



FRANCISCO MANOEL FILHO

**PROJETO DE UM CONTROLADOR *FUZZY-PI* PARA
AJUSTE AUTOMÁTICO DE VELOCIDADE DA
COLHEDORA DE CANA-DE-AÇÚCAR**

**CAMPINAS
2013**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

FRANCISCO MANOEL FILHO

**PROJETO DE UM CONTROLADOR *FUZZY*-PI PARA
AJUSTE AUTOMÁTICO DE VELOCIDADE DA
COLHEDORA DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Orientador: Prof. Dr. Nelson Luís Cappelli

Tese de Doutorado apresentada a Faculdade de Engenharia Agrícola da Unicamp, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola na área de concentração de Máquinas Agrícolas.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA PELO ALUNO FRANCISCO MANOEL FILHO E ORIENTADO PELO PROF. DR. NELSON LUÍS CAPPELLI.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

A handwritten signature in blue ink, written over a horizontal line. The signature is stylized and appears to be "N. L. Cappelli".

**CAMPINAS
2013**

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

M317p Manoel Filho, Francisco, 1974-
Projeto de um controlador fuzzy-PI para ajuste automático de velocidade da colhedora de cana de açúcar / Francisco Manoel Filho. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Nelson Luís Cappelli.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Automação. 2. Máquinas agrícolas - Velocidade. 3. Lógica fuzzy. 4. Agricultura - Mecanização. 5. Cana-de-Açúcar. I. Cappelli, Nelson Luís, 1954-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Design of a fuzzy-PI controller for automatic speed adjustment of sugar cane harvester

Palavras-chave em inglês:

Automation

Agricultural machinery - Speed

Fuzzy logic

Agriculture - Mechanization

Cane sugar

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora:

Nelson Luís Cappelli [Orientador]

Jorge Luís Mangolini Neves

Lino Rosell Valdenebro

Paulo Sérgio Graziano Magalhães

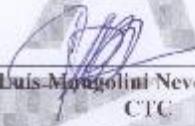
Cláudio Kiyoshi Umezu

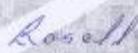
Data de defesa: 16-08-2013

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

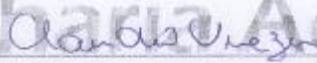
Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Francisco Manoel Filho**, aprovada pela Comissão Julgadora em 16 de agosto de 2013, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.


Prof. Dr. Nelson Luis Cappelli – Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp


Dr. Jorge Luis Mongolini Neves – Membro Titular
CTC


Prof. Dr. Lino Rosell Valdenebro - Membro Titular
Unisal


Prof. Dr. Paulo Sérgio Graziano Magalhães - Membro Titular
Feagri/Unicamp


Dr. Claudio Kiyoshi Umezu - Membro Titular
Feagri/Unicamp

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Francisco (In memoriam) e Silvia, e aos meus filhos, Olívia e Marcelo.

Nenhum deles entendia o que eu fazia e nem o porquê.

Assim mesmo, à sua maneira, cada um me amou, apoiou e incentivou.

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Dr. Robert Liang Koo, meu ex-chefe na empresa SDC Engenharia de Sistemas, que um dia me viu aqui onde estou e me estimulou a ingressar e seguir na carreira acadêmica. Ao Dr. Antonio Carlos Loureiro Lino, do IAC, que me pegou pela mão e me trouxe à FEAGRI, e me passou as primeiras orientações para ingresso como aluno especial e, posteriormente, como aluno regular no programa de mestrado. Ao prof. Dr. Inácio Maria Dal Fabbro, meu primeiro orientador na FEAGRI, que me ouviu e me conduziu até o LIC.

Ao meu orientador prof. Dr. Cappelli, pela amizade e pelas oportunidades desde 2003, passando pelas disciplinas como aluno especial, pela especialização no LIC e pelo mestrado, pela habilidade na administração das expectativas pessoais, pela orientação muito além da científica e técnica, pelo exemplo de seriedade, empenho, responsabilidade e trabalho. Ao Dr. Claudinho Umezu, um gigante incansável, pela amizade e orientação técnica permanente, sempre à disposição, sempre pronto à ajudar. Aos companheiros de trincheira, Edison Russo, Angel Garcia, Eduardo Nunes e, mais recentemente, Fabrício Soares. Pela solidariedade nas reuniões de sexta-feira, pela alegria pós-traumática, uma verdadeira terapia de grupo para assimilação do estilo Cobra de administração.

Ao amigo Renato Chaves de Souza (SJBV) por ter insistido tanto para eu prestar concurso no IFSP e, já no campus Salto, aos amigos José Antonio Neves, Paulo Sérgio Prampero e Marcelo de Paiva Guimarães (atualmente na UNIFESP), pela humanidade e solidariedade enquanto eu trabalhava no campus, morando em São Paulo. Durante dois anos vocês facilitaram minha vida em tudo que estava ao alcance, me estimularam a perseverar e quando eu estava para desistir, viabilizaram minha transferência para o campus São Paulo.

Ao amigo Jorge Mangolini Neves, do CTC, por tanto empenho, tanta assistência na realização deste trabalho. Ao amigo Marcelo Borges, da Rhodia, meu “motorista particular”, o verdadeiro TEG (Transporte Escolar Gratuito) de ensino superior. Carona e amizade na rodovia Anhanguera nos últimos semestres do doutorado.

À minha esposa Lili, aos meus filhos Olívia e Marcelo, à minha sogra Marta Melo, à minha mãe Silvia e à minha irmã Martha, que me suportaram durante todo esse percurso. À todos aqueles suavizaram essa jornada, com sorrisos, com amizade e alegria. Mas, acima de tudo, o meu agradecimento à Deus, por ter colocado todas essas pessoas no meu caminho. Só Ele tem condições de retribuir à todos, e esse é o meu desejo.

*Não é dos fortes a vitória,
Nem dos que correm melhor.
Mas dos fiéis e sinceros
Que seguem junto ao Senhor*

Fanny Jane Crosby
Salomão Luiz Ginsburg

RESUMO

A mecanização da colheita de cana é um processo irreversível no Brasil, tanto por aspectos ambientais quanto econômicos. A agroindústria canavieira da Região Sudeste tem o maior índice de mecanização, compondo a maior frota de colhedoras de cana picada do país. Essas máquinas oferecem diversos dispositivos, visando uma colheita limpa e sem perdas visíveis. Contudo, a literatura científica relata significativos índices de perdas e impurezas associados à colheita mecanizada da cana, em razão da ineficiência destes dispositivos e também pelo seu uso inadequado. Afim de minimizar erros operacionais, este trabalho apresenta o projeto de um controlador *fuzzy*-PI para ajuste automático da velocidade da colhedora de cana picada em função das condições operacionais. O desenvolvimento desse projeto envolveu a construção de uma base de conhecimento especialista contendo a experiência de profissionais da colheita mecanizada da cana na condução da colhedora. A partir dessa base de conhecimento, utilizando-se o “*Fuzzy Logic Toolbox*” do MATLAB, desenvolveu-se um sistema especialista *fuzzy*, com a função de indicar um índice que representa a velocidade de deslocamento da colhedora. Esse sistema especialista combinou dois *Fuzzy Inference System*, um para as variáveis relacionadas à Cultura e outro para as variáveis relacionadas ao Ambiente. No projeto do controlador, o sistema especialista foi integrado como gerador de *setpoint* de velocidade, e envolveu a construção do diagrama de blocos do sistema hidráulico no MATLAB-Simulink, que foi parametrizado segundo a especificação dos componentes da colhedora. A validação do sistema foi feita através de cenários operacionais específicos, simulados no modelo e confrontados por especialistas na área, alcançando 86,5% de acerto, indicando potencial técnico para a implantação do controlador.

PALAVRAS CHAVE: automação; controle de velocidade; modelos matemáticos; apoio à decisão; lógica nebulosa

ABSTRACT

The mechanization of the sugarcane harvest is an irreversible process in Brazil, both environmental and economic aspects. The sugar cane industry in the southeast region has the highest rate of mechanization, composing the largest fleet of combines chopped cane country. These machines offer several devices, targeting a harvest clean and without visible losses. However, the scientific literature reports significant loss ratios and impurities due to mechanized harvesting of sugarcane due to the inefficiency of these devices and also for its misuse. In order to minimize operational errors, this search presents the design of a fuzzy-PID controller for automatic adjustment of the speed of sugar cane harvester according to operating conditions. The development of this project involved the construction of a knowledge base containing the expertise of specialists in mechanical harvesting of sugarcane in driving the harvester. From this knowledge base, using the MATLAB Fuzzy Logic Toolbox, it was developed a fuzzy expert system with the function of indicating an index that represents the speed of the harvester. This expert system combined two Fuzzy Inference System, one for the variables related to culture and other variables related to the environment. In the controller design, the expert system was integrated as generator speed setpoint, and involved the built of block diagram of hydraulic system in MATLAB-Simulink, which was parameterized according to the specification of the components of the harvester. The validation of the system was done through specific operational scenarios simulated in the model, and confronted by experts in the field, reaching 86.5% accuracy, indicating technical potential for the deployment of the driver.

KEYWORDS: automation; speed control; mathematical models; decision support; fuzzy logic

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura de um sistema <i>fuzzy</i> _____	12
Figura 2: Planilha para indicação da velocidade na base de regras Cultura _____	25
Figura 3: Planilha para indicação da velocidade na base de regras Ambiente _____	25
Figura 4: Base de regras inserida no <i>Fuzzy Logic Toolbox</i> do MATLAB _____	26
Figura 5: FIS Cultura _____	32
Figura 6: FIS Ambiente _____	33
Figura 7: Funções de pertinência da variável <i>fuzzy</i> Topografia _____	34
Figura 8: Funções de pertinência da variável <i>fuzzy</i> Obstáculos _____	35
Figura 9: Funções de pertinência da variável <i>fuzzy</i> Adensamento _____	36
Figura 10: Funções de pertinência da variável <i>fuzzy</i> Posição _____	36
Figura 11: Funções de pertinência da variável <i>fuzzy</i> Topografia _____	37
Figura 12: Funções de pertinência da variável <i>fuzzy</i> Obstáculos _____	38
Figura 13: Funções de pertinência da variável <i>fuzzy</i> Chuva _____	38
Figura 14: Funções de pertinência da variável <i>fuzzy</i> Drenagem _____	39
Figura 15: Funções de pertinência da variável <i>fuzzy</i> Velocidade _____	40
Figura 16: Modelo combinando FIS Cultura e Ambiente para simulação e otimização; (a) Posição; (b) Adensamento; (c) Topografia; (d) Obstáculos; (e) Chuva; (d) Drenagem _____	41
Figura 17: Sobreposição entre duas populações (FAWCETT, 2006) _____	42
Figura 18: Diferença entre a resposta do Especialista Humano e o Sistema Especialista _____	47
Figura 19: Matriz de Confusão _____	49
Figura 20: Curva ROC para cada classe da saída de velocidade _____	50
Figura 21: Curva ROC para o sistema especialista _____	50
Figura 22: Diagrama do controlador proposto _____	57
Figura 23: Circuito hidráulico de transmissão da colhedora CASE A7700, com destaque para o ponto de atuação (a) do sistema de controle PI no deslocamento (<i>displacement</i>) do motor hidráulico. _____	58
Figura 24: Subsistemas do modelo matemático desenvolvido _____	58
Figura 25: Diagrama de blocos da unidade diesel _____	68
Figura 26: Diagrama de blocos da unidade hidráulica _____	68
Figura 27: Diagrama de blocos do sistema de rodagem _____	69
Figura 28: Diagrama de blocos do sistema de controle _____	69
Figura 29: Desempenho do motor diesel na simulação _____	70
Figura 30: Desempenho da bomba hidráulica na simulação _____	70
Figura 31: Resposta do controlador aos cenários simulados _____	71
Figura 32: Velocidade simulada da colhedora em boas condições degradadas _____	72
Figura 33: Velocidade simulada da colhedora em más condições mecânicas _____	72
Figura 34: Recursos da colhedora de cana picada _____	86
Figura 35: Painel de instrumentos da colhedora CASE A7700 _____	88
Figura 36: Parte superior do painel de instrumentos da colhedora CASE A7700 _____	89
Figura 37: Parte inferior do painel de instrumentos da colhedora CASE A7700 _____	89
Figura 38: Coluna de direção da colhedora CASE A7700 _____	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variáveis de entrada e termos linguísticos (MANOEL FILHO, 2011).....	24
Tabela 2: Termos linguísticos e seus intervalos de valores.....	47
Tabela 3: Valores da diferença por intervalo.....	48
Tabela 4: Testes para avaliação do controlador.....	61

LISTA DE SÍMBOLOS

A e B são classes da variável *fuzzy* velocidade, respectivamente, Alta e Baixa;

EE é a exatidão específica de uma classe da matriz de confusão [%];

EG é a exatidão global [%];

k é o ponto de corte;

kao e kco são constantes que representam a influência do ambiente e cultura, respectivamente;

m é o grau de pertinência de uma variável *fuzzy*;

n é o total de elementos de uma população;

MB, Me e MA são classes da variável *fuzzy* velocidade, respectivamente, Muito Baixa, Alta e Muito Alta;

P é a pressão de operação da bomba ou motor hidráulico;

Q_T é a vazão de operação da bomba ou motor hidráulico;

$Q_{Saída}$ é a vazão de saída da bomba ou motor hidráulico;

$Q_{Entrada}$ é a vazão de entrada da bomba ou motor hidráulico;

r é o número de linhas da matriz de confusão;

T é o torque nominal da bomba ou motor hidráulico;

x_i é o i-ésimo elemento da população testado;

x_{ii} é um elemento da diagonal principal da matriz de confusão;

Δ Erro é a variação do erro [%];

η_{Tot} é o rendimento total da bomba ou motor hidráulico;

η_{Tot} é o rendimento volumétrico da bomba ou motor hidráulico;

ω é a rotação de operação da bomba ou motor hidráulico;

θ é um conjunto *fuzzy*;

LISTA DE ABREVIACÕES

CONAB - Companhia Nacional De Abastecimento

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

FIS - Sistema de Inferência Fuzzy (do inglês *Fuzzy Inference System*);

FN - Falso Negativo;

FP - Falso Positivo;

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil;

MISO – Múltiplas entradas, saída única (do inglês *Multiple Inputs, Single Output*);

PO - Ponto de Operação;

PI – Proporcional, Integral;

ÚNICA - União da Agroindústria Canavieira

VN - Verdadeiro Negativo;

VP - Verdadeiro Positivo;

VDC - Velocidade de Deslocamento da Colhedora;

Sumário

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVO GERAL	4
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
CAPÍTULO 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. SENSORES APLICADOS AOS SUBSISTEMAS OPERACIONAIS DA COLHEDORA DE CANA	5
2.2. SISTEMAS DE CONTROLE AUTOMÁTICO EM EQUIPAMENTOS AGRÍCOLAS	8
2.3. SISTEMA DE CONTROLE FUZZY NA ÁREA AGRÍCOLA	9
2.3.1. <i>Fundamentação teórica</i>	9
2.3.2. <i>Projetos de sistema de inferência fuzzy</i>	14
2.3.3. <i>Aplicações de sistemas fuzzy na área agrícola</i>	15
CAPÍTULO 3. CONSTRUÇÃO DE UMA BASE DE CONHECIMENTO ESPECIALISTA SOBRE O AJUSTE DA VELOCIDADE DA COLHEDORA DE CANA DE AÇÚCAR	17
RESUMO	17
ABSTRACT	17
3.1. INTRODUÇÃO	18
3.2. MATERIAIS E MÉTODOS	19
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
3.4. CONCLUSÃO	26
3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27
CAPÍTULO 4. SISTEMA ESPECIALISTA FUZZY PARA RECOMENDAÇÃO DA VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO DA COLHEDORA DE CANA DE AÇÚCAR	28
RESUMO	28
ABSTRACT	28
4.1. INTRODUÇÃO	29
4.2. MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.2.1. <i>Avaliação do sistema</i>	41
4.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.4. CONCLUSÕES	51
4.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
CAPÍTULO 5. CONTROLADOR FUZZY-PI PARA AJUSTE AUTOMÁTICO DA VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO DA COLHEDORA DE CANA DE AÇÚCAR	54
RESUMO	54
ABSTRACT	54
5.1. INTRODUÇÃO	55
5.2. MATERIAIS E MÉTODOS	57
5.2.1. <i>Parametrização do diagrama de blocos criado no pacote Simulink do programa MATLAB R2012a</i>	62
5.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	68
5.4. CONCLUSÕES	73

5.5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
CAPÍTULO 6.	CONCLUSÕES GERAIS	76
CAPÍTULO 7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
CAPÍTULO 8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
APÊNDICES		85
ANEXOS		92

Capítulo 1. INTRODUÇÃO

A indústria da cana apresenta, historicamente, relevância econômica mundial. E nas últimas décadas sua participação se mostra cada vez mais significativa na economia, principalmente em função de fatores ambientais e energéticos. Dados do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2012), mostram que a produção mundial de açúcar, em toneladas, cresceu a uma taxa média de 1,12% a.a. entre 2002 e 2007. Neste cenário, destacam-se como principais países produtores de açúcar: Brasil (37%), Índia (16%) e China (6%) (MAPA, 2012).

O Brasil é o país que apresenta o maior crescimento na produção de cana. Em 2006, a quantidade produzida atingiu 420 milhões de toneladas e em 2012/2013 ficou próxima de 533 milhões (UNICA, 2013). Para o biênio 2013/2014, é previsto que a produção do país atinja mais de 587 milhões de toneladas. Desse volume de produção, em média, 60% da cana colhida é destinada à produção de álcool (para todos os fins) e o restante para a produção de açúcar. Segundo dados da União da Agroindústria Canavieira (UNICA, 2013), em 1975, a produtividade média brasileira era de 50t ha⁻¹, enquanto que, na safra 2012/2013, a produtividade média chegou a 70t ha⁻¹.

Estudos do MAPA revelam que, entre 2006 e 2012, a produção brasileira de açúcar cresceu em média 5,3% ao ano, estando concentrada na região Centro-Sul, responsável por 90% da produção nacional (UNICA, 2013), e o restante na região Norte-Nordeste. Ainda segundo a UNICA (2013), o estado de São Paulo é o maior produtor de açúcar, com 56% da produção nacional, seguido por Goiás (8,9%) e Minas Gerais (8,7%). Desde 1975, com a implantação do Proálcool, as áreas utilizadas na plantação de cana se expandiram, e a previsão é de que, na safra 2013/2014 o crescimento chegue a 3,7% (alcançando 8,8 milhões de hectares) em relação à safra 2012/2013, cuja a área ocupada com cana foi de 8,5 milhões de hectares (CONAB, 2013).

A evolução da indústria canavieira apresentada anteriormente é amparada por um processo de mecanização acentuado e expansão da área de cana plantada ocorridos nas últimas décadas, conforme Veiga (1998). Segundo esse autor, diversos fatores contribuíram para a construção desse cenário do setor sucroalcooleiro, entre eles a estabilidade comercial do produto, que permitiu ao produtor melhor planejamento financeiro para investir em tecnologia,

políticas de incentivo do governo, melhor aproveitamento do potencial energético dos produtos e derivados da cana e a concorrência internacional provocada pela globalização, que aumentou a pressão por produtividade.

Além desses fatores, questões ambientais aceleram o processo de mecanização da colheita da cana, sobretudo no estado de São Paulo, o maior produtor de cana do Brasil (Bittencourt, 2008). Neste estado, desde 2002, vigora a Lei 11241, que estabelece um cronograma para encerramento da atividade de queima da palha, etapa fundamental para a colheita manual da cana de açúcar. Segundo essa lei, que ficou conhecida com a “lei das queimadas”, os produtores do estado devem eliminar esse procedimento até 2021 nas áreas mecanizáveis e 2031 nas áreas não mecanizáveis. Mas a pressão para eliminação da queima é tão grande que, em 2007, o governo do estado juntamente com a UNICA, firmaram um acordo de incentivos voltados aos produtores que conseguirem antecipar a eliminação da queima para 2014 nas áreas mecanizáveis.

Um dos desafios enfrentados pela mecanização refere-se ao desemprego gerado em função da desqualificação do trabalhador empregado no corte manual de cana, ainda existente. Segundo pesquisa realizada por Abreu et al. (2009), uma colhedora de cana moderna substitui 100 homens e a colheita manual que restará, será realizada apenas nas áreas impróprias para a utilização das máquinas, onde normalmente as condições de trabalho são piores devido ao relevo e condições da cultura.

Além do problema social enfrentado, Paiva (2008), entrevistando Luís Bellini, coordenador do GMEC (Grupo de Motomecanização do Setor Sucroalcooleiro), responsável por avaliar e propor melhorias em máquinas e implementos agrícolas do setor, aponta a necessidade de aprimoramento tecnológico nas colhedoras de cana que, apesar de ano a ano baterem recordes em vendas, não se modernizam com a mesma intensidade.

Observando-se o painel de operação de uma colhedora de cana, especificamente a CASE A7700 (Apêndice A), verifica-se mais de 30 comandos operacionais no mesmo, onde o operador, além de se preocupar com a direção da máquina, precisa monitorar o alinhamento com o transbordo e a velocidade de deslocamento da mesma. Durante a colheita, sua atenção fica concentrada nessas operações, negligenciando o ajuste de outros subsistemas da máquina, como o ajuste de altura do corte de base, a altura do cortador de pontas, inclinação e rotação do elevador e a velocidade do extrator primário, conforme pode ser verificado durante

acompanhamento da colheita na fazenda Estância Garcia, colhendo para a Usina Santa Inês, no município de Rincão/SP.

O operador, por negligenciar o ajuste destes subsistemas da colhedora, acaba comprometendo a produtividade e a segurança da operação, uma vez que tais subsistemas estão relacionados à limpeza e ao aproveitamento da cana e, no caso do elevador, ao equilíbrio da máquina durante a colheita.

Existem algumas iniciativas da indústria visando aliviar a quantidade de tarefas realizadas pelo operador através da implantação de sistemas automatizados. Um exemplo disto é o controle AutoTracker, acessório opcional para as colhedoras de cana CASE. Esse sistema regula a altura do corte de base, levando em consideração as condições do relevo. Mas este sistema, apesar de possuir um recurso de autocalibração, depende de conhecimentos técnicos do operador, como grandezas físicas e medidas, necessários para parametrização. As colhedoras 3520 da empresa John Deere também oferecem recursos tecnológicos a seus usuários. Elas possuem um computador de bordo que contém informações do equipamento, como pressão do óleo do motor, temperatura da água do sistema de arrefecimento, temperatura do óleo hidráulico e pressão do óleo hidráulico em alguns subsistemas, como do cortador de base. A colhedora 3520 também possui um sistema de piloto automático, passível de melhorias.

Os centros de pesquisa também têm se esforçado para automatizar operações das colhedoras, conforme pode ser visto nos sistemas propostos por Baldo (2007), onde o autor desenvolve um sistema para alinhamento entre a colhedora e o transbordo e Gray (2008), que desenvolve um modelo e simula um dispositivo automático de corte de base para as colhedoras de cana.

Percebe-se, assim, o reconhecimento da comunidade científica e industrial de que é necessário a automação de recursos da colhedora de cana, para permitir que o operador se concentre no comando de subsistemas que dependam exclusivamente do conhecimento e avaliação do mesmo durante a colheita. E, pela velocidade de deslocamento da máquina ser um dos fatores operacionais que mais demandam atenção do operador, esse trabalho tem como hipótese que é possível controlar automaticamente a velocidade da colhedora de cana considerando-se variáveis relacionadas à cultura e ao ambiente, propondo para confirmação desta o projeto e simulação de um controlador automático de velocidade da colhedora,

baseando-se em informações de campo fornecidas pelo operador e por sensores da máquina, quando disponíveis.

Para o desenvolvimento desse trabalho, foi considerada a documentação e características da colhedora de cana CASE A7700 (Apêndice A), por ser um dos modelos mais utilizados no Brasil e no mundo.

1.1. Objetivo geral

Propor um controlador automático para ajuste da velocidade de deslocamento da colhedora de cana, baseado num sistema de inferência *fuzzy*.

1.2. Objetivos específicos

- Desenvolver uma base de conhecimento especialista
- Implementar e validar um Sistema Especialista capaz de indicar a velocidade da colhedora em função das condições de campo
- Projetar e simular um controlador PI para a velocidade cujo *setpoint* é dado pelo Sistema Especialista

Capítulo 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Sensores aplicados aos subsistemas operacionais da colhedora de cana

Existem diversas pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de sensores para utilização em colhedoras de cana mecanizada. Esses sensores são fundamentais como fonte de informação básica para o desenvolvimento de sistemas de controle automático para dispositivos da colhedora associados à limpeza, perdas e segurança da colheita. Entretanto, a tecnologia atual e as condições de aplicação em campo dificultam a utilização da maioria desses sensores nas máquinas, adiando a automação desses dispositivos e continuando a exigir o conhecimento especialista do operador para a correta utilização dos mesmos.

McCarthy et al. (2000) desenvolveram um sensor para monitoramento das perdas visíveis de cana no principal sistema de limpeza da colhedora, o extrator primário. O extrator primário separa as impurezas da cana cortada através de um fluxo de ar gerado por uma hélice acionada por um motor hidráulico. Neste processo, em função da rotação do motor hidráulico e, conseqüentemente, da velocidade de sucção do ar provocada pela mesma, são arrastados não somente impurezas, mas também toletes de cana. O sistema monitora o impacto dos toletes de cana nas hélices do extrator primário, através de transdutores acústicos instalados no mesmo. O sinal gerado por esses transdutores é filtrado e processado num computador instalado na cabine da colhedora, permitindo-se associar claramente cada impacto de tolete na hélice a um pico de sinal na amostra coletada.

Com a mesma finalidade, Neves et al. (2004) utilizaram um monitor de perdas baseado em sensores piezoelétricos de impacto, instalados no capuz do extrator primário. Na medida em que o capuz é atingido pelos toletes, o monitor indica a quantidade de eventos em sua interface instalada na cabine, representados pelo impacto dos toletes no capuz. Segundo os autores, tal monitor teve sensibilidade adequada à detecção do impacto dos toletes no capuz, servindo como uma ferramenta para o operador da colhedora regular a velocidade do extrator primário. Nesses dois trabalhos, a função do sistema desenvolvido é dar informação ao operador, para que o mesmo avalie a necessidade de ajustar a velocidade do extrator primário. A integração desse sensor numa malha de controle automático dependeria de informações de campo, como idade da planta, umidade e tonelagem de cana por hectare, pois são fatores que

afetariam o nível de aceitação de perdas no controlador e, conseqüentemente, o ajuste da velocidade de rotação do extrator. Além disso, a sensibilidade do sensor deveria ser ajustada mediante esses fatores, uma vez que o sistema deveria ser capaz de diferenciar o impacto provocado por toletes de cana mais fraca (finos) e de cana mais forte (grossos), além dos ponteiros e eventuais estilhaços dos mesmos.

Woods et al. (2002), interessados em minimizar a contaminação da matéria-prima, perda de produtividade da planta e também o desgaste prematuro do sistema de corte de base da colhedora de cana, desenvolveram um sensor que detecta a variação de relevo, que serviria de informação para um sistema de ajuste automático da altura do sistema de corte de base. Esse sensor é composto por elementos emissores e receptores de micro-ondas, instalados à frente do sistema de corte de base, de forma a constituírem uma barreira. A presença de terra entre os emissores e receptores atenuava de forma significativa o sinal transmitido, permitindo que o sensor respondesse proporcionalmente com um sinal elétrico, coletado por uma interface para aquisição de dados instalada num computador. Observa-se que esse sistema encontra desafios na sua fixação e exposição à vibração do equipamento, pois é necessário que o sensor acompanhe a altura do cortador de base. Essa característica diminui a rigidez do mecanismo para fixação do emissor e receptor, deixando-o sujeito a desalinhamento, que pode ser agravado em função de impacto no solo devido à variação do relevo.

Volpato (2001) projetou um mecanismo cujo objetivo era regular a altura do cortador de base em função do relevo percebido pelo referido mecanismo, como parte de uma linha de pesquisa que propunha alterações significativas no conceito da colhedora de cana da época. Esse sistema mecânico funcionava como um apalpador do solo que, mecanicamente, corrigia a altura do cortador de base. Neste caso, a distância entre o apalpador e o dispositivo de corte de base é crítica, uma vez que as variações de relevo encontradas entre os dois dispositivos podem ser significativas.

McCarthy e Billingsley (2002) desenvolveram um sensor para identificar a concentração de açúcar na cana, visando regular a altura do cortador de pontas da colhedora, uma vez que as pontas da cana possuem pouca concentração de açúcar. Esse sensor se baseia em propriedades refratométricas do açúcar em solução e utiliza um sensor CCD (*Charge-Coupled Device*) com arranjo linear de 64 pixels, um prisma óptico e uma fonte de luz conhecida. Parte da luz gerada pela fonte, ao passar pelo prisma, é refletida para o sensor CCD

linear e parte sofre refração. Essa luz que sofre refração no prisma é refletida pela solução de açúcares da cana, atingindo, então, o sensor CCD linear. Desta forma, na medida em que a concentração de açúcar aumenta, mais luz atinge o sensor CCD, aumentando o sinal elétrico de saída do mesmo, que então pode ser acoplado a um sistema computacional para regulação da altura do cortador de pontas, explorando as propriedades físico-químicas da cana, em especial do açúcar, através de matrizes de sensores de luz. Os autores destacaram o potencial de aplicação da tecnologia em campo, apesar de serem conhecidas restrições ao seu uso relacionadas à garantia das condições de inspeção, sobretudo associadas a sujeira nos sensores e água, que funcionaria como uma lente, mudando a direção da luz, por refração. Observa-se, também, dificuldades quanto ao posicionamento do feixe de luz, uma vez que as plantas não possuem a mesma altura e largura.

Com o objetivo de elaborar mapas de produtividade em tempo real, Cerri (2005) instrumentou uma colhedora de cana e desenvolveu um *software* capaz de quantificar a massa colhida e a posição da máquina no campo, através de um GPS. Para isso, instalou células de carga no elevador da colhedora para apurar o fluxo mássico de cana na posição indicada pelo GPS. Sensores auxiliares fizeram parte do sistema, sendo instalados acelerômetros em diversas partes da colhedora, para identificar a frequência de vibração da máquina e permitir a filtragem do sinal da célula de carga, além de um inclinômetro no elevador para corrigir a leitura da mesma. Neste sistema observa-se que a filtragem do sinal das células de carga, com tensões na ordem de milivolt, é crítica. E por isso, a quantidade e posicionamento dos acelerômetros foi uma etapa substancial a ser vencida nos testes do sistema, em campo. Além disso, folgas nos mecanismos do elevador e a própria oscilação do mesmo (em função do deslocamento e relevo) também tornaram a correção da massa medida, baseada no inclinômetro, mais complexa.

Baldo (2007) desenvolveu um sistema de apoio ao operador, sinalizando o desalinhamento entre a colhedora e o transbordo. Para isso, instalou sensores de ultrassom na colhedora, de forma que estes gerassem um sinal analógico proporcional à presença do transbordo. Caso o transbordo se adiantasse ou atrasasse, um sinal luminoso na cabine do trator que puxa o transbordo e na cabine da colhedora indicariam aos operadores a necessidade de avanço ou recuo da máquina. Os equipamentos micro processados instalados em cada uma das cabines se comunicavam via radiofrequência. Esse sistema, assim como o desenvolvido

por Neves et al. (2004) e McCarthy et al. (2000), é apresentado como ferramenta de apoio ao operador, neste caso, auxiliando-o a manter a colhedora alinhada ao transbordo.

2.2.Sistemas de controle automático em equipamentos agrícolas

O desenvolvimento de sistemas de controle automático na área agrícola enfrenta, em diversos momentos, o desafio do sensoriamento adequado para fechamento da malha. As aplicações onde a informação pode ser obtida através de um sensor ou do operador com alguma facilidade, apresentam maior potencial para implantação de tais sistemas.

Umezu (2003) desenvolveu um sistema de controle PID para formulação, dosagem e aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis, baseando-se num mapa de aplicação. Um sistema computacional com um aplicativo desenvolvido em Labview comandava os dosadores em função da posição geo-referenciada da máquina, proveniente de um GPS, que também informava a velocidade de deslocamento da mesma para o aplicativo.

Garcia (2007) desenvolveu um sistema eletrônico microprocessado para aplicação de fertilizante, capaz de variar a velocidade de rotação do motor elétrico que aciona o dosador helicoidal conforme as condições de trabalho se modificavam. O sistema obtém valores de velocidade da máquina através de um *encoder*, e dados configurados pelo operador, atuando na velocidade de rotação do motor de acionamento do dosador, com isso aplicando, de maneira controlada, o fertilizante no solo.

A CASE (2007) desenvolveu um sistema para ajuste automático da altura do sistema de corte de base, utilizando um sensor de pressão instalado no circuito hidráulico do motor que aciona o disco de corte, e um sensor de posição instalado no circuito hidráulico que regula a altura da máquina. Esses sensores são acoplados a uma interface eletrônica onde o operador informa valores máximos e mínimos de pressão de operação, bem como da altura de trabalho (altura de corte) desejada, também informada pelo operador. Ao informar esses parâmetros, o controlador ajusta a altura de corte e, sempre que houver impacto do sistema de corte com o solo, o mesmo é levantado, retornando à posição original automaticamente.

Esse sistema apresenta uma primeira limitação associada à velocidade de reação, uma vez que o levantamento do dispositivo de corte é feito através do levantamento de boa parte da estrutura da colhedora. Uma segunda limitação está associada ao conceito do sistema, uma vez

que, para que seja feita a correção da altura, é necessário que, primeiramente, ocorra o impacto das facas no solo, aumentando a pressão no sistema hidráulico do dispositivo, e assim permitindo que o controlador emita o sinal de atuação em função da leitura do transdutor de pressão.

Matsumoto (2000) desenvolveu um sistema de controle adaptativo para regulagem da altura do corte de base em colhedoras de grãos. Para isso, utilizou a plataforma desenvolvida por Lopes (1999) para simulação do dispositivo de corte da colhedora. O autor implementou o sistema hidráulico para regulagem da altura e a instrumentação da malha de controle, representada por um sensor potenciométrico rotativo e um cilindro hidráulico de dupla ação.

2.3. Sistema de controle fuzzy na área agrícola

2.3.1. Fundamentação teórica

Nos anos 60, o prof. Zadeh (Berkeley, Califórnia) percebeu que a lógica *booleana* era incapaz de solucionar problemas de automação fundamentados em informações vagas e subjetivas. Seus estudos formaram a base da teoria dos conjuntos *fuzzy*, que permite o desenvolvimento de sistemas de controle cuja modelagem matemática é complexa e admitem um certo grau de incerteza em suas variáveis de entrada e saída sem afetar de maneira significativa o desempenho do mesmo. Com essa característica, os sistemas de controle *fuzzy* (fundamentados na teoria dos conjuntos *fuzzy*) apresentam, assim, uma maior aderência ao raciocínio humano, mais qualitativo do que quantitativo.

Apesar do crescimento de aplicações de controle *fuzzy* nas mais diversas áreas da sociedade, em muitos casos persiste a dificuldade em se avaliar a escolha entre um controlador clássico e um *fuzzy*. Segundo Zadeh (1996) existem duas principais razões para a escolha de um controlador *fuzzy* e não um clássico. A primeira, quando o processo for incapaz de oferecer informações precisas que possam ser quantificadas e utilizadas pelo controlador e a segunda, quando o processo suportar imprecisão.

Essas duas características podem ser observadas na colheita mecanizada da cana, através da colhedora de cana picada. Conforme já apresentado anteriormente, ainda não se chegou ao desenvolvimento tecnológico de sensores para obtenção de todas as informações

que influenciam decisões do operador da colhedora de cana. Portanto, não é possível a quantificação dessas grandezas e, assim, a utilização de um controlador clássico fica prejudicada. Por outro lado, o ajuste manual da velocidade da máquina é um procedimento impreciso, baseado na avaliação do operador que a classifica como alta ou baixa para as condições de colheitas do momento.

Num conjunto *fuzzy* não é dada pertinência absoluta a seus elementos. Qualquer elemento do universo de discurso pode pertencer ao conjunto *fuzzy*, onde obtém um grau de pertinência (função de pertinência) referente a quanto o elemento pertence ao conjunto. Portanto, a interpretação dada aos elementos do conjunto *fuzzy* não é “se o elemento pertence ao conjunto” mas sim “quanto ele pertence ao conjunto”.

Os conjuntos *fuzzy* são importantes por conseguirem representar conhecimentos imprecisos ou difusos, que podem ser expressos e manipulados de modo a gerar decisões. A linguagem humana utiliza, frequentemente, conceitos (termos linguísticos) para a descrição de conhecimentos. Os comandos condicionais, baseados na teoria de conjuntos *fuzzy*, envolvem produtos lógicos (mínimos) dos blocos antecedentes "SE", os quais são combinados dentro das somas lógicas (máximos) dos blocos consequentes "ENTÃO".

Define-se uma proposição *fuzzy* como a associação de um conjunto *fuzzy*, representando um conceito, a uma variável linguística. Uma proposição *fuzzy* pode ser representada genericamente por uma construção do tipo (x é θ) onde x é uma variável linguística e θ é um conjunto *fuzzy*.

Define-se regra *fuzzy* como uma regra de produção que utiliza proposições *fuzzy* representando um conceito. A regra é formada por um antecedente, representando uma condição e um consequente, representando uma ação, estruturada em termos de uma associação de proposições *fuzzy*. A estrutura básica de uma regra *fuzzy* é a seguinte:

$$\text{SE } (u_1 \text{ é } \theta_1) \text{ E } (u_2 \text{ é } \theta_2) \text{ E } \dots \text{ E } (u_n \text{ é } \theta_n) \text{ ENTÃO } (y \text{ é } \theta)_N.$$

Como exemplo, pode-se ter, num processo de resfriamento de ar, (sendo x uma variável de vazão de ar, y uma variável de temperatura do ar e z a vazão de fluido refrigerante) regras do seguinte tipo:

$$\text{SE } (x \text{ é baixa}) \text{ E } (y \text{ é baixa}) \text{ ENTÃO } (z \text{ é alta})$$

Significando que se a vazão de ar é baixa e a temperatura é baixa deve-se ter uma alta vazão de refrigerante, aumentando a troca de calor. A definição do que é alto ou baixo é dada pelas funções de pertinência de cada conjunto, que, por sua vez, é dada para cada tipo de variável linguística. O conectivo ENTÃO utilizado na descrição de regras *fuzzy* corresponde ao operador *fuzzy* de implicação. Uma das maneiras de se definir a implicação *fuzzy* é por meio de uma relação *fuzzy*.

Os modelos de controle de processos são típica e simultaneamente multidimensionais e multicondicionais, relacionados com as funções de associações. Os algoritmos de controle da lógica *fuzzy* utilizam termos linguísticos para descrever as variáveis do processo com segurança, economia, efetividade, facilidade e aplicabilidade, sem a necessidade de modelos matemáticos. Devido a dificuldades encontradas no controle de processos como complexidade dos fenômenos simultâneos, modelagem matemática, precisão do modelo, tempo de atuação do controle pelos algoritmos, não linearidade de processos, condições dinâmicas e conhecimento do processo, o controle *fuzzy* torna-se conveniente, uma vez que apresenta as facilidades quanto à adequação da estratégia de controle humano, às regras de controle, à simplicidade das leis de controle, à flexibilidade das variáveis linguísticas e à precisão para implementação no computador.

A principal fonte de conhecimento para construir o algoritmo de controle vem da experiência de controle do operador humano. A configuração consiste num conjunto de condicionais (se - então), onde a primeira parte é chamada de antecedente (condições) e a segunda parte chamada de conseqüente, lida com uma ação (controle) que tem que ser realizada. Assim, da mesma forma que a estratégia humana, as bases de regras *fuzzy* expressam como o controle deve ser realizado quando um certo estado do processo controlado é observado, a partir do conhecimento do operador do processo. Na formação dos condicionais linguísticos para o controle de um processo, há dois tipos de questões importantes para a construção do controlador *fuzzy*, onde o operador, conhecedor do processo, pode prever de forma qualitativa:

- a) Forma de atuação em cada situação do processo, em caso de alteração de alguma variável.
- b) Comportamento do processo em resposta à ação de perturbações externas e das variáveis manipuláveis.

A análise da sistematização verbal é promissora para a modelagem da ação humana em um controle de processo. Os principais aspectos a serem considerados são:

- Características do comportamento do controle humano;
- Desenvolvimento das habilidades no controle de processo;
- Diferenças individuais entre os operadores do processo;
- Organização do comportamento de controle dos operadores;
- Volume de tarefas afetando o desempenho.

A estrutura básica de um sistema *fuzzy* é apresentada na Figura 1, destacando a interface de *fuzzyficação*, a base de regras, o procedimento de inferência e a interface de *defuzzyficação*.

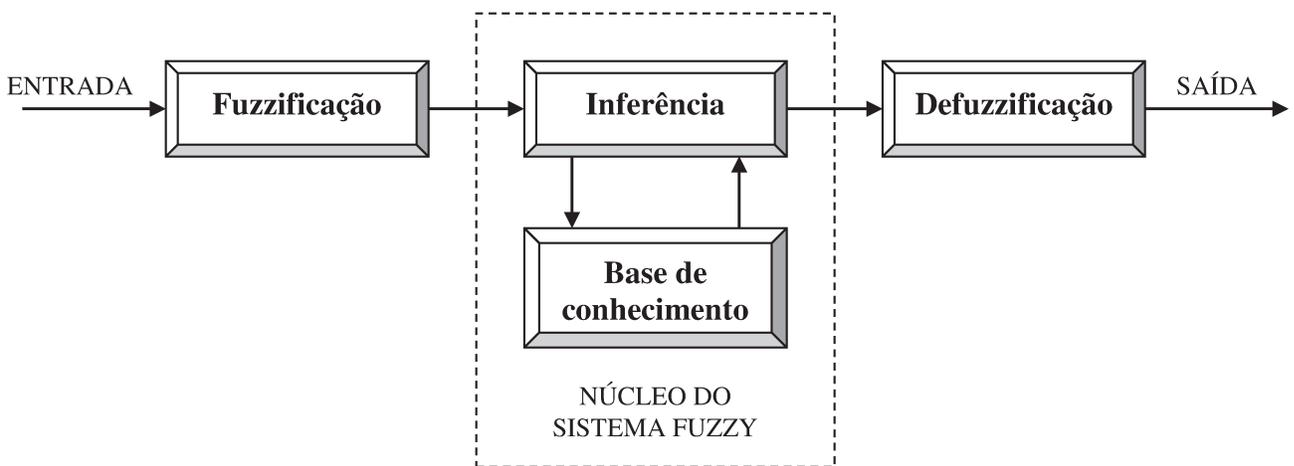


Figura 1: Estrutura de um sistema *fuzzy*

O processo de *fuzzyficação* é responsável pela transformação de um sinal escalar de um sensor de campo, que indica o estado de alguma variável do processo, realizando um escalonamento para condicionar os valores a universos de discurso normalizados, transformando números em conjuntos *fuzzy*, de modo que possam se tornar instâncias de variáveis linguísticas.

O procedimento de inferência processa os dados *fuzzy* de entrada, junto com as regras, de modo a inferir ações de controle *fuzzy*, aplicando o operador de implicação *fuzzy* e as regras

de inferência da lógica *fuzzy*. A base de conhecimento consiste de uma base de regras, caracterizando a estratégia de controle e suas metas. As funções de pertinências definem as normalizações dos universos de discurso, as partições *fuzzy* e formas dos espaços de entrada e saída. A vantagem do uso da base de regras *fuzzy* é a forma de apresentação mais próxima da linguagem humana, tornando a etapa de aquisição do conhecimento especialista mais fácil.

Para que uma determinada informação seja utilizada em um sistema de controle, é necessário tomar o resultado da inferência das diversas regras (que serão conjuntos *fuzzy*) e transformá-lo em valores numéricos correspondentes aos sinais de controle associados às variáveis linguísticas utilizadas nas proposições inferidas. Esta etapa é chamada de *defuzzyficação*. Apesar de não existir nenhum procedimento sistemático para a escolha da estratégia de *defuzzyficação* os critérios mais utilizados são (ARBEX, 1994; GOMIDE e GUDWIN, 1994):

- a) Método do Critério Máximo: Esse método produz, como ação de controle, o valor no qual a função de pertinência assume o valor máximo do conjunto *fuzzy* de saída.
- b) Método da Média dos Máximos: Essa estratégia gera uma ação de controle obtida pelo valor médio de todas as ações de controle locais, onde a função de pertinência assume o valor máximo.
- c) Método do Centro de Gravidade: Dentre as estratégias de *defuzzyficação*, o método do centro de massa é o mais utilizado. Calcula-se para cada variável de controle a integral da função de pertinência de saída, definida sobre o universo de discurso, tomando-se o ponto que divide o valor desta integral na metade, ou seja, consiste no cálculo do centro de gravidade da função de associação.

Em controle de processos convencionais, suposições, simplificações e criação de parâmetros são frequentemente utilizados para construir um modelo matemático, que pode ser distante do fenômeno real. Em contraste, o controle *fuzzy* é capaz de atuar em processos complexos em que o conhecimento é restrito e os modelos matemáticos não são disponíveis (ZHANG et al., 1993).

2.3.2. Projetos de sistema de inferência *fuzzy*

O projeto de um sistema *fuzzy* consiste basicamente na definição do conjunto de termos utilizado para as variáveis de entrada e saída, suas respectivas funções de pertinência e um banco de regras que representa o conhecimento especialista do sistema. Entretanto devido a múltiplos ajustes simultâneos, a fase de sintonia torna-se também difícil e trabalhosa (LI, 1997; LI e GATLAND, 1996; HABER e GUERRA, 1999).

O projeto de um sistema usando a lógica *fuzzy* envolve as seguintes etapas:

1) caracterização do intervalo de valores que as variáveis de entrada e saída podem assumir.

2) definição de um conjunto de funções, denominadas funções de pertinência, que mapeiam as variáveis de entrada e saída no intervalo $[0,1]$. Estas funções recebem “rótulos” que procuram traduzir verbalmente algum significado para o fenômeno físico modelado (variáveis linguísticas). A definição do número de funções e a forma das mesmas constituem-se em um campo aberto para investigações.

3) definição de um conjunto de regras, usando operadores lógicos, que buscam estabelecer uma relação entre valores da entrada e da saída. O estabelecimento das regras, ou seja, a natureza e o número das mesmas, é uma variável de projeto que não dispensa, naturalmente, o uso da experiência e do bom senso. Um número elevado de regras não significa necessariamente um melhor desempenho. A relação custo-benefício entre a demanda adicional de memória, o tempo de processamento e a melhoria no desempenho do sistema precisa ser criteriosamente avaliada quando da construção do conjunto de regras.

4) Uma vez definidas as regras, derivadas a partir de uma linguagem simbólica e com significado bem intuitivo para o projetista, passa-se à fase de tradução matemática da linguagem simbólica construída. Isto é conduzido através da utilização de operadores lógicos definidos pela teoria dos conjuntos *fuzzy*. Esta tarefa se divide, na verdade, em três sub-etapas: a primeira transforma os valores reais das variáveis de entrada em graus de pertinência a um determinado conjunto (*fuzzyficação*); a segunda opera com as regras, os “rótulos” e o resultado da fase de *fuzzyficação* gerando um conjunto de variáveis *fuzzy* através do mecanismo da inferência; a terceira e última sub-etapa transforma os resultados da inferência em uma saída numérica (*defuzzyficação*).

As etapas de *fuzzyficação* e *defuzzyficação* requerem regras heurísticas e funções de pertinência baseadas em conhecimentos primários do sistema, para a obtenção de características desejadas na resposta do sistema. Este é um problema significativo no projeto de vários controladores *fuzzy* e é a justificativa preliminar para a utilização de um controlador PID bem sintonizado como ponto de partida para um controle *fuzzy* (CARVAJAL et al., 2000). Existem vários sistemas que possuem características físicas peculiares, para os quais é difícil realizar uma modelagem matemática. A principal tarefa de um controlador é a de encontrar um conjunto de comandos convenientes que levem o sistema a alcançar suavemente o estado desejado com o menor desvio possível. Se um problema não é bem esclarecido e não pode ser matematicamente representado, mas apresenta um bom entendimento prático, um controlador *fuzzy* pode ser utilizado com sucesso. Inicialmente determina-se as funções de pertinência e as definições linguísticas para capturar a dinâmica desejada, que, uma vez alcançada, permite a implementação do controlador, através de aplicação direta das técnicas existentes. Entretanto, a determinação das regras e as definições linguísticas não são tão óbvias para sistemas complexos, porém, são críticas no desempenho do controlador. O controlador *fuzzy* é intrinsecamente não linear e ao contrário dos outros métodos, como as redes neurais, se caracteriza pela fácil determinação da ação que deverá tomar para uma dada situação, uma vez que apresenta estruturas analíticas. A base de regras é construída por observação geral e conhecimento do problema, sendo simples de projetar (CARVAJAL et al., 2000).

2.3.3. Aplicações de sistemas *fuzzy* na área agrícola

O uso de controladores *fuzzy* tem se difundido no meio agrícola, exatamente por se adequar ao controle de sistemas cuja modelagem matemática é complexa, como os biológicos e, também, por permitir o aproveitamento da experiência no campo, principalmente em casos de difícil sensoriamento, seja por questões tecnológicas ou pela variabilidade de condições encontradas nos processos. No entanto, não foram encontradas aplicações deste sistema em máquinas agrícolas. Na sua maioria, as aplicações dos controladores e sistemas *fuzzy* concentram-se na área de ambiência.

Romanini (2009) utilizou um controlador *fuzzy* para controle de variáveis ambientais numa incubadora de ovos. Conforme destacou o autor, o controle *fuzzy* é adequado a processos não lineares, como no caso da incubadora, onde a temperatura e a umidade apresentam esse comportamento.

Ainda na área avícola, Pereira et al. (2008) desenvolveram um sistema *fuzzy* para estimativa do bem estar de frangos. Para tanto, registraram o comportamento das aves em filmes e submeteram os mesmos à análise de especialistas, que procuraram identificar comportamentos associados ao desconforto ou *stress* animal. Com isso foi construída a base de conhecimento especialista do sistema e as funções de pertinência, que permitiram a simulação do mesmo. Um especialista que não participou da construção da base de conhecimento foi convidado a analisar o comportamento de aves em viveiros, segundo os critérios do sistema. As observações feitas pelo especialista foram inseridas no sistema *fuzzy* e o resultado obtido pelo sistema foi confrontado com o do especialista, apresentando-se coerentes.

Rosseto (2008) projetou e implementou em protótipo um controlador *fuzzy* para controle da taxa de aplicação de herbicidas a partir de mapas de infestação de plantas daninhas georeferenciados. O controlador *fuzzy* foi simulado e comparado a um controlador PID, também simulado no protótipo. Segundo o autor, o controlador *fuzzy* se mostrou mais eficiente nas respostas às variações do *setpoint* enquanto que o controlador PID apresentou melhor desempenho face à distúrbios.

Tizzei et al. (2011) realizaram um estudo de estratégias de controle automático buscando diminuir a variação da temperatura dentro de uma câmara de armazenamento e também reduzir o consumo de energia elétrica. No experimento foram testadas as estratégias de controle liga-desliga, PID e *fuzzy*, onde o controlador *fuzzy* mostrou o melhor resultado, economizando 10% em relação às outras estratégias testadas.

Capítulo 3. CONSTRUÇÃO DE UMA BASE DE CONHECIMENTO ESPECIALISTA SOBRE O AJUSTE DA VELOCIDADE DA COLHEDORA DE CANA DE AÇÚCAR

Resumo

A mecanização da colheita de cana é um processo irreversível no Brasil, tanto por aspectos ambientais quanto econômicos. A agroindústria canavieira da Região Centro-Sul tem o maior índice de mecanização nacional, compondo a maior frota de colhedoras de cana picada do país. Essas máquinas oferecem diversos dispositivos, visando uma colheita limpa e sem perdas visíveis. Contudo, a literatura científica relata significativos índices de perdas e impurezas na colheita mecanizada da cana, devido a ineficiência e também pelo uso inadequado destes dispositivos. Objetivando construir uma base de conhecimento especialista sobre o uso dos recursos da colhedora de cana picada, nesta pesquisa foram realizadas entrevistas e aplicados questionários a profissionais experientes na colheita mecanizada da cana no estado de São Paulo, buscando a melhor forma de operação em diversas situações de colheita. Resultados mostram que o adensamento da cultura, o tipo e a umidade do solo são fatores que requerem ajustes constantes na alavanca de avanço da máquina, um dos comandos mais importantes. Além disso, as condições da plantação e complexidade do equipamento levam o operador a negligenciar alguns dispositivos, aumentando as impurezas e as perdas.

PALAVRAS-CHAVE: Sistemas especialistas, mecanização agrícola, agricultura de precisão, cana de açúcar

Abstract

The mechanization of cane harvesting is an irreversible process in Brazil, both for environmental and economic aspects. The sugarcane industry in the southeast region has the highest level of mechanization, forming the largest fleet of harvesters of sugar cane stalks in

Brazil. These machines offer a variety of devices, targeting a harvest clean and without visible losses. However, the scientific literature reporting significant losses and impurities on the mechanical harvest of sugar cane, due to inefficiencies and also by inappropriate use of these devices. Aiming to build a specialist knowledge base about the use of resources of chopped sugar cane harvester, in this study were interviewed and applied questionnaires to experienced professionals in the mechanical harvesting of sugarcane in São Paulo state, seeking the best way of operation in various harvest situations. Results show that the density of the culture, the type and soil moisture are factors that require constant adjustments in advance's control of the machine, one of the most important drives. Furthermore, the conditions of the plantation and the complexity of the equipment, drive the operator to overlook some devices, increasing the impurities and losses.

KEY-WORDS: Expert systems, agricultural mechanization, precision agriculture, sugar cane

3.1. Introdução

Segundo Magalhães e Braunbeck (2010), a evolução tecnológica das colhedoras de cana-de-açúcar foi insignificante nos últimos anos, conservando-se conceitos originais nos vários sistemas de processamento e, principalmente, os mesmos componentes mecânicos, eletrônicos e hidráulicos. Essa defasagem tecnológica afeta a operação da máquina, que por si só, já é uma atividade complexa. O operador deve permanecer constantemente concentrado, atento a diversos parâmetros de operação, para tomar decisões sobre o momento e a maneira de atuar nos comandos da máquina. Além disso, o operador deve ainda monitorar outros fatores que não permitem alguma forma de regulagem durante a operação, como parâmetros do motor. Não é difícil identificar mais de 30 comandos operacionais no painel de operação de uma colhedora de cana picada, e o operador, além de se preocupar com a direção, precisa monitorar o alinhamento com o transbordo, o posicionamento do elevador lateral e a velocidade de deslocamento da máquina. A grande variabilidade das condições de campo exige do operador a capacidade de reconhecimento e avaliação das mesmas para regulagem

adequada dos comandos da máquina, visando a minimização das perdas visíveis e da contaminação mineral da cana colhida. Por esse motivo, esse trabalho apresenta a construção de uma base de conhecimento especialista sobre a colheita mecanizada da cana, realizada a partir da aplicação de ferramentas de pesquisa de campo e levantamento de requisitos de projetos de produtos. Espera-se, assim, conhecer e documentar os fatores que afetam a decisão do operador no ajuste de um determinado comando, e a medida em que isso é feito. O resultado desse trabalho será utilizado no desenvolvimento de sistemas de controle *fuzzy* para automação de comandos da colhedora, como o ajuste automático da velocidade de deslocamento, visando aliviar o trabalho do operador e contribuir para o aumento da eficiência da colheita.

3.2. Materiais e métodos

O processo de identificação das condições de campo e seus efeitos na decisão do operador em ajustar determinados comandos da colhedora de cana foi tratado como a fase de projeto informacional no desenvolvimento de um produto, no caso, um controlador *fuzzy* para a velocidade de deslocamento. A fase de projeto informacional, conforme descreve Reis (2003) apud Reis e Forcellini (2006), consiste na análise detalhada do problema que motiva o desenvolvimento do projeto, buscando-se todas as informações necessárias ao desenvolvimento total do mesmo. Alguns dos recursos para obtenção dessas informações são os questionários estruturados e entrevistas envolvendo pessoas especializadas no assunto investigado, conforme aplicado por Machado et al. (2010).

Visando a construção de sistemas *fuzzy*, o processo de identificação destes, segundo Shaw e Simões (2007), pode ser feito através do estudo do trabalho realizado pelo operador, onde o projetista do sistema, muitas vezes, acaba assumindo a função do operador e combinando esse trabalho com princípios físicos do mesmo. Além disso, tais autores destacam o uso de entrevistas e questionários como ferramentas importantes no processo de identificação do sistema.

Na fase inicial, buscou-se a identificação dos fatores que afetam a decisão do operador em alterar a velocidade da colhedora, bem como seus termos linguísticos. Lakatos

(2010) orienta que a obtenção de informações sobre um determinado assunto deve iniciar-se com uma pesquisa bibliográfica, seguida de uma observação de fatos ou fenômenos em campo e, num terceiro momento, o pesquisador deve fazer contatos com pessoas que possam fornecer dados ou sugerir possíveis fontes de informações úteis.

A pesquisa bibliográfica é tratada separadamente neste trabalho, no Capítulo 2 (Revisão Bibliográfica), e por isso não será abordada novamente aqui. A observação de campo, conforme destaca Lakatos (2010), ajuda o pesquisador a identificar e obter provas sobre objetivos e hipóteses da pesquisa. Essas provas nem sempre são relatadas pelos indivíduos pesquisados, pois estes não têm consciência das mesmas, e muito menos de que as mesmas orientam seu comportamento. Segundo esse mesmo autor, a observação de campo pode ser assistemática, quando o observador apenas registra os eventos observados, ou então participativa, onde o observador interage com os indivíduos observados, influenciando-os.

Levando-se isso em consideração, foram realizadas entrevistas com experientes operadores de colhedoras de cana-de-açúcar, pesquisadores e especialistas em colheita mecanizada da cana. Os primeiros oferecem informações sobre o dia-a-dia da operação e condições especiais na colheita, muitas vezes só percebidas por eles. Os especialistas em colheita mecanizada fornecem informações gerais sobre a colheita, que servirão de referência para os operadores. Essas entrevistas aconteceram em campo ou através de telefonemas, conforme disponibilidade dos entrevistados. As entrevistas foram do tipo semiestruturadas e recorrentes, pois essas, segundo Lakatos (2010), permitem que detalhes novos sejam explorados, e também que se esclareçam pontos específicos da entrevista atual e, até mesmo, de anteriores. Neste procedimento, a conversa é conduzida a partir de perguntas de referência e, também, formulam-se novas perguntas a partir das informações fornecidas pelo entrevistado. Depois da entrevista seu conteúdo é transcrito e, eventualmente, são esclarecidos ou explorados alguns pontos numa próxima entrevista.

As entrevistas iniciais foram realizadas utilizando-se um questionário base, composto pelas perguntas: 1) O que o operador precisa avaliar/levar em consideração para aumentar ou diminuir a velocidade da máquina? Como o operador avalia a densidade? É comum, no campo, durante a colheita, a densidade da plantação variar? 2) Em que medida o adensamento da cultura afeta a velocidade da máquina? 3) As colheitas feitas à noite são feitas com velocidade reduzida? 4) A intensidade da chuva afeta a velocidade da máquina? Afeta a

estabilidade e/ou visibilidade? 5) Cana tombada afeta a velocidade da máquina? Por quê? 6) A inclinação do terreno é um fator para diminuição da velocidade da máquina? Como o operador avalia a necessidade de reduzir a velocidade devido à inclinação? Com base nesse questionário, foram entrevistados supervisores de produção e operadores de usinas.

Esse trabalho também utilizou a observação assistemática (LAKATOS, 2010) para conhecimento dos procedimentos do operador na colhedora de cana afim de identificar os momentos em que ele realiza a alteração de velocidade da máquina e as condições externas e do equipamento no momento em que isto ocorre. Isto foi realizado em campo através do acompanhamento da colheita na cabine de operação.

Além da observação de campo e das entrevistas, foram enviados questionários semiestruturados a outros operadores e especialistas em colheita mecanizada. Esse procedimento, apesar de ter desvantagens como a possível dificuldade na expressão escrita, compreensão de leitura e da preocupação do entrevistado com relação ao sigilo das informações, permite que seja alcançada uma quantidade de pessoas muito maior do que nas entrevistas, além de poder ser realizado sem a presença do entrevistador. Esse questionário foi submetido a membros de comunidades virtuais formadas por operadores, mecânicos e outros profissionais ligados à colheita mecanizada da cana. Foi feita uma consulta prévia a estas comunidades, buscando os membros interessados em contribuir com a pesquisa e, também, para obter o perfil profissional destes. Entre entrevistados e respondentes do questionário participaram 15 pessoas.

Uma vez identificados os fatores de decisão (variáveis *fuzzy*) para alteração da velocidade e seus termos linguísticos, foi elaborada uma planilha combinando-os, afim de avaliar-se seus efeitos na velocidade. A partir das variáveis *fuzzy* foram identificadas duas categorias gerais às quais tais variáveis pertenciam: Ambiente e Cultura, gerando uma planilha para cada categoria, onde suas respectivas variáveis foram combinadas. Tais planilhas foram submetidas a especialistas, afim de que fossem indicadas as velocidades recomendadas para cada combinação.

Parte das regras foram descartadas, visando a eliminação de condições incoerentes e/ou divergentes. As regras relacionadas ao Ambiente, onde a variável Chuva assumia o valor linguístico Nenhuma e a variável Drenagem assumia o valor linguístico Alta, foram descartadas, por não terem significado real e, assim, não interferirem no processo de inferência

do modelo *fuzzy*. Da mesma forma, as regras onde não havia consenso entre os especialistas também foram eliminadas, uma vez que caracterizavam uma situação de difícil avaliação, onde os especialistas não convergiam para uma solução clara. Para as demais regras, foi considerada como resposta à condição avaliada a de maior moda, ou seja, a com maior frequência entre as respostas dos especialistas.

A construção da base de conhecimento especialista é realizada a partir de informações do trabalho cotidiano de operadores no sistema que se deseja controlar (SHAW e SIMÕES, 2007). A base de conhecimento é definida como um conjunto de regras contendo as declarações SE – ENTÃO, por exemplo:

Regra: **Se** Erro é Pequeno **E** ΔErro é Grande **ENTÃO** Aceleração é Média.

A parte antecedente pode conter uma ou mais condições e a parte consequente pode apresentar uma ou mais ações a serem executadas. As regras foram editadas com o auxílio do *Rule Editor* do *Fuzzy Logic Toolbox* do programa MATLAB R2012a.

Para a avaliação dos sistemas desenvolvidos nos Capítulos 4 e 5, foram criados 37 cenários de avaliação, através do sorteio e combinação de regras das categorias Cultura e Ambiente. Tais cenários foram submetidos a especialistas diferentes dos que participaram da elaboração da base de conhecimento, onde aqueles indicaram a velocidade de operação recomendada para cada situação.

3.3. Resultados e discussão

Foram identificados cinco fatores principais que afetam a decisão do operador no ajuste da velocidade da colhedora: adensamento da cultura, a direção do crescimento da cana, chuva e tipo do solo e, por fim, fatores aleatórios. Segundo os entrevistados, o adensamento da cultura, representado por termos como “cana forte” ou “cana fraca” está associado ao embuchamento da máquina, ou seja, à capacidade de processamento da mesma. Esse adensamento refere-se à quantidade de cana que pode ser colhida por hectare, e varia por motivos diversos como o cultivar utilizado, condições climáticas e do solo, idade das plantas. Quando o talhão colhido é classificado pelo operador como “cana fraca”, ou seja, baixo

adensamento, a velocidade da máquina pode ser aumentada. Quando é classificado como “cana forte”, a velocidade deve ser diminuída.

A direção do crescimento da cana afeta a velocidade da máquina por ser necessário mais tempo na condução da cana ao sistema de corte. Basicamente, quando o operador encontra a chamada “cana tombada” durante a colheita, ele precisa direcioná-la ao cortador de base, utilizando para isso o divisor de linhas. Isso faz com que o operador tenha que reduzir a velocidade da máquina, caso contrário, a tendência é de que a cana seja quebrada pela máquina e aproveitada apenas parcialmente. A “cana tombada” pode ser, também, classificada como “cana ajoelhada” e “cana enrolada”. A “cana ajoelhada” é caracterizada pela inclinação de parte da planta, partindo-se da raiz, seguida de seguimento vertical até a ponta. Ou seja, é a planta que tombou e tentou retomar o crescimento vertical. A “cana enrolada” forma um verdadeiro “emaranhado” de plantas no campo, formado por plantas que tombaram e brotaram a partir de seus nós. Caracteriza a situação mais difícil de colheita, requerendo as menores velocidades da máquina para diminuição de perdas e impurezas minerais.

Quanto às chuvas e o tipo do solo, a combinação desses fatores afeta a velocidade da máquina em função da intensidade da chuva e da capacidade de drenagem e absorção do solo, que podem fazer com que a máquina perca a dirigibilidade, derrape e danifique a soqueira. Sobre a colheita noturna, os entrevistados disseram que essa condição não afeta significativamente o ajuste da velocidade da máquina, uma vez que existe iluminação auxiliar de alta potência disponível nas máquinas. A inclinação do terreno afeta fortemente a velocidade da máquina e o operador realiza o ajuste conforme a tendência da máquina tombar. Os fatores aleatórios referem-se a eventos como obstáculos (erosão, pedras, etc.) que, eventualmente, podem ser encontradas pelo caminho da colhedora. Por serem aleatórios, é melhor que tais fatores sejam administrados pelo operador da colhedora. A Tabela 1 mostra as variáveis de entrada identificadas para o projeto do controlador *fuzzy* de velocidade, e seus termos linguísticos.

Tabela 1: Variáveis de entrada e termos linguísticos (MANOEL FILHO, 2011)

Adensamento	Posição da cana	Topografia	Obstáculos	Chuva	Drenagem
Fraco	Vertical	Levemente inclinada	Nenhum	Nenhuma	Irrelevante
Fraco/Médio	Levemente deitada	Médio inclinada	Poucos	Fraca	Baixa
Médio	Totalmente deitada	Muito inclinada	Muitos	Média	Média
	Ajoelhada			Forte	Alta
	Enrolada				

No acompanhamento do trabalho de operadores na condução da máquina em colheita, realizado na Fazenda Santa Inês em novembro de 2010, verificou-se a preocupação constante com o acionamento das alavancas de tração, para controle da velocidade e alinhamento da colhedora com o transbordo, bem como da alavanca de regulagem da altura do corte de base, que tocava o solo esporadicamente, em função do relevo.

Recursos da colhedora como cortador de pontas, “pirulitos” e extratores (primário e secundário) não foram acionados. A velocidade do extrator primário foi mantida constante, em seu valor máximo. Nessa situação, quando a velocidade de deslocamento da colhedora era diminuída podia-se ouvir com maior incidência o som do impacto dos toletes na estrutura do extrator primário, caracterizando perdas de cana. Nesta velocidade de rotação, também, a energia oferecida pelo sistema era muito maior do que a necessária para limpeza, gerando um gasto desnecessário de combustível.

O cortador de pontas foi mantido ligado, em sua altura máxima, acima das folhas do canavial. Nesta situação, o dispositivo ficou operando em vazio, desperdiçando energia, sendo a cana recolhida com suas folhas, exigindo maior rotação do extrator primário. A não utilização do cortador de pontas também gera problemas na usina, pois a extremidade da cana, próxima à suas folhas, possui baixo teor de sacarose, devendo ser descartada no campo para evitar seu processamento na usina.

Os divisores de linha foram mantidos em uma mesma altura e inclinação, mesmo com variações no tombamento da cana e do relevo. Isso fez com que a ponta dos divisores

gerassem sulcos mais profundos no solo, conduzindo a cana tombada com mais impurezas minerais para o interior da máquina, levando carga adicional aos sistemas de limpeza e favorecendo contaminação da cana.

Para construção da base de conhecimento, os especialistas avaliaram 25 regras formadas a partir da combinação das variáveis da categoria Cultura (Figura 2) e 108 regras formadas a partir da combinação das variáveis da categoria Ambiente (Figura 3), já descartadas as inconsistências, onde indicaram a velocidade apropriada para cada combinação. Após revisão das respostas, onde descartou-se as regras com respostas divergentes, chegou-se a 97 regras que formaram a base de regras (Figura 4) que foi utilizada na construção do sistema especialista e do controlador *fuzzy*-PI descritos nos Capítulos 4 e 5, respectivamente.

Regras	Adensamento	Posição da cana	Velocidade	Observações
1	Forte	Vertical	Alta	
2	Fraco	Vertical	Muito Alta	
3	Forte/Médio	Enrolada	Baixa	
4	Fraco	Totalmente deitada	Muito Alta Alta Média Baixa Muito Baixa	
5	Médio/Fraco	Ajoelhada		

Figura 2: Planilha para indicação da velocidade na base de regras Cultura

Regra	Topografia	Obstáculos	Chuva	Drenagem	Velocidade	Observações
1	Pouco inclinado	Nenhum	Forte	Alta	Baixa	
2	Pouco inclinado	Nenhum	Forte	Média	Baixa	
3	Pouco inclinado	Nenhum	Forte	Baixa	Muito Baixa	
4	Pouco inclinado	Nenhum	Moderada	Alta	Baixa	
5	Pouco inclinado	Nenhum	Moderada	Média	Baixa	
6	Pouco inclinado	Nenhum	Moderada	Baixa	Muito Alta Alta Média Baixa Muito Baixa	
7	Pouco inclinado	Nenhum	Fraca	Alta		
8	Pouco inclinado	Nenhum	Fraca	Média		

Figura 3: Planilha para indicação da velocidade na base de regras Ambiente

Uma terceira planilha, similar às apresentadas na Figura 2 e na Figura 3, foi elaborada combinando-se regras de ambas através de sorteio. Essa planilha foi utilizada para validação

do sistema especialista *fuzzy* e do controlador *fuzzy*-PI descritos nos Capítulos 4 e 5 respectivamente. A base de regras indicada na Figura 4 refere-se à combinação das variáveis relacionadas ao Ambiente. Ela é a reprodução das respostas dadas pelos especialistas, face à combinação dos termos linguísticos das variáveis consideradas, utilizando-se a planilha da Figura 3. De maneira semelhante, foi construída uma base de regras para as variáveis relacionadas à Cultura.

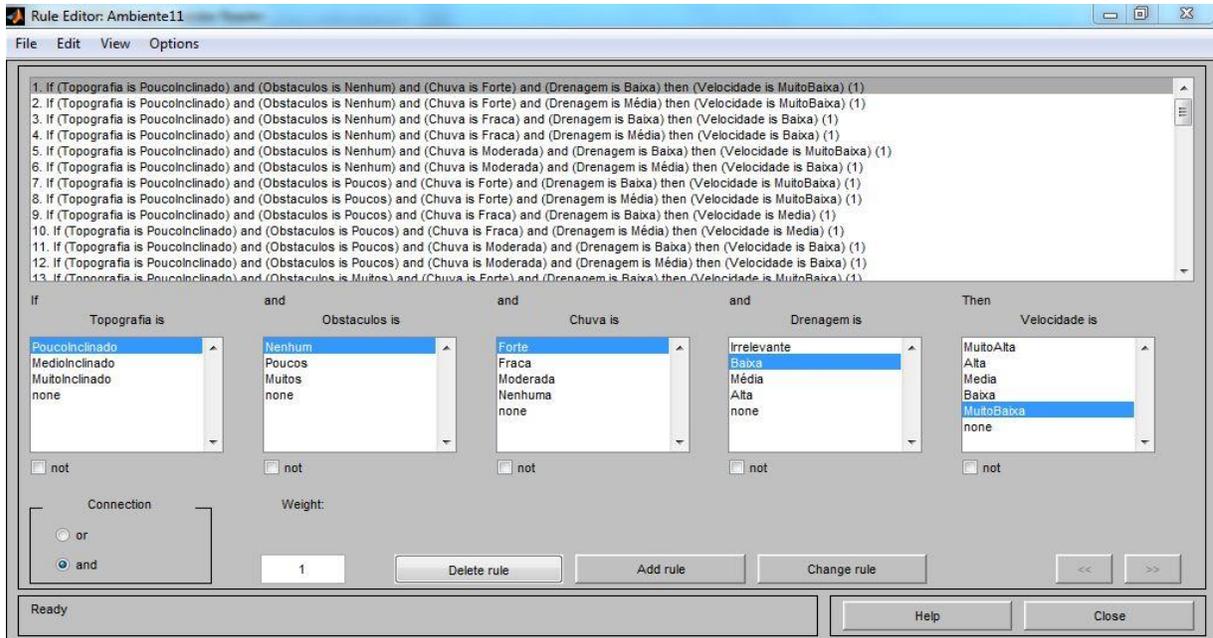


Figura 4: Base de regras inserida no *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB

3.4. Conclusão

Considerando-se apenas o subsistema de velocidade de deslocamento da máquina, foi possível a identificação de seis variáveis relevantes para o ajuste do mesmo. As ferramentas de pesquisa utilizadas permitiram aprofundar o conhecimento e a documentação da operação, algo pouco estudado. Expandindo-se essa pesquisa para os demais subsistemas da colhedora, como o extrator primário e o cortador de base, é possível que se chegue a muitas outras variáveis, motivando o desenvolvimento de controladores automáticos, possivelmente *fuzzy*, para os demais subsistemas.

3.5.Referências bibliográficas

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Técnicas de Pesquisa**. 7ed. São Paulo: Atlas, 2010.

MACHADO, A. L. T.; NEVES, L. A.; REIS, A. V. dos; MACHADO, R. L. T.; HORNKE, N. F. Questionário de pesquisa: auxiliando o estudo exploratório de patrulhas agrícolas dos municípios da região de Pelotas-RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 39. 2010, Vitória. **Anais...** Vitória: SBEA, 2010. 1 CD-ROM.

MAGALHÃES, P. S. G.; BRAUNBECK, O. A. **Bioetanol de cana-de-açúcar: Novo Modelo Agrícola para cana-de-açúcar**. 1ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010.

MANOEL FILHO, F.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. Construção de uma base de conhecimento especialista para ajuste de dispositivos de corte e limpeza em colhedoras de cana picada, In: XL Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. **Anais...** Cuiabá: **SBEA**, p. 1-4. 2011.

REIS, A.V. dos. **Desenvolvimento de concepções para a dosagem e deposição de precisão para sementes miúdas**. 277 p. Tese (Doutorado em Projetos de Sistemas Mecânicos) - CTC/EMC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

REIS, A. V. dos; FORCELLINI, F. A. Identificação de requisitos de clientes para o projeto de um dosador de precisão para sementes miúdas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.1, p.309-320, jan./abr. 2006.

SHAW, I. S.; SIMÕES, M. G. **Controle e modelagem fuzzy**. 2ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2007.

Capítulo 4. SISTEMA ESPECIALISTA FUZZY PARA RECOMENDAÇÃO DA VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO DA COLHEDORA DE CANA DE AÇÚCAR

Resumo

A colheita mecanizada da cana envolve intuição e experiência dos operadores para que seu resultado seja adequado e sem perdas. Para o ajuste adequado dos comandos da máquina às condições de campo, muitas vezes o operador utiliza informações incompletas e imprecisas, valendo-se de análises qualitativas. Objetivando a obtenção de uma ferramenta computacional para auxílio no ajuste da velocidade de deslocamento da colhedora (VDC), este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema especialista, baseado em lógica *fuzzy*, que modela o conhecimento heurístico de operadores e supervisores envolvidos com a colheita mecanizada da cana, normalmente indisponível na literatura técnica. Desenvolveram-se dois FIS (*Fuzzy Inference System*) no MATLAB, com múltiplas entradas e uma saída (MISO). As entradas do primeiro FIS foram: topografia, quantidade de obstáculos, presença ou intensidade da chuva e drenagem do solo, e as do segundo foram adensamento e posição da cana. Os valores de saída dos FIS foram combinados para indicação da VDC da colhedora. Simularam-se 37 condições operacionais para alteração da VDC e estas, também, foram submetidas a especialistas para indicação da VDC esperada, permitindo a validação dos resultados do sistema. Os FIS associados foram capazes de gerar valores de VDC nas diferentes condições e compatíveis com as apresentadas pelos especialistas.

PALAVRAS CHAVE: apoio à decisão, colheita mecanizada, lógica nebulosa.

Abstract

Mechanized harvesting of sugar cane involves operator's intuition and experience for appropriated and lossless results. In order to obtain a computational tool to assist in the adjust of harvester's movement speed (VDC), this paper presents the development of an expert

system based on fuzzy logic, which models the heuristic knowledge of operators and field supervisors, usually unavailable in technical literature. It were developed two FIS (Fuzzy Inference System) in MATLAB, with multiple inputs and single output (MISO). The inputs of first FIS were: topography, amount of obstacles, presence or intensity of rainfall and soil drainage. The second were: sugarcane's crowding and position. The FIS output values were combined for generation of VDC indication. Different operating conditions were simulated for modification of VDC, and these, were subjected to experts for indicating the expected VDC too, allowing the validation of system's results. The related FIS were able to generate VDC values on different conditions and also consistent with those presented by the experts.

KEYWORDS: decision support, mechanized harvesting, fuzzy logic.

4.1.Introdução

Nos últimos anos o tema Inteligência Artificial vem surgindo em pesquisas nas mais diversas áreas do conhecimento, em especial, em sistemas que visam capturar e simular computacionalmente a forma de solucionar problemas de especialistas humanos, conhecidos como Sistemas Especialistas (SE). Um especialista é aquele que, através de treinamento e experiência, alcançou um alto grau de conhecimento e competência em uma determinada área do conhecimento, tornando-o capaz de executar tarefas que outros não conseguem, sendo exímios e eficientes no que fazem (MONTELLO, 1999). As pesquisas nesta área envolvem o uso ou desenvolvimento de *softwares* capazes de lidar com cenários e informações de problemas complexos para se chegar às mesmas conclusões do especialista humano. O desenvolvimento desse tipo de sistema justifica-se por fatores tecnológicos e econômico-sociais como a dificuldade de acesso a especialistas humanos em algumas áreas do conhecimento e regiões geográficas, o armazenamento e formalização do conhecimento de vários especialistas humanos, o seu uso como ferramenta de apoio à tomada de decisões de especialistas ou como ferramenta de treinamento de profissionais, pela imparcialidade na tomada de decisões, e, por fim, pelo alto custo e o longo tempo demandados para a formação de um especialista humano.

Encontram-se aplicações de SE nas mais diversas áreas, como sistemas de auxílio ao diagnóstico médico e mecânico, sistemas de predição e análise de risco para o mercado financeiro, entre outras. Na área agrícola, as aplicações relacionadas a SE concentram-se em temas relacionados ao bem estar de rebanhos confinados, classificação de produtos e meio ambiente

Pandorfi (2007) desenvolveu um sistema especialista para avaliação do ambiente de dois tipos de confinamento para alojamento de matrizes gestantes, estimando as condições favoráveis ao melhor desempenho. Para isso, construiu a base de conhecimento utilizando o sistema de inferência *fuzzy* do MATLAB. As variáveis consideradas no sistema foram medidas em campo e, após tratamento estatístico adequado, inseridas no sistema *fuzzy*, que retornava a classificação do ambiente em Muito Bom, Bom, Regular e Ruim. Os resultados do sistema foram confrontados com os obtidos a partir de modelos matemáticos consagrados da literatura, mostrando-se compatíveis e indicando o sistema de confinamento em baias coletivas o mais adequado.

Utilizando a Teoria dos Conjuntos *fuzzy*, Owada (2007) estimou o bem-estar para frangos de corte alojados, considerando atributos específicos do ambiente térmico e da densidade de aves, em função da concentração de amônia e luminosidade no ambiente de alojamento. O limite das variáveis e a base de regras do sistema de inferência *fuzzy* foram obtidos a partir de pesquisas anteriores, relacionadas à ambiência. Com este sistema foi possível identificar os níveis de concentração de amônia e luminosidade capazes de maximizar a variável linguística *bem-estar* estudada.

Angulo et al. (2011) desenvolveram um sistema especialista para monitoração da qualidade da água em represas, capaz de sugerir a origem da contaminação. Para tanto, o sistema de inferência *fuzzy* foi implementado e simulado em MATLAB, utilizando-se dados como pH e turbidez da água, coletados durante dois anos. Os especialistas participaram da identificação das variáveis a serem monitoradas, da composição dos índices e da base de regras, responsável pelo diagnóstico, indicando eventos pontuais, como descargas, e eventos contínuos como a eutrofização e risco de mortandade de peixes.

Karmakar et al. (2010) desenvolveram um sistema especialista para suporte à decisão sobre o encaminhamento de resíduos provenientes de uma granja de criação de suínos. Tal aplicação foi desenvolvida em Microsoft Visual Basic utilizando-se Árvores de Decisão para

geração de cenários, através da parametrização de fatores econômicos, agrônômicos, climáticos e ecológicos, segundo modelos específicos para os mesmos. O sistema foi validado através de um estudo de caso, e seus resultados validados por especialistas.

Omid (2011) desenvolveu um sistema especialista para a classificação (Aberta/Fechada) de sementes de pistache, baseando-se no sinal acústico provocado pelo impacto das mesmas num anteparo. A classificação das sementes foi feita através de um sistema de inferência *fuzzy*, cujas variáveis de entrada são características estatísticas do sinal acústico selecionadas através de uma Árvore de Decisão. O sistema foi validado através do ensaio de 300 sementes dos dois tipos e obteve 99,52% de acerto.

Pereira et al. (2008) desenvolveram um sistema de apoio à decisão sobre o acionamento de dispositivos empregados na climatização visando o bem estar de frangos em granjas. Para tanto, os autores monitoraram o comportamento dos animais através de câmeras fixadas no teto do local do experimento e registraram grandezas relacionadas ao bem estar animal, como temperatura, umidade e concentração de amônia. Os dados registrados foram, com o auxílio de um especialista, utilizados na construção de um sistema de inferência *fuzzy* em MATLAB, cuja variável de saída era a estimativa do bem estar dos animais. Uma nova coleta de dados foi realizada e acompanhada por um especialista, que avaliou o bem estar dos animais nas condições da coleta. Os dados coletados foram submetidos ao sistema *fuzzy* e o resultado confrontado com a análise do especialista, onde obteve-se equivalência.

Sivakami e Karthikeyan (2009) desenvolveram um sistema especialista em Visual Basic 6, para apoio à decisões relacionadas ao cultivo de milho, considerando fatores como seleção de variedades, manejo da terra, irrigação, fertilização e colheita. O sistema foi avaliado através da submissão de cenários a especialistas que, num primeiro momento, faziam suas sugestões sem o auxílio do sistema e, posteriormente, com o auxílio. Assim os autores avaliaram a contribuição do sistema às sugestões apresentadas, obtendo-se melhores resultados com o auxílio do sistema.

Considerando-se a informalidade do conhecimento no processo de colheita mecanizada, bem como a complexidade de tal operação, neste trabalho apresenta-se o desenvolvimento de um sistema especialista *fuzzy* capaz de indicar ao operador a velocidade adequada da colhedora à medida que se alterem as condições de campo consideradas.

4.2. Materiais e métodos

A base de conhecimento inserida nos dois FIS (*Fuzzy Inference System*) desenvolvidos foi construída através de questionários estruturados e entrevistas envolvendo pessoas especializadas no assunto investigado, conforme aplicado por Machado et al. (2010). No presente trabalho, as entrevistas foram realizadas com especialistas na operação de colhedoras de cana-de-açúcar e especialistas em colheita mecanizada da cana. Os especialistas na operação de colhedoras oferecem informações sobre o dia-a-dia da operação e condições especiais na colheita, muitas vezes só percebidas por eles. O trabalho do operador também foi acompanhado diretamente na cabine da colhedora, registrando-se os motivos que o levavam à redução de velocidade. Ao fim dessa etapa, foi possível identificar as principais variáveis que afetam a decisão do operador em ajustar a velocidade da colhedora de cana (Tabela 1). Essas variáveis foram agrupadas e combinadas em dois FIS, com o propósito de diminuir a quantidade de regras de produção: FIS Cultura (Figura 5) e FIS Ambiente (Figura 6).

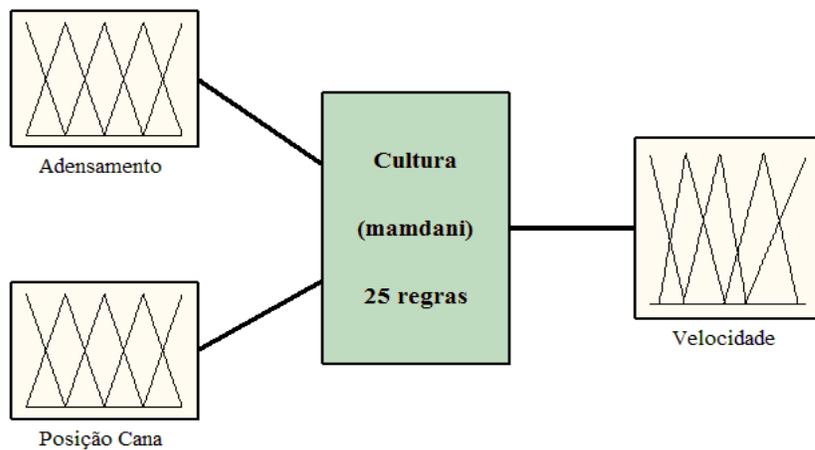


Figura 5: FIS Cultura

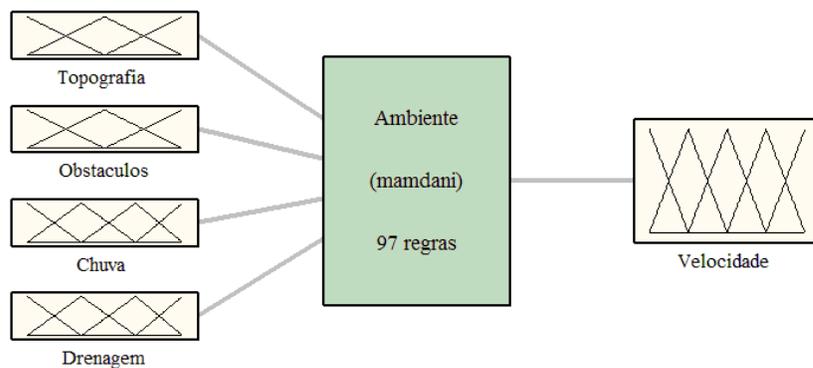


Figura 6: FIS Ambiente

As saídas desses dois FIS foram combinadas conforme procedimento descrito posteriormente, afim de gerar a resposta do sistema.

Definição dos Conjuntos *Fuzzy*

Segundo Shaw e Simões (2007), as funções de pertinência definem o grau de pertinência num intervalo $[0,1]$, em seu universo de discurso, que representa o intervalo numérico de todos os possíveis valores reais que uma variável específica pode assumir. Ainda segundo estes autores, define-se algo entre dois e sete como uma quantidade prática de conjuntos *fuzzy*. Quanto maior o número de conjuntos *fuzzy*, maior a precisão, porém, maior complexidade do sistema. Experiências mostraram que uma mudança de cinco para sete conjuntos aumenta a precisão em torno de 15%, não se observando melhorias significativas para valores superiores.

Foram escolhidas funções de pertinência de forma triangular por serem amplamente utilizadas na literatura, pela simplicidade de implementação e por apresentarem bons resultados nas aplicações (PEREIRA et al., 2008; NASCIMENTO et al., 2011). Tais funções de pertinência foram desenvolvidas utilizando-se o *Membership Function Editor* do “*Fuzzy Logic Toolbox*” do MATLAB R2012a.

Os valores *fuzzy* para as variáveis (Tabela 1) e os conjuntos *fuzzy* correspondentes foram definidos através de avaliações técnicas de especialistas em colheita mecanizada da cana. Quanto melhor se configurar a situação representada pela variável, mais próximo se

estará da extrema direita do universo de discurso (1.0). Por exemplo, a posição do conjunto *fuzzy* Muito Inclinado no universo para Topografia (Figura 7) indica que uma condição de operação que requer cuidado na condução da máquina, o que implica que a velocidade deverá ser diminuída. Quando a Topografia é próxima de zero (Pouco Inclinado), as condições de colheita melhoram e a velocidade poderá ser aumentada. A Figura 8 permite que seja feita a mesma análise para a variável *fuzzy* Obstáculos.

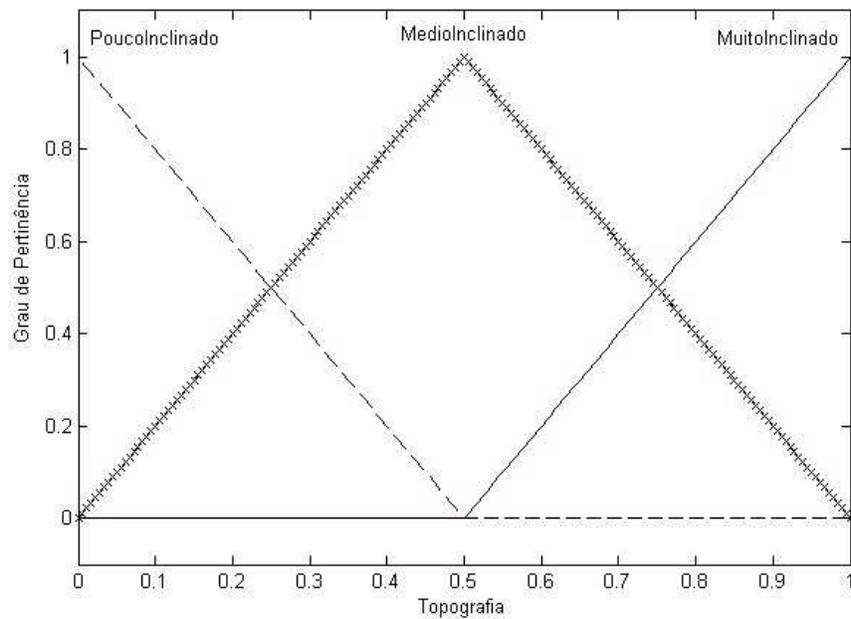


Figura 7: Funções de pertinência da variável *fuzzy* Topografia

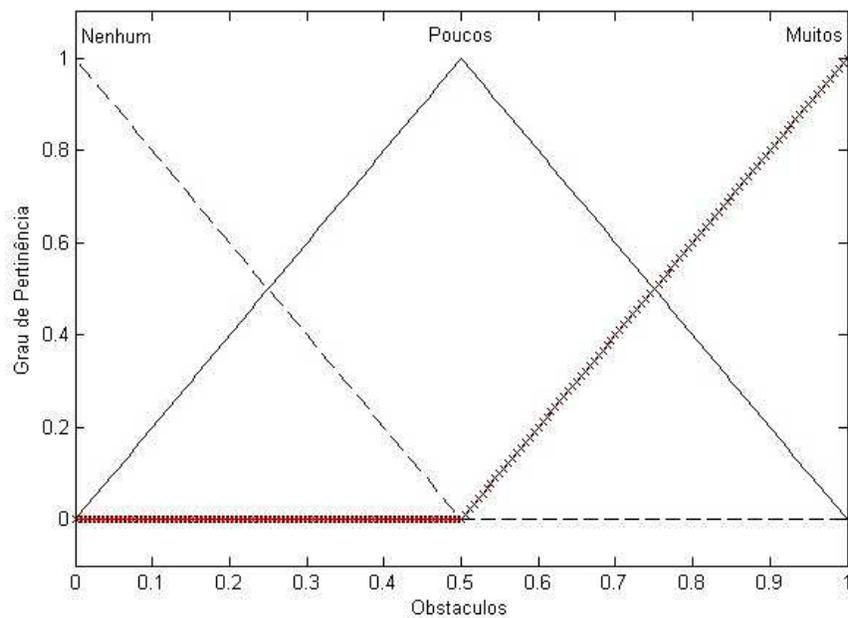


Figura 8: Funções de pertinência da variável *fuzzy* Obstáculos

Conforme mencionado anteriormente, as variáveis *fuzzy* possuem quantificação imprecisa no dia a dia da colheita e o registro de suas formas de expressão constitui-se em um processo subjetivo de experimentação envolvendo os especialistas. As duas categorias utilizadas para as variáveis de entrada foram:

a) Fatores relacionados à Cultura

Adensamento: cinco valores linguísticos são associados a essa variável, conforme especificado pelos conjuntos *fuzzy* **Fraco**, **Fraco/Médio**, **Médio**, **Médio/Forte**, **Forte**, cujas funções de pertinência são mostradas na Figura 9.

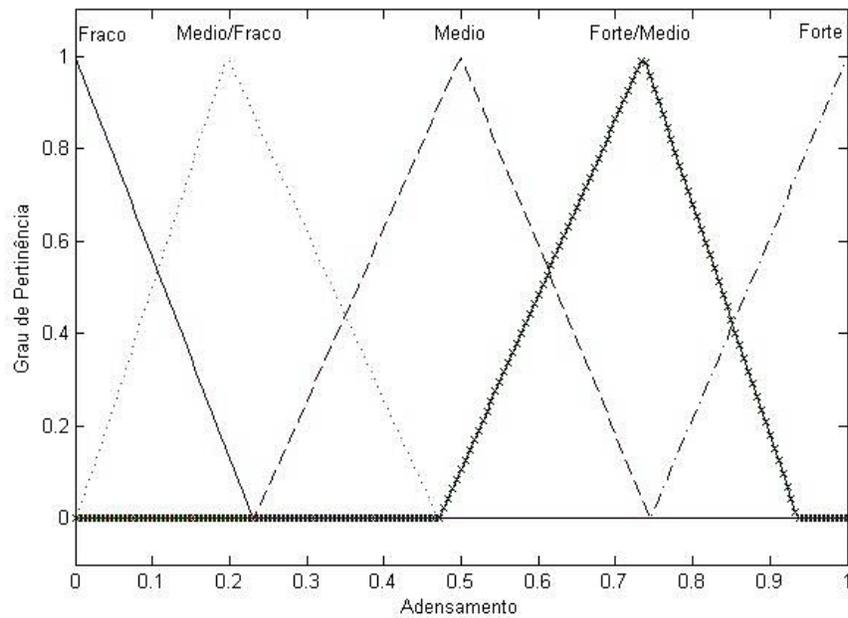


Figura 9: Funções de pertinência da variável *fuzzy* Adensamento

Posição da cana: cinco valores linguísticos são associados a essa variável, conforme especificado pelos conjuntos *fuzzy* **Vertical**, **Levemente Deitada**, **Totalmente Deitada**, **Ajoelhada**, **Enrolada**, cujas funções de pertinência são mostradas na Figura 10.

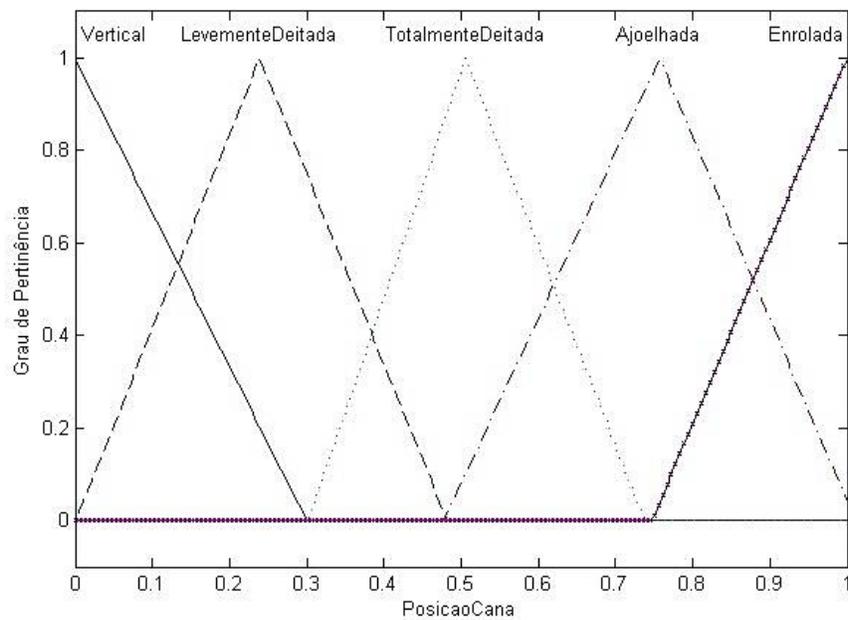


Figura 10: Funções de pertinência da variável *fuzzy* Posição

b) Fatores relacionados ao Ambiente

Topografia: três valores linguísticos são associados a essa variável, conforme especificado pelos conjuntos *fuzzy* **Pouco Inclinado**, **Médio Inclinado**, **Muito Inclinado**, cujas funções de pertinência são mostradas na Figura 11.

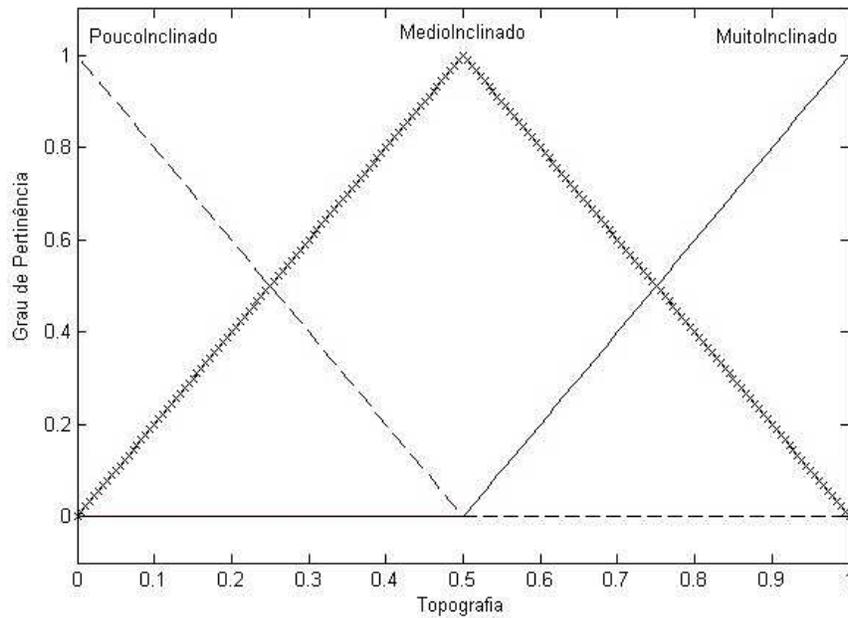


Figura 11: Funções de pertinência da variável *fuzzy* Topografia

Obstáculos: três valores linguísticos são associados a essa variável, conforme especificado pelos conjuntos *fuzzy* **Nenhum**, **Poucos**, **Muitos**, cujas funções de pertinência são mostradas na Figura 12.

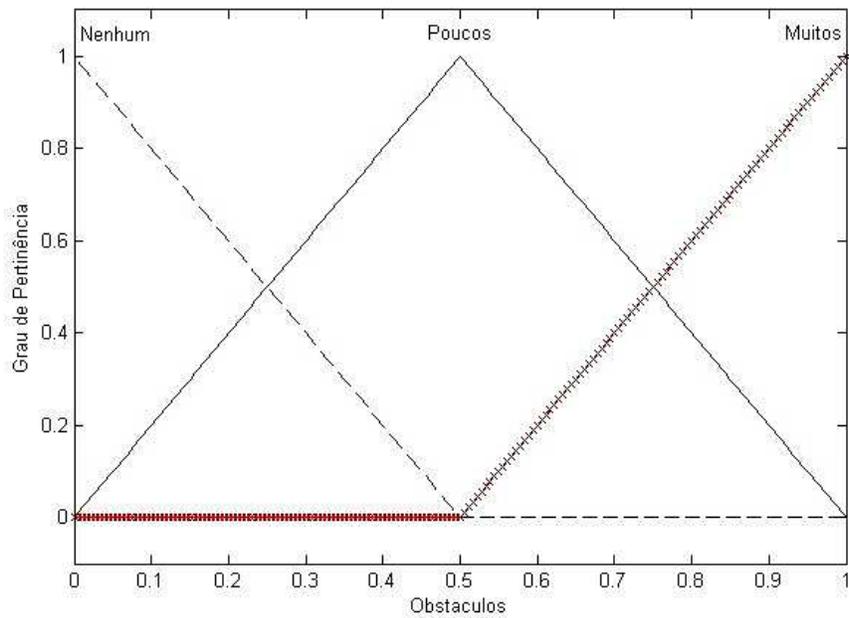


Figura 12: Funções de pertinência da variável *fuzzy* Obstáculos

Chuva: quatro valores linguísticos são associados a essa variável, conforme especificado pelos conjuntos *fuzzy* **Nenhuma**, **Fraca**, **Moderada**, **Forte**, cujas funções de pertinência são mostradas na Figura 13.

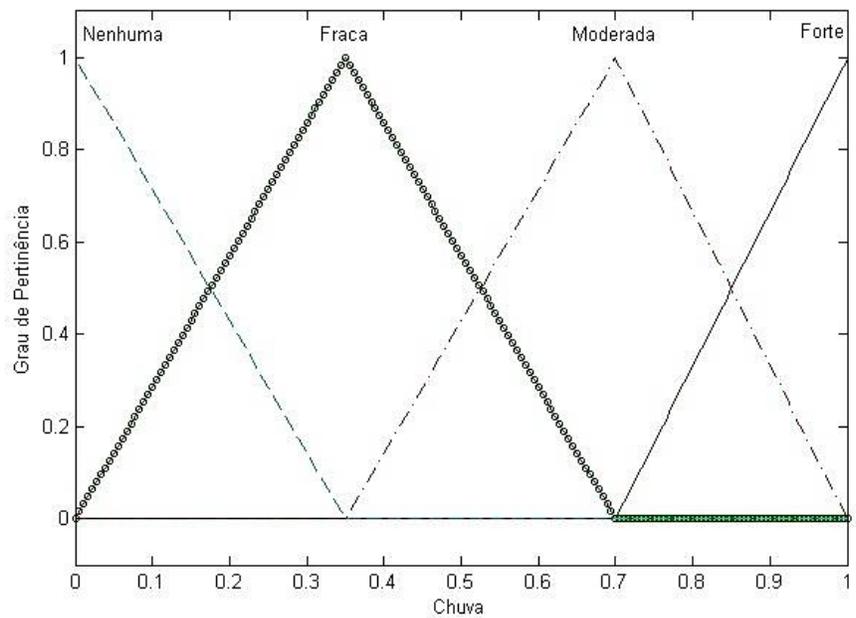


Figura 13: Funções de pertinência da variável *fuzzy* Chuva

Drenagem: três valores linguísticos são associados a essa variável, conforme especificado pelos conjuntos *fuzzy* **Baixa**, **Média**, **Alta**, **Irrelevante** cujas funções de pertinência são mostradas na Figura 14. O termo Irrelevante aplica-se à ausência de chuva, onde as condições de drenagem não afetariam a operação.

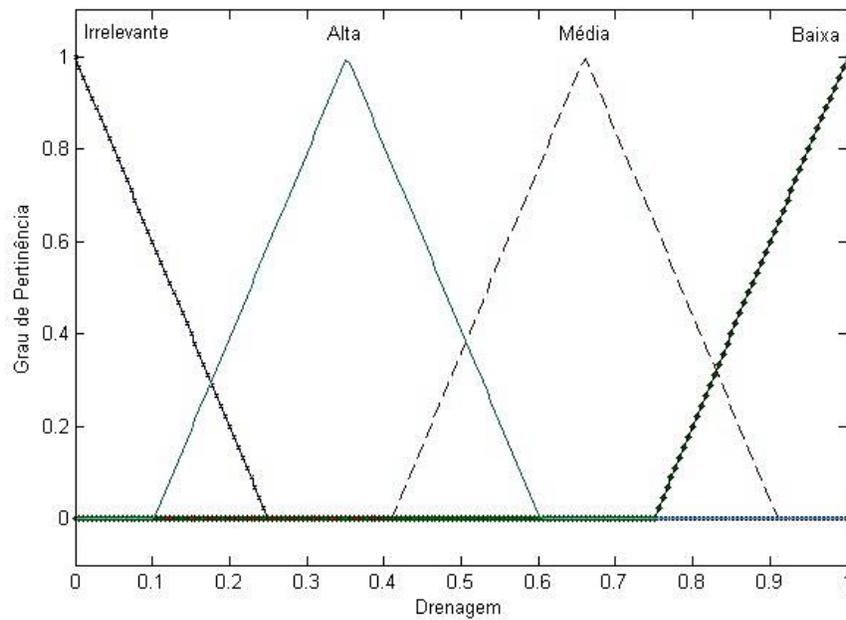


Figura 14: Funções de pertinência da variável *fuzzy* Drenagem

Os valores linguísticos para a saída do sistema (*Velocidade da colhedora*) são definidos pelos conjuntos *fuzzy* mostrados na Figura 15. As denominações são: **Muito Baixa**, **Baixa**, **Média**, **Alta**, **Muito Alta**.

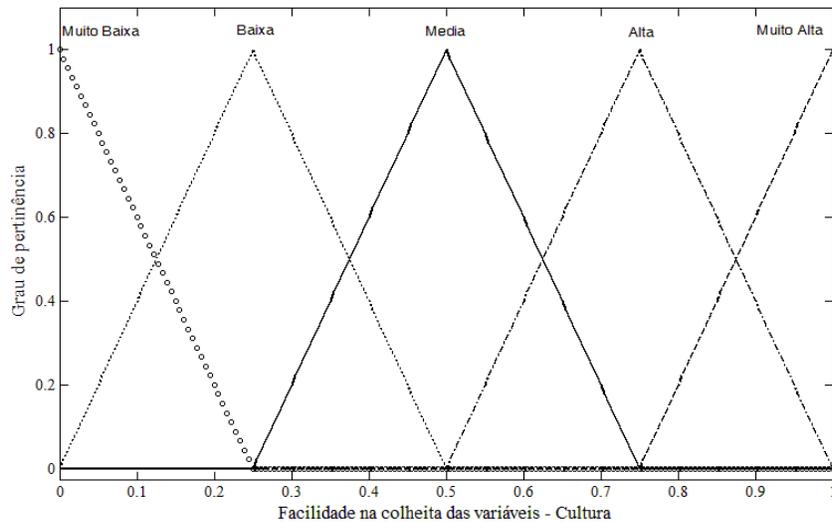


Figura 15: Funções de pertinência da variável *fuzzy* Velocidade

Construção de regras

Inferência e defuzzificação

O sistema utiliza o operador de implicação *min* de Mamdani (DRIANKOV et al., 1996) e o método de composição da soma limitada (COX, 1994), que foi escolhido devido à natureza das regras. Como cada uma define um incremento ou decremento na velocidade da colhedora, é desejável que todas as regras ativadas tenham influência no resultado final. O método da soma limitada calcula a saída *fuzzy* através da soma de todos os valores de pertinência resultantes para um conjunto *fuzzy* de saída específico, limitando essa soma a 1. Quando comparado ao operador *max*, que considera apenas o valor de pertinência máximo, o método da soma limitada mostra ser mais adequado para esta aplicação específica.

O valor *crisp* para velocidade da colhedora foi obtido através do método de defuzzificação do Centróide (DRIANKOV et al., 1996). O intervalo [0,1] para o universo de discurso da variável de saída (Figura 15) indica a variação real obtida pelo sistema *fuzzy*, onde o valor 0 indica velocidade baixa (inferiores a $1,5\text{m s}^{-1}$) de colheita, enquanto que 1 indica velocidade alta (entre 6m s^{-1} e $7,5\text{m s}^{-1}$).

A saída dos dois FIS elaborados foram somadas no programa MATLAB R2012a - Simulink (Figura 16) considerando-se a complementação de seus efeitos sobre a velocidade.

Considerou-se a possibilidade de uma maior influência de um FIS sobre a saída combinada do sistema, por isso admitiu-se os ganhos k_{ao} e k_{co} no modelo. Os valores de tais constantes foram obtidos através do algoritmo Simplex, onde a diferença entre a saída combinada do sistema em relação a valores indicados por especialistas foi minimizada.

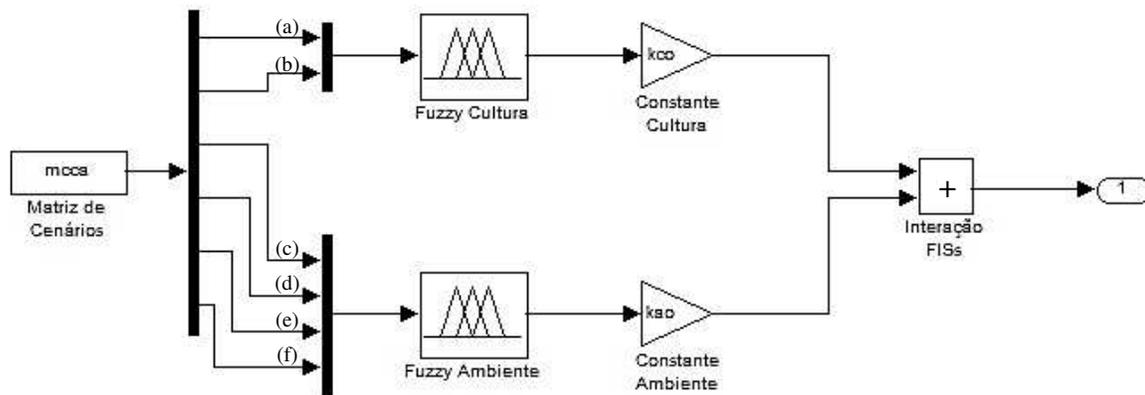


Figura 16: Modelo combinando FIS Cultura e Ambiente para simulação e otimização; (a) Posição; (b) Adensamento; (c) Topografia; (d) Obstáculos; (e) Chuva; (f) Drenagem

4.2.1. Avaliação do sistema

O sistema *fuzzy* proposto foi simulado em 37 cenários gerados aleatoriamente, representando diferentes condições de operação compostas pelas variáveis apresentadas na Tabela 1. Tais cenários também foram apresentados a especialistas da área, que indicaram a velocidade ideal para cada um. Em cada cenário foi confrontada a saída do sistema *fuzzy* com a indicação do especialista, obtendo-se assim índices de acerto individuais que, posteriormente, geraram um índice de acerto geral, obtido pelo cálculo da média destes.

Curvas ROC

Segundo Fawcett (2006), a análise ROC (do inglês *Receiver Operating Characteristic*) é um método gráfico para avaliação, organização e seleção de sistemas de diagnóstico e/ou predição. Este mesmo autor destaca que as Curvas ROC foram originalmente utilizadas na detecção de sinais, para se avaliar a qualidade de transmissão de um sinal em um

canal com ruído. Nas últimas décadas, a análise ROC também passou a ser utilizada na Aprendizagem de Máquina e Mineração de Dados, como uma ferramenta para a avaliação de modelos de classificação (BRADLEY, 1997), sendo particularmente útil em domínios nos quais existe desproporção quantitativa entre as classes ou quando se deve levar em consideração diferentes custos/benefícios para os diferentes erros/acertos de classificação (CASTRO e BRAGA, 2011). Análise ROC também tem sido utilizada para a construção e refinamento de modelos (NASCIMENTO, 2011).

Quando considera-se o resultado de um teste classificador em duas populações, uma população pertencente à classe A e outra pertencente à classe B, raramente observa-se uma perfeita separação entre esses grupos. Em geral, há uma sobreposição entre as duas curvas que as representam (Figura 17).

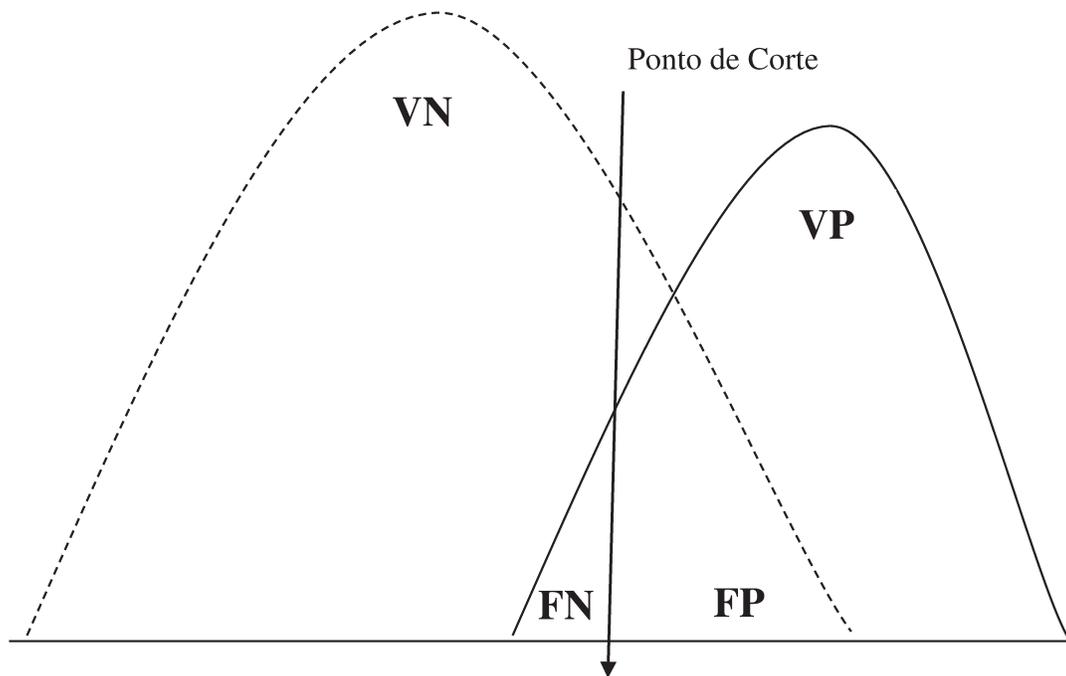


Figura 17: Sobreposição entre duas populações (FAWCETT, 2006)

Portanto, qualquer que seja o “ponto de corte” (valor que separa as duas populações) escolhido, alguns elementos da população A serão classificados corretamente como positivos (VP – total de indivíduos Verdadeiros Positivos) e alguns serão classificados como negativos (FN – total de indivíduos Falsos Negativos). Por outro lado, alguns casos da população B serão classificados como positivos (FP – total de indivíduos Falsos Positivos), mas alguns

serão corretamente classificados como negativos (VN – total de indivíduos Verdadeiros Negativos).

Considerando-se que a velocidade da colhedora seja representada por valores em um intervalo contínuo, o ponto de corte que separa as classificações da velocidade em Pertencente e Não Pertencente à classe deve estar contido no intervalo. Para avaliar a eficiência do classificador (no caso, o modelo *fuzzy*), o procedimento é estudar o efeito de diversos pontos de corte em termos de Sensibilidade e Especificidade. Para isto, constrói-se a curva ROC que é a representação dos pares (1-Especificidade, Sensibilidade) obtidos ao considerar todos os possíveis valores de corte de classificador. Especificidade é a probabilidade de que o teste classifique um indivíduo como não pertencente à uma categoria, quando ele realmente não pertence. Logo, considerando um ponto de corte k , o valor da Especificidade pode ser obtida através da Equação 1:

$$Especificidade = \frac{\sum_{i=1}^n VN(x_i)}{\sum_{i=1}^n VN(x_i) + \sum_{i=1}^n FP(x_i)} \quad (1)$$

Onde x_i é o i -ésimo indivíduo ao teste, classificado como negativo para $x_i < k$ e n é o número total de indivíduos da população. Sensibilidade é a probabilidade de que o teste classifique um indivíduo como pertencente à uma categoria, quando ele realmente pertença. Também considerando um ponto de corte k , o valor da Sensibilidade pode ser obtido através da Equação 2:

$$Sensibilidade = \frac{\sum_{i=1}^n VP(x_i)}{\sum_{i=1}^n VP(x_i) + \sum_{i=1}^n FN(x_i)} \quad (2)$$

Onde x_i é o resultado do teste para o i -ésimo indivíduo submetido a ele, considerado como positivo para $x_i \geq k$, e n é o número total de indivíduos da população.

A escolha do ponto de corte envolve a combinação ótima entre Especificidade e Sensibilidade. Se o propósito principal do teste é negar o pertencimento à classe, então se deve selecionar um ponto de corte com alta sensibilidade. Já para confirmar o pertencimento à classe, os casos positivos encontrados serão testados novamente e, portanto, no segundo teste deve-se exigir alta especificidade. Uma das formas de se escolher o ponto de corte é por meio

do cálculo da média aritmética entre Sensibilidade e Especificidade, também chamada de Eficiência (CASTANHO, 2008), conforme mostra a Equação 3:

$$Eficiência = \frac{Sensibilidade(k) + Especificidade(k)}{2} \quad (3)$$

Outro método de seleção do ponto de corte é proposto por Duarte (2004) e consiste em obter o ponto para o qual se tenha maior produto entre Sensibilidade e Especificidade, conforme mostra a Equação 4:

$$Eficiência = Sensibilidade(k) \times Especificidade(k) \quad (4)$$

A área sob a curva é empregada como uma medida do desempenho do classificador, como discriminador de pertencente ou não pertencente à classe avaliada. Um teste ideal é aquele cuja área sob a curva ROC é igual a 1. Quando a curva ROC é a bissetriz, ou seja, área igual a 0.5, o teste não permite distinguir entre os grupos.

A análise da curva ROC baseia-se na ideia de que é possível a classificação confiável de um elemento da população em uma determinada categoria. Esta confiança é obtida por algum procedimento paralelo ao classificador em análise, conhecido como padrão-ouro, que pode ser um teste mais preciso ou mesmo um diagnóstico feito por um mais ou profissionais experientes na área.

Algumas vezes, o padrão-ouro não permite uma classificação dicotômica (pertence ou não pertence). Se ele é dado por um teste que não pode ser interpretado objetivamente ou se é feito por um grupo de especialistas, existe uma subjetividade que deve ser considerada sob risco de produzir um modelo distorcido forçando a classificação dicotômica. A teoria dos conjuntos *fuzzy* fornece ferramentas que permitem preservar a subjetividade ao invés de impor a dicotomia.

Matriz de Confusão

A matriz de confusão (ou matriz de erro) é uma matriz quadrada de números que expressam a quantidade de unidades amostrais, associados a uma categoria da classificação

efetuada, e à categoria real a que pertencem essas unidades (SOUSA et al., 2013). Cada coluna da matriz representa as instâncias de uma classe prevista (modelo), enquanto que cada linha representa os casos em uma classe real (especialista).

Diversos trabalhos utilizaram a matriz de confusão como ferramenta de avaliação de sistemas de classificação. Chagas et al. (2009) desenvolveram uma RNA (Rede Neural Artificial) para classificação da degradação de pastagens a partir de imagens de satélite, classificando a degradação em três níveis (moderado, forte e muito forte), sendo tal classificação avaliada através de uma matriz de confusão e mostrando-se satisfatória. Gomes et al. (2008) desenvolveram um aplicativo para classificação automática de defeitos no corte da madeira, baseando-se no processamento de imagens digitais. A matriz de confusão indicou 81% de acerto na classificação em relação a uma norma comercial, resultado considerado satisfatório pelos autores. O uso e a cobertura vegetal do bioma caatinga foi avaliado e classificado por Sousa et al. (2013) através de algoritmos de aprendizagem de máquinas aplicados à imagens de satélite. Neste trabalho, as ferramentas de classificação foram avaliadas através de matrizes de confusão. Meira et al. (2009) elaboraram um aplicativo baseado em Árvores de Decisão para gerar alertas conforme o nível de infecção da lavoura de café pela ferrugem-do-cafeeiro. A classificação em tais níveis de alerta foram avaliados através de uma matriz de confusão, apresentando acurácia superior a 80%. Na matriz de confusão, a exatidão global (EG) é obtida pela divisão das somas das entradas que formam a diagonal principal da matriz, ou seja, o número de classificações corretas, pelo número total de amostras utilizadas (WATZLAWICK, 2003), como mostra a Equação 5.

$$EG = \frac{\sum_{i=1}^r x_{ii}}{N} \times 100 \quad (5)$$

Sendo: r = número de linhas da matriz de erro; x_{ii} = valor da linha i e coluna i ; N = quantidade total de pontos amostrais.

Já a Exatidão Específica (EE) é obtida pela divisão do número de amostras classificadas corretamente na classe pelo número total de amostras desta, como apresentada na Equação 6.

$$EE = \frac{x_{ii}}{n} \times 100 \quad (6)$$

Numa matriz de confusão, os maiores valores presentes em sua diagonal principal indicam uma menor confusão, melhor definição e caracterização da classe avaliada. Com isso é possível quantificar os erros e acertos na classificação do modelo.

4.3. Resultados e discussão

O gráfico da Figura 18 apresenta o valor da diferença entre a indicação de velocidade do especialista humano e a do modelo matemático. Nela observa-se que, nos cenários que representavam situações difíceis de operação (baixas velocidades), a indicação do modelo matemático ficou maior do que a do especialista. Nos cenários onde as condições de operação eram melhores (velocidades maiores), o modelo matemático se mostrou, na maioria dos casos, mais cauteloso do que o especialista, indicando valores menores. Isso sugere uma tendência na base de conhecimento, que envolve respostas contaminadas por situações e experiências específicas dos especialistas que participaram de sua construção. Observa-se, também, um desbalanceamento na distribuição de elementos pelas classes Baixa (entre 0,2 e 0,4) e Média (0,4 e 0,6), onde se fizeram presentes dois elementos na primeira e seis na segunda. Esse desbalanceamento se justifica, exclusivamente, à aleatoriedade do sorteio dos cenários.

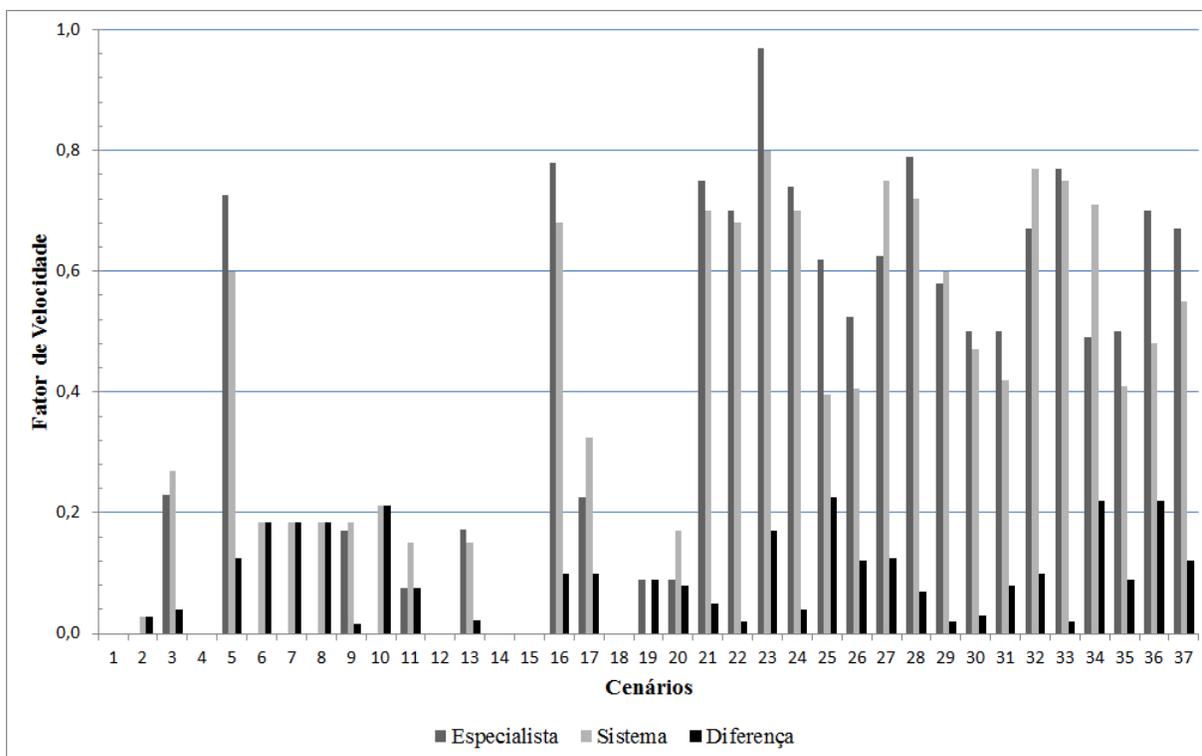


Figura 18: Diferença entre a resposta do Especialista Humano e o Sistema Especialista

Analisando as respostas da Figura 18 linguisticamente, conforme intervalos apresentados na Tabela 2, verifica-se que 4 cenários (25, 34, 36 e 37) apresentaram respostas divergentes, ou seja, nestes a resposta do especialista indicou um intervalo e a do modelo matemático indicou outro. Além disso, somente o cenário 25 teve uma divergência mais acentuada, com as respostas não pertencendo a classes vizinhas. Com isso o sistema mostra-se capaz de acompanhar as indicações dos especialistas, divergindo para classes vizinhas na maioria dos casos onde não coincidiu.

Tabela 2: Termos linguísticos e seus intervalos de valores

Intervalo da Resposta	Velocidade (m/s)	Termo Linguístico
De 0,00 a 0,20	De 0,0 a 1,5	Muito Baixa
De 0,21 a 0,40	De 1,6 a 3,0	Baixa
De 0,41 a 0,60	De 3,1 a 4,5	Média
De 0,61 a 0,80	De 4,6 a 6,0	Alta
De 0,81 a 1,00	De 6,1 a 7,5	Muito Alta

A Tabela 3 apresenta a distribuição dos valores da diferença obtidos através da subtração entre os valores indicados pelo modelo matemático e pelo especialista humano:

Tabela 3: Valores da diferença por intervalo

Intervalo	Ocorrências	Percentual
Inferiores a 10%	23	62%
Entre 10% e 15%	6	16%
Entre 15% e 20%	4	11%
Maiores que 20%	4	11%

Observa-se que 78% dos casos analisados apresentaram diferença inferior a 15%, o que favorece que as respostas do especialista e do sistema estejam na mesma classe. Além disso, a diferença geral do modelo matemático, obtido através da média aritmética dos valores das diferenças em cada cenário foi de 8%.

Na Figura 19 é apresentada a matriz de confusão para avaliação do sistema especialista. Pode-se observar que a Exatidão Global (EG) do sistema alcançou 86,5%, significando que a resposta do sistema coincidiu com a resposta dos especialistas humanos em 32 dos 37 casos avaliados. Observa-se, também, que as classes MB (Muito Baixa), Me (Média) e A (Alta) foram as classes que mais contribuíram para a obtenção do valor da EG.

Considerando-se a Exatidão Específica (observada a partir do eixo horizontal, onde tem-se a perspectiva dos especialistas humanos), a classe com pior desempenho (A – Alta) obteve valor de 75%. Esta classe, ainda apresentou valores absolutos significativos para EE e, na sua contribuição para EG, demonstrou maior confusão do modelo em sua classificação, contendo o erro de classificação de maior amplitude, onde o padrão-ouro (especialista humano) indicou uma velocidade Alta e o modelo indicou uma velocidade Baixa.

Observa-se, ainda, que as classes B e Me tiveram poucos representantes na amostra sorteada aleatoriamente, sendo apenas dois representantes para a primeira e seis para a segunda. Isso aumenta a sensibilidade do teste, uma vez que havendo apenas um erro de classificação sua EE seria afetada significativamente, o que pode ser observado na classe Me, onde um erro de classificação penalizou em quase 17% a EE da mesma.

Sistema Especialista	MB	15 40.5%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
	B	1 2.7%	2 5.4%	0 0.0%	1 2.7%	0 0.0%	50.0% 50.0%
	Me	0 0.0%	0 0.0%	5 13.5%	2 5.4%	0 0.0%	71.4% 28.6%
	A	0 0.0%	0 0.0%	1 2.7%	9 24.3%	0 0.0%	90.0% 10.0%
	MA	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 2.7%	100% 0.0%
			93.8% 6.3%	100% 0.0%	83.3% 16.7%	75.0% 25.0%	100% 0.0%
		MB	B	Me	A	MA	
		Especialista Humano					

Figura 19: Matriz de Confusão

Na Figura 20 são apresentadas as curvas ROC para as classes avaliadas (MB, B, Me, A, MA). Observa-se que tais curvas encontram-se acima da diagonal do gráfico, indicando capacidade de classificar adequadamente as respostas do modelo matemático frente ao padrão-ouro, fornecido pelos especialistas humanos. Na Figura 21 pode-se observar a curva ROC para o sistema, que é a média entre as curvas de cada classe da Figura 20. A área abaixo desta curva é 0,9514, o que caracteriza um bom desempenho do modelo como classificador, conforme apontado por Martinez et al. (2003) e Carminati et al. (2010).

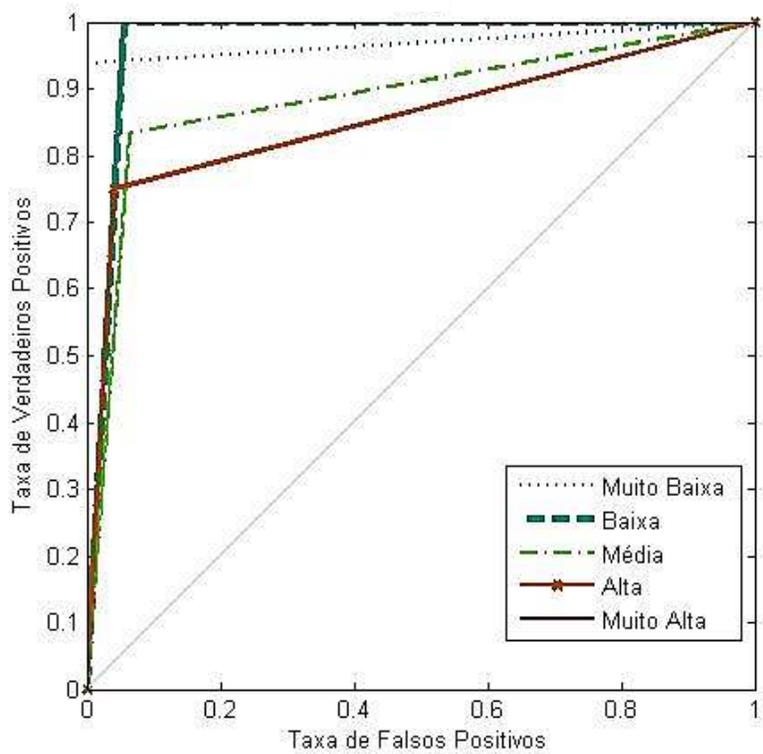


Figura 20: Curva ROC para cada classe da saída de velocidade

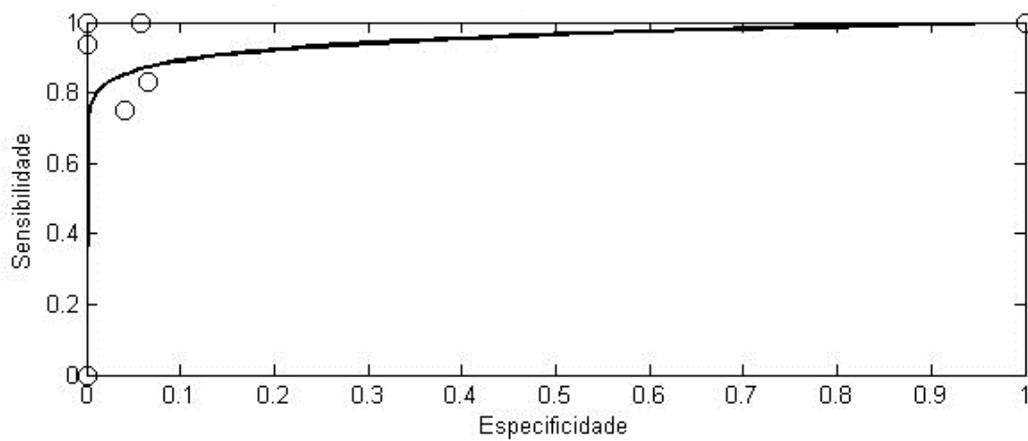


Figura 21: Curva ROC para o sistema especialista

4.4. Conclusões

1. Os resultados alcançados neste estudo mostram o potencial da utilização de lógica *fuzzy* como ferramenta de apoio à decisão sobre o ajuste da velocidade da colhedora em função das condições de operação.
2. O índice de acerto da classificação baseada em lógica *fuzzy*, mostrou-se influenciada pela experiência dos entrevistados e qualidade das regras utilizadas na formação da base de conhecimento especialista, sugerindo a regionalização da base de regras.

4.5. Referências bibliográficas

ANGULO, C.; CABESTANY, J.; RODRIGUEZ, P.; BATLLE, M. Fuzzy expert system for the detection of episodes of poor water quality through continuous measurement. **Expert Systems with Applications**, v. 39, p. 1011-1020, 2012.

BRADLEY, A. P. The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms. **Pattern recognition**, v. 30, n. 7, p. 1145-1159, 1997.

CARMINATI, R.; BAHIA, R.; COSTA, L. F. D. M.; PAULE, B. J. A.; VALE, V. L.; REGIS, L.; MEYER, R. Determinação da sensibilidade e da especificidade de um teste de ELISA indireto para o diagnóstico de linfadenite caseosa em caprinos. **Revista de Ciências Médicas e Biológicas**, v. 2, n. 1, p. 88-93, 2010.

CASTANHO, M. J. de Paula; BARROS, L. C. de; YAMAKAMI, A.; VENDITE, L. L. Fuzzy expert system: An example in prostate cancer. **Applied Mathematics and Computation**, v. 202, n. 1, p. 78-85, 2008.

CASTRO, C. L. de; BRAGA, A. P. Supervised learning with imbalanced data sets: an overview. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, v. 22, n. 5, p. 441-466, 2011.

CHAGAS, C. S. et al. Utilização de redes neurais artificiais na classificação de níveis de degradação em pastagens. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 319-327, 2009.

COX, E. **The Fuzzy Systems Handbook: A Practitioner's Guide to Building, Using, and Maintaining Fuzzy Systems**, A.P Professional, 1999.

DRIANKOV, D.; HELLENDORN, H.; RHEINFRANK, M. **An Introduction to Fuzzy Control**, Springer-Verlag, 1996.

FAWCETT, T. An introduction to ROC analysis. **Pattern recognition letters**, v. 27, n. 8, p. 861-874, 2006.

GOMES, J. M. et al. Desenvolvimento e avaliação de um protótipo classificador de tábuas usando técnicas de visão artificial. **Revista Árvore**, v. 32, n. 5, p. 949-959, 2008.

KARMAKAR, S. et al. Development of expert system modeling based decision support system for swine manure management. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 71, n. 1, p. 88-95, 2010.

MACHADO, A. L. T.; NEVES, L. A.; REIS, A. V. dos; MACHADO, R. L. T.; HORNKE, N. F. Questionário de pesquisa: auxiliando o estudo exploratório de patrulhas agrícolas dos municípios da região de Pelotas-RS. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. **Anais...** Vitória, ES: SBEA, CD-ROM. 2010.

MAGALHÃES, P. G.; BALDO, R. F. G.; CERRI, D. G. Sistema de sincronismo entre a colhedora de cana-de-açúcar e o veículo de transbordo. **Engenharia Agrícola**, v. 28, p. 274-282, 2008.

MARTINEZ, E. Z.; LOUZADA-NETO, F.; PEREIRA, B. de Bragança. A curva ROC para testes diagnósticos. **Cadernos Saúde Coletiva**, v. 11, n. 1, p. 7-31, 2003.

MEIRA, C. A. A.; RODRIGUES, L. H. A.; DE MORAES, S. Modelos de alerta para o controle da ferrugem-do-cafeeiro em lavouras com alta carga pendente. **Pesq. agropec. bras.**, v. 44, n. 3, p. 233-242, 2009.

MONTELLO, M. V. **Sistema Especialista para predição de Complicações Cardiovasculares integrado a um Sistema de Controle de Pacientes Portadores de Diabetes Mellitus**. 152p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico Florianópolis, 1999.

NASCIMENTO, G. R. do et al. Índice *fuzzy* de conforto térmico para frangos de corte. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 2, p. 219-229, 2011.

OMID, M. Design of an expert system for sorting pistachio nuts through decision tree and fuzzy logic classifier. **Expert Systems With Applications**, v. 38, n. 4, p. 4339-4347, 2011.

OWADA, A. N.; NÄÄS, I. A.; MOURA, D. J. Estimativa de bem-estar de frango de corte em função da concentração de amônia e grau de luminosidade no galpão de produção. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 3, 2007.

SALVI, J.V.; MATOS, M.A.; MILAN, M. Avaliação do desempenho de dispositivo de corte de base de colhedora de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.1, p.201-209, 2007

SHAW, I. S. e SIMÕES, M. G. **Controle e modelagem fuzzy**, 2 ed, São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2007.

SIVAKAMI, S.; KARTHIKEYAN, C. Evaluating the effectiveness of expert system for performing agricultural extension services in India. **Expert Systems with Applications**, v. 36, n. 6, p. 9634-9636, 2009.

SOUSA, B. F. S. et al. Avaliação de classificadores baseados em aprendizado de máquina para a classificação do uso e cobertura da terra no bioma Caatinga. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 62, 2013.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; MADRUGA, P. R de A. Avaliação de classificação digital em imagens de vídeo multiespectral utilizando matriz confusão. **Revista de Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava-PR, v. 5, n. 1, p. 47-57, jul./dez. 2003.

Capítulo 5. CONTROLADOR FUZZY-PI PARA AJUSTE AUTOMÁTICO DA VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO DA COLHEDORA DE CANA DE AÇÚCAR

Resumo

A complexidade da operação de colheita induz a significativos índices de perdas e impurezas. O operador concentra-se na direção, velocidade de deslocamento (VDC), posicionamento do elevador e alinhamento da colhedora ao transbordo, negligenciando o ajuste dos subsistemas operacionais da mesma. Assim, este trabalho apresenta o projeto e simulação de um controlador automático de VDC. Nas simulações (MATLAB) utilizaram-se os parâmetros hidráulicos e mecânicos da colhedora CASE A7700. Projetaram-se dois sistemas *fuzzy* (FIS), com múltiplas entradas e uma saída (MISO). As entradas do primeiro FIS foram: topografia, presença de obstáculos, presença ou intensidade da chuva e drenagem do solo. No segundo FIS as entradas foram: adensamento e posição da cana. Os sinais de saída dos FIS foram ponderados e somados para se gerar o ponto de operação (PO) da VDC. Este PO foi a referência do controlador PI que atua na variação do deslocamento volumétrico do motor hidráulico responsável pela tração. Foram simuladas diferentes condições operacionais alterando o PO. Observou-se que a associação dos FIS ao controlador PI foi capaz de gerar valores de PO em diferentes condições e controlar a VDC. Controladores inteligentes podem incorporar estratégias gerenciais tornando a operação de colheita mais adequada para cada situação e aliviando o trabalho do operador.

PALAVRAS CHAVE: automação, controle de velocidade, modelos matemáticos

Abstract

The complexity of harvesting operation induces significant loss rates and impurities. The operator focuses on direction, elevator position and travel speed of the harvester (VDC) and the alignment between harvester and transloader, disregarding the adjustment of harvester's operating subsystems. Thus, this paper presents the design and simulation of an automatic

controller for the VDC. In simulations (MATLAB) were used hydraulic and mechanical parameters from CASE A7700 harvester. Two fuzzy controllers, with multiple inputs and single output (MISO) were designed. The inputs of first controller were topography, presence of obstacles, the presence or intensity of precipitation and soil drainage. The second were: aggregation and position of sugarcane. The controllers' output signals were weighted and summed to generate the operating point (PO) of VDC. This PO was the reference for PI controller that acts on displacement's variation of the hydraulic motor that regulates the VDC. By simulations, different operating conditions were implemented, modifying the PO. It was noticed that the association between fuzzy and PI controllers was capable of generating PO values under different conditions and controlling VDC. Intelligent controllers can incorporate management strategies making harvesting operation most appropriate for each situation, relieving operator's work.

KEYWORDS: automation, speed control, mathematical models

5.1.Introdução

Segundo a CONAB (2013), a área brasileira destinada à atividade sucroalcooleira na safra 2012/2013 chegou a 8.5 milhões de hectares. Na safra 2012/2013, o processamento de cana-de-açúcar no país chegou a 533 milhões de toneladas e a produtividade média brasileira foi estimada de 70t ha⁻¹ (UNICA, 2013). O crescimento da demanda por cana-de-açúcar e a necessidade de agilidade na colheita fez com que o setor agrícola buscasse soluções de maior capacidade no campo, como a colheita mecanizada. Do total da produção de cana, aproximadamente 70%, na safra 2010/2011, foram colhidas mecanicamente, segundo a Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo.

Além de fatores produtivos, questões ambientais aceleram o processo de mecanização da colheita da cana, sobretudo no estado de São Paulo, o maior produtor de cana do Brasil (BITTENCOURT, 2008). Neste estado, desde 2002, vigora a Lei 11241, que estabelece um cronograma para encerramento da atividade de queima da palha, etapa fundamental para a colheita manual da cana de açúcar.

Entretanto, a operação de uma colhedora de cana é uma atividade complexa. No painel de operação de tal máquina verifica-se mais de 30 comandos operacionais, onde o

operador, além de se preocupar com a direção da máquina, precisa monitorar o alinhamento com o transbordo e a velocidade de deslocamento da mesma. O operador deve se manter concentrado em diversos parâmetros de operação, para tomar decisões sobre o momento e a maneira de atuar nos comandos da máquina, além da monitoração de fatores não ajustados durante a operação, como parâmetros do motor diesel.

Isso leva o operador a abandonar o acompanhamento de funções da máquina e/ou errar na atuação, principalmente após longas horas de trabalho. Como sua atenção fica concentrada na direção, velocidade e alinhamento da máquina ao transbordo, ele negligencia o ajuste de subsistemas como a altura do dispositivo de corte de base, a altura do cortador de pontas, a inclinação e rotação do elevador e a velocidade do extrator primário. Com isso, tem-se o aumento de perdas visíveis, de impurezas na carga e desperdício de energia. Neste contexto, o controle automático e preciso de subsistemas da máquina torna-se importante, visando poupar o operador de tarefas repetitivas e cansativas, que o conduziriam ao erro, deixando para ele as tarefas de cunho intelectual relativas à tomada de decisão, para as quais o ser humano tem maior aptidão.

Esse mesmo cenário foi relatado por Salvi et al. (2007), que destacaram que em todas as operações da colheita mecanizada o operador deve ficar atento às condições do canal e atuar constantemente nos dispositivos da máquina, além de se ater à direção e ao controle de velocidade. Magalhães et al. (2008) relatam que a fadiga mental sobre estes operadores não é causada apenas pela monotonia do trabalho, mas também devido ao estresse criado pela necessidade de dirigir com precisão dentro de linhas sem causar dano à vegetação, mantendo um ritmo de trabalho adequado. Berglund e Buick (2005) observaram que a adoção de sistemas de auxílio à direção e ao controle de velocidade diminui o estresse no operador, além de aumentar a precisão do trabalho.

Huang et al. (2010) elaboraram uma revisão da literatura sobre métodos *soft computing* (técnicas computacionais para solução de problemas, similares às utilizadas pelos seres humanos) aplicados à agricultura de precisão. Entre as técnicas identificadas, os autores destacaram o uso de lógica *fuzzy* como ferramentas de suporte à decisão aplicadas ao gerenciamento de colheitas, irrigação de precisão, análise de solo e aplicação de fertilizantes.

Nos últimos anos também foram realizadas pesquisas envolvendo o uso de lógica *fuzzy* e controladores PID, onde a lógica *fuzzy* é responsável pela geração do *setpoint* para os

controladores PID, partindo-se de variáveis linguísticas ou mesmo numéricas (ROMANINI et al., 2010; TIZZEI et al., 2011)

Diante desse cenário, este trabalho apresenta o projeto e simulação de um controlador automático *fuzzy*-PI de velocidade, baseado em condições operacionais de colheita mecanizada da cana.

5.2. Materiais e métodos

O sistema de controle proposto, cujo diagrama de blocos está apresentado na Figura 22, tem a função controlar a velocidade de deslocamento linear da colhedora de cana-de-açúcar.

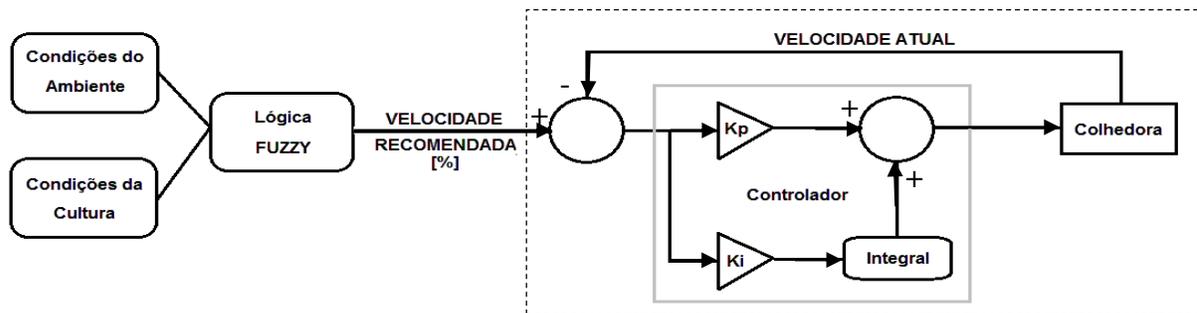


Figura 22: Diagrama do controlador proposto

A variável manipulada (sinal de controle) foi a vazão do motor hidráulico, variada através do deslocamento volumétrico deste, que, por sua vez, é pilotado hidráulicamente no circuito de transmissão através de válvulas reguladoras de pressão de três vias, cuja regulagem de abertura é feita através de pedais instalados na cabine de operação (Figura 23). Esse circuito foi simulado no *software* Automation Studio e modelado no MATLAB R2012a-Simulink. A variável de controle considerada foi a velocidade de deslocamento da colhedora.

O diagrama de blocos construído foi parametrizado para as simulações de acordo com a documentação da colhedora CASE A7700 e as especificações dos componentes nela utilizados. Ele é formado por quatro conjuntos principais: Unidade Diesel, Unidade Hidráulica, Sistema de Rodagem e Sistema de Controle. Na Unidade Diesel encontra-se o motor diesel, uma redução mecânica para acoplamento com a bomba hidráulica e um controlador PI para a aceleração do motor diesel. Na Unidade Hidráulica concentram-se os

motores hidráulicos de deslocamento variável, a bomba hidráulica e as válvulas de segurança e controle. O Sistema de Rodagem inclui o cubo de redução planetário da roda e a roda em si. E por fim, no Sistema de Controle encontra-se o controlador PI que atua no deslocamento do motor hidráulico para a variação da velocidade e o gerador *fuzzy* de *setpoint* de velocidade, conforme as condições de operação. A Figura 24 representa a integração destes 4 sistemas.

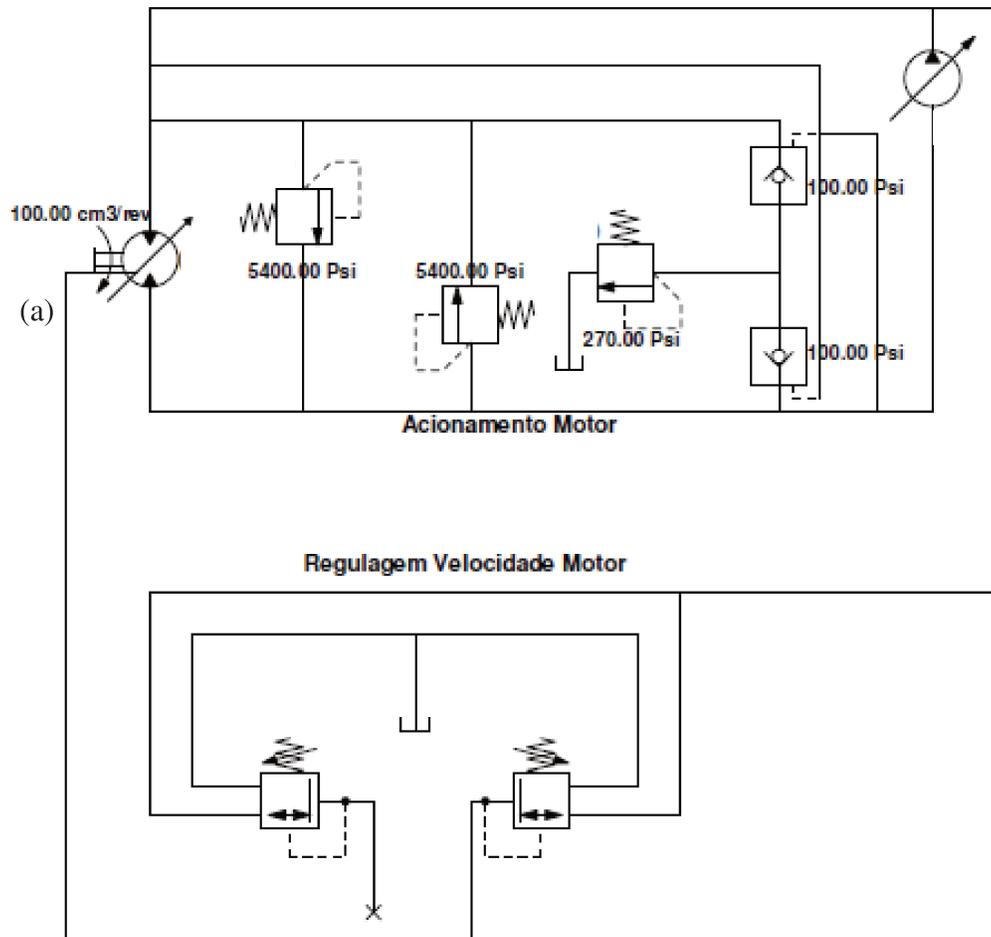


Figura 23: Circuito hidráulico de transmissão da colhedora CASE A7700, com destaque para o ponto de atuação (a) do sistema de controle PI no deslocamento (*displacement*) do motor hidráulico.

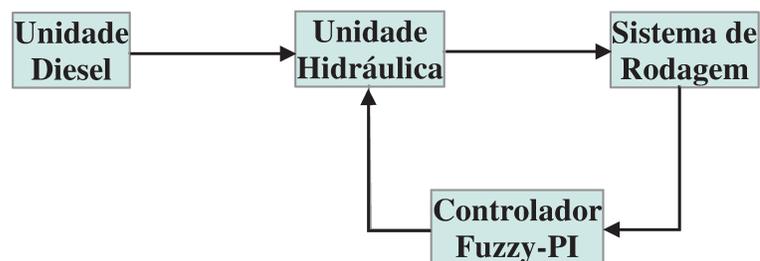


Figura 24: Subsistemas do modelo matemático desenvolvido

Para construção da base de conhecimento especialista foram feitos levantamentos de campo através do acompanhamento da colheita e de entrevistas com especialistas na operação de colhedoras de cana-de-açúcar e especialistas em colheita mecanizada da cana, conforme descrito no Capítulo 3.

Na lógica *fuzzy* usaram-se universos de discurso de entrada e de saída normalizados, conforme recomendado por Yager e Filev (1994). Com isso, as entradas possuem limitadores de 0 a 1. Procurou-se limitar em cinco a quantidade de funções de pertinência das variáveis e estas foram divididas em dois FIS (*Fuzzy Inference System*), um chamado Ambiente e outro Cultura, cujas saídas foram combinadas, visando minimização da quantidade de regras em cada um e, assim, menor tempo de execução. Nos dois FIS utilizou-se a estratégia *fuzzy* do tipo Mamdani, sendo 25 regras no FIS Cultura e 97 regras no FIS Ambiente, abrangendo as combinações das funções de pertinência identificadas. Os termos linguísticos das variáveis de entrada dos FIS estão presentes na Tabela 1.

Para a variável de controle (Velocidade) utilizaram-se cinco funções de pertinência para uma atuação mais suave, conforme recomendação de Shaw e Simões (2007), onde os termos linguísticos utilizados foram: MB (Muito Baixa), B (Baixa), M (Média), A (Alta) e MA (Muito Alta).

Os blocos que representam o circuito de transmissão da colhedora, o gerador *fuzzy* de *setpoint* e o controlador PI foram simulados utilizando o pacote Simulink do programa MATLAB R2012a. A lógica *fuzzy* foi programada com o auxílio do “*Fuzzy Logic Toolbox*”, do programa MATLAB. Na simulação utilizou-se o método de resolução trapezoidal com um passo, com interpolação livre (ode23t) no domínio do tempo. O método de *defuzzificação* utilizado foi o centroide, devido à sua propriedade de ação de controle suave frente à variação dos sinais de entrada.

O controlador da velocidade de deslocamento da colhedora também foi implementado no MATLAB – Simulink, utilizando-se estratégia de controle do tipo Proporcional + Integral (PI), com realimentação de saída. Neste tipo de sistema de controle a velocidade da colhedora (obtida através da rotação de seu redutor de tração e diâmetro da roda) é comparada com a velocidade desejada (obtida do gerador *fuzzy* de *setpoints*), produzindo-se um sinal de erro que é então aplicado ao controlador. Para a ajustagem dos parâmetros do controlador PI, utilizou-se como ponto de partida os valores obtidos através do

recurso *PID Tuner* do Simulink. Posteriormente, para obtenção de um desempenho ainda melhor, ajustou-se manualmente cada um dos ganhos dos parâmetros de forma individual, procurando-se os valores combinados que fornecessem menor tempo de estabilização para alcance da velocidade ajustada.

A sintonia de controladores combinados com lógica *fuzzy* é mais complexa do que a sintonia dos controladores convencionais, devido, principalmente, ao maior número de parâmetros a serem sintonizados. Mudanças na base de regras, nas disposições das funções de pertinência e atribuição de ganhos para as entradas e saídas do controlador *fuzzy* são as técnicas mais comumente utilizadas para a sintonia desses controladores combinados (LI, 1997; LI e GATLAND, 1996; XU et al., 2000; SHAW e SIMÕES, 2007). A sintonia dos FIS foi realizada através da adaptação das funções de pertinência adotadas inicialmente, observando-se a dinâmica do controlador em malha fechada. O ajuste das funções de pertinência consistiu na expansão/contração do conjunto suporte (subconjunto do universo de discurso) respeitando-se os limites de sobreposição das funções de pertinências adjacentes.

Para avaliação do controlador *fuzzy* de velocidade, foi elaborado (através de sorteio) um conjunto de cenários, onde cada variável *fuzzy* assumiu seus valores linguísticos. Uma vez elaborado o painel, o mesmo foi submetido a especialistas, que apontaram as prováveis respostas às situações dos cenários. O controlador *fuzzy* foi simulado com o mesmo conjunto de cenários e os resultados obtidos foram comparados com os resultados do especialista.

Além disso, foram criados cenários procurando-se reproduzir condições de campo onde a variabilidade e transição de situações fosse suave, o que não foi garantido no sorteio de cenários submetido aos especialistas. Para tanto, foram considerados 37 cenários para 4 categorias: boas condições de cultura (BCC), boas condições de ambiente (BCA), boas condições de cultura e ambiente (BCCA) e más condições de cultura e ambiente (MCCA). Na categoria BCC, as variáveis linguísticas associadas à cultura foram mantidas entre os valores 0 e 0,25, que corresponde às melhores condições que elas podem assumir. Os valores da variável Topografia, relacionada ao ambiente, foram simulados através de uma função senoidal, num intervalo onde seus valores eram não negativos, crescentes e limitados ao seu universo de discurso. O mesmo procedimento foi aplicado às variáveis Chuva e Drenagem, porém limitando-os aos valores que representam as melhores condições de operação em seu universo de discurso (sem chuva e drenagem irrelevante). Nesta mesma categoria, a variável

Obstáculos assumiu valores aleatórios dentro de seu universo de discurso. Os mesmos critérios foram aplicados à construção das demais categorias para simulação. De posse das mesmas, seus respectivos cenários foram submetidos ao controlador *fuzzy-PI* para simulação, onde avaliou-se o controlador, comparando-se a velocidade da colhedora ao seu *setpoint*. Numa segunda etapa, estas mesmas condições foram novamente aplicadas ao modelo, porém, considerando o desgaste de componentes mecânicos e hidráulicos, representando o final de uma safra. Nesta condição, considerou-se perdas de 10% no rendimento (total e volumétrico) do motor e bomba hidráulica, além do aumento em 10% do atrito na caixa de engrenagens do motor diesel e do sistema planetário de engrenagens do cubo da roda. A Tabela 4 resume os testes realizados para avaliação do controlador.

Tabela 4: Testes para avaliação do controlador

Teste	Condições de Campo	Condições da Máquina	Características avaliadas
Especialista	Aleatórias, em função do sorteio	Boas (início de safra)	
BCA	Cultura: condições variadas crescentemente, segundo uma função seno, da melhor à pior situação Ambiente: garantidas boas condições		
BCC	Cultura: garantidas boas condições Ambiente: condições variadas crescentemente, segundo uma função seno, da melhor à pior situação	1. Boas (início de safra) 2. Ruins (fim de safra)	1. Capacidade do controlador acompanhar o <i>setpoint</i> do teste 2. Velocidade de resposta do controlador
BCCA	Cultura: garantidas boas condições Ambiente: garantidas boas condições		
MCCA	Cultura: garantidas más condições Ambiente: garantidas más condições		

5.2.1. Parametrização do diagrama de blocos criado no pacote Simulink do programa MATLAB R2012a

Unidade Diesel

Segundo o manual de treinamento e serviço da colhedora CASE A7700 (CASE, 2007), essa máquina é encontrada no mercado com quatro opções de motor diesel: Scania DS 11, CASE Cursor 10.3, Cummins M11-C-330 e Cummins QSM-11-C. Na modelagem desse subsistema, foram considerados os parâmetros do motor Cummins QSM-11-C, uma vez que o fabricante do motor apresentou documentação técnica mais completa e detalhada desta versão, utilizada na parametrização de seu modelo matemático neste trabalho (ANEXO - A).

Em sua representação no modelo matemático (*Generic Engine*), o motor diesel apresenta quatro portas (conexões): T, P, B e F. A porta T (*Throttle*) recebe a saída do controlador PI da aceleração, responsável por limitar a rotação do motor às suas condições de operação (2100rpm), conforme indicado no Manual do Operador (CASE, 2007). A porta P representa a potência de saída do motor (em HP) e foi utilizada apenas para monitor o comportamento do motor frente às condições simuladas. A porta B representa o torque de reação da estrutura da colhedora no bloco do motor e a porta F representa a rotação do virabrequim, que é utilizada como entrada nos demais elementos modelados no sistema.

Acessando as propriedades do bloco *Generic Engine* através de um duplo clique, encontra-se a aba *Engine Torque*, onde foi selecionado *Normalized 3rd-order polynomial matched to peak power* como opção do campo *Model Parametrization*, pois permite a função de potência do motor diesel seja controlada pela rotação e potência informada. Os demais parâmetros da aba (*Engine type*, *Maximum power*, *Speed at maximum power*, *Maximum speed*, *Stall speed*) foram preenchidos conforme as especificações do motor.

Além da própria inércia do motor, foi considerada a inércia dos sistemas mecânicos acoplados ao eixo do virabrequim. Isso foi feito conectando-se um elemento rotacional *Inertia* na saída do bloco que representa o motor diesel no modelo.

Acessando as propriedades do bloco *Generic Engine* através de um duplo clique, encontra-se a aba *Dynamics*, onde foi considerada a inercia rotacional do motor, definida com o valor de $1,8\text{kg m}^2$ (ANEXO - A) e velocidade inicial de 2100r min^{-1} , considerando que a colhedora só opera após alcançar essa rotação, conforme indicado no Manual do Operador

(CASE, 2007). Considerou-se, também, um atraso de 0,5s na resposta do motor, definido no campo *Engine time constant*. Acessando as propriedades do bloco *Generic Engine* através de um duplo clique, encontra-se a aba *Limits*, onde o campo *Speed threshold* foi definido em 2200r min^{-1} , para evitar que o modelo, durante as simulações, ultrapassasse a rotação máxima do motor representado.

De acordo com o manual de treinamento e serviço da colhedora (CASE, 2007), existe uma caixa de engrenagens acoplada ao virabrequim do motor diesel, onde a bomba hidráulica pertencente ao sistema de transmissão está instalada. Essa caixa de engrenagens possui uma relação de transmissão de 1,17:1 (ANEXO - B) e está representada no modelo matemático pelo bloco Redução (*Simple Gear*). Foi considerado um sistema não ideal, de eficiência constante, ou seja, independente da carga e de variação de viscosidade do lubrificante. Isso foi definido na aba *Meshing Losses* (Encontrada nas propriedades do bloco *Simple Gear*, acessadas através de um duplo clique) onde o valor *Constant efficiency* foi selecionado no campo *Friction Model*, o campo *Efficiency* recebeu o valor 0,9 e o campo *Follower angular velocity threshold* recebeu o valor de 2000r min^{-1} , sendo que este último campo indica o valor de rotação acima do qual a perda da eficiência é total.

Unidade hidráulica

A documentação técnica da colhedora em estudo (CASE, 2007) indica a utilização do óleo hidráulico Akcela AW100 ou equivalente. Para a construção do modelo matemático da unidade hidráulica foi considerado o óleo hidráulico Tellus 100 (ANEXO – C), produzido pela empresa Shell, por respeitar a equivalência indicada pelo fabricante da colhedora e por apresentar documentação técnica mais completa. No modelo matemático foi inserido um bloco *Custom Hydraulic Fluid* onde o parâmetro *Fluid Density* recebeu o valor 889kg m^{-3} conforme a documentação do óleo e o campo *Kinematic viscosity* recebeu o valor 25cSt, conforme curvas de viscosidade cinemática do produto, onde foi considerada a temperatura de 80°C de operação do óleo hidráulico, em conformidade com as recomendações do fabricante da colhedora.

De acordo com o manual de treinamento e serviço da colhedora A7700 (CASE, 2007), o sistema de transmissão hidráulico da máquina vem equipado com duas bombas de

pistões modelo 54 (uma para o circuito de cada esteira) fabricadas pela empresa Eaton, cujos dados técnicos encontram-se no ANEXO - D. Ainda segundo este mesmo manual, o circuito hidráulico de cada esteira também possui um motor hidráulico de pistões modelo 54, também fabricado pela empresa Eaton (ANEXO - E).

Para representação da bomba hidráulica no modelo matemático foi utilizado o bloco *Fixed Displacement Bomb*, onde seus parâmetros foram preenchidos e calculados conforme as especificações do ANEXO – D. O valor do deslocamento volumétrico da bomba ($89,1\text{cm}^3 \text{ rot}^{-1}$) foi informado no campo *Pump displacement*, e assim como os campos *Nominal pressure* e *Nominal angular velocity* receberam, respectivamente, os valores 3500psi e 3720rpm em conformidade com os dados fornecidos pelo fabricante. Ainda sobre a parametrização desse bloco, os campos *Volumetric efficiency* (0,95) e *Total efficiency* (0,90) foram calculados segundo a Equação 7 e a Equação 8.

$$\eta_{Tot} = \frac{P \times Q_T}{T \times \omega} \quad (7)$$

$$\eta_{Vol} = \frac{Q_{Saída}}{Q_{Entrada}} \times 100 \quad (8)$$

Na Equação 7, P é a pressão de saída, Q_T é a vazão, T é o torque e ω é a rotação da bomba. Segundo a documentação do fabricante (ANEXO – D), para uma pressão P de 240bar e considerando-se a rotação da bomba conforme a recomendação de operação do motor diesel, descontando-se a eficiência da caixa de engrenagens, ou seja, 2000rpm, obteve-se o valor do torque $T = 360\text{N m}$. Na mesma documentação, considerando-se a rotação da bomba como 2000r min^{-1} , obtém-se a vazão de 170L min^{-1} para Q_T .

Na Equação 8, o rendimento volumétrico da bomba é obtido através da razão entre a vazão de saída ($Q_{Saída}$) e a vazão de entrada ($Q_{Entrada}$). Nas mesmas condições onde $P=240\text{bar}$, $\omega=2000\text{r min}^{-1}$ e $Q_T = 170\text{L min}^{-1}$, tem-se que $Q_{Saída} = 85\text{cm}^3 \text{ rot}^{-1}$. E, finalmente, de acordo com a documentação da bomba, $Q_{Entrada} = 89,1\text{cm}^3 \text{ rot}^{-1}$, o que permite o cálculo do rendimento volumétrico. Os campos *Nominal pressure* e *Nominal angular velocity* receberam os valores 3500psi e 3720rpm, respectivamente, em conformidade com os dados fornecidos

pelo fabricante. O campo *Nominal kinematic viscosity* recebeu o valor 25cSt, referente ao óleo considerado no modelo matemático.

O motor hidráulico do modelo matemático foi representado pelo bloco *Variable-Displacement Motor*, que possui quatro conexões: A, B, C e S. O deslocamento volumétrico do motor é ajustado pela porta C, onde foi conectado o sinal de controle gerado pelo controlador proposto. A porta S é uma saída rotacional, representando a rotação do eixo do motor, que é conectada ao sistema de rodagem. As portas A e B são as conexões hidráulicas de entrada e saída do motor.

Este bloco permite a parametrização do deslocamento e de seu ajuste de duas formas: ou indicando seus valores máximos e, assim, admitindo-se que os valores intermediários variam linearmente, ou então informando tabelas de valores para esses dois parâmetros, admitindo-se, assim, conhecimento de valores intermediários de deslocamento volumétrico em função do ajuste do sinal de controle. Neste trabalho, foi considerada a segunda opção (parametrização por tabela) por esta oferecer maior flexibilidade na simulação, através da escolha do método de interpolação dos pontos e extrapolação da saída. Isso foi feito escolhendo-se a opção *By displacement vs. control member position table* no campo *Model parameterization*.

O campo *Control member positions table* recebeu como parâmetros os únicos valores conhecidos (0,0025m e 0,005m), que representam o curso do dispositivo de ajuste da inclinação da base dos pistões do motor, o qual permite a regulagem do volume deslocado. O valor 0,0025m foi utilizado no lugar do zero absoluto em função de uma inconsistência matemática apresentada durante a simulação do modelo, que não aceitava o uso do zero absoluto. No campo *Pump displacements table* foram informados os valores disponíveis na documentação técnica do motor, ($0,0025\text{in}^3 \text{ rev}^{-1}$ e $5,44\text{in}^3 \text{ rev}^{-1}$). Como dispunha-se apenas de dois valores para formação das matrizes de deslocamento volumétrico e sinal de controle, o campo *Interpolation method* permitiu a seleção de apenas uma opção, a *Linear*.

Para o preenchimento dos campos referentes à eficiência do motor, foi utilizada a Equação 9 e a Equação 8, esta última já utilizada na parametrização da bomba hidráulica. Na Equação 9, P é a pressão de saída, Q_T é a vazão, T é o torque e ω é a rotação do motor. Segundo a documentação do fabricante (ANEXO – E), para uma pressão P de 240bar e considerando-se a rotação do motor conforme a recomendação de operação do motor diesel,

descontando-se a eficiência da caixa de engrenagens, ou seja, 2000r min^{-1} , obteve-se o valor do torque $T = 320\text{Nm}$. Na mesma documentação, considerando-se a rotação da bomba como 2000r min^{-1} , obtém-se a vazão de 189L min^{-1} para Q_T , obtendo-se o valor de 0,88 para o rendimento total, inserido no campo *Total efficiency*.

$$\eta_{Tot} = \frac{T \times \omega}{P \times Q_T} \quad (9)$$

Na Equação 8, o rendimento volumétrico do motor é obtido através da razão entre a vazão de saída ($Q_{Saída}$) e a vazão de entrada ($Q_{Entrada}$). Nas mesmas condições onde $P=240\text{bar}$, $\omega=2000\text{r min}^{-1}$ e $Q_T = 189\text{L min}^{-1}$, tem-se que $Q_{Saída} = 89,1\text{cm}^3 \text{rot}^{-1}$. Finalmente, de acordo com a documentação do motor, $Q_{Entrada} = 94,5\text{cm}^3 \text{rot}^{-1}$, obtendo-se, assim, o valor de 0,94 para o rendimento volumétrico do motor, inserido no campo *Volumetric efficiency*.

Assim como na bomba hidráulica, os campos *Nominal pressure* e *Nominal angular velocity* receberam os valores 3500psi e 3720r min^{-1} , respectivamente, em conformidade com os dados fornecidos pelo fabricante do motor hidráulico. O campo *Nominal kinematic viscosity* recebeu o valor 25cSt , referente ao óleo considerado no modelo matemático.

Sistema de Rodagem

De acordo com o manual de treinamento e serviço da colhedora CASE A7700 (CASE, 2007), o sistema de rodagem da mesma é formado por um cubo de redução e a roda em si, que traciona a esteira. No modelo matemático desenvolvido, o cubo de redução foi representado pelo bloco *Ring planet*, que consiste num sistema de engrenagens planetárias como os utilizados pela colhedora, conferindo ao modelo matemático a configuração da relação de transmissão e perdas por atrito. Conforme a documentação da colhedora, o cubo de redução utilizado em sua transmissão possui relação de 35:1, valor que foi inserido no campo *Ring (R) to planet (P) teeth ratio (NR/NP)* da aba *Main* (Encontrada nas propriedades do bloco *Ring planet*, acessadas através de um duplo clique). Referente às perdas pelo engrenamento (aba *Meshing losses*, acessada da mesma forma que a aba *Main*), considerou-se um sistema não ideal, com modelo de atrito constante (campo *Friction model*) assumindo o parâmetro *Constant efficiency*. Devido à falta de informações sobre o material utilizado na fabricação do

sistema mecânico, sobre seu processamento e tratamentos físico-químicos recebidos, optou-se por considerar os valores sugeridos pelo modelo matemático para os campos *Ordinary efficiency* (0,98) e *Planet-carrier velocity threshold* (0,01rad s⁻¹). Este último parâmetro corresponde à menor rotação na qual o modelo de atrito passa a ser considerado na simulação.

Foi considerado um contratorque, no sentido contrário à rotação da roda, resultante da interação da esteira com o solo. Para tanto, derivou-se a velocidade instantânea da colhedora, multiplicando-a pela sua massa (17000kg) e distância do ponto de aplicação (0,53m) que é metade do diâmetro da roda somada à espessura da esteira. Essa reação foi representada por um bloco *Ideal Torque Source*, onde a porta C do bloco foi conectada a um referencial inercial, a porta R foi atribuída ao sistema planetário e a porta S recebeu o torque calculado em função da velocidade de deslocamento da colhedora.

Sistema de controle

O sistema de controle é composto por um bloco *PID Controller* e um grupo de blocos formado pela combinação dos FIS desenvolvidos no Capítulo 4 (bloco *fuzzy*). O bloco *fuzzy* é responsável pela geração do *setpoint* de velocidade, que é utilizado pelo controlador PI. Através de um bloco *Sum*, o valor gerado pelo bloco *fuzzy* é subtraído do valor da velocidade gerado pelo sensor de rotação instalado no sistema de rodagem. Essa diferença (erro) é, então, aplicada ao bloco *PID Controller*. Em função das características da planta onde o controlador é aplicado (massa elevada e limitações quanto à estabilidade), optou-se pela não utilização da ação derivativa do controlador, visando minimizar a ocorrência de movimentos bruscos e pelo tempo de resposta dos demais sistemas da planta, que não exige do controlador uma resposta instantânea. Por conta dessas considerações, no campo *Controller* foi selecionada a opção PI.

O campo *Form* recebeu o valor *Parallel*, que considera a soma das ações proporcional, integral e derivativa como saída do controlador, onde a ação proporcional não afeta as demais ações. O campo *Time domain* recebeu o valor *Continuous-time*, considerando representação contínua do tempo na simulação. Os valores das constantes P e I do controlador foram obtidas através do recurso *PID tuner* do *Simulink*, que gerou automaticamente, através de simulações, os valores otimizados 0,1 e 0,015 para as constantes P e I, respectivamente.

5.3. Resultados e discussão

Na Figura 25, Figura 26, Figura 27 e Figura 28 apresenta-se o diagrama de blocos dos sistemas representados na Figura 24, construídos no MATLAB-Simulink.

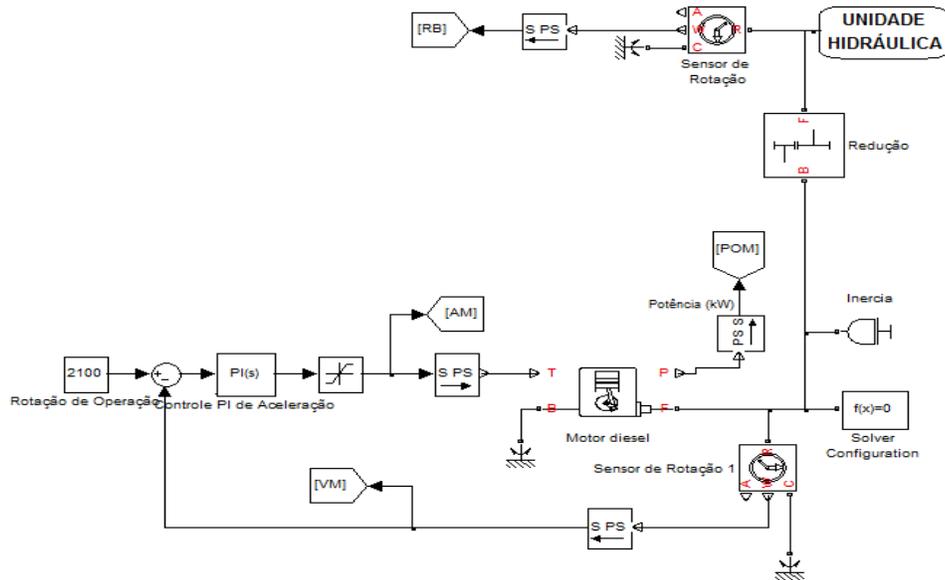


Figura 25: Diagrama de blocos da unidade diesel

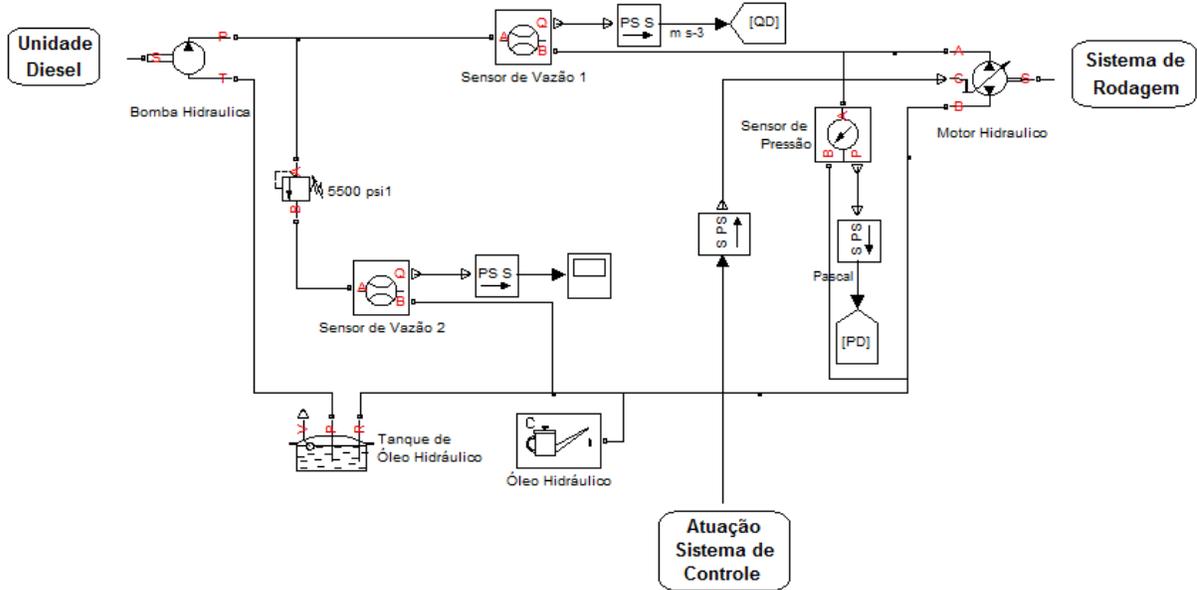


Figura 26: Diagrama de blocos da unidade hidráulica

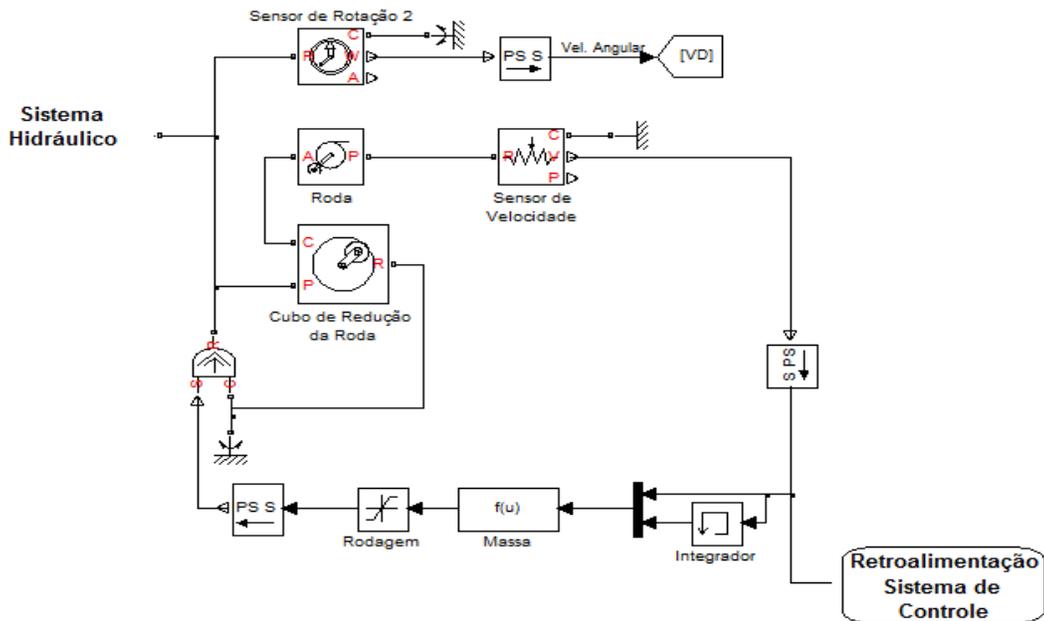


Figura 27: Diagrama de blocos do sistema de rodagem

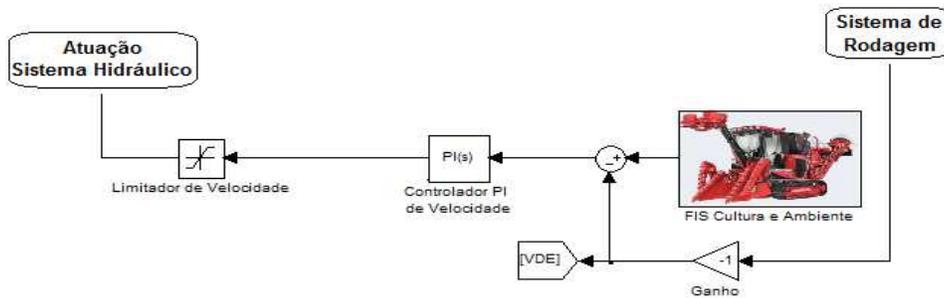


Figura 28: Diagrama de blocos do sistema de controle

Na Figura 29 são apresentados gráficos de parâmetros do motor diesel simulados no modelo. Observa-se que o perfil de tais curvas são coerentes entre si, indicando que a parametrização e modelagem realizadas estão adequadas. O mesmo pode ser observado na Figura 30, onde são apresentados parâmetros do circuito hidráulico modelado.

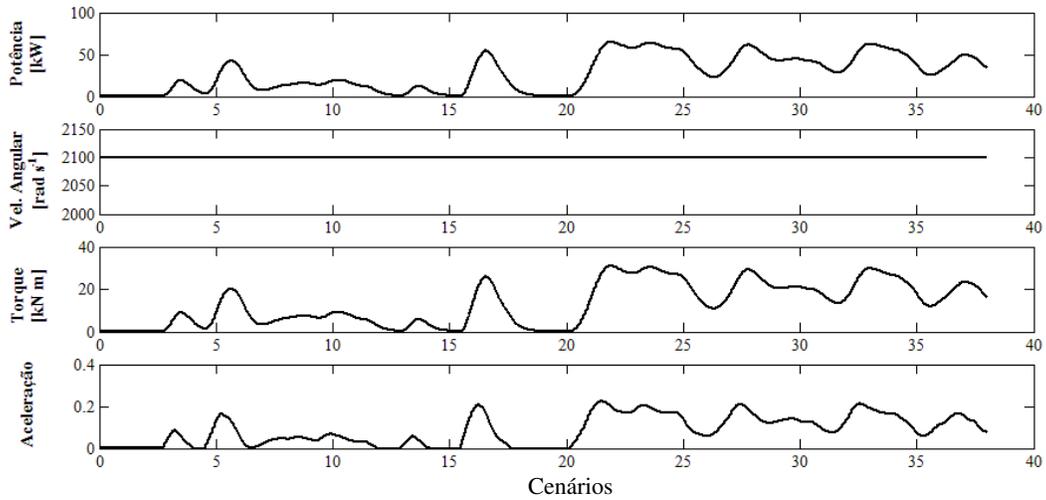


Figura 29: Desempenho do motor diesel na simulação

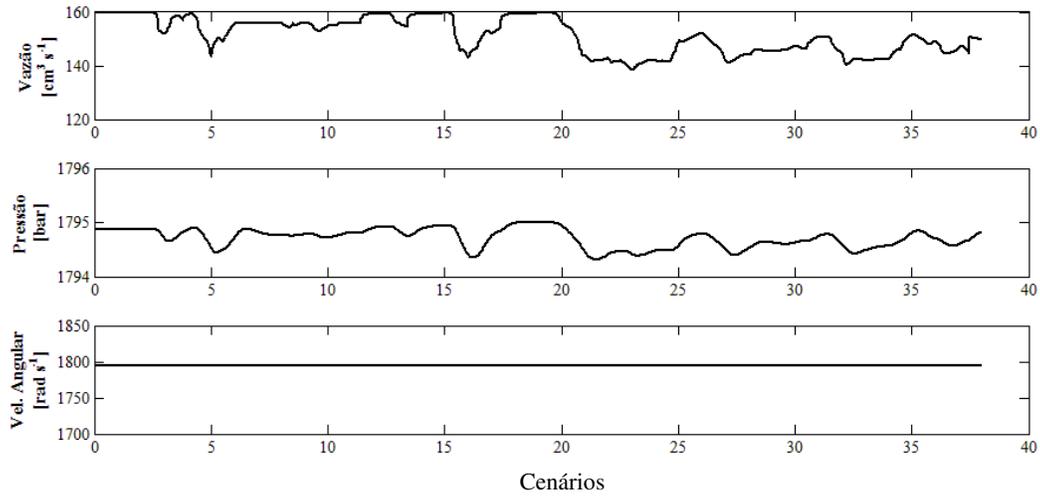


Figura 30: Desempenho da bomba hidráulica na simulação

Na Figura 31 pode-se verificar o desempenho do controlador *fuzzy*-PI em resposta às velocidades indicadas pelos especialistas após a análise dos cenários propostos. Verifica-se que o controlador foi capaz de acompanhar a variação de velocidade com atrasos menores que um segundo nas respostas às variações bruscas.

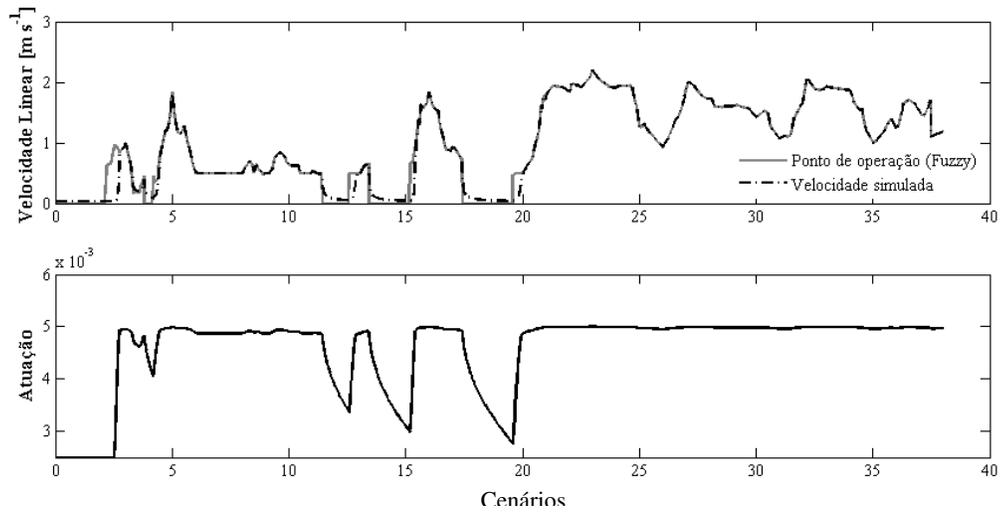


Figura 31: Resposta do controlador aos cenários simulados

A simulação do controlador *fuzzy*-PI considerando-se os cenários BCA (Boas Condições Ambientais), BCC (Boas Condições de Cultura), BCCA (Boas Condições de Cultura e de Ambiente) e MCCA (Más Condições de Cultura e Ambiente), obteve-se os gráficos apresentados na

Figura 32 e

Figura 33.

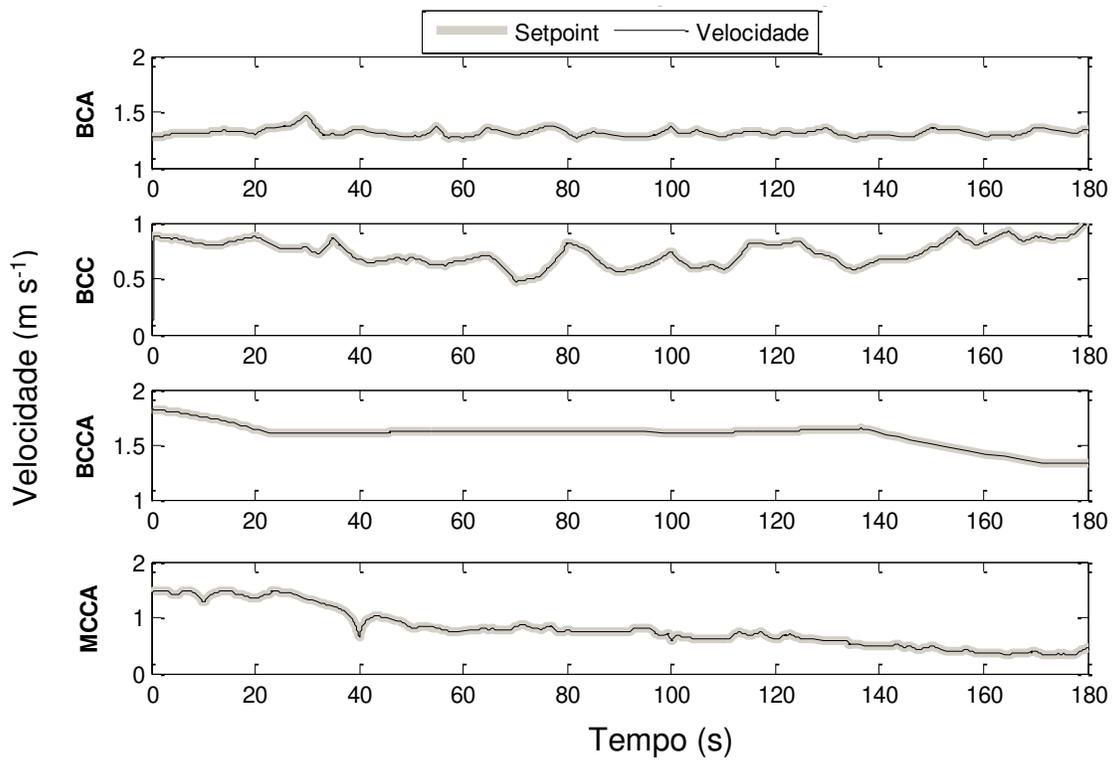


Figura 32: Velocidade simulada da colhedora em boas condições degradadas

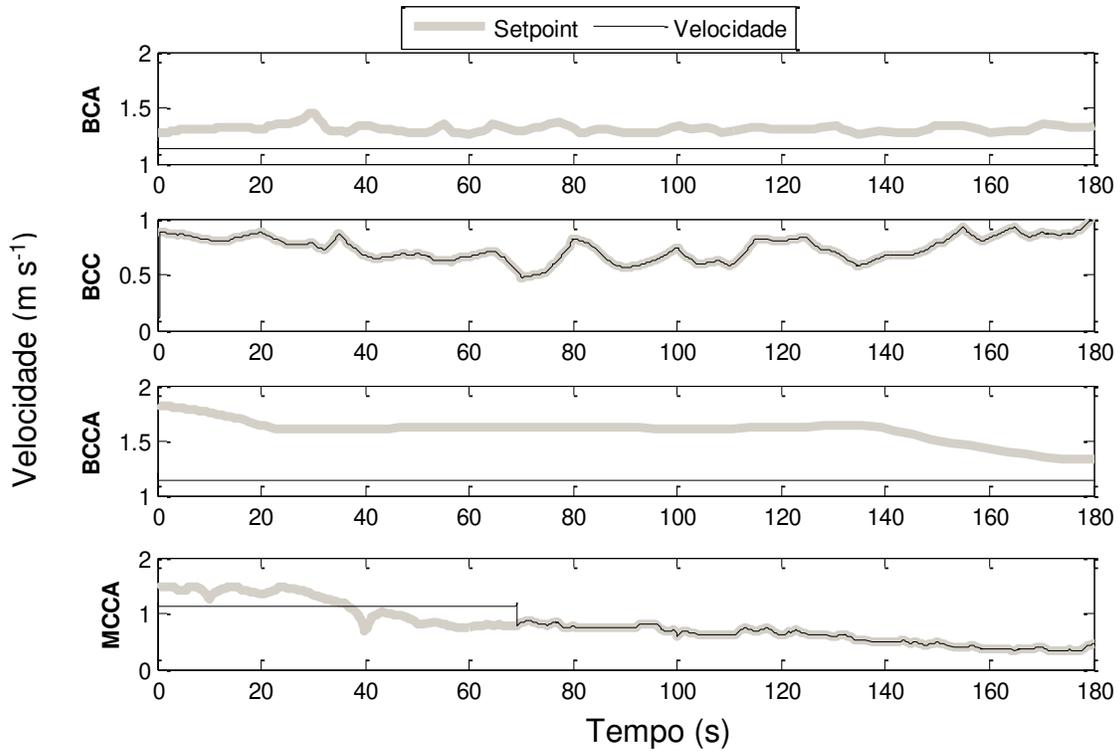


Figura 33: Velocidade simulada da colhedora em más condições mecânicas

Figura 32 observa-se que o *setpoint* gerado pelo sistema *fuzzy* foi alcançado e mantido pelo controlador durante toda a simulação, cumprindo seu objetivo. Esse comportamento é observado tanto nas boas condições de campo quanto nas más. Observa-se, também, um maior comprometimento da velocidade da colhedora durante a operação no cenário BCC, onde somente as boas condições de cultura foram garantidas, sugerindo maior influência das variáveis *fuzzy* Topografia, Obstáculos, Chuva e Drenagem na decisão do operador em ajustar a velocidade.

Na

Figura 33, onde o desgaste mecânico da colhedora foi estimado em 10% e aplicado no diagrama de blocos reduzindo-se o rendimento mecânico do motor hidráulico, bomba hidráulica e redução e caixa de engrenagens. Com isso pode-se verificar que o controlador foi incapaz de fazer com que a colhedora alcançasse o *setpoint* de velocidade enquanto este manteve-se acima de $1,1\text{m s}^{-1}$. Em velocidades menores, como as obtidas na simulação de BCC e MCCA, observa-se que o controlador conseguiu cumprir seu objetivo, ajustando a velocidade ao *setpoint* desejado.

Em todas as condições simuladas, observou-se resposta imediata do sistema mecânico ao controlador, sugerindo ausência de dinâmica no sistema. Considera-se que esse comportamento seja resultado, predominantemente, das características dos sistemas óleo-hidráulicos, cuja transmissão de força e movimentos é, praticamente, instantânea devido à baixa compressibilidade do óleo hidráulico e por envolverem massas em proporções irrelevantes diante da energia transmitida.

5.4. Conclusões

O controlador *fuzzy*-PI mostrou-se capaz de manter a velocidade de deslocamento da colhedora, respeitando as indicações de velocidade dadas pelos especialistas frente aos cenários avaliados. O modelo desenvolvido permite simulações para o desenvolvimento de estratégias de operação de acordo com as regras elaboradas. A simulação do sistema de controle se mostrou relevante para a configuração e melhoria da estratégia de controle proposta, uma vez que por meio das simulações pode-se alterar tais parâmetros e visualizar a influência de cada um destes no resultado final.

5.5.Referências bibliográficas

ABREU, D.; MORAES, L. A.; NASCIMENTO, E. N.; OLIVEIRA, R. A. **Revista Brasileira de Medicina do Trabalho**. São Paulo. Volumes 4, 5 e 6. Número Especial. Julho de 2009.

BERGLUND, S.; BUICK, R. Guidance and automated steering drive resurgence in precision farming. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5, 2005, Uppsala. **Proceedings...**Uppsala: John Stafford, 2005. p.39-45.

BITTENCOURT, E. Revolução no Campo. **Canal - Jornal da Bioenergia**, Goiânia, n. 25, set. 2008. Disponível em: <<http://www.canalbioenergia.com.br/secao.php?idSecao=125>>. Acesso em: 9 maio de 2010.

CARMINATI, R.; BAHIA, R.; COSTA, L. F. D. M.; PAULE, B. J. A.; VALE, V. L.; REGIS, L.; MEYER, R. Determinação da sensibilidade e da especificidade de um teste de ELISA indireto para o diagnóstico de linfadenite caseosa em caprinos. **Revista de Ciências Médicas e Biológicas**, v. 2, n. 1, p. 88-93, 2010.

CASE, IH Austoft. **Manual de treinamento e serviço** – Colhedoras de cana A7000/A7700. Piracicaba, 306p. 2007.

CASE, IH Austoft. **Manual do operador** – Colhedoras de cana A7000/A7700. Piracicaba, 108p. 2007.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento**. Brasília, 2011. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/arquivos/110106091550_boletim_cana_3o_lev_cana_2010_2011.pdf>. Acesso em: 22 fev. 2012.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, primeiro levantamento**. Brasília, 2013. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_04_09_10_29_31_boletim_cana_p_ortugues_abril_2013_1o_lev.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2013.

HUANG, Y.; LAN, Y.; THOMSON S.J.; FANG, A.; HOFFMANN, W.C.; LACEY R.E. Development of soft computing and applications in agricultural and biological engineering. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v.71, n.2, p.107-127, 2010.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Técnicas de Pesquisa**. 7ed. São Paulo: Atlas, 2010.

LI, H. X. A comparative design and tuning for a conventional fuzzy control. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v.27, n.5, p.884-889, 1997.

LI, H. X.; GATLAND, H. B. Conventional fuzzy control and its enhancement. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v.26, n.5, p.791-797, oct, 1996.

MAGALHÃES, P. G.; BALDO, R. F. G.; CERRI, D. G. Sistema de sincronismo entre a colhedora de cana-de-açúcar e o veículo de transbordo. **Engenharia Agrícola**, v. 28, p. 274-282, 2008.

MARTINEZ, E. Z.; LOUZADA-NETO, F.; PEREIRA, B. de Bragança. A curva ROC para testes diagnósticos. **Cadernos Saúde Coletiva**, v. 11, n. 1, p. 7-31, 2003.

ROMANINI, C. E. B.; GARCIA, A. P.; ALVARADO, L. M.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. Desenvolvimento e simulação de um sistema avançado de controle ambiental em cultivo protegido. **Rev. bras. eng. agríc. ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 11, Nov. 2010

SALVI, J.V.; MATOS, M.A.; MILAN, M. Avaliação do desempenho de dispositivo de corte de base de colhedora de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.1, p.201-209, 2007

SHAW, I. S. e SIMÕES, M. G. **Controle e modelagem fuzzy**. 2.ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2007.

TIZZEI, A.; MENEGHETTI, C. R.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. System for studies of control strategies applied in the refrigerated chambers. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 5, Oct. 2011

UNICA – União da Indústria de Cana de Açúcar. **Relatório final da safra 2012/2013 – Região Centro-Sul**. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/listagem.php?idMn=83>>. Acesso em: 12 out. 2013.

YAGER, R.R.; FILEV, D.P. **Essentials of fuzzy modeling and control**. New York, 1994.

Capítulo 6. CONCLUSÕES GERAIS

Ao fim deste trabalho pode-se enumerar as conclusões obtidas:

1. O modelo matemático proposto, por meio da simulação, descreveu o comportamento do sistema hidráulico de forma significativa;
2. O diagrama de blocos do sistema hidráulico permite a realização de simulações e análises de desempenho em componentes hidráulicos de diferentes características;
3. A simulação do sistema de controle se mostrou relevante para a configuração e melhoria do sistema de controle proposto;
4. O sistema de controle simulado foi capaz de responder ao comportamento do sistema hidráulico, bem como acompanhar mudanças do ponto de operação;
5. A simulação computacional demonstrou ser viável a construção de um controlador dessa natureza, apesar da limitação quanto à existência de sensores capazes de caracterizar as condições de campo;
6. As ferramentas de simulação se mostraram adequadas para a aplicação.

Capítulo 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A continuidade dessa pesquisa pode envolver a validação do controlador desenvolvido, através de seu desenvolvimento eletrônico e testes em campo. Além disso, pode-se aprofundar no desenvolvimento de sensores capazes de representar mais variáveis linguísticas do sistema. Também pode-se aplicar outras ferramentas relacionadas ao aprendizado de máquinas, como redes neurais artificiais.

Capítulo 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, D., MORAES, L. A., NASCIMENTO, E. N., OLIVEIRA, R. A. **Revista Brasileira de Medicina do Trabalho**. São Paulo. Volumes 4, 5 e 6. Número Especial. Julho de 2009.

ANGULO, C.; CABESTANY, J.; RODRIGUEZ, P.; BATLLE, M. Fuzzy expert system for the detection of episodes of poor water quality through continuous measurement. **Expert Systems with Applications**, v. 39, p. 1011-1020, 2012.

ARBEX, R. T. Controle Fuzzy: conceitos e aplicações. **INTEC – Instrumentação e Controle de Processos**, v.78, p.18-30, jun, 1994.

BALDO, R. F. G. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema de sincronismo entre a colhedora de cana-de-açúcar e o transbordo**. 59 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação, Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP, Campinas, 2007.

BERGLUND, S.; BUICK, R. Guidance and automated steering drive resurgence in precision farming. In: EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5, 2005, Uppsala. **Proceedings...** Uppsala: John Stafford, 2005. p.39-45.

BITTENCOURT, E. Revolução no Campo. **Canal - Jornal da Bioenergia**, Goiânia, n. 25, set. 2008. Disponível em: < <http://www.canalbioenergia.com.br/secao.php?idSecao=125> >. Acesso em: 9 maio de 2010.

BRADLEY, A. P. The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms. **Pattern recognition**, v. 30, n. 7, p. 1145-1159, 1997.

CARVAJAL, J.; CHEN, G. e OGMEN, H. Fuzzy PID controller: Design, performance evaluation, and stability analysis. **Information Sciences**, v.123, p.249-270, 2000.

CASE, IH Austoft. **Manual de Instalação, operação e manutenção do Auto Tracker**. Piracicaba, 38p. 2007.

CASE, IH Austoft. **Manual de treinamento e serviço** – Colhedoras de cana A7000/A7700. Piracicaba, 306p. 2007.

CASE, IH Austoft. **Manual do operador** – Colhedoras de cana A7000/A7700. Piracicaba, 108p. 2007.

CASTANHO, M. J. de Paula; BARROS, L. C. de; YAMAKAMI, A.; VENDITE, L. L. Fuzzy expert system: An example in prostate cancer. **Applied Mathematics and Computation**, v. 202, n. 1, p. 78-85, 2008.

CASTRO, C. L. de; BRAGA, A. P. Supervised learning with imbalanced data sets: an overview. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, v. 22, n. 5, p. 441-466, 2011.

CERRI, D. G. P. **Agricultura de precisão em cana-de-açúcar: instrumentação de uma colhedora, mapeamento da produtividade e de atributos do solo**. 173 p. Tese (Doutorado) – Programa de pós-graduação, Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP, Campinas, 2005.

CHAGAS, C. S. et al. Utilização de redes neurais artificiais na classificação de níveis de degradação em pastagens. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 319-327, 2009.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar, primeiro levantamento**. Brasília, 2013. Disponível em:

<http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_04_09_10_29_31_boletim_cana_p_ortugues_abril_2013_1o_lev.pdf>. Acesso em: 22 abr. 2013.

COX, E. **The Fuzzy Systems Handbook: A Practitioner's Guide to Building, Using, and Maintaining Fuzzy Systems**, A.P Professional, 1999.

CRESCER fatia de setor sucroalcooleiro na compra de máquinas agrícolas. **Jornal Cana**, Ribeirão Preto, 22 ago. 2005. Disponível em: <http://www.jornalcana.com.br/conteudo/noticia.asp?id_materia=17907>. Acesso em: 9 mai. 2010.

DRIANKOV, D.; HELLENDORN, H.; RHEINFRANK, M. **An Introduction to Fuzzy Control**, Springer-Verlag, 1996.

FAWCETT, T. An introduction to ROC analysis. **Pattern recognition letters**, v. 27, n. 8, p. 861-874, 2006.

GARCIA, A. P. **Desenvolvimento de um sistema de controle eletro-mecânico para dosador de fertilizantes**. 120 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação, Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP, Campinas, 2007.

GOMES, J. M. et al. Desenvolvimento e avaliação de um protótipo classificador de tábuas usando técnicas de visão artificial. **Revista Árvore**, v. 32, n. 5, p. 949-959, 2008.

GOMIDE, F. A. C. e GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy. **SBA Controle e Automação**, v.4, n.3, p.97-115, set-out, 1994.

GRAY, G. R. **Metodologia de projeto de suspensão pantográfica para corte de base de cana-de-açúcar**. 84 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação, Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP, Campinas, 2008.

HABER, R. H. e GUERRA, R. E. H. Hierarchical fuzzy controller with a self-tuning strategy an application to end milling process. In: 4º SBAI - Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, **Anais...**São Paulo, p. 657-662.1999.

HUANG, Y.; LAN, Y.; THOMSON S.J.; FANG, A.; HOFFMANN, W.C.; LACEY R.E. Development of soft computing and applications in agricultural and biological engineering. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v.71, n.2, p.107-127, 2010.

KARMAKAR, S. et al. Development of expert system modeling based decision support system for swine manure management. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 71, n. 1, p. 88-95, 2010.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Técnicas de Pesquisa**. 7ed. São Paulo: Atlas, 2010.

LI, H.-X. A comparative design and tuning for a conventional fuzzy control. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v.27, n.5, p.884-889, 1997.

LI, H.-X.; GATLAND, H. B. Conventional fuzzy control and its enhancement. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v.26, n.5, p.791-797, oct, 1996.

LOPES, G. T. **Proposta de um controlador ótimo de altura da plataforma de colhedoras**. 282 p. Tese (Doutorado) – Programa de pós-graduação, Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP, Campinas, 1999.

MACHADO, A. L. T.; NEVES, L. A.; REIS, A. V. dos; MACHADO, R. L. T.; HORNKE, N. F. Questionário de pesquisa: auxiliando o estudo exploratório de patrulhas agrícolas dos municípios da região de Pelotas-RS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 39. 2010, Vitória. **Anais...** Vitória: SBEA, 2010. 1 CD-ROM.

MAGALHÃES, P. G.; BALDO, R. F. G.; CERRI, D. G. Sistema de sincronismo entre a colhedora de cana-de-açúcar e o veículo de transbordo. **Engenharia Agrícola**, v. 28, p. 274-282, 2008.

MAGALHÃES, P. S. G.; BRAUNBECK, O. A. **Bioetanol de cana-de-açúcar: Novo Modelo Agrícola para cana-de-açúcar**. 1ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010.

MANOEL FILHO, F.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. Construção de uma base de conhecimento especialista para ajuste de dispositivos de corte e limpeza em colhedoras de cana picada, In: XL Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola. **Anais...** Cuiabá: SBEA, p. 1-4. 2011.

MATSUMOTO, S. I. **Controle adaptativo de uma plataforma hidráulica de uma colhedora automotriz**. 137 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação, Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP, Campinas, 2000.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento do Brasil. **Anuário Estatístico da Agroenergia – 2012.** Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/arq_editor/file/Desenvolvimento_Sustentavel/Agroenergia/anuario_agroenergia_web_2012.pdf>. Acesso em: 9 mai. 2013.

MCCARTHY, S. G.; HARRIS, H.; BILLINGSLEY, J. Listening for cane loss. In: Billingsley, John, (ed.) **Mechatronics and machine vision.** Robotics and Mechatronics Series (3). Research Studies Press, Baldock, Hertfordshire, 2000, England, pp. 113-118.

MCCARTHY, S. G.; BILLINGSLEY, J. A sensor for the sugar cane harvester topper. **Sensor Review**, Bingley, v. 22, n. 3, p. 242-246, 2002.

MEIRA, C. A. A.; RODRIGUES, L. H. A.; DE MORAES, S. Modelos de alerta para o controle da ferrugem-do-cafeeiro em lavouras com alta carga pendente. **Pesq. agropec. bras.**, v. 44, n. 3, p. 233-242, 2009.

MONTELLO, M. V. **Sistema Especialista para predição de Complicações Cardiovasculares integrado a um Sistema de Controle de Pacientes Portadores de Diabetes Mellitus.** 152p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico Florianópolis, 1999.

NASCIMENTO, G. R. do et al. Índice *fuzzy* de conforto térmico para frangos de corte. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 2, p. 219-229, 2011.

NEVES, J. L. M.; MAGALHÃES, P. S. G.; OTA, W. M. Sistema de monitoramento de perdas visíveis de cana-de-açúcar em colhedora de cana picada. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.3, p.764-770, set./dez. 2004.

NEVES, M. F.; CONEJERO, M. A. Sistema agroindustrial da cana: cenários e agenda estratégica. **Economia Aplicada**. vol.11. número 4. Ribeirão Preto. Outubro/Novembro de 2007.

OMID, M. Design of an expert system for sorting pistachio nuts through decision tree and fuzzy logic classifier. **Expert Systems With Applications**, v. 38, n. 4, p. 4339-4347, 2011.

OWADA, A. N.; NÄÄS, I. A.; MOURA, D. J. Estimativa de bem-estar de frango de corte em função da concentração de amônia e grau de luminosidade no galpão de produção. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 3, 2007.

PAIVA, L. O plantio mecanizado da cana parou no tempo. **Revista CanaMix**, Ribeirão Preto, número 3, maio de 2008.

PEREIRA, D. F., BIGHI, C. A., FILHO, L. R G., GABRIEL, C. P. C. Sistema fuzzy para estimativa do bem-estar de matrizes pesadas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.4, p.624-634, out./dez. 2008.

REIS, A.V. dos. **Desenvolvimento de concepções para a dosagem e deposição de precisão para sementes miúdas**. 277 p. Tese (Doutorado em Projetos de Sistemas Mecânicos) - CTC/EMC, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

REIS, A. V. dos; FORCELLINI, F. A. Identificação de requisitos de clientes para o projeto de um dosador de precisão para sementes miúdas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.1, p.309-320, jan./abr. 2006.

ROMANINI, C. E. B.; GARCIA, A. P.; ALVARADO, L. M.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. Desenvolvimento e simulação de um sistema avançado de controle ambiental em cultivo protegido. **Rev. bras. eng. agríc. ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 11, Nov. 2010

ROSSETO, F. R. **Controlador fuzzy para um sistema de aplicação de herbicidas a taxa variável**. 145 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, 2008.

SALVI, J.V.; MATOS, M.A.; MILAN, M. Avaliação do desempenho de dispositivo de corte de base de colhedora de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.27, n.1, p.201-209, 2007

SHAW, I. S. e SIMÕES, M. G. **Controle e modelagem fuzzy**. 2.ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2007. 165p.

SIVAKAMI, S.; KARTHIKEYAN, C. Evaluating the effectiveness of expert system for performing agricultural extension services in India. **Expert Systems with Applications**, v. 36, n. 6, p. 9634-9636, 2009.

SOUSA, B. F. S. et al. Avaliação de classificadores baseados em aprendizado de máquina para a classificação do uso e cobertura da terra no bioma Caatinga. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 62, 2013.

TIZZEI, A.; MENEGHETTI, C. R.; CAPPELLI, N. L.; UMEZU, C. K. System for studies of control strategies applied in the refrigerated chambers. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 31, n. 5, Oct. 2011

UMEZU, C. K. **Sistema de controle de um equipamento de formulação, dosagem e aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis**. 186 p. Tese (Doutorado) – Programa de pós-graduação, Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP, Campinas, 2003.

UNICA – União da Indústria de Cana de Açúcar. **Relatório final da safra 2012/2013 – Região Centro-Sul**. Disponível em: <<http://www.unicadata.com.br/listagem.php?idMn=83>>. Acesso em: 12 out. 2013.

VEIGA FILHO, A. A. Fatores Explicativos da Mecanização do Corte na Lavoura Canavieira Paulista. In: I Workshop Agroindústria Canavieira e o Novo Ambiente Institucional: oportunidades e desafios, 1998, Campinas. **CD-ROM** do I Workshop Agroindústria Canavieira e o Novo Ambiente Institucional: oportunidades e desafios. Campinas: Unicamp, 1998.

VOLPATO, C. E. S. **Otimização de um cortador de base flutuante para seguimento do perfil de solo em colhedoras de cana de açúcar**. 204 p. Tese (Doutorado) – Programa de pós-graduação, Faculdade de Engenharia Agrícola - UNICAMP, Campinas, 2001.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; MADRUGA, P. R de A. Avaliação de classificação digital em imagens de vídeo multiespectral utilizando matriz confusão. **Revista de Ciências Exatas e Naturais**, Guarapuava-PR, v. 5, n. 1, p. 47-57, jul./dez. 2003.

WOODS, G.S.; PAGE, R.L.; MASKELL, D.L. Ground Height Detection Sensor for Control of Harvesting Equipment, **Asia Pacific Microwave Conference**, Kyoto, Japan, Dec., 2002.

XU, J.-X.; HANG, C. C.; LIU, C. Parallel structure and tuning of a fuzzy PID controller. **Automatica**, v.36, p.673-684, 2000.

YAGER, R.R.; FILEV, D.P. **Essentials of fuzzy modeling and control**. New York, 1994.

ZADEH, L. A. Fuzzy logic = Computing with words. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v.4, n.2, p.103-111, may, 1996.

ZHANG, Q.; LITCHFIELD, J. B. e BENTSMAN, J. Fuzzy logic control for food processes. **AIChE Symposium Series**, v.89, n.297, p.90-97, 1993.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Recursos da colhedora CASE A7700

Na colhedora CASE A7700 existem subsistemas hidromecânicos com funções específicas na colheita da cana picada, conforme indicado na Figura 34.

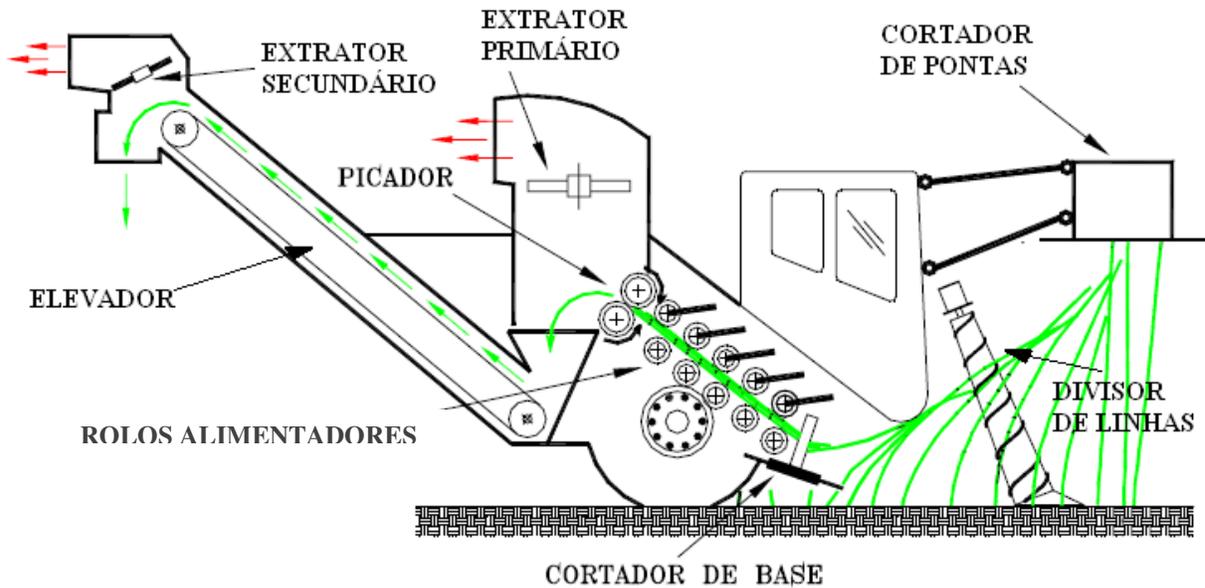


Figura 34: Recursos da colhedora de cana picada

Esses subsistemas não são exclusividade desse modelo e nem da CASE, sendo facilmente encontrados em produtos concorrentes. São eles:

- Cortador de pontas: responsável pelo corte e descarte das folhas da ponta da cana. Possui botão para acionamento no interior da cabine, funcionando em velocidade única. Também dispõem de uma alavanca para ajuste manual da altura do dispositivo, conforme a altura das folhas na rua do canavial. Requer verificação periódica do operador, uma vez que a altura das canas é variável ao longo das ruas do talhão. O operador ajusta altura de acordo com a visão do canavial que possui a partir da cabine.
- Cortador de base: responsável pelo primeiro corte feito na cana, em sua base. Possui regulagem da altura do corte, procurando mantê-lo rente ao solo, sem toca-lo e sem danificar a touceira, evitando assim contaminação da cana colhida e perdas de produtividade em cortes futuros, além de danos às facas do dispositivo. Possui um botão para acionamento no painel de instrumentos e uma alavanca para ajuste de altura cuja referência, para o operador, é a pressão do sistema hidráulico do dispositivo, indicada num manômetro na coluna da cabine da colhedora. Quando as facas do cortador tocam o solo, a

pressão no sistema hidráulico sobe e o operador, percebendo isso através da indicação no manômetro, ajusta a altura do cortador, elevando-o.

- Divisor de linhas: formado por espirais cônicas, facilita o levantamento e condução da cana tombada para o interior da colhedora. É posicionado ao lado da linha de cana que está sendo cortada, empurrando a cana dessa linha que normalmente se mistura com a da linha ao lado. Possui um botão para acionamento no painel de instrumentos da colhedora e um outro botão para ajuste da inclinação dos espirais, conforme o tombamento da cana no talhão.
- Rolos Alimentadores (Trem de rolos): conjunto de cilindros acionados por motores hidráulicos, responsáveis pela condução da cana, ainda inteira, até o picador de cana. Também tem a função de limpeza da cana, permitindo que impurezas caiam por gravidade durante o movimento da cana. Está associado ao deslocamento da máquina, operando em velocidade ajustada por potenciômetro no painel de instrumentos da cabine.
- Picador: conjunto de facas montadas em dois cilindros, cuja rotação sincronizada faz com que a cana inteira seja picada em toletes de, aproximadamente, 20cm. O comprimento dos toletes pode variar em função da velocidade ajustada para os rolos alimentadores.
- Extrator primário: sistema de ventilação forçada, responsável por extrair por arrasto a palha e outras impurezas remanescentes da cana picada, no momento em que a mesma é lançada do picador para a esteira do elevador. Possui potenciômetro para ajuste de velocidade de rotação no painel de instrumentos da colhedora.
- Elevador: conduz os toletes para serem despejados no veículo de transbordo, passando antes pelo extrator secundário. Possui dois pedais na cabine para ajuste de sua posição e um botão no painel de instrumentos para ajuste de sua inclinação em relação ao deslocamento da máquina. Desempenha uma função importante na operação da máquina, uma vez que permite o equilíbrio da mesma em função da inclinação do terreno.
- Extrator secundário: possui as mesmas características e funções do extrator primário, porém com dimensões reduzidas. Funciona como um sistema de

limpeza complementar e final, antes dos toletes serem lançados para o veículo de transbordo.

- Sistema de tração: par de alavancas (tração por esteira) ou de pedais (tração por rodas) responsável pela regulagem da aceleração da colhedora de cana.

Esses são os recursos do equipamento que estão diretamente relacionados à colheita. Além desses existem outros, auxiliares, como limpador de para-brisa, faróis, etc. A Figura 35 apresenta a disposição geral do painel de instrumentos da colhedora CASE A7700.



Figura 35: Painel de instrumentos da colhedora CASE A7700

A Figura 36 e a Figura 37 identificam os comandos da colhedora no painel de instrumentos.



Figura 36: Parte superior do painel de instrumentos da colhedora CASE A7700

Na Figura 36 são identificados: 1- Giro do capuz do extrator secundário; 2- Altura do cortador de pontas; 3- Implementos; 4- Rolos tombadores; 5- Inclinação do Flap; 6- Giro do capuz do extrator primário; 7- Inclinação do elevador; 8- Altura do corte lateral esquerdo; 9- Altura do corte lateral direito; 10- Acionamento do disco de corte lateral esquerdo; 11- Acionamento do disco de corte lateral direito; 12- Sentido de rotação da esteira do elevador; 13- comprimento do tolete.



Figura 37: Parte inferior do painel de instrumentos da colhedora CASE A7700

Na Figura 37 são identificados: 1- Seta; 2- Freio; 3- Acionamento do extrator secundário; 4- Acionamento do extrator primário; 5- Farol traseiro; 6- Farol dianteiro; 7- Ignição; 8- Partida auxiliar; 9- Indicação de restrição nos filtros de sucção; 10- Sinalizador rotativo; 11- Reversão limpador de para-brisa; 12- Inclinação dos divisores de linha; 13- Ajuste da altura do cortador de base. Outros recursos da colhedora A7700 estão presentes na coluna de direção da cabine, conforme indicado na Figura 38.

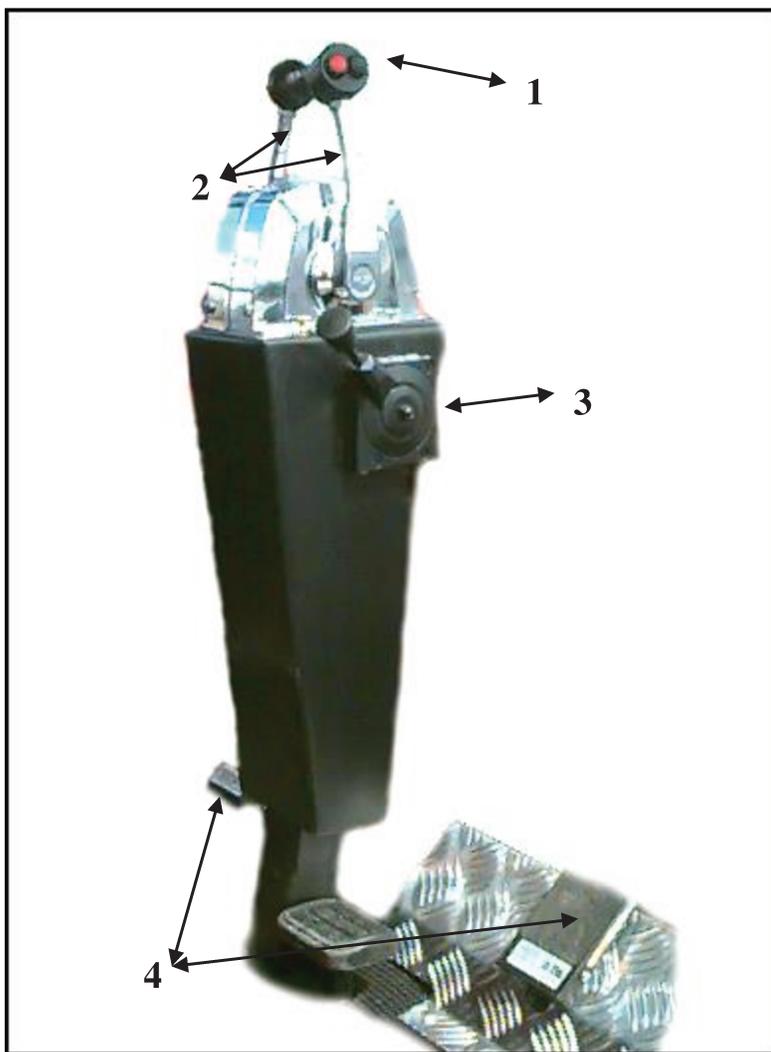


Figura 38: Coluna de direção da colhedora CASE A7700

Na Figura 38 são identificados: 1- Acionamento da esteira do elevador; 2- Alavancas de tração; 3- Alavanca de aceleração do motor diesel; 4- Pedais para rotação do elevador.

Além desses, na estrutura da cabine, especificamente em sua coluna esquerda, além e outros instrumentos, existe um manômetro que indica a pressão do sistema hidráulico de acionamento do cortador de base, onde o operador verifica, através da pressão indicada, se as lâminas do cortador estão tocando o solo ou não. Nesta coluna também é encontrado um tacômetro que indica a rotação do extrator primário e um potenciômetro para ajuste da rotação do extrator primário.

ANEXOS

ANEXO - A – Especificações do motor Cummins QSM-11-C

Cummins Marine and Cummins MerCruiser Diesel

Marine Engine General Data Sheet

Engine Model: QSM11-M / D(M)

Data Sheet: DS-3021

Date: 19 Mar 08

GENERAL ENGINE DATA

Metric [U.S. Customary]

Type	Metric [U.S. Customary]	4 Cycle, Inline, 6 Cylinder
Bore	mm [in]	125 [4.92]
Stroke	mm [in]	147 [5.79]
Displacement	liter [in ³]	10.8 [661]

ENGINE MOUNTING & ACCESSORY DRIVES

Max. Allowable Bending Moment at Rear Face of Block	N-m [ft-lb]	1356 [1000]
Max. Allowable Axial Thrust Load on Crankshaft	N [lb]	4670 [1050]
Max. Allowable Radial Load on Crankshaft		
At 0°	N [lb]	854 [192]
At 90°	N [lb]	2180 [490]
At 180°	N [lb]	4919 [1106]
At 270°	N [lb]	854 [192]

Installation/Operating Angles - OP 2120 (Additional Options Available)

Engine Installation Angles

In-Line drive: Installation: Static Installed Engine Pitch Angle

Engine Front Up From Horizontal	Min.	0°
Engine Front Up From Horizontal	Max.	12°

Vee Drive: Installation: Static Installed Engine Pitch

Engine Front Up From Horizontal	Min.	3°
Engine Front Up From Horizontal	Max.	12°

All Drives: Static Installed Engine Roll Angle

From vertical "Right/Left" Viewed from Flywheel End of Engine	Max. Right	45°
From vertical "Right/Left" Viewed from Flywheel End of Engine	Max. Left	37°

Engine Angles - Vessel Operating

Steady-State Operation - Engine Pitch Angle

Engine Front Up From Horizontal	Min.	-15°
Engine Front Up From Horizontal	Max.	31°

All Drives: Intermittent Operation - Eng. Roll Angle

From Vertical "Right/Left" viewed from Flywheel End of Engine	Max. Right	45°
From Vertical "Right/Left" viewed from Flywheel End of Engine	Max. Left	37°

All Drives: Intermittent Operation - Engine Pitch Angle

Engine Front Up From Horizontal	Min.	N.A.
Engine Front Up From Horizontal	Max.	N.A.

FUEL SYSTEM

Maximum Allowable Restriction to Fuel Pump

Clean Filter	kPa [in Hg]	20 [6.0]
Dirty Filter	kPa [in Hg]	34 [10.0]
Maximum Allowable Return Line Pressure	kPa [in Hg]	22 [6.5]
Maximum Static Pressure at Fuel Pump	kPa [in Hg]	20 [6]
Maximum Height of Fuel In Tank Above Fuel Pump	m [ft]	2.47 [8.1]

EXHAUST SYSTEM

Maximum Allowable Back Pressure	kPa [in Hg]	10 [3]
Maximum Bending Moment at Turbine Outlet Mounting Flange	N-m [ft-lb]	19 [14]
Maximum Incremental Direct Load at Turbine Outlet Mounting Flange	kg [lb]	9 [20]

AIR INDUCTION SYSTEM

Max. Allowable Intake Restriction - Turbocharged

Clean Filter	mm H ₂ O [in H ₂ O]	254 [10]
Dirty Filter	mm H ₂ O [in H ₂ O]	635 [25]
Maximum Air Cleaner Inlet Temperature Rise Over Ambient	°C [°F]	17 [30]

TBD= To Be Determined

N/A = Not Applicable

N.A. = Available

CUMMINS ENGINE COMPANY, INC
COLUMBUS, INDIANA

All Data is Subject to Change Without Notice - Consult the following Cummins Intranet site for most recent data:

<http://www.cummins.com>

Cummins Marine and Cummins MerCruiser Diesel

Marine Engine General Data Sheet

Engine Model: QSM11-M / D(M)

Data Sheet: DS-3021

Date: 19 Mar 08

LUBRICATION SYSTEM

Oil Consumption Rate (Volume Percent of Fuel Consumption Rate)	%	0.0008
Oil Pressure at Normal Operating Temperature		
Idle Speed - Minimum in Filter Head Upstream of Filter	kPa [psi]	69 [10]
Idle Speed - Minimum in Main Oil Gallery	kPa [psi]	69 [10]
Rated Speed - Measured in Filter Head Upstream of Filter (Low)	kPa [psi]	207 [30]
Rated Speed - Measured in Filter Head Upstream of Filter (High)	kPa [psi]	448 [65]
Rated Speed - Measured in Main Oil Gallery (Low)	kPa [psi]	207 [30]
Rated Speed - Measured in Main Oil Gallery (High)	kPa [psi]	448 [65]
Max. Allowable Oil Temperature (Sump)	°C [°F]	121 [250]
Oil Pan Capacity (Shallow)		
Low	liter [gal]	26.5 [7.0]
High	liter [gal]	30.3 [8.0]
Total System Capacity (Max. Sump + Filter)	liter [gal]	32.9 [8.7]
Oil Pan Capacity (Deep)		
Low	liter [gal]	30.3 [8.0]
High	liter [gal]	34.1 [9.0]
Total System Capacity (Max. Sump + Filter)	liter [gal]	36.7 [9.7]

COOLING SYSTEM

Coolant Capacity		
Engine Only	liter [gal]	28 [7.4]
Engine Including Heat Exchanger and Integral Expansion Tank	liter [gal]	36 [9.4]
Min. Coolant Makeup Capacity	liter [gal]	15 [4]
Max. Pressure Drop Across Any External Cooling System Circuit	kPa [psi]	34 [5]
Max. Allowable Block Coolant System Pressure	kPa [psi]	276 [40]
Max. Coolant Head From Crankshaft Centerline With 15 psi Pressure Cap	m [ft]	16 [51]
Max. Coolant Temperature at Engine Outlet	°C [°F]	96 [205]
Min. Block Coolant Temperature (Warm Engine)	°C [°F]	71 [160]
Min. Allowable Coolant Expansion Space	% of System Capacity	5
Maximum Sea Water Pressure	kPa [psi]	172 [25]
Maximum Sea Water Pressure Drop Across Heat Exchanger	kPa [psi]	34 [5]
Maximum Sea Water Inlet Restriction	kPa [in Hg]	17 [5]

ELECTRICAL AND STARTER SYSTEM

Electrical		12V	24V
Min. Recommended Battery Capacity			
Cold Cranking Amperes Rating (CCA)		1800	900
Marine Cranking Amperes Rating (MCA)		2250	1125
Reserve Capacity (Discharging 25 Amps @ 80°F)	minutes	320	320
Min. Allowable System Voltage (@ Battery While Running)	Volts	12	24
Min. Allowable System Voltage (@ Battery While Cranking)	Volts	9	15
Max. Allowable System Voltage (@ Battery While Running)	Volts	15.5	31.0
Max. Allowable Voltage Drop of Starting Circuit (While Cranking)	Volts	0.7	1.0
Min. Engine Cranking Torque	ft-lb	1150	600
Min. Break-away Engine Cranking Torque	ft-lb	N.A.	N.A.
Min. Engine Cranking Speed	rpm	150	150
Max. Engine (Running) Current Draw	Amps	25	15
Min. Ambient Temperature for Cold Start (No Aids)	°C [°F]	-7 [20]	-7 [20]
Air Starter			
Regulated Pressure for Air Starter System	kPa [psi]	N.A.	N.A.
Min. Air-Flow for Air Starter System	l/sec [cfm]	N.A.	N.A.
Min. Recommended Tank Volume	liter [gal]	N.A.	N.A.

TBD= To Be Determined

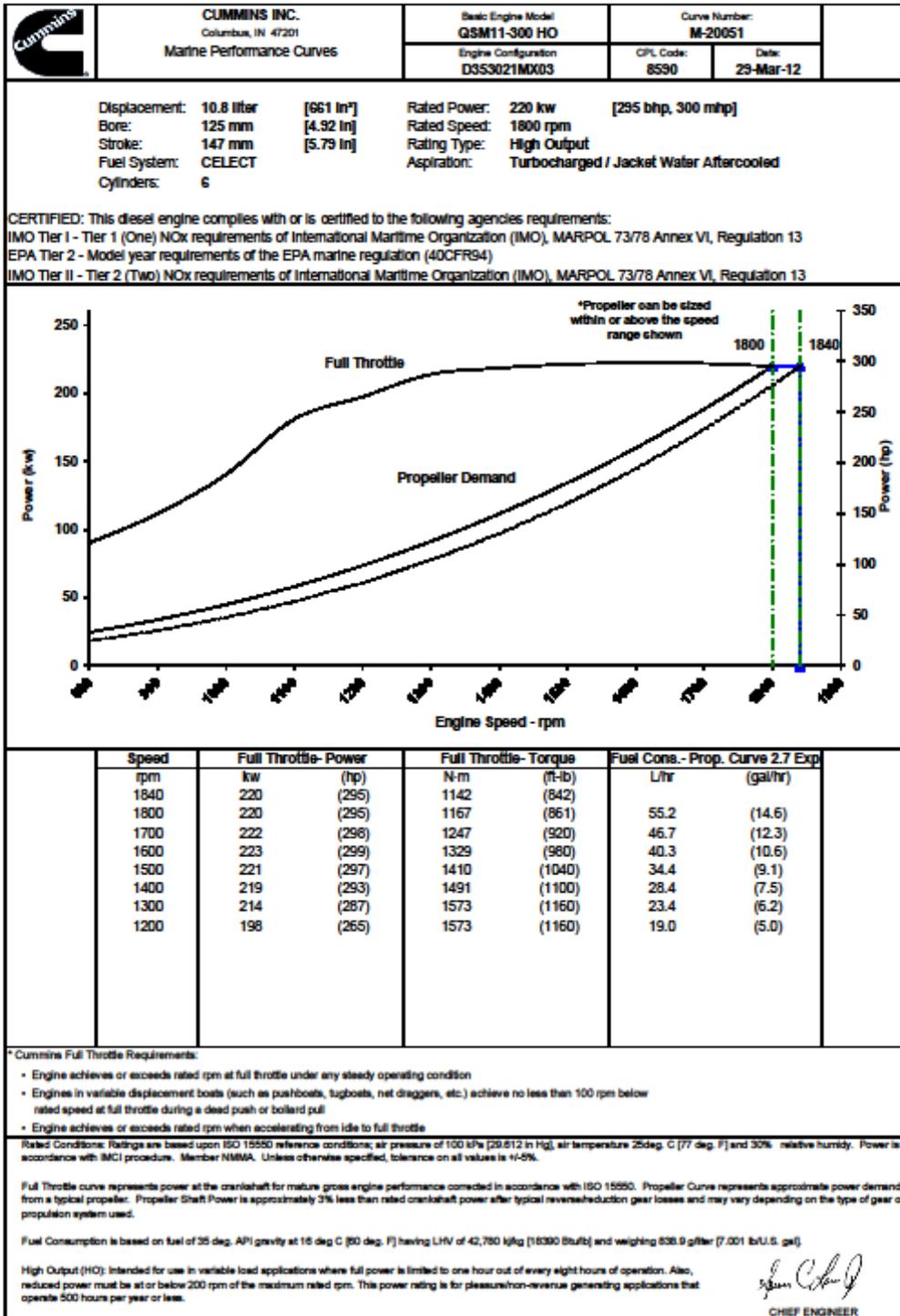
N/A = Not Applicable

N.A. = Available

CUMMINS ENGINE COMPANY, INC
COLUMBUS, INDIANA

All Data is Subject to Change Without Notice - Consult the following Cummins Intranet site for most recent data:

<http://www.cummins.com>



Propulsion Marine Engine Performance Data

Curve No. M-20051
 DS : 3075
 CPL : 8590
 DATE: 29-Mar-12

General Engine Data

Engine Model		QSM11-300 HO
Rating Type		High Output
Rated Engine Power	kW [hp]	220 [295]
Rated Engine Speed	rpm	1800
Rated Power Production Tolerance	±%	5
Rated Engine Torque	N-m [lb-ft]	1167 [861]
Peak Engine Torque @ 1300 rpm	N-m [lb-ft]	1573 [1160]
Brake Mean Effective Pressure	kPa [psi]	1355 [197]
Indicated Mean Effective Pressure	kPa [psi]	1534 [223]
Maximum Allowable Engine Speed	rpm	1860
Maximum Torque Capacity from Front of Crank ²	N-m [lb-ft]	847 [625]
Compression Ratio		15.9:1
Piston Speed	m/sec [ft/min]	8.8 [1736]
Firing Order		1-5-3-6-2-4
Weight (Dry) - Engine Only - Average	kg [lb]	1118 [2464]
Weight (Dry) - Engine With Heat Exchanger System - Average	kg [lb]	1184 [2610]
Weight Tolerance (Dry) Engine Only	3xStd Dev(±%)	N.A.

Governor Settings

High Speed Governor Break Point	rpm	1840
Minimum Idle Speed Setting	rpm	600
Normal Idle Speed Variation	±rpm	10
High Idle Speed Range Minimum	rpm	1840
High Idle Speed Range Maximum	rpm	1860

Noise and Vibration

Average Noise Level - Top	(Idle)	dBa @ 1m	80
	(Rated)	dBa @ 1m	95
Average Noise Level - Right Side	(Idle)	dBa @ 1m	80
	(Rated)	dBa @ 1m	95
Average Noise Level - Left Side	(Idle)	dBa @ 1m	80
	(Rated)	dBa @ 1m	95
Average Noise Level - Front	(Idle)	dBa @ 1m	80
	(Rated)	dBa @ 1m	95

Fuel System¹

Avg. Fuel Consumption - ISO 8178 E3 Standard Test Cycle	l/hr [gal/hr]	39.4 [10.4]
Fuel Consumption at Rated Speed	l/hr [gal/hr]	55.2 [14.6]
Approximate Fuel Flow to Pump	l/hr [gal/hr]	219.6 [58.0]
Maximum Allowable Fuel Supply to Pump Temperature	°C [°F]	60.0 [140]
Approximate Fuel Flow Return to Tank	l/hr [gal/hr]	164.3 [43.4]
Approximate Fuel Return to Tank Temperature	°C [°F]	71.2 [160]
Maximum Heat Rejection to Drain Fuel	kW [Btu/min]	2.6 [149]
Fuel Transfer Pump Pressure Range	kPa [psi]	N.A.
Fuel Pressure - Pump Out/Rail .. Mechanical Gauge	kPa [psi]	1103 [160]
INSITE Reading	kPa [psi]	N.A.

TBD= To Be Determined

N/A = Not Applicable

N.A. = Not Available

- ¹ Unless otherwise specified, all data is at rated power conditions and can vary ± 5%.
- ² No rear loads can be applied when the PPTO is fully loaded. Max PTO torque is contingent on torsional analysis results for the specific drive system. Consult Installation Direction Booklet for Limitations.
- ³ Heat rejection to coolant values are based on 50% water/50% ethylene glycol mix and do NOT include fouling factors. If sourcing your own cooler, a service fouling factor should be applied according to the cooler manufacturer's recommendation.
- ⁴ Consult option notes for flow specifications of optional Cummins seawater pumps, if applicable.
- ⁵ May not be at rated load and speed. Maximum heat rejection may occur at other than rated conditions.

CUMMINS ENGINE COMPANY, INC
 COLUMBUS, INDIANA

All Data is Subject to Change Without Notice - Consult the following Cummins Intranet site for most recent data:

<http://cumminsmarine.com/>

Propulsion Marine Engine Performance Data

Curve No. M-20051
 DS : 3075
 CPL : 8590
 DATE: 29-Mar-12

Air System*		
Intake Manifold Pressure	kPa [in Hg]	118 [35]
Intake Air Flow/sec [cfm]	288 [811]
Heat Rejection to Ambient	kW [Btu/min]	17 [986]
Exhaust System*		
Exhaust Gas Flow/sec [cfm]	621 [1315]
Exhaust Gas Temperature (Turbine Out)	°C [°F]	385 [725]
Exhaust Gas Temperature (Manifold)	°C [°F]	526 [978]
Emissions (in accordance with ISO 8178 Cycle E3)		
NOx (Oxides of Nitrogen)	g/kw-hr [g/hp-hr]	6.28 [4.68]
HC (Hydrocarbons)	g/kw-hr [g/hp-hr]	0.26 [0.19]
CO (Carbon Monoxide)	g/kw-hr [g/hp-hr]	0.58 [0.43]
PM (Particulate Matter)	g/kw-hr [g/hp-hr]	0.17 [0.13]
Cooling System*		
Sea Water Pump Specifications	MAB 0.08.17-07/16/2001	
Pressure Cap Rating (With Heat Exchanger Option)	kPa [psi]	103 [15]
Engines without Low Temperature Aftercooling (LTA)		
Sea Water Aftercooled Engine (SWAC)		
Coolant Flow to Engine Heat Exchanger/min [gal/min]	151 [39.9]
Standard Thermostat Operating Range (Start to Open)	°C [°F]	71 [160]
Standard Thermostat Operating Range (Full Open)	°C [°F]	80 [175]
Heat Rejection to Engine Coolant ²	kW [Btu/min]	223 [12700]
Engines with Low Temperature Aftercooling (LTA)		
Single Loop LTA		
Coolant Flow to Cooler (with blocked open thermostat)/min [gal/min]	170 [45]
LTA Thermostat Operating Range (Start to Open)	°C [°F]	66 [150]
LTA Thermostat Operating Range (Full Open)	°C [°F]	80 [175]
Heat Rejection to Engine Coolant ²	kW [Btu/min]	181 [10288]
Maximum Coolant Inlet Temperature from LTA Cooler	°C [°F]	54 [130]

TBD= To Be Determined

N/A = Not Applicable

N.A. = Not Available

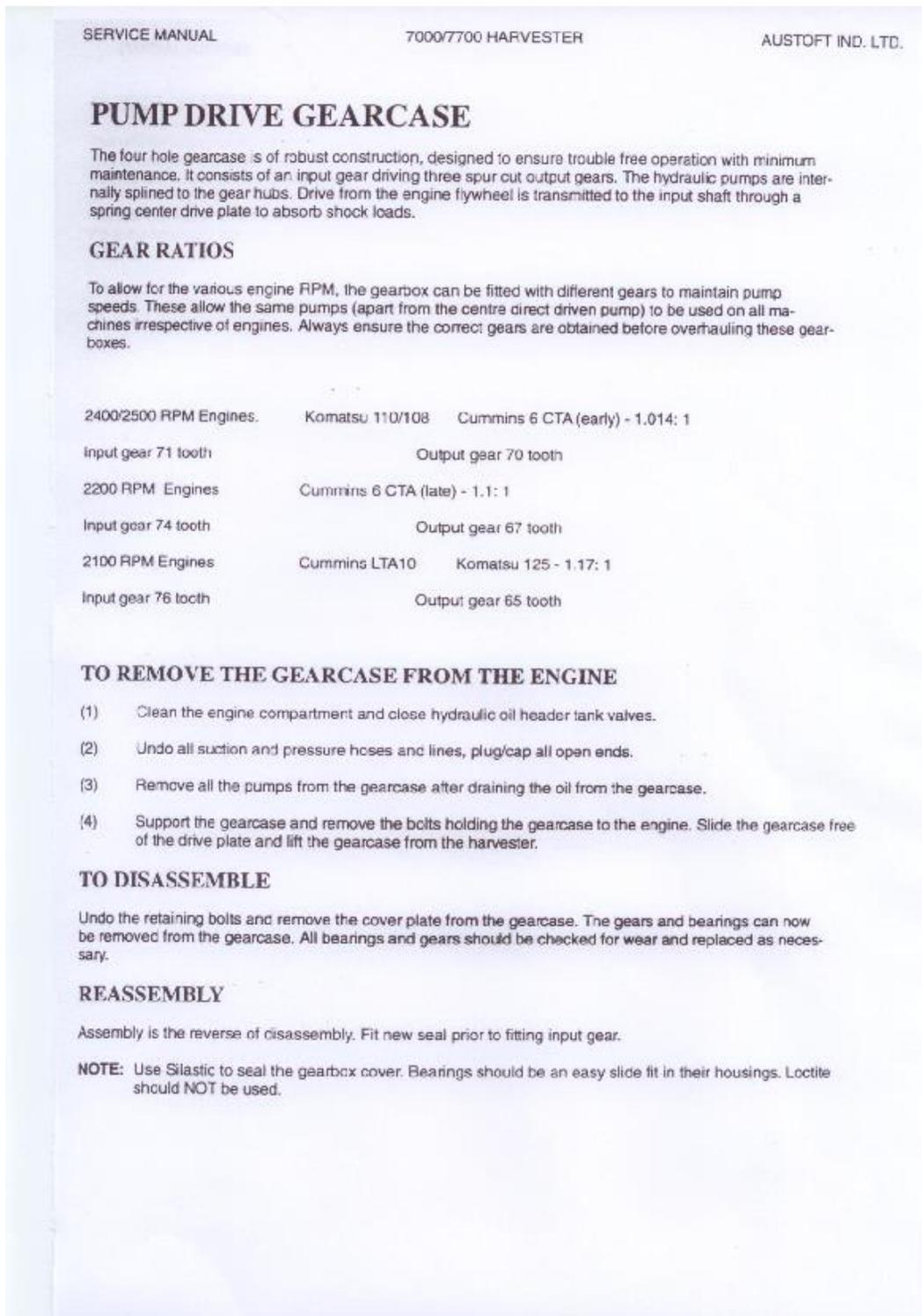
- ¹ Unless otherwise specified, all data is at rated power conditions and can vary ± 5%.
- ² No rear loads can be applied when the PPTO is fully loaded. Max PTO torque is contingent on torsional analysis results for the specific drive system. Consult Installation Director Booklet for Limitations.
- ³ Heat rejection to coolant values are based on 50% water/50% ethylene glycol mix and do NOT include fouling factors. If sourcing your own cooler, a service fouling factor should be applied according to the cooler manufacturer's recommendation.
- ⁴ Consult option notes for flow specifications of optional Cummins seawater pumps, if applicable.
- ⁵ May not be at rated load and speed. Maximum heat rejection may occur at other than rated conditions.

CUMMINS ENGINE COMPANY, INC
 COLUMBUS, INDIANA

All Data is Subject to Change Without Notice - Consult the following Cummins Intranet site for most recent data:

<http://www.cummins.com>

ANEXO - B – Caixa de engrenagens da bomba hidráulica





Shell Tellus T

Óleo hidráulico de qualidade para aplicações onde pode haver grandes amplitudes térmicas

Óleos hidráulicos de elevada performance, óleos hidráulicos com características anti-desgaste que incorporam um melhorador do índice de Viscosidade o que garante umas óptimas características viscosidade/temperatura.

Aplicações

- Sistemas hidráulicos e de transmissão de potência, sujeitos a grandes variações de temperatura ou nos quais se requeira uma variação mínima da viscosidade com a temperatura.

Alguns sistemas hidráulicos críticos só toleram pequenas variações na sua viscosidade provocadas pela variação da temperatura. Os óleos hidráulicos, como os Shell Tellus T, com características de multigradação, devem ser utilizados nestes casos com vantagens evidentes.

Características e vantagens

- **Reduzida variação da viscosidade com a temperatura**

Uma tecnologia especial de melhoria do índice de viscosidade que minimiza a variação da viscosidade do óleo com alterações na temperatura e proporciona uma fácil bombagem a baixas temperaturas. Estas características são particularmente benéficas em aplicações hidráulicas sujeitas a grandes variações na temperatura de trabalho.

- **Elevada estabilidade ao corte**
O melhorador do IV tem uma elevada resistência a esforços mecânicos.

- **Excelente capacidade anti-desgaste**
Aditivos anti-desgaste são eficientes em qualquer condição operatória incluindo em condições de exigência extrema.

- **Ótima filterabilidade**

Muito baixa tendência a causar colmatção dos filtros na presença de contaminantes como água ou cálcio.

- **Resistente à oxidação**

Resiste à oxidação de produtos ácidos e lamas, mesmo em condições severas de operação.

- **Protege contra a corrosão**

Poderosos inibidores de corrosão garantem uma protecção longa e eficaz tanto em metais ferrosos como não ferrosos.

- **Propriedades anti-espuma e de desmulsibilidade**

Está garantida uma rápida libertação do ar sem formação de espuma.

Especificações e Aprovações

O Shell Tellus T cumpre os requisitos ISO 11158 Tipo HV.

Compatibilidade

O aditivo anti-desgaste contém zinco e, por isso, os Shell Tellus T, embora sejam o ideal na maior parte dos sistemas, não deverão ser utilizado em sistemas antigos que contenham prata. Nesses casos recomendamos a utilização dos Tellus S.

Compatibilidade com tintas e vedantes

Os Shell Tellus T são compatíveis com os vedantes e com as tintas normalmente recomendadas para utilizar em sistemas que funcionem com óleos hidráulicos minerais.

Saúde & Segurança

É improvável que o Tellus T apresente qualquer risco significativo para a saúde ou segurança sempre que for devidamente utilizado nas aplicações recomendadas e se mantiverem bons padrões de higiene industrial e pessoal.

Evitar o contacto com a pele. Com óleo usado, utilizar luvas. Após contacto com a pele, lavar imediatamente com água e sabão.

Para informação complementar sobre Saúde & Segurança do Produto, consultar a Ficha de Segurança do Produto.

Proteger o ambiente

Levar o óleo usado para um local de recolha autorizado. Não o despejar em esgotos, terra ou água.

Conselhos

Informações complementares sobre aplicações não abrangidas neste folheto poderão obter-se com o vosso Representante da Shell.

Características Físicas Típicas

Shell Tellus		T15	T32	T46	T68	T100
Tipo de óleo ISO		HV	HV	HV	HV	HV
Grau de viscosidade ISO		15	32	46	68	100
Viscosidade Cinemática @	IP 71					
0° C cSt		75	-	310	-	960
20° C cSt		30	71	105	-	268
40° C cSt		15	32	46	68	100
100° C cSt		3.8	6.4	8.2	10.9	14.7
Índice de Viscosidade	IP 226	150	150	150	150	150
Densidade @15°C Kg/l	IP 365	0.871	0.872	0.872	0.877	0.889
Ponto Inflamação (VF) °C	IP 34	160	170	210	230	176
Ponto de Fluxão °C	IP 15	-42	-42	-39	-36	-30

Estas características são típicas da produção actual. Embora a futura produção tenha que respeitar a especificação da Shell, poderão ocorrer variações destas características.

ANEXO – D – Dados da bomba de pistões modelo 54 fabricada pela empresa Eaton

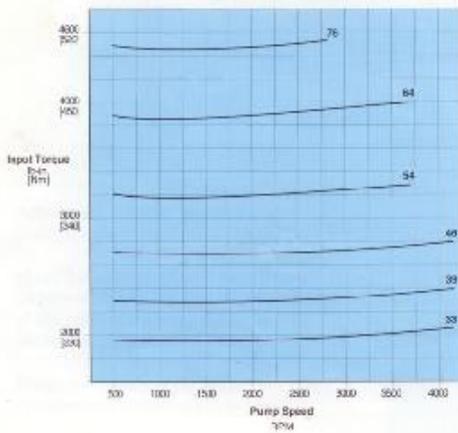
Pump Performance

H. de pistão
↓
Pump Performance

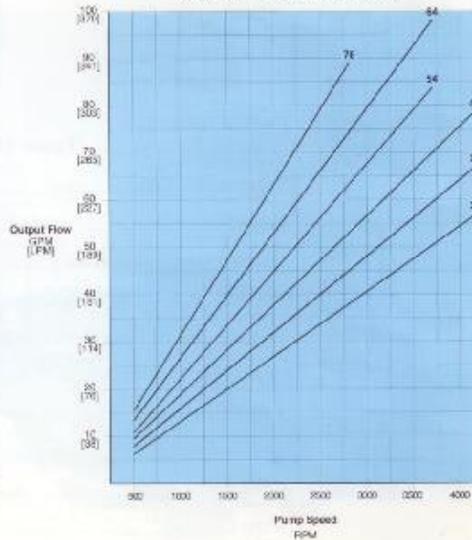
Model		33	39	46	54	64	76
Displacement	in ³ /rev	3.32	3.89	4.60	5.44	6.44	7.62
	cm ³ /rev	52,5	63,7	75,3	89,1	105,5	124,8
Maximum Shaft Speed*	RPM @ 18°	4510**	4160	4160	3720	3720	2775
Peak Pressure***	PSI [bar]	6000 [415]	6000 [415]	6000 [415]	6000 [415]	6000 [415]	6000 [415]
Output Flow	GPM @ 3500 PSI	61.5	67.3	79.2	94.1	99.1	87.9
	LPM @ 241 bar	233	255	300	318	375	333
Input Torque	lb-in @ 3500 PSI	2049	2346	2786	3285	3900	4552
	Nm @ 241 bar	232	265	315	371	441	514

Pump performance calculated at 98% efficiency.
 * The maximum pump shaft speed may be limited by the charge pump speed rating.
 ** The maximum swashplate angle on model 33 pumps is 15.5°.
 *** Peak pressure should not exceed 1% of operating time.

Input Torque vs Speed

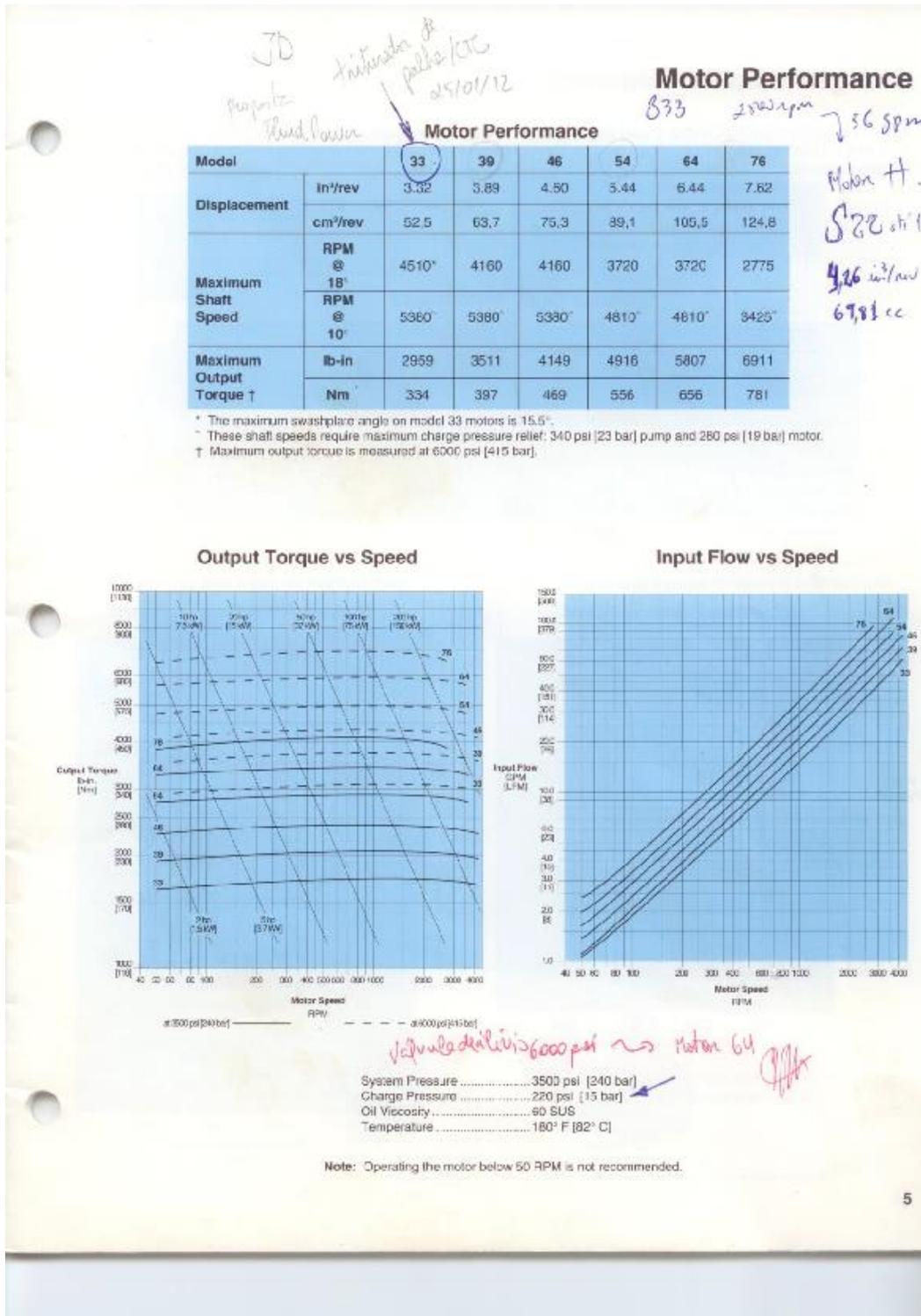


Output Flow vs Speed



System Pressure 3500 psi [240 bar]
 Charge Pressure 220 psi [15 bar]
 Oil Viscosity 60 SUS
 Temperature 180° F [82° C]

ANEXO - E – Dados do motor de pistões modelo 54 fabricado pela empresa Eaton



ANEXO – F – Dados do cubo de redução da roda

MODEL 40 REDUCTION HUB 7000

The unit consists of a hub mounted on a stub which is bolted to the machine frame. Attached to the hub is a double epicycle reduction gear train. The reduction hub is driven by an Eaton hydraulic motor, coupled by a shaft to which a disc brake is attached. The ratio of the reduction is : 35 : 1.

The planetary gear trains may be removed without removal of the rear wheel or half track, and to remove the hub completely the wheel or half track will have to be removed.

