide application system, Computers and Electronics in Agriculture, Amsterdam, v.36, n.2-3, p.133–149.

TIAN, L.; SLAUGHTER, D. C.; NORRIS, R. F. (1997). Outdoor field machine vision identification of tomato seedlings for automated weed control, **Transactions of the ASAE**, New York v.40, n.6, p.1761–1768.

TIEPPO, R. C.et al. (2007). Avaliação de diferentes interpoladores na geração de mapas temáticos da produtividade de soja e agricultura de precisão. In: SIAP-2007
SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA DE PRECISÃO, 4., Anais..., Viçosa: DEBOER, J.L. .

VIEIRA, S. R. (1995). Uso da Geoestatística em Estudos de Variabilidade Espacial, Curso de Atualização em Conservação do Solo, Campinas, IAC.p. 1-61,

VIEIRA, S. R. (2000). Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo, In: Novais, R.F., Alvarez, V.V.H., Schaefer, C.E.G.R. Tópicos em Ciência do Solo, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, p. 1–54.

WALTERS, R. B. (1991). Hydraulic and Electro-hydraulic Control Systems, Wembley, UK. Kluwer Academic Publishers,

WILES, L. J. (2005). Sampling to make maps for site-specific weed management, Weed Science, Ithaca, v.53, n.2, p.228–235.

WOEBBECKE, D. M.et al. (1992). Plant species identification, size, and enumeration using machine vision techniques on near-binary images, **SPIE Optics in Agriculture and Forestry**, Kluwer, Netherlands, v.1836, p.208–217.

YANG, C. C.et al. (2000). Recognition of weeds with image processing and their use with fuzzy logic for precision farming, **Canadian Agricultural Engineering**, Ottawa, v.42, n.4, p.195–200.

YANG, C. C.et al. (2002). A vegetation localization algorithm for precision farming, **Biosystems Engineering**, London, v.81, n.2, p.137–146.

ZADEH, L. A. (1965). Fuzzy sets, Information and Control, New York, v.8, n.3, p.338–353.

ZHANG, N.; CHAISATTAPAGON, C. (1995). Effective criteria for weed identification in wheat fields using machine vision, **Transactions of the ASAE**, New York, v.38, n.3, p.965–975.

ZUNG, P.; PERNG, M. (2002). Nonlinear dynamic model of a two-stage pressure relief valve for designers, Journal of Dynamic Systems Measurement and Control - Transactions of the ASME, New York, v.124, n.1, p.62–66.