



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS DE PONTA GROSSA
DEPARTAMENTO DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
PPGEP

MARCELO BILOBROVEC

SISTEMA ESPECIALISTA EM LÓGICA *FUZZY*
PARA O CONTROLE, GERENCIAMENTO E
MANUTENÇÃO DA QUALIDADE
EM PROCESSO DE AERAÇÃO DE GRÃOS

PONTA GROSSA

DEZEMBRO - 2005

MARCELO BILOBROVEC

**SISTEMA ESPECIALISTA EM LÓGICA *FUZZY*
PARA O CONTROLE, GERENCIAMENTO E
MANUTENÇÃO DA QUALIDADE
EM PROCESSO DE AERAÇÃO DE GRÃOS**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Área de Concentração: Gestão Industrial, do Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação, do Campus Ponta Grossa, da UTFPR.

Orientador: Rui Francisco Martins Marçal, Dr.

PONTA GROSSA

DEZEMBRO - 2005

B599

Bilobrovec, Marcelo

Sistema especialista em lógica fuzzy para o controle, gerenciamento e manutenção da qualidade em processo de aeração de grãos / Marcelo Bilobrovec. – Ponta Grossa : UTFPR, 2005.

75 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Prof^o Dr. Rui Francisco Martins Marçal

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Ponta Grossa. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Ponta Grossa, 2005.

1. Grãos – Aeração. 2. Sistemas especialistas (Computação). 3. Lógica difusa. 4. Automação industrial. I. Marçal, Rui Francisco Martins, orient.
II. UTFPR, Campus Ponta Grossa. Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. III. Título.

CDD 631.568



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS DE PONTA GROSSA
DEPARTAMENTO DE PÓS-GRADUAÇÃO



TERMO DE APROVAÇÃO

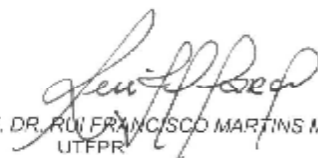
Título de Dissertação Nº 014

"Sistema especialista em Lógica Fuzzy para o controle, gerenciamento e manutenção da qualidade em processo de aeração de grãos".

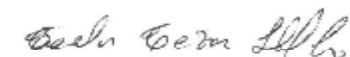
Por

Marcelo Bilobrovec

Esta dissertação foi apresentada às **17 horas** do dia **17 de dezembro de 2005** como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Linha de Pesquisa em Produção e Manutenção, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. O candidato foi argüido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.


PROF. DR. RUI FRANCISCO MARTINS MARÇAL
UTFPR
Orientador


PROF. DR. ALTAMIRO AMADEU SUSIN
UFERS


PROF. DR. CARLOS CÉZAR STADLER
UTFPR

PROF. DR. JOÃO LUIZ KOVALESKI
UTFPR

Visto do Coordenador:

PROF. DR. KAZUO HATAKEYAMA
Coordenador do PPGE

Aos meus pais José e Wladyslawa, pois foram os responsáveis pela minha formação.

À minha esposa Marina, pois sempre esteve presente, paciente e compreensiva nas horas mais difíceis, acompanhado-me desde o início desta jornada.

Ao meu filho Matheus, pois muitas foram às vezes que não lhe pude dar atenção.

Minha conquista também lhes pertence, pois o seu apoio, carinho e amor foram imprescindíveis.

AGRADECIMENTOS

Quero externar os meus agradecimentos a todos os que direta ou indiretamente contribuíram para o término deste trabalho.

Em especial agradeço ao grande amigo Ariangelo Hauer Dias, pelas horas dedicadas durante o decorrer de todo este trabalho.

A meu orientador, professor Dr. Rui Francisco Martins Marçal, pela paciência, incentivo, orientação e compreensão nos momentos mais difíceis deste longo caminho.

Aos demais professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção pelo atendimento, carinho e colaboração.

Aos meus colegas pelo convívio, pelas longas horas de estudo. Serão lembrados com alegria e satisfação. Obrigado pelo companheirismo.

*“[...] uma coisa são as
máquinas e outra coisa é o
modo de utilizá-las. A pólvora
continua pólvora,
indiferentemente que seja
utilizada para ferir ou para
curar”.*

Karl Marx

RESUMO

Este trabalho apresenta um sistema especialista baseado em Lógica *Fuzzy* para controle automático, gerenciamento e manutenção da qualidade do processo de aeração de grãos em silos. O sistema possibilita a aeração de grãos de forma racional em silos verticais atendendo às necessidades tanto para o armazenamento como para a conservação destes. É desenvolvido um protótipo que permite o ensaio com grãos de milho e a verificação da necessidade de aerar certa massa destes grãos, através da análise das condições de temperatura ambiente e da massa ensilada e da umidade relativa do ar ambiente e dos grãos. A implementação das ações de intervenção e controle usa a Lógica *Fuzzy*, por esta possibilitar a captura do conhecimento de especialistas, da mesma forma que permite, em função da diversidade de opiniões entre os pares, verificar o momento ótimo da intervenção. Sensores fornecem as medidas de umidade e temperatura, as quais servem como variáveis de entrada do processo. A interação entre os valores capturados, operados pelas regras de inferência do sistema especialista em Lógica *Fuzzy*, desencadeia as ações de controle e aeração. O sistema desenvolvido mostra-se apto a indicar a aeração em conformidade com o Diagrama da Condução Racional da Aeração, prescrito e desenvolvido pelo Instituto Técnico de Cereais e Forragens (ITCF), situado na França, mostrando-se, desta forma capaz de operacionalizar de forma informatizada o controle e gerenciamento automático do sistema de aeração.

Palavras-chave: sistemas especialistas, lógica *fuzzy*, automação industrial, aeração de grãos, manutenção de qualidade.

ABSTRACT

This work presents a specialist system for automatic control and management of the process of aeration of grains and to maintain the quality them, using the Fuzzy Logic. It makes possible the aeration of the maize grains in rational way in vertical storage system taking care of the necessities for the storage as for the conservation. A prototype has been developed that allows the assay and the verification of the necessity of aeration of certain mass of maize grains, through the analysis of the conditions of ambient temperature, the mass of grains temperature and the relative humidity of air. The implementation of the actions and control uses the Fuzzy Logic, making possible the capture of the knowledge of specialists. In the same way allows the comparison of the diversity of opinions between the pairs, the excellent moment of the intervention. The system uses sensors to measure humidity and temperature, which are input variables of the process. The interaction between the acquired values by the rules of inference of the specialist system in Fuzzy Logic, creates the actions of aeration control. The developed system able indicates the aeration in compliance with the Rational Conduction of Aeration Diagram developed by the Technical Cereals and Fodder Plants Institute (ITCF), situated in France. In this way, capable to operate automatically the control of the aeration system.

Keywords: specialist system, fuzzy logic, industrial automation, aeration of grains, quality maintenance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Função de pertinência.....	30
Figura 2.2 - Universo de discurso da variável lingüística temperatura.....	31
Figura 3.1 - Curva de equilíbrio ar-milho a 20 °C.....	38
Figura 3.2 - Diagrama da Condução Racional da Aeração.	39
Figura 4.1 - Sensor SHT71 utilizado.....	42
Figura 4.2 - Diagrama de blocos do sensor SHT71.....	42
Figura 4.3 - Especificações técnicas segundo o fabricante.	43
Figura 4.4 - Exemplo de como obter a leitura da umidade relativa do ar.....	44
Figura 4.5 - Circuito inicial montado para leitura das informações dos sensores.	44
Figura 4.6 - Sensores SHT71 utilizados no projeto.	45
Figura 4.7 - Esquemático da placa de aquisição de dados.	45
Figura 4.8 - Traçado da placa de aquisição de dados.	46
Figura 4.9 - Circuito elétrico fixado em sua base.....	47
Figura 4.10 - Vista superior da placa de aquisição de dados com os sensores.	47
Figura 5.1 - Elementos de um PC e placa de aquisição de dados.	48
Figura 5.2 - Borland Delphi 7 - Versão Enterprise.	49
Figura 5.3 - Tela principal do sistema.....	52
Figura 5.4 - Opções do sistema para o operador.	52
Figura 5.5 - Tela do sistema do controle fuzzy.	53
Figura 5.6 - Tela de informações sobre o sistema.....	54
Figura 5.7 - Tela com informações gráficas de umidade e temperatura.....	54
Figura 5.8 - Tela de exibição da temperatura em Celsius ou Fahrenheit.	55
Figura 5.9 - Sistema operando no modo automático.....	56
Figura 5.10 - Sistema operando no modo manual.....	57

Figura 5.11 - Escolha do método de defuzzyficação a ser utilizado.	57
Figura 5.12 – Intervalo onde o sistema realiza o processo de aeração.....	58
Figura 5.13 - Conjuntos fuzzy para a diferença de temperatura do grão.....	59
Figura 5.14 - Conjuntos fuzzy para a umidade relativa do ar ambiente.....	60
Figura 5.15 - Regra lingüística do mapa de regras <i>fuzzy</i>	61
Figura 5.16 - Estrutura completa do controlador <i>fuzzy</i>	62
Figura 5.17 - Conjuntos <i>fuzzy</i> para a condução racional da aeração.....	63
Figura 6.1 - Estágios funcionais de um instrumento ou um sistema de medição.	64
Figura 6.2 – Especificação do processo de aeração demonstrando a malha fechada de controle automático.	67
Figura 7.1 - Resultado numérico da defuzzyficação na condução racional da aeração.....	68
Figura 7.2 - Resultado lingüístico da defuzzyficação na condução racional da aeração.....	69
Figura 7.3 - Sistema em funcionamento realizando a condução racional da aeração.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Lista de comandos disponíveis do sensor SHT71	43
Tabela 4.2 – Lista de materiais utilizados no desenvolvimento do trabalho	46
Tabela 5.1 - Lista de bibliotecas adicionais utilizadas	51
Tabela 5.2 - Variáveis lingüísticas utilizadas para fuzzyficação da diferença de temperatura	59
Tabela 5.3 - Variáveis lingüísticas utilizadas para fuzzyficação da umidade	60
Tabela 5.4 - Condução racional da aeração, função da Diferença temperatura do grão e ar por umidade relativa do ar ambiente	61
Tabela 5.5 - Processo de defuzzyficação	63

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	16
1.2	AERAÇÃO	20
1.3	LÓGICA <i>FUZZY</i>	23
1.4	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	25
1.5	OBJETIVO GERAL	25
1.6	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
1.7	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	26
2	FUNDAMENTOS DA LÓGICA <i>FUZZY</i>	27
2.1	APLICAÇÃO DA LÓGICA <i>FUZZY</i>	31
2.2	BASE DE REGRAS	32
2.3	FUZZYFICAÇÃO	33
2.4	INFERÊNCIA	34
2.5	DEFUZZYFICAÇÃO	35
3	FUNDAMENTOS DA AERAÇÃO	36
3.1	DEFINIÇÃO E OBJETIVOS DA AERAÇÃO	36
3.2	CONDUÇÃO DA AERAÇÃO	37
4	<i>HARDWARE</i> PARA A AQUISIÇÃO DOS DADOS	41
4.1	INTRODUÇÃO	41
4.2	A PORTA PARALELA DO PC	41
4.3	SENSOR SHT71 – UMIDADE E TEMPERATURA	41
4.4	PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	44
5	<i>SOFTWARE</i> PARA CONTROLE <i>FUZZY</i> DA AERAÇÃO	48
5.1	INTRODUÇÃO	48
5.2	O USO DA LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO BORLAND DELPHI 7 [®] – VERSÃO ENTERPRISE	49
5.3	MÓDULOS DO SISTEMA DE CONTROLE	50
5.4	BIBLIOTECAS ADICIONAIS UTILIZADAS NO DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA	50
5.5	INTERFACE COM O USUÁRIO	51
5.6	MODOS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA DE AERAÇÃO	55
5.7	DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE <i>FUZZY</i>	58
5.7.1	Função de fuzzyficação para a variável de entrada diferença de temperatura	59

5.7.2	Função de fuzzyficação para a variável de entrada umidade do ar ambiente	60
5.7.3	Regras de inferência para o controle da aeração	60
5.7.4	Função de fuzzyficação para a variável de saída aeração	62
6	ESPECIFICAÇÃO DO PROCESSO DE AERAÇÃO	64
7	RESULTADOS	68
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	70
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICE A - FLUXOGRAMA DO SISTEMA	75

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A expansão do chamado complexo eletrônico e a utilização generalizada da microeletrônica e informática sugerem uma investigação para saber como a agricultura tem investido nessa área. A literatura sobre o tema ressalta o papel da microeletrônica e informática numa possível transformação do processo produtivo agrícola, tornando-o semelhante ao processo produtivo industrial.

Ao longo dos anos 90, no cenário mundial, podem ser detectadas algumas tendências para o setor industrial, mas que afetam também a produção agropecuária. Essas tendências segundo Coutinho (1992) são:

“... o peso crescente do complexo eletrônico; um novo paradigma de produção industrial - automação integrada flexível; revolução nos processos de trabalho; transformação das estruturas e estratégias empresariais; as novas bases da competitividade; a "globalização" como aprofundamento da internacionalização e as "alianças tecnológicas" como forma de competição”.

Entretanto, a discussão dos efeitos da microeletrônica nos processos produtivos e desenvolvimento agrícola não pode ser feita nos mesmos padrões utilizados para o setor industrial. A agricultura apresenta algumas características particulares (ou barreiras), que afetam seus processos de produção, investimento, decisão, organização e modernização, que podem ser assim explicitados:

- O uso, a propriedade e monopolização da terra, que é o elemento essencial e ainda não reprodutível (em larga escala) para a produção agropecuária;
- As condições naturais (sol, chuva, etc.), o tempo natural de produção e reprodução das plantas e animais;
- A diferença entre o tempo de trabalho e o tempo de produção no processo agrícola (nestes dois últimos itens, embora a Ciência tenha feito progressos notáveis e apontado as tendências de

mudança, a agricultura ainda depende das condições naturais para produção em larga escala) e

- As formas de renda fundiária.

A partir destas considerações iniciais, podemos destacar duas teses principais sobre o comportamento futuro do desenvolvimento agrícola. A primeira tese, de Goodman, Sorj e Wilkinson (1990), diz que:

"... a chave para compreender o caráter único da agricultura, (...) não está nem em sua estrutura social nem na dotação dos fatores. Ao contrário, a agricultura confronta o capitalismo com um processo de produção natural. Diferentemente dos setores da atividade artesanal, a agricultura não poderia ser diretamente transformada num ramo da produção industrial..."

Em contraposição às idéias acima sintetizadas, a segunda tese, de Graziano (1992), diz que:

"... a apropriação capitalista do processo de produção e de trabalho na agricultura, apesar de este ser "discreto e descontínuo" - lento, foi o adjetivo preferido dos autores marxistas clássicos - está gradativamente superando as "limitações estruturais" representadas pela natureza (conversão biológica de energia, tempo de crescimento e de gestação) e pelo espaço físico (representado pela terra como meio de produção fundamental)..."

Ressalta também que:

"... essa reestruturação não chega a constituir-se numa transformação unificada tem uma resposta já consagrada na literatura clássica: a agricultura se encontra ainda na etapa da manufatura, na qual essa transformação é mesmo parcial. (...). Hoje podemos pensar num "salto de etapas", da base natural à produção flexível, por exemplo. Seria absurdo por acaso

considerar uma agricultura pós-industrial à base de um exército de robôs controlados por computadores em paralelo.

O progresso técnico, visto como "progresso das técnicas capitalistas de produção no processo de valorização do capital", (GRAZIANO, 1981) ocorre de modo diferente na agricultura, quando comparado à indústria e outros setores, exatamente por conta e, principalmente, das barreiras acima apontadas. Entretanto:

"o sentido do progresso técnico na agricultura tem sido justamente o de superar as limitações que o capital encontra para o seu desenvolvimento, de modo que as únicas barreiras que lhe restem sejam aquelas colocadas pela própria produção capitalista." (GRAZIANO, 1981).

Assim, as inovações capitalistas na agricultura, que impulsionaram a produção agropecuária podem ser classificadas de:

- Inovações mecânicas: que afetam de modo particular a intensidade e o ritmo da jornada de trabalho; (além das inovações já disseminadas, atualmente na área de inovações mecânicas, a aplicação da robótica na agricultura encontra-se em fase de estudos ou avaliações);
- Inovações físico-químicas: que modificam as condições naturais do solo, elevando a produtividade do trabalho aplicado a esse meio de produção básico e
- Inovações biológicas: que afetam principalmente a velocidade de rotação do capital adiantado no processo produtivo, através da redução do período de produção e da potenciação dos efeitos das inovações mecânicas e físico-químicas.

O amplo desenvolvimento, difusão e utilização dessas inovações, embora tenha colocado a agricultura como um setor da indústria, não rompeu, definitivamente, as barreiras acima apontadas. A produção agrícola criou um sistema de mão dupla com a produção industrial tanto a montante como a jusante, ou seja, embora dependa da produção industrial, nas duas pontas para produzir e realizar seu produto, ela passa a ser importante fonte de demanda efetiva, que estimula e

fortalece as atividades industriais. As estratégias empresariais e a gestão das empresas agrícolas se alteraram. Formaram-se as cadeias agro-industriais. Reduziu-se a incerteza. Mas os processos de produção industrial, o uso da microeletrônica, da informática e da robótica ainda encontra barreiras para sua ampla utilização na agricultura. Aqui é preciso acrescentar que, muito provavelmente, junto com as barreiras naturais e tecnológicas, a forma de organização fundiária e o tipo de administração (familiar ou empresarial) dos estabelecimentos agrícolas são elementos que afetam também a transformação do processo de produção agrícola, através do uso da microeletrônica.

O processo chamado de industrialização da agricultura não permite dizer que o processo de produção agrícola é igual ou semelhante ao processo de produção industrial. O progresso técnico, sem embargo, alterou profundamente a produtividade do trabalho e da terra, mas não removeu, ainda, as barreiras para que a produção agrícola possa ser comparada às diferentes formas de produção industrial. Muito embora todas as mudanças na tecnologia, nos processos e nas relações de trabalho, as plantas e os animais, bem como os solos de que tanto estes como aquelas ainda dependem, continuam sendo os principais meios de produção do setor agropecuário. Este apresenta a tendência de transformar-se numa indústria por meio do progresso técnico, mas com a tecnologia disponível, ele dificilmente se transformará num ramo industrial como os demais.

Na agricultura, quando se prepara a terra e se semeia soja, ou qualquer outro cereal, o produto final será uma determinada qualidade de soja ou de outra mercadoria. Além do que, há que se dar o tempo necessário para a germinação, crescimento e maturação, ou seja, as transformações biológicas das plantas. Não há, mesmo com a introdução de máquinas e acessórios, equipados com componentes microeletrônicos, formas de alterar esse processo. Não há a possibilidade de flexibilizar a produção de acordo com a demanda do mercado ou necessidades de alterações técnicas. Uma vez iniciado o processo de produção, não há como alterá-lo, a não ser destruindo-o e recomeçando outro.

“A reunião da revolução do computador e da revolução da biotecnologia num complexo tecnológico único prenuncia uma nova era de produção de alimentos - dissociada da terra, do

clima e de mudanças de estação, agentes que sempre foram condicionadores da produção agrícola. Nos próximos 50 anos, a agricultura tradicional deverá declinar vítima das forças tecnológicas que rapidamente estão substituindo a agricultura ao ar livre pela manipulação de moléculas em laboratório. (RIFKIN, 1995)”.

A produção agrícola pode ser dividida, do ponto de vista da organização da produção e do processo de trabalho, em dois grandes blocos: culturas temporárias e culturas permanentes. Dentro desses dois blocos, cada cultura apresenta características particulares. Nesta divisão geral, a produção de grãos está mais avançada do ponto de vista da mecanização, absorção de inovações tecnológicas, onde a racionalização do processo de trabalho permitiu a maior redução entre tempo de trabalho e tempo de produção. Além disso, aí se vislumbra a maior possibilidade de utilização de tecnologias na produção. A produção de trigo, soja e milho, por exemplo, já totalmente mecanizada, poderia ser totalmente automatizada num futuro não muito remoto. A produção de laranja e café, por outro lado, requer por suas características, trabalhos manuais (enxertias, plantio, colheita, por exemplo) que a automação ainda não soluciona. A solução final estaria contida na afirmação radical de RIFKIN (1995).

1.2 AERAÇÃO

A aeração é a passagem forçada de ar através de uma massa de grãos ensilada, visando prevenir ou solucionar problemas de conservação do produto e secundariamente com o interesse de promover a secagem. A aeração é, atualmente, a técnica mais utilizada para melhorar as condições de secagem e armazenamento.

Uma outra técnica utilizada para fazer o arejamento periódico de grãos armazenados a granel é a transilagem, que consiste na transferência da massa de grãos de uma célula para outra através de uma esteira rolante. Assim, na transilagem, o arejamento é feito passando o produto pelo ar e na aeração o ar passa pelo produto. Comparando essas duas técnicas pode-se observar que, na transilagem quem se movimenta é o grão e na aeração o grão fica armazenado e

quem se movimenta é o ar. A transilagem deixou de ser utilizada devido às desvantagens apresentadas em relação à aeração, dentre elas o seu alto custo, uma vez que prescinde da reserva de células vazias para fazer a movimentação dos grãos, o alto índice de quebras e danos no tegumento (revestimento externo das sementes) dos grãos devido à movimentação da massa, o curto período de exposição do grão em contato com o ar, sendo necessário aplicar várias repetições para obter o arejamento desejado.

A técnica de aeração é empregada nos Estados Unidos e Europa desde o início da década de 40. Nos dias de hoje ela é utilizada, praticamente, em todos os países produtores de grãos, com técnicas de controle avançadas e equipamentos modernos, fazendo com que o sistema de aeração seja a parte mais importante em um silo, uma vez que seus benefícios são de fundamental importância para o produtor. Ela é adotada na maioria dos silos existentes nos países de clima temperado. No Brasil, principalmente a região sul, incluindo o estado de São Paulo, apresenta condições favoráveis para o emprego da aeração. Em muitas regiões tropicais da América do Sul, a aeração é empregada com vistas a manter, pelo resfriamento, a qualidade do produto. Nas regiões tropicais, onde não é possível a obtenção de ar frio, a aeração deve ser usada com cuidado, considerando que, em alguns casos, podem ser obtidos resultados negativos, tais como: uma super secagem da massa de grãos se a umidade relativa for baixa ou uma condensação, se a umidade relativa for alta e a temperatura ambiente for baixa. Entretanto, vários trabalhos experimentais foram realizados em países de clima quente, como a Austrália e Israel, e o benefício da aeração tem sido amplamente constatado na prática. (PUZZI, 1973).

Dentre as várias utilidades da aeração as principais são:

- Resfriamento e a manutenção da massa de grãos ensilada a uma temperatura suficientemente baixa, para assegurar uma boa conservação; secundariamente o interesse pode ser a secagem;
- Prevenir o aquecimento e o umedecimento da massa de grãos;
- Promover a remoção de odores na massa de grãos e
- Inibir a atividade de insetos e o desenvolvimento da microflora, evitando o aparecimento de fungos que deterioram o produto.

Os conjuntos que compõem um sistema de aeração visam, principalmente, a distribuição uniforme da movimentação do ar através da massa de grãos, de tal forma que todas as zonas das células sejam aeradas de forma homogênea.

Os principais componentes de um sistema de aeração são:

- As células do silo que armazenam a massa de grãos;
- Os condutores perfurados para conduzir e distribuir o ar através da massa de grãos;
- Os tubos de conexão que ligam os ventiladores aos condutores e
- O conjunto ventilador-motor para insuflação ou sucção do ar.

O conjunto ventilador-motor constitui a parte mais importante dos componentes de um sistema de aeração. Ele é selecionado, em função do volume de ar necessário para vencer determinada pressão estática. Trata-se, portanto, de selecionar um conjunto que possa atender uma ou mais células de um silo cheio, com diferentes grãos, que serão armazenados na unidade.

Existem vários tipos de ventiladores como: ventiladores helicoidais, ventiladores axiais de uma ou duas hélices, ventiladores centrífugos, ventiladores de pás curvadas para frente, entre outros. A utilização ou recomendação de cada um deles depende, basicamente, do tamanho da célula do silo, da quantidade e do tipo da massa de grãos a ser aerada e do fluxo de ar necessário.

Através de cálculos matemáticos é possível dimensionar o conjunto ventilador-motor quanto ao tipo a ser usado, o fluxo de ar necessário e a potência do motor.

Para se fazer uma aeração, primeiramente, deve-se definir qual é a finalidade, por exemplo: armazenar certa massa de grãos e manter sua umidade relativa em 13% e a temperatura em 20 °C. Basicamente, a aeração depende da temperatura e umidade do grão e da temperatura e umidade relativa do ar ambiente. Para o controle da temperatura, na massa de grãos, empregam-se as instalações de termometria, as quais são constituídas por uma rede de sensores de temperatura, dispostos de forma regular nas células de armazenamento dos silos.

O mesmo ocorre no controle da umidade. Aparelhos chamados umidistatos, que operam, também, através de sensores instalados nas células. Ambos os sensores são ligados a um quadro de controle, que indicam a temperatura e a umidade em vários níveis da massa de grãos. Esses aparelhos permitem ao operador escolher o momento oportuno para se fazer uma aeração e quanto deve ser a sua duração. Assim o operador pode ligar ou desligar os ventiladores conforme as necessidades. Através de cálculos matemáticos é possível determinar o tempo de aeração necessário para que uma determinada massa de grãos, a partir das condições iniciais, atinja as condições finais desejadas de armazenamento. Desta forma, o operador do silo poderá programar o sistema de aeração com maior precisão e conforme as necessidades do processo.

Atualmente, existem controles automáticos de aeração, os quais são pouco usados no Brasil, devido ao custo elevado. Operam utilizando termostatos e umidistatos que são ajustados para comandar o desligamento dos ventiladores de acordo com as condições do tempo, permitindo que a aeração continue durante a noite, com aproveitamento total dos períodos que permitem a operação, principalmente sendo desligados nos horários de pico de consumo de energia elétrica.

O alto custo da energia elétrica, cuja produção é crítica em nosso país e, portanto, deve ser usada racionalmente, associada à política tarifária das concessionárias, torna-se uma das principais preocupações quanto ao encarecimento no valor final do produto.

1.3 LÓGICA FUZZY

Na década de 60, o professor L. A. Zadeh, da Universidade de Berkeley, USA, trabalhando com inteligência artificial, considerou que a rigidez da teoria usual de conjuntos era incompatível com a implementação satisfatória de sistemas especializados, pois estes, sendo softwares interativos, capazes de tomar algumas decisões, alicerçados nos conjuntos usuais com tomadas de decisões binárias, não contemplavam todo o espectro de escolha desenvolvido pela mente humana no cotidiano.

Devido à necessidade de ferramentas mais flexíveis, ele sugeriu, neste período, uma teoria alternativa de conjuntos, onde a passagem da pertinência para a não pertinência fosse gradual e não abrupta. Dessa maneira, surgiram os Conjuntos *Fuzzy*.

A característica especial de Lógica *Fuzzy* é a de representar uma forma inovadora no manuseio de informações imprecisas, de forma muito distinta da teoria de probabilidades. A Lógica *Fuzzy* provê um método de traduzir expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana em valores numéricos (MARÇAL e SUSIN, 2005).

Deste modo, é possível se converter toda a experiência humana em uma forma compreensível pelo computador. Assim, a tecnologia possibilitada pelo enfoque *fuzzy*, tem um imenso valor prático, pela qual se torna possível a inclusão da experiência de operadores humanos, os quais controlam os processos e plantas industriais, em controladores computadorizados, possibilitando estratégias de tomadas de decisão em problemas complexos ou que exijam tempo de solução reduzido. O sucesso atualmente reconhecido, de sistemas de modelagem e controle baseados em Lógica *Fuzzy*, em aplicações industriais, tem comprovado sua utilização como mais uma ferramenta (ou tecnologia) para a resolução de problemas de engenharia de controle industrial, manufatura, manutenção, comunicação homem-máquina e em sistemas de tomadas de decisão (MARÇAL e SUSIN, 2005).

Com o desenvolvimento desses elementos de teoria, os estudos desenvolvidos permitiram vislumbrar a possibilidade de se caminhar teoricamente, pois, com os conjuntos *fuzzy*, crescia a possibilidade de interpretação de fenômenos não quantitativos e vagos, sendo, porém, necessário buscarem-se mecanismos para inferência a partir desses dados. Como os sistemas lógicos são intimamente relacionados com conjuntos, o passo seguinte foi dado em direção à construção de uma lógica capaz de adequar os conjuntos *fuzzy* ao raciocínio do senso comum. Tal sistema denomina-se Lógica *Fuzzy*.

Na tentativa de construir a Lógica *Fuzzy*, significativos resultados foram aparecendo e despertando o interesse de outros campos de estudo, principalmente aqueles que desenvolvem tecnologia elétrica, eletrônica e computacional. Esta também tem contribuído, acentuadamente, para o desenvolvimento de áreas como a

lingüística, teoria de controle, teoria de informação, modelos de reconhecimento, análise de decisão, recuperação de informação e robótica, onde tem surgido um grande número de máquinas capazes de decisões, as quais são chamadas de máquinas inteligentes.

1.4 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A necessidade de preparação e conservação para a industrialização ou consumo de grãos exige o controle das condições de umidade e temperatura para evitar perdas na qualidade do produto e controlar as condições de germinação.

Diante do exposto e devido à possibilidade da Lógica *Fuzzy* (interpretação de fenômenos não quantitativos e vagos onde a passagem da pertinência para a não pertinência é gradual e não abrupta), o presente trabalho motiva o desenvolvimento de um sistema automático de controle e gerenciamento do processo de aeração em silos, para a manutenção da qualidade de grãos, utilizando a Lógica *Fuzzy*, para sistemas de aeração em silos verticais, que possa atender as necessidades do agricultor no armazenamento adequado dos seus produtos para obter uma melhor e maior conservação dos grãos.

1.5 OBJETIVO GERAL

Desenvolvimento de um sistema especialista baseado em Lógica *Fuzzy* para o controle automático e gerenciamento do processo de aeração de grãos em silos e, assim, garantir a manutenção da qualidade destes.

1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Implementar o conhecimento de especialistas em armazenagem, visando desenvolver procedimentos e mecanismos automáticos no controle do processo de aeração de grãos de milho;
- Aplicar os padrões existentes (propostos por Lasseran) no desenvolvimento do sistema informatizado de controle automático, no

que se refere às condições de umidade e temperatura utilizando a Lógica *Fuzzy* e

- Propor um sistema que permita a flexibilidade de (re)configuração adaptando-o à variação de produto e condições do ambiente.

1.7 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Neste capítulo é exposta a motivação para a realização da pesquisa, enfocando a importância do controle automático da aeração de grãos de milho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão da literatura de fundamentos da Lógica *Fuzzy*.

O capítulo 3 expõe a teoria a respeito de aeração de grãos.

O capítulo 4 exhibe as etapas utilizadas para a construção e implementação do *hardware*, ou seja, descreve o desenvolvimento.

O capítulo 5 delinea a estrutura lógica de programação do sistema, isto é o sistema especialista em Lógica *Fuzzy* e a interface homem – máquina (IHM) desenvolvidos.

O capítulo 6 traz a especificação do processo de aeração, onde se utiliza a linguagem de especificação para instrumentos e processos, sugeridas por Ernest O. Doebelin, demonstrando a malha fechada de controle automático.

O capítulo 7 traz os resultados adquiridos utilizando-se o sistema desenvolvido.

O capítulo 8 contém as considerações finais e sugere a especificação e aplicação em outros produtos como trabalhos futuros.

Na sequência estão as referências bibliográficas que compõem o trabalho na íntegra.

2 FUNDAMENTOS DA LÓGICA FUZZY

Segundo Feitosa (1992), na década de 60, mais precisamente em 1965, o professor L. A. Zadeh, da Universidade de Berkeley, USA, que trabalhava com Inteligência Artificial, achava que a teoria usual de conjuntos era por demais rígida, para contemplar fenômenos quotidianos do dia a dia. Uma vez que, os sistemas especializados, os quais estava interessado em implementar, eram *softwares* interativos, capazes de tomar algumas decisões próprias, sustentadas apenas pela teoria usual de conjuntos, a qual admite apenas decisões binárias, ou seja, o “verdadeiro” e o “falso”. Não seria possível utilizá-los satisfatoriamente, abrangendo toda a gama de decisões da mente humana para interpretar estes fenômenos.

Com os estudos realizados sobre os conjuntos *fuzzy*, surgia a possibilidade de interpretar os fenômenos não quantitativos e vagos, porém, surgia também, a necessidade de dar a esta teoria uma estrutura matemática completa e consistente. Como os sistemas lógicos estão intimamente relacionados com a teoria de conjuntos, Zadeh, vislumbrou a possibilidade da construção de uma lógica, capaz de adequar os conjuntos *fuzzy*, aos “padrões” dos sistemas lógicos já consagrados.

Na Lógica Clássica, o valor verdade de uma proposição assumirá, somente, o valor falso (0) ou o valor verdadeiro (1) e, necessariamente, terá que assumir um desses dois, não havendo outra possibilidade. Já na Lógica *Fuzzy*, o valor verdade de uma proposição, pode ser um subconjunto *fuzzy* de qualquer conjunto parcialmente ordenado. Geralmente é adotado o $[0,1]$, que é o intervalo fechado de números reais. Assim, na Lógica *Fuzzy*, não existem apenas o verdadeiro (1) e falso (0), mas uma infinidade de valores verdades, os quais são expressões lingüísticas interpretadas como subconjuntos *fuzzy* do intervalo unitário. Por exemplo: falso, muito falso, um pouco falso, mais ou menos falso, um pouco verdadeiro, pouco verdadeiro, muito verdadeiro, verdadeiro, etc.

Na Lógica Clássica, os predicados são termos exatos como: igual a, maior que, ímpar, primo, etc. Na Lógica *Fuzzy*, os predicados são termos subjetivos, indefinidos ou “nebulosos” como: magro, alto, úmido, quente, velho, etc. Outro aspecto que difere as duas lógicas é quanto aos quantificadores, que na Lógica Clássica existem apenas os quantificadores: universal ($\forall$) e o existencial ($\exists$).

Conforme Feitosa (1992) e Cruz (1996), a idéia de Zadeh se torna interessante, na medida em que associa a cada elemento de um conjunto um certo número real do intervalo $[0,1]$. Sendo que, cada conjunto corresponde a um predicado lógico e os elementos do conjunto aos objetos que satisfazem o predicado. Pode-se dizer que esse número é o grau de verdade do objeto satisfazendo o predicado.

Definição: Seja $V \neq \emptyset$. Um conjunto *fuzzy* A é uma função $f_A: V \rightarrow [0,1]$, onde o conjunto V é chamado o universo de A , com $A \subseteq V \times [0,1]$, $[0,1]$ é o intervalo de números reais e f_A é denominado o conjunto verdade de A . Dessa forma definido, pode-se identificar o conjunto *fuzzy* A com a função f_A , ou seja, $A \equiv f_A$.

Por exemplo: Seja $V = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$. Então um conjunto *fuzzy* A poderia ser do tipo: $A = \{(x_1; 0,3), (x_2; 0,7), (x_4; 0,1)\}$. É conveniente observar que, cada elemento do conjunto *fuzzy* A possui um valor verdade em $[0,1]$ e que A é formado por pares ordenados, uma vez que, $A \subseteq V \times [0,1]$. Assim, o valor verdade, também chamado de “grau de aderência” ou “grau de pertinência”, do elemento x_1 é 0,3, ou seja, $f_A(x_1) = 0,3$. Por convenção, os elementos que tiverem grau de aderência (valor verdade) igual a zero, não precisam ser representados no conjunto, que é o caso do elemento x_3 , ou seja, $f_A(x_3) = 0$, ou ainda $(x_3; 0) \in A$. Também por convenção, todos os elementos do conjunto universo V possuem grau de aderência igual a 1, grau este que não precisa ser representado.

Sejam V , o conjunto universo, e dois conjuntos *fuzzy* $A = \{(x, f_A(x)), \forall x \in V\}$ e $B = \{(x, f_B(x)), \forall x \in V\}$. Então:

Igualdade de conjuntos: $A = B \Leftrightarrow f_A(x) = f_B(x), \forall x \in V$.

Conjunto Vazio: $A = \emptyset \Leftrightarrow f_A(x) = 0, \forall x \in V$.

Conjunto Universo: $A = V \Leftrightarrow f_A(x) = 1, \forall x \in V$.

União de conjuntos: $A \cup B = \{(x, \max[f_A(x), f_B(x)]), \forall x \in V\}$. Usa-se a notação: $\max[f_A(x), f_B(x)] = f_A \vee f_B$, onde $\vee$ é o conectivo “ou”.

Intersecção de conjuntos: $A \cap B = \{(x, \min[f_A(x), f_B(x)]), \forall x \in V\}$. Usa-se a notação: $\min[f_A(x), f_B(x)] = f_A \wedge f_B$, onde $\wedge$ é o conectivo “e”.

Conjunto Complementar: denotado por $\neg A$: $f_{\neg A}(x) = 1 - f_A(x)$, $\forall x \in V$.

É interessante notar que, para a linguagem *fuzzy*, são usados os conectivos: $\wedge$ (e); $\vee$ (ou); $\neg$ (negação) e $\rightarrow$ (se... então). O $\wedge$ modelado pelo mínimo, o $\vee$ pelo máximo, $\neg$ pelo complementar, isto é, negar uma frase A de valor lógico (grau de aderência) $f_A(x)$ é tomar o seu complementar $\neg A$, de valor lógico $f_{\neg A}(x) = 1 - f_A(x)$. Já o conectivo $\rightarrow$, chamado de implicação, é modelado por: $a \rightarrow b = 1 \wedge (1 - a + b)$. Dessa forma, uma sentença *fuzzy* pode admitir outros valores-verdade e não somente falsa (0) ou verdadeira (1).

Na Lógica Clássica, um elemento ou pertence a um conjunto ou não. Dado um conjunto universo U e um elemento $x \in U$, o grau de pertinência $f_A(x)$, o qual, de agora em diante, denota-se por $\mu_A(x)$, com respeito a um conjunto $A \subseteq U$ é dado pela função $\mu_A(x): U \rightarrow [0, 1]$, chamada de função característica definida pela Equação 2.1:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad \text{Equação 2.1}$$

Zadeh (1987) propôs uma caracterização mais ampla, fazendo com que a passagem da pertinência para não pertinência fosse mais lenta e gradual, na medida em que sugere que alguns elementos são mais pertinentes de um conjunto do que outros. O fator de pertinência pode então assumir qualquer valor entre 0 e 1, sendo que o valor (0) indica uma completa exclusão e o valor (1) representa a completa pertinência ou inclusão. Esta generalização aumenta o poder da função característica. Por exemplo, para expressar a idéia de que uma temperatura tem seu valor perto de 30 °C pode-se utilizar uma função de pertinência triangular ilustrada na Figura 2.1a, onde os valores maiores e menores que 30 °C são distribuídos simetricamente, com máximo grau de pertinência em 30 °C, para sugerir a idéia de que quanto mais perto a temperatura de 30 °C, mais ele se identifica com o valor representado.

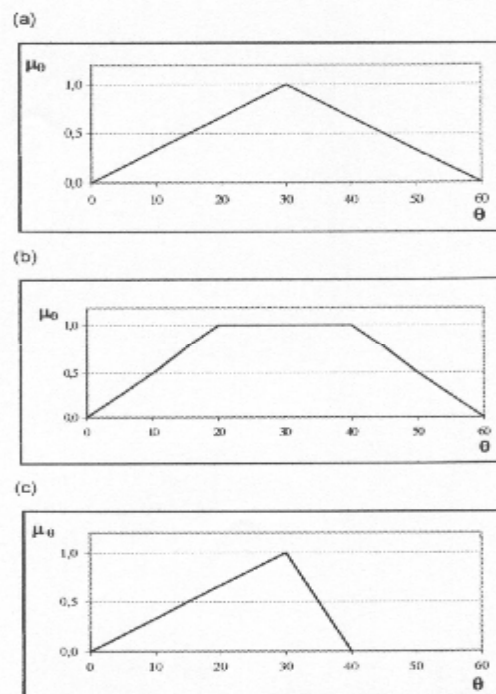


Figura 2.1 - Função de pertinência.

Um outro fenômeno poderia ser caracterizado pela função trapezoidal ilustrada na Figura 2.1b, a qual expressa qualquer temperatura entre 20 °C e 40 °C, ter a mesma importância que a temperatura central de 30 °C. Se a necessidade é fazer com que os valores menores que 30 °C tenham pertinência maior dentro do conjunto e, restringir este fato aos valores maiores, pode ser usada uma outra função triangular ilustrada na Figura 2.1c, a qual vem de encontro ao que se deseja representar.

Conceitos são de uma forma geral, expressos por elementos qualitativos como: “muito”, “não muito”, “mais ou menos”, “pouco quente”, “um tanto baixo”, ao invés de valores quantitativos. Esses elementos qualitativos são resgatados através de variáveis lingüísticas, as quais assumem valores dentro de um conjunto de termos lingüísticos, ou seja, palavras e frases, ao invés de assumirem valores numéricos. Por exemplo, a variável lingüística “temperatura” poderia assumir valores no conjunto [mínima (MI), muito baixa (MB), pouco baixa (PB), média (MD), pouco alta (PA), muito alta (MA), máxima (MX)]. Para se atribuir um significado aos termos

lingüísticos, associa-se a cada um deles um conjunto *fuzzy* definido sobre um universo de discurso comum conforme a Figura 2.2.

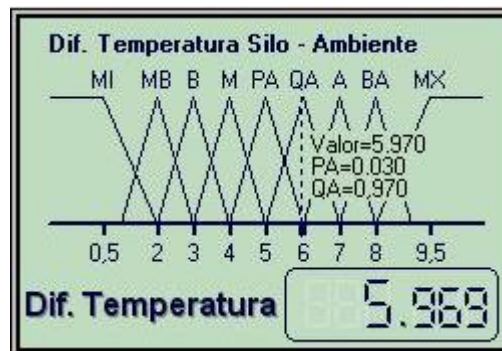


Figura 2.2 - Universo de discurso da variável linguística temperatura.

2.1 APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY

Zadeh (1987), criador da Lógica *Fuzzy*, demonstra em seus trabalhos, a capacidade de tal teoria interpretar os fenômenos não exatos do nosso dia-a-dia. Daí sua aplicabilidade. Apesar disso, os matemáticos não consideram a Lógica *Fuzzy* como uma Lógica Matemática nos padrões atuais, ou seja, ela não é, ainda, uma teoria matemática perfeitamente consistente e completa, uma vez que ela deixa de satisfazer algumas propriedades da Lógica Clássica, principal responsável para ditar a veracidade de uma teoria matemática. Isso, no entanto, não inviabiliza a Lógica *Fuzzy* como uma teoria matemática perfeitamente aplicada, segundo Cruz (1996).

Segundo Ivanqui (2005), existem diversas áreas que estão sendo beneficiadas pelo uso da Lógica *Fuzzy*, a exemplo:

- Em câmeras de vídeo, são aplicados ao foco automático e ao controle da íris da câmera;
- Em máquinas de lavar com a utilização de sensores de temperatura da água, concentração de detergente, peso das roupas, nível de água, etc;
- Em fornos de microondas, com informações obtidas a partir de sensores;
- Em aparelhos de ar-condicionado com o controle da umidade e

temperatura e

- Manutenção de motores elétricos, verificação das condições de vibração dos motores com a finalidade de estabelecer procedimentos de manutenção.

Para Barbosa (1995), a aplicação da Lógica *Fuzzy* no controle de motores CC, facilitou, sensivelmente, o desenvolvimento de tais aparelhos, tornando-os mais precisos, capazes de interpretar com mais exatidão os fenômenos elétricos de um motor.

Especialistas em programação, como Tanaka & Mizumoto (1974), consideram a Lógica *Fuzzy*, no que diz respeito aos modelos matemáticos, muito mais adequada a programação, sugerindo *softwares fuzzy* de fácil entendimento, capazes de serem usados em várias simulações reais. Estas afirmações são corroboradas por Chang (1974), que também trabalha com representação e execução de programas *fuzzy*.

2.2 BASE DE REGRAS

A base de regras tem por objetivo representar de forma sistemática a maneira como o controlador gerenciará o sistema sob sua supervisão (DRIANKOV et al, 1996).

A forma mais geral de uma regra lingüística é:

SE premissa **ENTÃO** consequência

Para Driankov (1996) e Ross (1995), as premissas também chamadas de antecedentes são associadas com as entradas do controlador *fuzzy* e formam a parte das regras representada à esquerda, enquanto as consequências, que também são conhecidas como ações, estão associadas às saídas dos controladores.

Relacionadas às variáveis lingüísticas do processo, pode-se estabelecer os antecedentes – ou estados do processo – (DRIANKOV; HELLENDORRN e REINFRANK, 1996) e associá-los com ações de controle. Para exemplificar a

utilização da base de regras, toma-se como exemplo o controle de uma caldeira, onde se estabelece uma relação entre a temperatura interna da unidade, com a vazão necessária de água para o seu resfriamento, o que produz as seguintes regras:

SE temperatura é alta **ENTÃO** vazão de água é alta

SE temperatura é baixa **ENTÃO** vazão de água é baixa

SE temperatura é estável **ENTÃO** vazão de água é normal

Aparentemente simples, o exemplo dado é capaz de manter estável a temperatura em uma caldeira, desde que os conjuntos *fuzzy* envolvidos tenham uma definição condizente com a realidade. O que vale observar é que para cada estado do processo é relacionada uma ação de controle (VIEIRA, 1999).

Este conjunto demonstra que a base de regras *fuzzy* é bastante intuitiva, do ponto de vista humano. É como o clássico exemplo de estacionar um veículo em uma vaga, virando-o um pouco mais para a esquerda ou para direita. Não existe, neste caso, uma formulação matemática explícita envolvida na solução do problema, mas sim a representação de um conhecimento adquirido pelo operador, o que justifica a dificuldade encontrada pelos iniciantes em estacionar um carro e a facilidade com que os motoristas com mais prática executam as manobras necessárias. (IVANQUI, 2005).

Portanto é este conhecimento – o da experiência – que as regras *fuzzy* representam, sendo perfeitamente inteligível o seu significado.

Numa base de regras, há sempre um número finito de regras que pode ser estabelecida, depois que se determina o número de entradas e saídas necessárias ao sistema de controle, e que se escolhe os predicados lingüísticos (número, distribuição e forma das funções de pertinência) para cada uma destas variáveis.

2.3 FUZZYFICAÇÃO

A fuzzyficação é o processo de associar ou calcular um valor para representar um grau de pertinência da entrada em um ou mais grupos qualitativos, chamados de conjuntos difusos. O grau de pertinência é determinado por uma

função de pertinência que foi definida com base na experiência ou intuição. Funções de pertinência são o meio pelo qual um controlador é sintonizado para alcançar respostas desejadas a determinadas entradas (CABRAL, 1994).

Conforme Fernandes (1997), o tipo e a quantidade de funções de pertinência usadas em um sistema dependem de: (i) precisão; (ii) estabilidade; (iii) facilidade de implementação; (iv) manipulação e (v) manutenção.

Portanto, nessa etapa, Mattos (2001), cita que os valores numéricos são transformados em graus de pertinência e associados a uma variável lingüística. Permitindo uma ligação entre os termos lingüísticos (frio, próximo, quente, dentre outros) e as funções de pertinência.

Segundo Viot (1993 apud MATTOS, 2001), o número e a forma das funções de pertinência em conjuntos difusos são escolhidos dependendo da exatidão, resposta, estabilidade, facilidade de implementação, manipulação e manutenção requeridas pelo sistema.

As funções de pertinência triangulares e trapezóides são as mais comuns, e têm provado serem boas em efetividade e eficiência. Os conjuntos difusos devem abranger o eixo X, cobrindo todo o intervalo, ou o universo de discurso, para uma entrada de um sistema, mapeando para o intervalo de 0 a 1 do eixo Y as pertinências de uma entrada. Sobreposição entre limites de conjuntos é desejável e a chave para a operação suave do controlador. São permitidas pertinências em múltiplos – até mesmo em contraditórios – conjuntos (CABRAL, 1994).

2.4 INFERÊNCIA

Depois das variáveis lingüísticas serem interpretadas, por meio da fuzzyficação, a próxima etapa é a descrição das situações nas quais há reações, ou seja, a determinação das regras SE-ENTÃO.

O lado SE (*IF*) de uma regra contém uma ou mais condições, chamadas antecedentes que constituem uma premissa; o lado ENTÃO (*THEN*) contém uma ou mais ações chamadas conseqüentes (CABRAL, 1994).

O antecedente da regra contém uma ou mais condições, o conseqüente contém uma ou mais ações.

O antecedente corresponde diretamente aos graus de pertinência calculados durante o processo de fuzzyficação. Cada antecedente tem um grau de pertinência indicado para ele como resultado da fuzzyficação. Durante a avaliação das regras (a inferência), a intensidade é calculada com base em valores dos antecedentes e estão indicadas para saídas difusas da regra (FERNANDES, 1997).

2.5 DEFUZZYFICAÇÃO

A defuzzyficação converte um conjunto difuso de saída de um sistema em um valor clássico correspondente. Este processo é importante para decifrar o significado das ações difusas usando funções de pertinência e também para resolver conflitos entre ações de competição (VIOT, 1993 apud MATTOS, 2001).

A avaliação das regras associa potências (intensidade) para cada ação específica na atividade de inferência. Contudo, um outro processamento, ou defuzzyficação, é necessário que seja executado por duas razões: a primeira é decifrar o significado de ações vagas (difusas), utilizando funções de pertinência; a segunda é resolver os conflitos entre ações conflitantes, que podem ter sido acionadas durante certas condições na avaliação das regras (CABRAL, 1994).

3 FUNDAMENTOS DA AERAÇÃO

3.1 DEFINIÇÃO E OBJETIVOS DA AERAÇÃO

A aeração é a movimentação de ar ambiente adequado através da massa de grãos para melhores condições de armazenamento (PUZZI, 1986).

Segundo Silva (1995), a aeração é a passagem forçada do ar através da massa de grãos visando a prevenir ou solucionar problemas de conservação do produto.

Lasseran (1981) define a aeração ou ventilação como sendo a circulação forçada do ar ambiente através da massa de grãos.

O objetivo essencial da aeração é o resfriamento e a manutenção do grão a uma temperatura suficientemente baixa para assegurar uma boa conservação.

A transilagem é uma técnica empregada em silos, a qual consiste na transferência da massa de grãos de uma célula para outra através de uma esteira rolante. A massa de grãos ao passar pelo ar é então ventilada. A temperatura pode ser reduzida com a movimentação dos grãos e eliminar possíveis “bolsas” de calor que tenham se formado no meio da massa.

No Brasil, durante muitos anos, foi utilizada a técnica de transilagem. Nos dias de hoje, alguns poucos silos mais antigos, ainda utilizam essa técnica. A maioria dos silos mais novos e modernos faz uso da aeração. A transilagem pode, em alguns casos, resolver o problema da “migração da umidade”, que é a propagação desta por condução. Entretanto, a ventilação provocada na massa de grãos é pequena, exigindo, várias transilagens, causando grande dispêndio de energia e danos mecânicos nos grãos (a quebra).

Puzzi (1986) e Silva (1995) apontam as seguintes vantagens da aeração em relação à técnica de transilagem:

- Prescinde da reserva de células vazias para realização da transilagem;
- Não apresenta as quebras e danos no tegumento dos grãos pela movimentação da massa;

- Permite custos acentuadamente mais baixos por tonelada resfriada e
- Na transilagem, como os grãos passam através do ar por um período reduzido de tempo, tornam-se necessárias, para um arejamento satisfatório da massa de grãos, repetidas operações.

O resfriamento da massa de grãos pode prevenir o desenvolvimento de insetos e fungos. Cereais mantidos em temperaturas baixas podem ser armazenados com teores de umidade de 14 a 15%. Em um clima frio, os grãos destinados ao plantio (sementes) têm também poder germinativo preservado por mais tempo.

Uma massa de grãos mais fria guarda melhor a característica de armazenamento. Entretanto, o principal objetivo da aeração é manter uma temperatura uniforme nos grãos armazenados, impedindo, assim, a migração da umidade (PUZZI, 1986).

3.2 CONDUÇÃO DA AERAÇÃO

Definida a finalidade da aeração, basicamente ela vai depender de quatro variáveis: temperatura do grão, temperatura do ar ambiente, umidade do grão e umidade do ar ambiente.

O grão é um produto higroscópico, isto é, pode ceder ou absorver umidade do ar que o envolve. Assim, o teor de umidade dos grãos armazenados fica em equilíbrio com a umidade relativa do ar intergranular.

Segundo Puzzi (1986) os grãos se encontram com teor de umidade adequado para o armazenamento, quando estão em equilíbrio com uma umidade relativa máxima de 70% do ar intergranular. Esta condição indica que durante a aeração a umidade relativa do ar ambiente não deve ser superior a 70%, a fim de não ocasionar um aumento da umidade dos grãos. Na Figura 3.1 é mostrada a curva de equilíbrio entre o ar e o grão de milho.

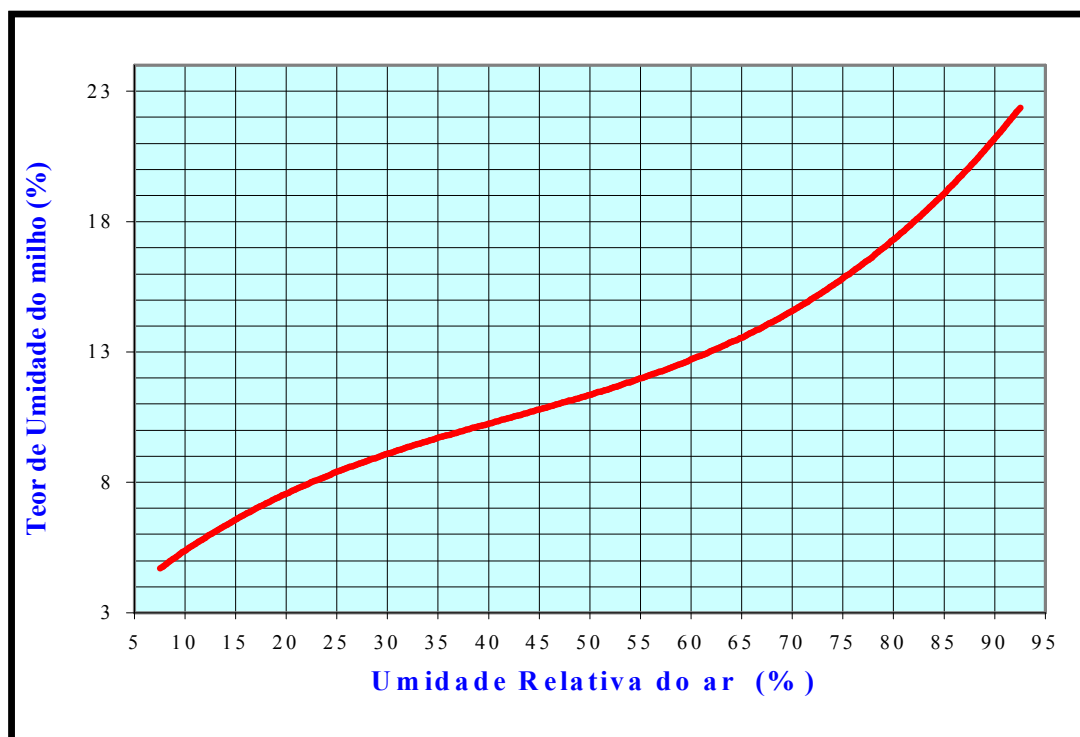


Figura 3.1 - Curva de equilíbrio ar-milho a 20 °C.

Existem várias opiniões sobre o momento mais conveniente para realizar uma aeração. Alguns pesquisadores aconselham a aeração sempre que a temperatura do ar ambiente for de 5 °C a 8 °C inferior à da porção mais quente do grão. Uns acham que o intervalo da diferença de temperatura entre o ar e o grão deve ser de 5 °C a 6 °C. Outros afirmam que a aeração é sempre possível quando a temperatura do ar ambiente for inferior à do grão. Outros ainda aconselham a aeração quando a temperatura do ar ambiente for 6 °C inferior a temperatura do grão, mas que isso depende da umidade relativa do ar e da massa de grãos. Uma grande maioria afirma que para uma boa aeração, a diferença de temperatura entre o ar ambiente e o grão e a umidade do ar ambiente e do grão, devem pesar, conjuntamente, para a decisão final.

De uma forma geral, quase unânime, os pesquisadores recomendam, cada um conforme seu entendimento do momento apropriado, que a aeração deve ser feita usando o critério da diferença de temperatura entre o ar e o grão. (De Beer - 1972; Burrell - 1973; Lasseran - 1981; Puzzi - 1986; Silva - 1995).

Assim, pode-se verificar que, a temperatura é a variável fundamental para a realização efetiva da aeração, já que o objetivo principal do processo consiste na remoção o mais rápido possível do calor retido pela massa de grãos armazenada.

A Figura 3.2 mostra o Método da Condução Racional da Aeração, mais conhecido como Diagrama da Condução Racional da Aeração, desenvolvido pelo Instituto Técnico de Cereais e Forragens (ITCF), situado na França, o qual se aplica aos cereais cuja umidade se aproxima das normas.

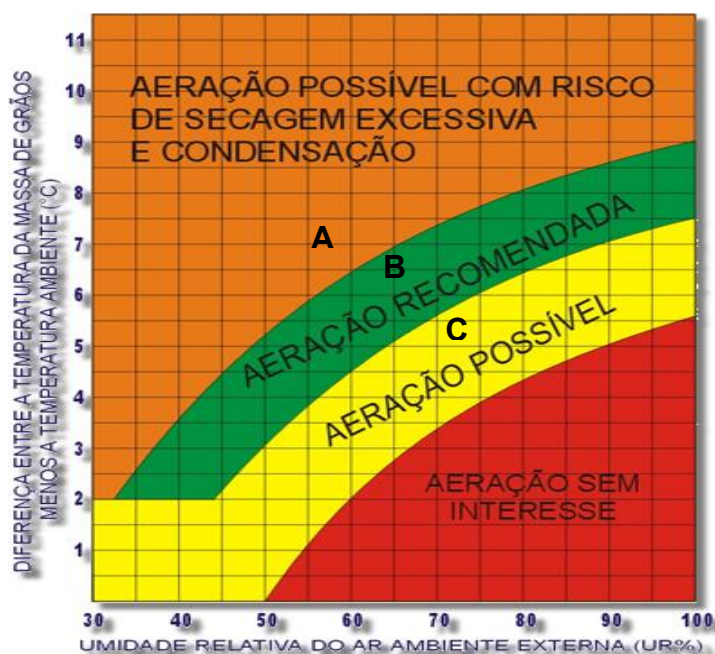


Figura 3.2 - Diagrama da Condução Racional da Aeração.

Fonte: Instituto Técnico de Cereais e Forragens (ITCF)

Neste diagrama, para a região superior à curva “A”, tendo umidade relativa baixa, haverá supersecagem da massa de grãos e se a umidade relativa for alta e a temperatura externa baixa, poderá ocorrer condensação. Nestes casos, a aeração pode ser feita apenas em caso de necessidade. Na região entre as curvas “A” e “B”, a aeração é recomendada, contudo nos extremos desta região podem ocorrer os mesmos fenômenos descritos acima. A região compreendida entre as curvas “B” e “C”, permite aeração, porém com cuidados para evitar umedecimento da massa de grãos. Fazer aeração com ar nas condições compreendidas entre a curva “C” e os eixos, pode ocorrer o risco de umedecer os grãos.

Segundo Lasseran (1981), este diagrama resulta de uma construção teórica, mas verificada na prática, cujos elementos de base foram:

- Diagrama de Mollier (gráfico psicrométrico) e
- As curvas de equilíbrio entre a umidade relativa do ar e o teor de umidade do grão.

Atualmente existem sistemas de aeração controlados manualmente onde, somente através da monitoração da temperatura e umidade do grão armazenado, são acionados os ventiladores, deixando-os em funcionamento o tempo necessário para atingir a temperatura e a umidade desejada, desligando-os em seguida.

4 HARDWARE PARA A AQUISIÇÃO DOS DADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Para construir o sistema capaz de controlar a aeração de grãos de milho, são utilizados dois sensores de umidade e temperatura da marca Sensirion® modelo SHT71. Para o controle *fuzzy* de umidade e temperatura utiliza-se *hardware* e *software* específicos.

O *hardware* desenvolvido é apresentado neste capítulo e o *software* que implementa o controle inteligente *fuzzy* é descrito no capítulo 5.

Os valores adquiridos dos sensores de umidade e temperatura estão armazenados em um banco de dados relacional INTERBASE® 7.5 para se criar um histórico. Estes valores são obtidos através da porta paralela do PC (*Personal Computer*), por meio de uma placa de aquisição desenvolvida para este fim.

Para a implementação do sistema *fuzzy* de controle, de medição da umidade e temperatura, usa-se um *software* desenvolvido na linguagem de programação BORLAND DELPHI 7® – Versão Enterprise.

4.2 A PORTA PARALELA DO PC

É utilizada a porta paralela para a aquisição das variáveis do processo: temperatura e umidade.

4.3 SENSOR SHT71 – UMIDADE E TEMPERATURA

O sensor SHT71, Figuras 4.1 e 4.2, é um *chip* multi sensor de umidade relativa do ar e temperatura. Utiliza a tecnologia industrial patenteada CMOSens®. O dispositivo inclui um polímero de alta capacidade que capta a umidade relativa e a temperatura. Usa-se um para a aquisição da temperatura e umidade do ambiente e um segundo para a captação da temperatura e umidade do produto armazenado (a ser aerado). O circuito contém um conversor analógico-digital de 14 *bits*.



Figura 4.1 - Sensor SHT71 utilizado.

Fonte: www.sensirion.com

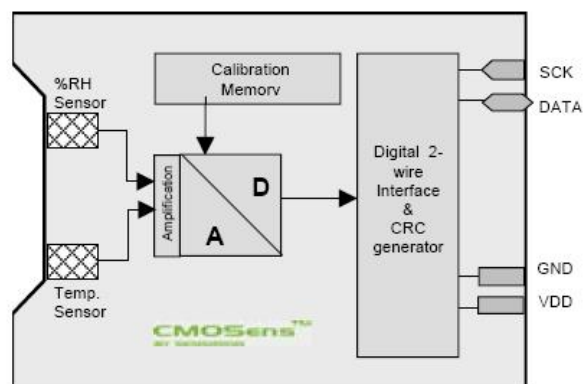


Figura 4.2 - Diagrama de blocos do sensor SHT71.

Fonte: www.sensirion.com

Na Figura 4.3 são mostradas as especificações do sensor segundo informações do fabricante:

SHT1x / SHT7x Relative Humidity & Temperature Sensor System

SENSIRION
 THE SENSOR COMPANY

1 Sensor Performance Specifications

Parameter	Conditions	Min.	Typ.	Max.	Units
Humidity					
Resolution ⁽²⁾		0.5	0.03	0.03	%RH
		8	12	12	bit
Repeatability			±0.1		%RH
Accuracy ⁽¹⁾	linearized	see figure 1			
Uncertainty					
Interchangeability		Fully interchangeable			
Nonlinearity	raw data		±3		%RH
	linearized		<<1		%RH
Range		0		100	%RH
Response time	1/e (63%) slowly moving air		4		s
Hysteresis			±1		%RH
Long term stability	typical		< 0.5		%RH/yr
Temperature					
Resolution ⁽²⁾		0.04	0.01	0.01	°C
		0.07	0.02	0.02	°F
		12	14	14	bit
Repeatability			±0.1		°C
			±0.2		°F
Accuracy		see figure 1			
Range		-40		123.8	°C
		-40		254.9	°F
Response Time	1/e (63%)	5		30	s

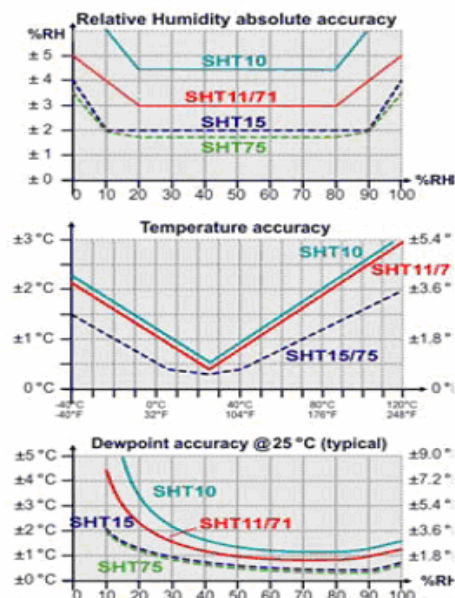


Figura 4.3 - Especificações técnicas segundo o fabricante.

Fonte: www.sensirion.com

Para iniciar uma transmissão, um “*Transmission Start*” deve ser emitido. Isto consiste em abaixar da linha de DADOS enquanto SCK é alto, seguido por um baixo pulso em SCK e elevando DADOS novamente enquanto SCK ainda é alto.

Na Tabela 4.1 são mostrados os comandos disponíveis para obter as informações a partir do sensor SHT71:

Tabela 4.1 - Lista de comandos disponíveis do sensor SHT71

Fonte: www.sensirion.com

Command	Code
Reserved	0000x
Measure Temperature	00011
Measure Humidity	00101
Read Status Register	00111
Write Status Register	00110
Reserved	0101x-1110x
Soft reset , resets the interface, clears the status register to default values wait minimum 11 ms before next command	11110

Na Figura 4.4 é mostrado um exemplo de como obter a umidade relativa do ar a partir do sensor SHT71:

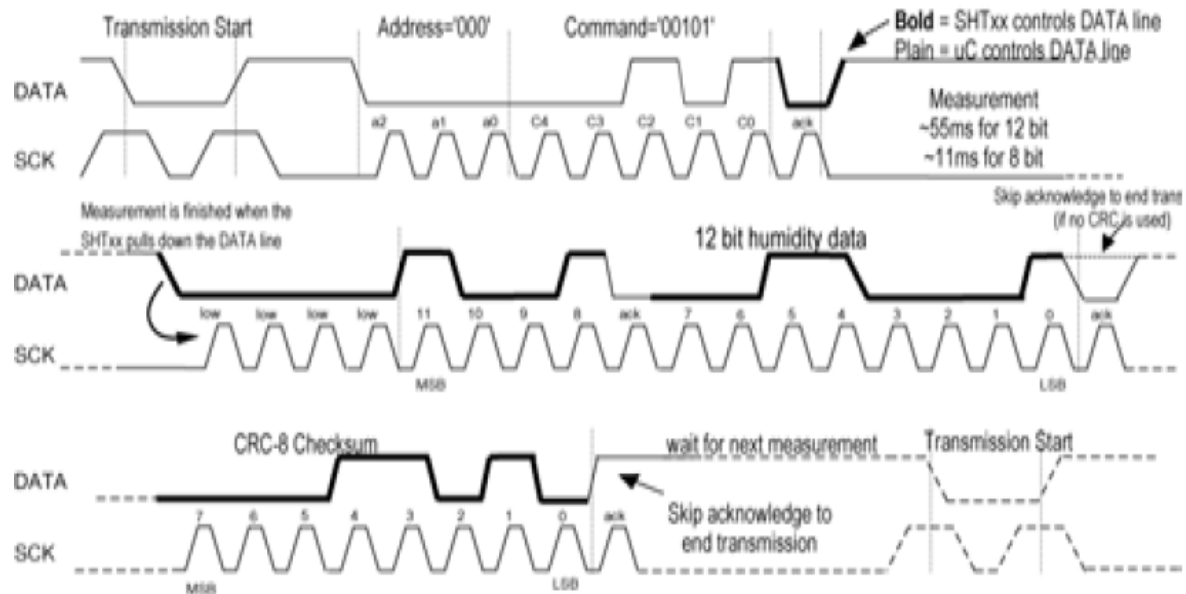


Figura 4.4 - Exemplo de como obter a leitura da umidade relativa do ar.

Fonte: www.sensirion.com

4.4 PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para que a leitura das informações dos sensores possa ser obtida é necessário uma placa de aquisição de dados. Inicialmente este circuito elétrico foi montado em uma *protoboard* (circuito de testes) para que pudessem ser efetuados todos os testes necessários e também o desenvolvimento do *software* de controle.

Na Figura 4.5 é mostrado o circuito inicial montado para testes:

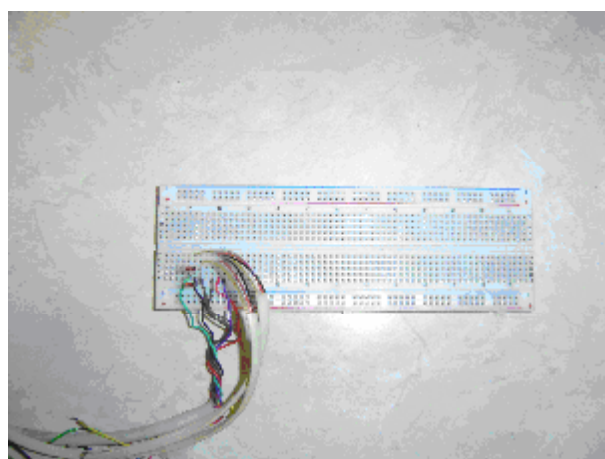


Figura 4.5 - Circuito inicial montado para leitura das informações dos sensores.

Na Figura 4.6 são mostrados os dois sensores SHT71 utilizados neste trabalho, já acoplados a uma pequena placa de circuito e um conector RJ11 (telefone) para conexão com a placa de aquisição de dados.



Figura 4.6 - Sensores SHT71 utilizados no projeto.

Através do programa *ExpressSCH*[®] é construído um modelo esquemático das ligações para a confecção da placa de aquisição definitiva conforme ilustra a Figura 4.7:

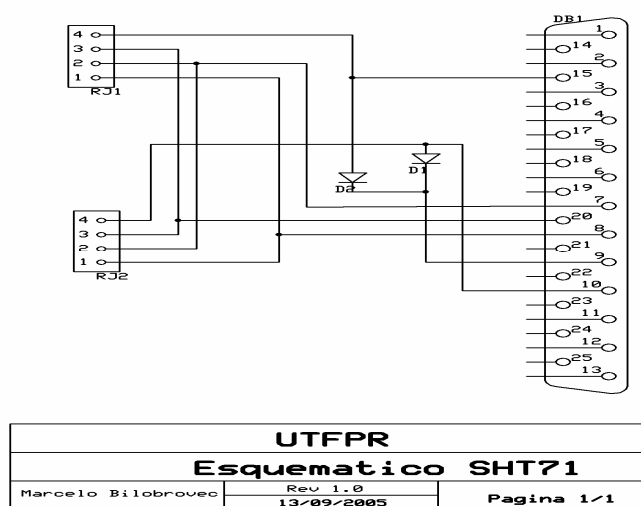


Figura 4.7 - Esquemático da placa de aquisição de dados.

Para a confecção da placa definitiva são utilizados os seguintes componentes conforme a Tabela 4.2 abaixo:

Tabela 4.2 – Lista de materiais utilizados no desenvolvimento do trabalho

Material	Quantidade	Unidade	Custo R\$
Placa de circuito simples face 8x6 cm	1	Peça	8,00
Porta paralela para PCI DB25 macho	1	Peça	12,00
Diodo 1N 4148 High-Speed Switching	2	Peça	0,50
TF Modular Jack para PCI 4P4C	2	Peça	0,50
TM Modular Plug 4P4C	2	Peça	1,00
Cabo telefônico 4 fios	10	Metro	10,00
Cabo paralelo DB25 macho/fêmea	1	Peça	13,00
Caixa plástica para montar o circuito elétrico	1	Peça	5,00
Sensor SHT71 – marca Sensirion®	2	Peça	280,00
Ferro de solda, estanho, parafusos, furadeira, cortador de placa de fenolite, etc.	-	-	-
CUSTO TOTAL			330,00

Com a utilização do programa *ExpressPCB*® é desenvolvido o *layout* da placa de aquisição de dados definitiva conforme Figura 4.8:

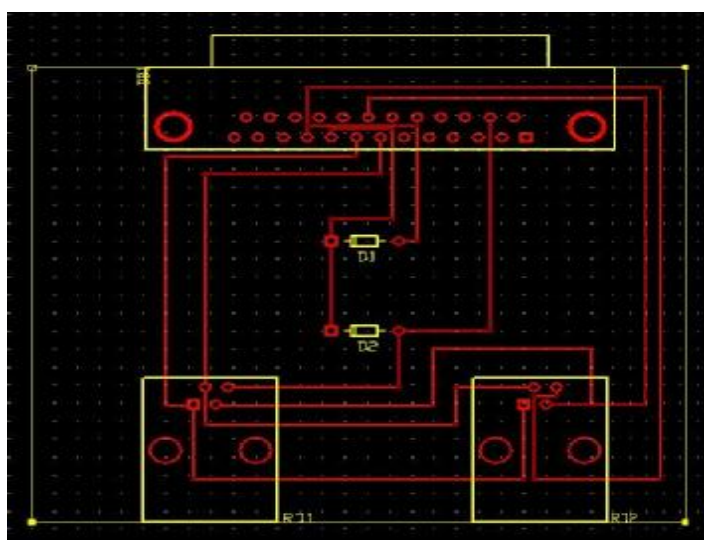


Figura 4.8 - Traçado da placa de aquisição de dados.

As Figuras 4.9 e 4.10 mostram a placa de aquisição de dados já preparada para utilização através da porta paralela:



Figura 4.9 - Circuito elétrico fixado em sua base.



Figura 4.10 - Vista superior da placa de aquisição de dados com os sensores.

5 SOFTWARE PARA CONTROLE FUZZY DA AERAÇÃO

5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentado o *software* de controle do sistema *fuzzy* o qual está instalado em um microcomputador do tipo PC, rodando em ambiente Windows® XP Professional e utilizando como linguagem de programação o Borland Delphi 7® – Versão Enterprise.

A conexão do microcomputador com a placa de aquisição de dados, como descrito no capítulo anterior, é feita através da porta paralela.

A Figura 5.1 mostra as partes que constituem o microcomputador, bem como sua conexão à placa de aquisição de dados. Além das partes acima citadas, o *software* desenvolvido possui um banco de dados Borland Interbase 7.5®, que armazena todas as leituras de umidade e temperatura obtidas a partir dos sensores em um intervalo de tempo pré-definido.

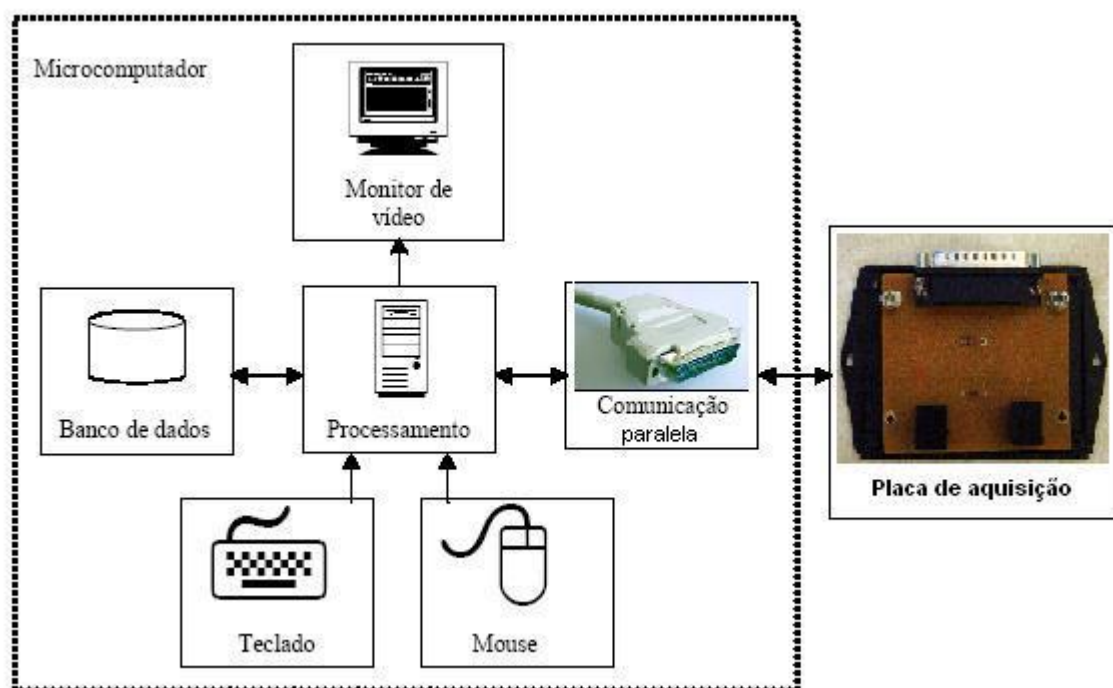


Figura 5.1 - Elementos de um PC e placa de aquisição de dados.

5.2 O USO DA LINGUAGEM DE PROGRAMAÇÃO BORLAND DELPHI 7® – VERSÃO ENTERPRISE

A linguagem de programação Borland Delphi 7® – Versão Enterprise é um ambiente de programação que agrega uma plataforma de desenvolvimento integrado ao compilador da linguagem de programação Delphi de alto nível, disponibilizado pela empresa Borland®. A função do compilador é traduzir os comandos das linguagens de alto nível em comandos do baixo nível que tratam diretamente com o processador e o *hardware*.

O surgimento de *interfaces* gráficas, principalmente o Windows® e a demanda dos usuários de sistemas computacionais por *interfaces* homem-máquina mais amigáveis trouxe aos desenvolvedores de *software* e aplicativos a necessidade de construir programas eficientes não só em nível de programação, mas também de fácil utilização. A preocupação com o desenvolvimento da *interface*, das janelas, dos eventos, dos botões, etc, demanda muito tempo e experiência que muitas vezes o programador, especialista no problema que o *software* deve resolver, não dispõe.

O Borland Delphi 7®, Figura 5.2, é um ambiente do tipo RAD (*Rapid Application Development*, ou Desenvolvimento Rápido de Aplicações), estes ambientes são otimizados e voltados para o desenvolvimento da *interface* (e de muitas outras funções como de banco de dados), possibilitando ao programador realizar apenas as funcionalidades específicas que o *software* deve possuir.



Figura 5.2 - Borland Delphi 7 - Versão Enterprise.

Fonte: www.borland.com

5.3 MÓDULOS DO SISTEMA DE CONTROLE

O desenvolvimento do *software* de controle inteligente, utilizando a linguagem de programação da Borland®, inicia com a confecção dos módulos envolvidos no projeto, os quais representam as principais funções a serem realizadas pelo sistema:

- Interface Homem-Máquina: responsável pela troca de informações entre o operador e o sistema. Este item será explorado adiante, descrevendo-se a função de cada uma das telas que coletam ou repassam as informações ao operador;
- O banco de dados Interbase 7.5®, fornecido pela própria Borland®, que armazena as informações referentes à umidade e temperatura, obtidas a partir dos sensores;
- *Interface* de comunicação entre a placa de aquisição de dados e o computador. Esta comunicação é feita via porta paralela do microcomputador e
- Módulo de controle *fuzzy* implementado na linguagem de programação Borland Delphi 7®, que realiza todas as etapas de fuzzyficação, inferência e defuzzyficação das variáveis do sistema (umidade e temperatura).

5.4 BIBLIOTECAS ADICIONAIS UTILIZADAS NO DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA

Além das bibliotecas padrões de componentes (formulários, botões, caixas de edição, caixas de texto, memos, etc) que acompanham a linguagem de programação Delphi 7®, foram utilizadas algumas bibliotecas adicionais com o objetivo de melhorar a funcionalidade do sistema de controle.

As bibliotecas adicionais utilizadas são mostradas na Tabela 5.1, juntamente com a sua aplicação:

Tabela 5.1 - Lista de bibliotecas adicionais utilizadas

Biblioteca	Desenvolvedor	Utilização
<i>TMS Skin Factory</i>	TMS Software	Utilizada no desenvolvimento da <i>interface</i> do sistema (telas do sistema).
<i>TMS Component Pack</i>	TMS Software	Conjunto de componentes adicionais utilizados em todo o desenvolvimento do sistema.
<i>TMS Instrumentation WorkShop</i>	TMS Software	Conjunto de componentes para instrumentação virtual.
<i>Fuzzy Components</i>	Alexandre Beauvois, adaptado por Ariangelo Hauer Dias ¹	Componente <i>freeware</i> responsável pelo gerenciamento <i>fuzzy</i> do sistema (fuzzyficação, defuzzyficação).
<i>TGIF Image</i>	Anders Melander	Componente <i>freeware</i> utilizado para manipular imagens (<i>gif's</i> animados).
<i>SHT_XX.PAS</i>	Ariangelo Hauer Dias	Função desenvolvida em Borland Delphi 7, responsável pela leitura do sensor SHT71.

5.5 INTERFACE COM O USUÁRIO

Com o objetivo de criar um sistema amigável, busca-se elaborá-lo de forma mais simples possível, para que os operadores não tenham dificuldades na sua utilização. A Figura 5.3 mostra a tela principal do sistema onde temos as informações de umidade e temperatura obtidas a partir dos sensores ligados à placa

¹ DIAS, H. Ariangelo; MATHIAS, M. Ivo; BIAGIONNI, M.A. Marco; CRUZ, F. Luiz; BILOBROVEC, Marcelo. **Teoria Fuzzy aplicada à automação da condução racional da aeração de grãos de milho** In: V Congresso Brasileiro de Agrolnformática, Londrina, 2005.

de aquisição de dados. Nesta tela também temos as opções disponíveis para o operador utilizar o sistema.



Figura 5.3 - Tela principal do sistema.

Além das informações de umidade e temperatura mostradas nos dois painéis de LCD – *Liquid Cristal Display* - (Figura 5.3), o sistema possui quatro opções para o usuário, que são mostradas na Figura 5.4:



Figura 5.4 - Opções do sistema para o operador.



A opção  ativa o módulo de controle *fuzzy* do sistema, onde a partir de configurações prévias no sistema é feito todo o controle do processo de aeração (Figura 5.5):

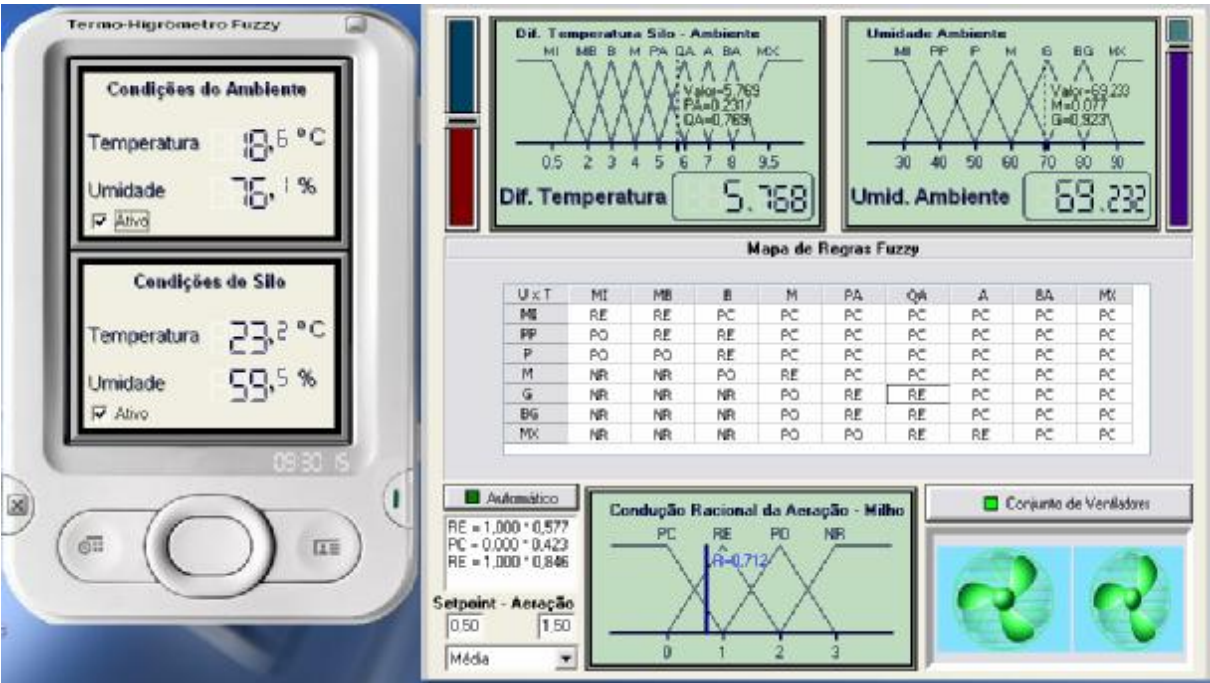


Figura 5.5 - Tela do sistema do controle fuzzy.



A opção  exibe as informações a respeito do desenvolvimento do sistema (Figura 5.6):

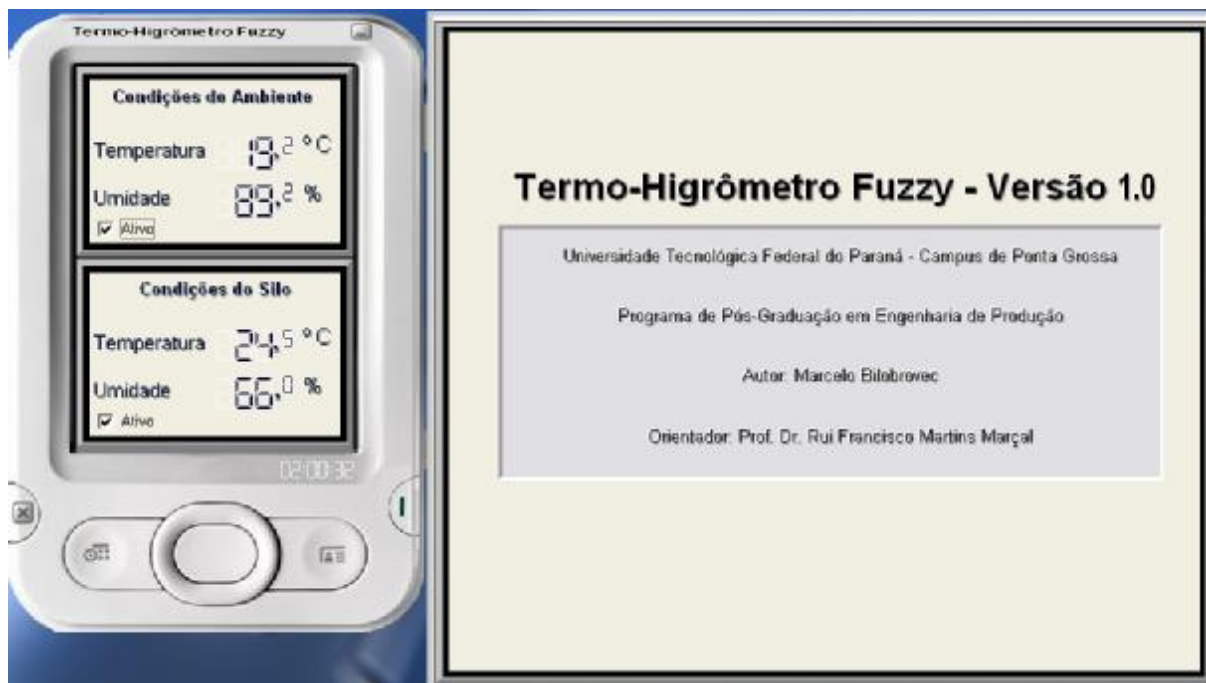


Figura 5.6 - Tela de informações sobre o sistema.

A opção  exibe as informações de umidade e temperatura obtidas a partir dos sensores ligados à placa de controle de forma gráfica (Figura 5.7):

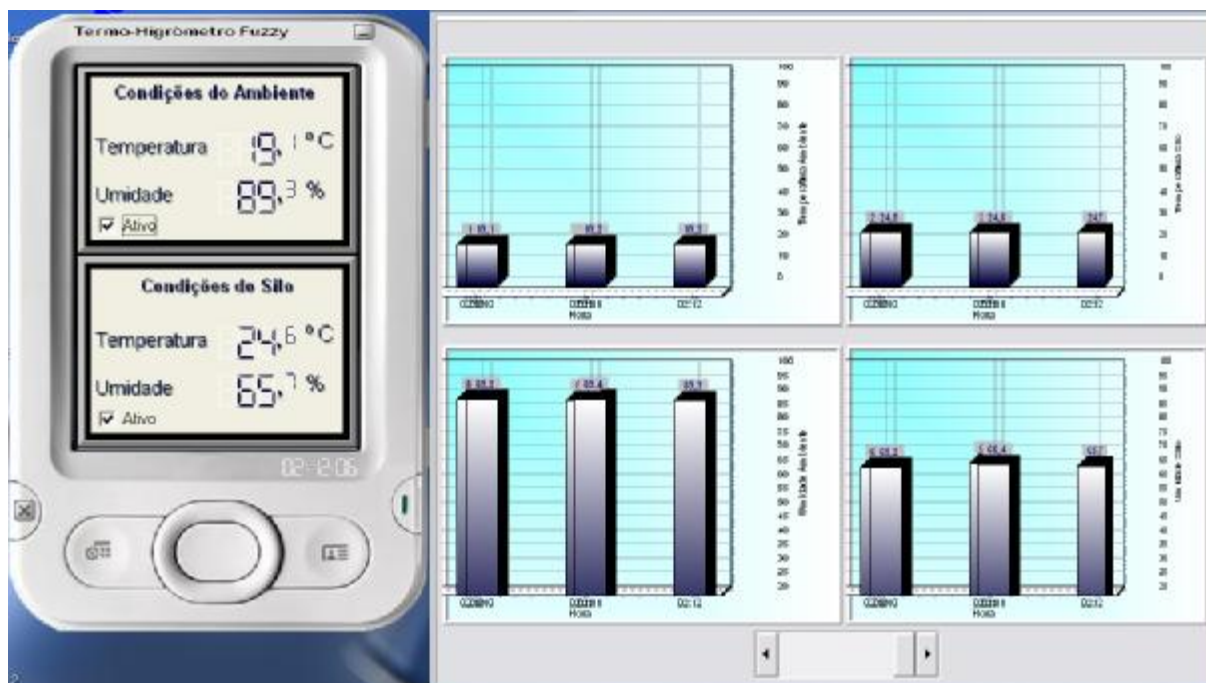


Figura 5.7 - Tela com informações gráficas de umidade e temperatura.



A opção possibilita ao usuário mudar a unidade de exibição da temperatura nos dois painéis de LCD de graus *Celsius* para graus *Fahrenheit* (Figura 5.8):



Figura 5.8 - Tela de exibição da temperatura em Celsius ou Fahrenheit.

5.6 MODOS DE OPERAÇÃO DO SISTEMA DE AERAÇÃO

O sistema desenvolvido pode operar de duas formas: modo automático ou modo manual. O padrão do sistema é sempre trabalhar no modo automático, mas o sistema permite ao usuário alternar entre os dois modos.

No modo automático (Figura 5.9) não é necessária nenhuma intervenção do operador. O sistema automaticamente obtém os dados a partir dos sensores de umidade e temperatura conectados na placa de aquisição de dados, grava estas informações em um banco de dados e baseado no mapa de regras estabelecido por

um especialista em aeração de grãos, realiza as etapas de fuzzyficação, defuzzyficação.

Quando o sistema detectar a necessidade de realizar a aeração de grãos, baseado nos valores de umidade e temperatura, o conjunto de ventiladores virtuais é acionado, simulando uma aeração, até que a situação volte a sua condição de normalidade.

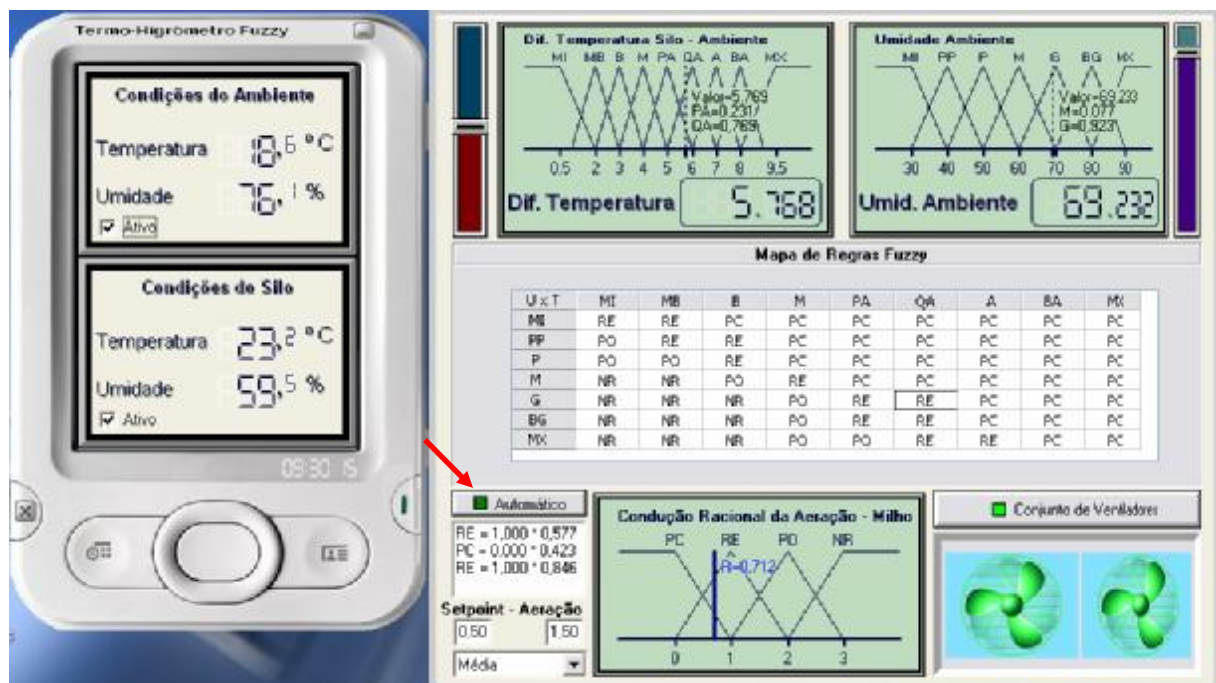


Figura 5.9 - Sistema operando no modo automático.

Já no modo manual o sistema continua a realizar a leitura dos sensores de umidade e temperatura, apenas que não utiliza estas informações para realizar a fuzzyficação e defuzzyficação. Neste modo o operador pode realizar simulações com valores de umidade e temperatura. O princípio de funcionamento é o mesmo, apenas que no modo manual é o operador que passa a controlar o sistema.

Neste modo existem dois controles deslizantes (Figura 5.10) que permitem ao operador simular situações reais de valores de umidade e temperatura. A partir destes valores é realizado o processo de fuzzyficação, defuzzyficação e quando necessário é acionado o conjunto de ventiladores virtuais, podendo o operador, se quiser, tomar a decisão de desligá-los.

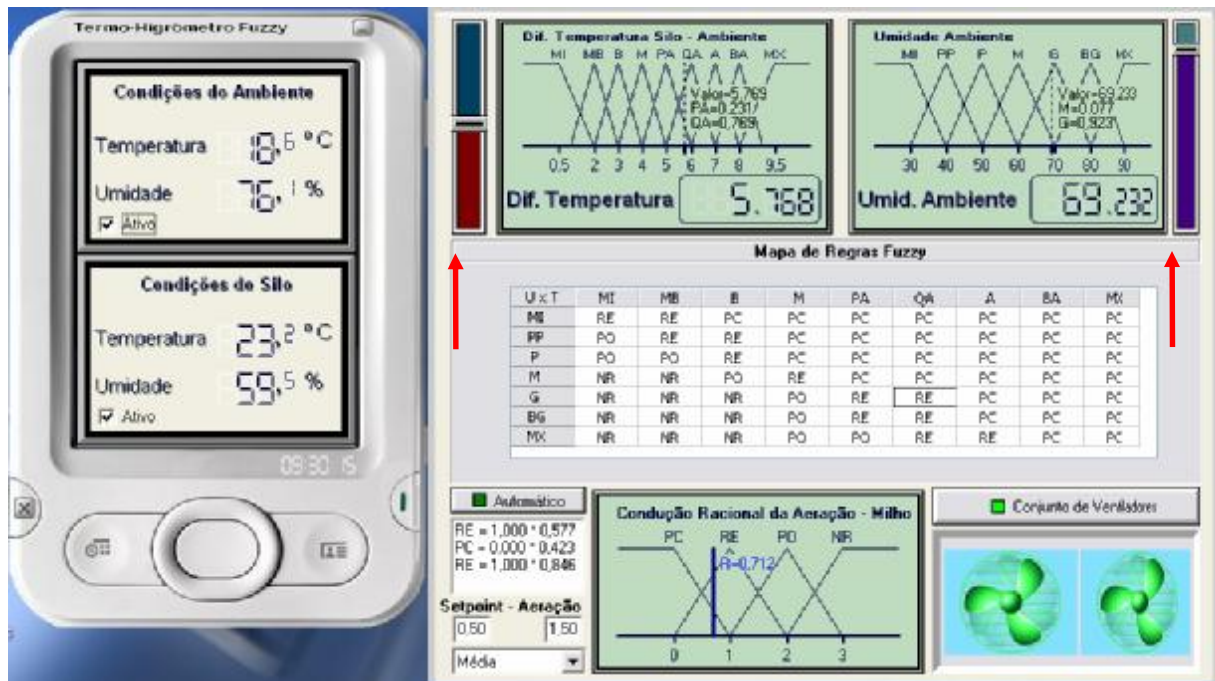


Figura 5.10 - Sistema operando no modo manual.

Em ambos os modos de operação (automático ou manual) é permitido ao operador escolher qual o método deseja que seja feito o processo de defuzzyficação: média (padrão), máximo ou mínimo (Figura 5.11).

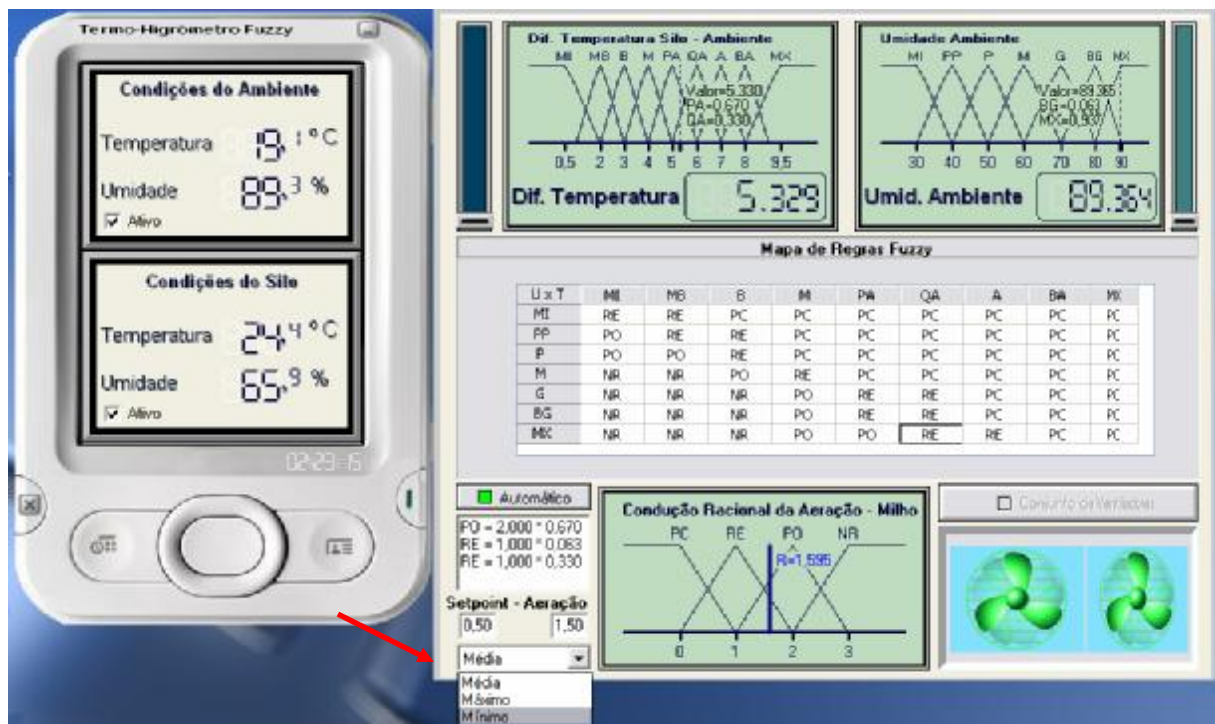


Figura 5.11 - Escolha do método de defuzzyficação a ser utilizado.

O intervalo onde a aeração é recomendada situa-se entre 0,5 e 1,5 (resultado do processo de defuzzyficação). Conforme a necessidade, o operador tem a opção de modificar estes valores, adaptando o sistema às suas necessidades (Figura 5.12).

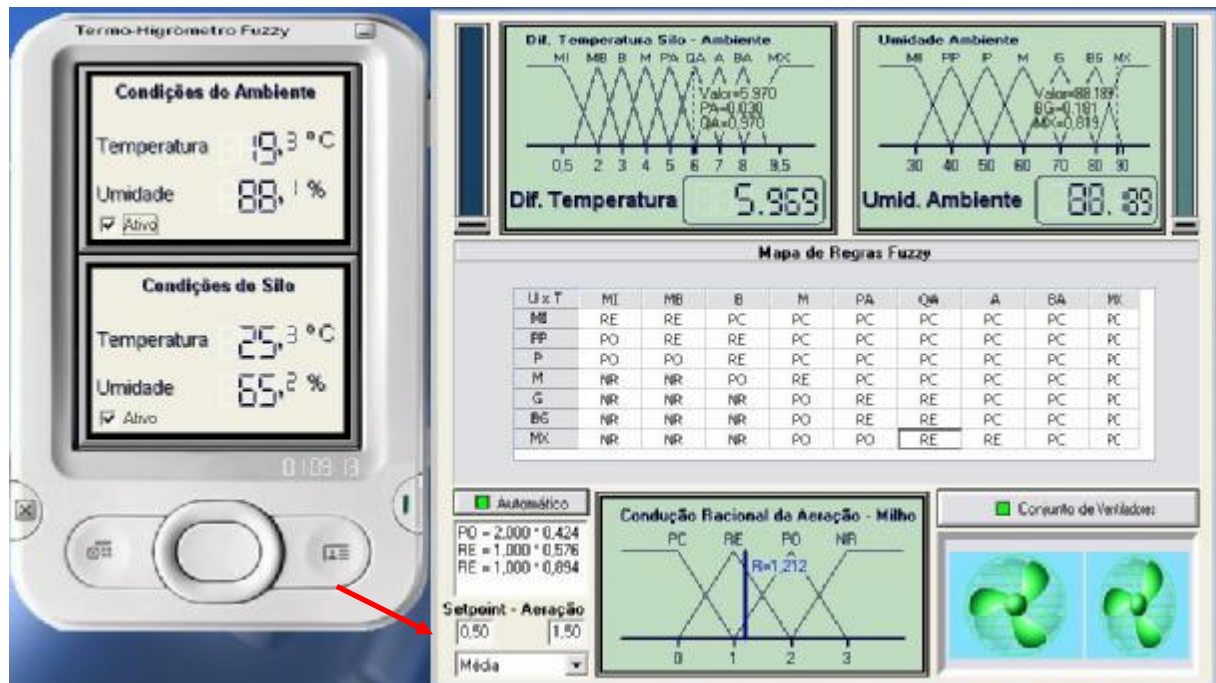


Figura 5.12 – Intervalo onde o sistema realiza o processo de aeração.

5.7 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE FUZZY

A principal vantagem da aplicação de controladores *fuzzy* é a possibilidade de capturar por regras heurísticas as estratégias de controle de operadores humanos.

A Lógica *Fuzzy* é também útil em tarefas de tomadas de decisão, onde as variáveis individuais não são definidas em termos exatos. Por exemplo, na seqüência de tarefas de uma linha de produção industrial ou no planejamento de manutenção, o uso da Lógica *Fuzzy* pode significar vantagens adicionais em minimização de custos, devido à facilidade de implementação dessas estratégias (MARÇAL, 2000).

Um método prático de conduzir a aeração consiste no controle da diferença da temperatura média dos grãos e do ar ambiente, LASSERAN (1981), PUZZI (1986) e SILVA (1995).

5.7.1 Função de fuzzyficação para a variável de entrada diferença de temperatura

O modelo *fuzzy* para a determinação da condução racional da aeração é função da diferença da temperatura do grão (externa) e a temperatura do ar ambiente.

Os conjuntos *fuzzy* para a diferença da temperatura do grão e do ar ambiente têm como limite inferior 0 °C e superior de 10 °C, em intervalos de 1 °C, estes valores têm como base o Diagrama de Condução da Aeração e estão representados na Figura 5.13. (DIAS et al, 2005).

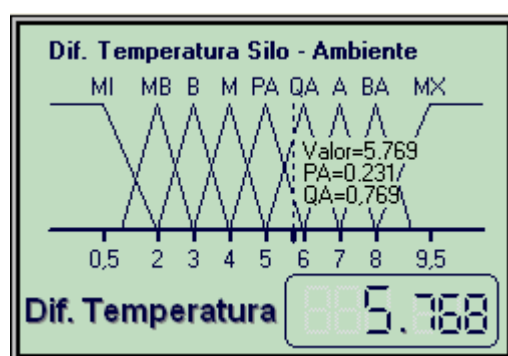


Figura 5.13 - Conjuntos fuzzy para a diferença de temperatura do grão.

A nomenclatura utilizada para a diferença de temperatura é descrita na Tabela 5.2, abaixo:

Tabela 5.2 - Variáveis lingüísticas utilizadas para fuzzyficação da diferença de temperatura

Nome	Identificação
MI	Mínima
BP	Bem pequena
P	Pequena
PP	Pouco pequena
M	Média
PG	Pouco grande
G	Grande
BG	Bem grande
MX	Máxima

5.7.2 Função de fuzzyficação para a variável de entrada umidade do ar ambiente

O mesmo se aplica para a umidade relativa do ar ambiente e os conjuntos *fuzzy* têm as seguintes características: limites inferior e superior de 30% e 90%, com intervalos de 10%, também baseados no Diagrama da Condução Racional da Aeração, e representados na Figura 5.14. (DIAS et all, 2005).

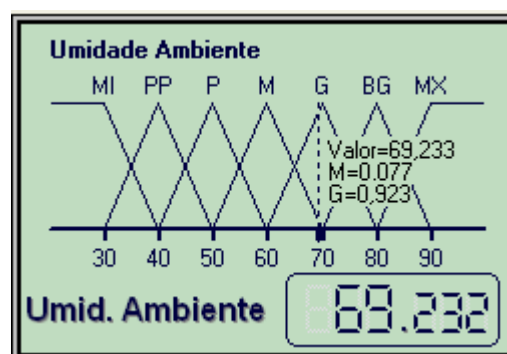


Figura 5.14 - Conjuntos fuzzy para a umidade relativa do ar ambiente.

A nomenclatura dos símbolos adotados para os conjuntos *fuzzy* estão descritos na Tabela 5.3

Tabela 5.3 - Variáveis lingüísticas utilizadas para fuzzyficação da umidade

Nome	Identificação
MI	Mínima
MB	Muito baixa
B	Baixa
M	Média
A	Alta
MA	Meio alta
MX	Máxima

5.7.3 Regras de inferência para o controle da aeração

A tabela *fuzzy* que representa o comportamento do sistema de condução racional da aeração é construída analisando-se os conjuntos *fuzzy* para a diferença da temperatura do grão e do ar ambiente, em função umidade relativa do ar ambiente (diferença de temperatura por umidade relativa do ar ambiente). Assim,

qualquer condição desejada pode ser obtida através desta tabela de regras *fuzzy* (Tabela 5.4):

Tabela 5.4 - Condução racional da aeração, função da Diferença temperatura do grão e ar por umidade relativa do ar ambiente

Mapa de Regras Fuzzy									
U x T	MI	MB	B	M	PA	QA	A	BA	MX
MI	RE	RE	PC	PC	PC	PC	PC	PC	PC
PP	PO	RE	RE	PC	PC	PC	PC	PC	PC
P	PO	PO	RE	PC	PC	PC	PC	PC	PC
M	NR	NR	PO	RE	PC	PC	PC	PC	PC
G	NR	NR	NR	PO	RE	RE	PC	PC	PC
BG	NR	NR	NR	PO	RE	RE	PC	PC	PC
MX	NR	NR	NR	PO	PO	RE	RE	PC	PC

Os conjuntos *fuzzy*, os limites inferior e superior e as amplitudes dos intervalos adotados para a diferença de temperatura do grão ensilado e a temperatura do ar ambiente estão representados na Figura 5.13. Os nomes e os símbolos dos conjuntos *fuzzy* adotados encontram-se na Tabela 5.2. Os valores para a umidade relativa do ar ambiente encontram-se na Figura 5.14 e na Tabela 5.3.

A função da tabela *fuzzy* (Tabela 5.4) é criar o mapa de regras lingüísticas aplicadas à fuzzyficação do sistema. Cada combinação entre uma coluna e uma linha descreve uma situação de controle do sistema. Esta situação é determinada pelo termo da interseção da coluna com a linha (Figura 5.15).

SE Diferença de Temperatura = QUASE ALTA
E Umidade Ambiente = GRANDE
ENTÃO Aeração = RECOMENDÁVEL

Figura 5.15 - Regra lingüística do mapa de regras *fuzzy*.

Como a diferença de temperatura entre o grão e o ar é “QUASE ALTA”, no caso deste trabalho 5,769 °C com grau de pertinência QA de 0,769 (Figura 5.13) e a umidade relativa do ar é “GRANDE”, 69,233% com grau de pertinência G de 0,923 (Figura 5.14) a condução racional da aeração é “RECOMENDÁVEL” (Tabela 5.4). De forma esquemática tem-se a estrutura mostrada na Figura 5.16. (DIAS et al, 2005).

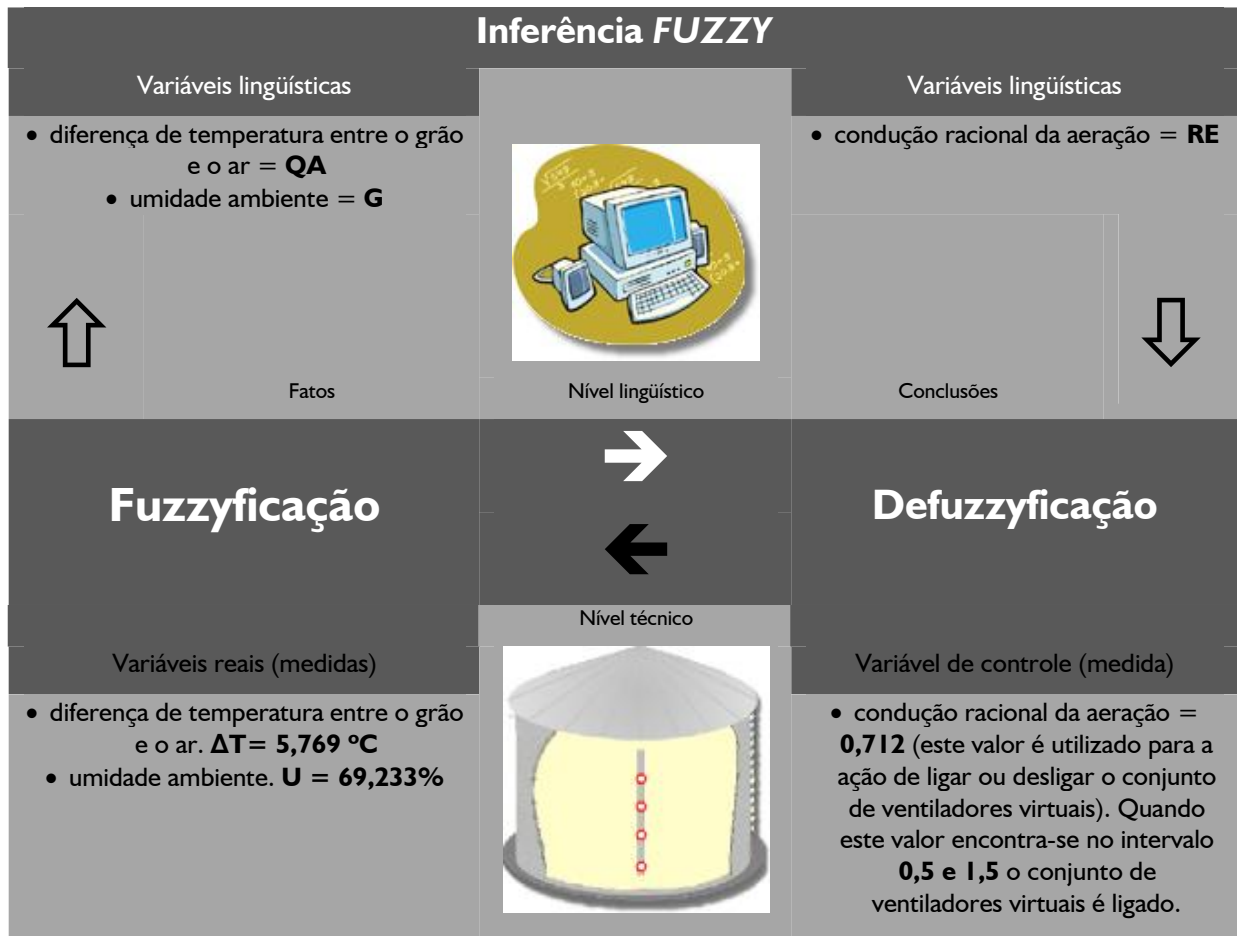


Figura 5.16 - Estrutura completa do controlador *fuzzy*.
DIAS et al, 2005 – adaptada.

5.7.4 Função de fuzzyficação para a variável de saída aeração

Como parte final do controlador *fuzzy* tem-se a etapa de defuzzyficação, mencionada na Figura 5.16, a qual segue os mesmos passos da fuzzyficação, só que em sentido contrário. A partir da variável lingüística de controle se obtém o valor para que o controlador execute a ação de automação desejada. No caso deste trabalho é a ativação do conjunto de ventiladores virtuais.

Os conjuntos *fuzzy* adotados para a condução racional da aeração são aqueles contidos no Diagrama de Condução da Aeração, conforme mostrado na Figura 5.13. Para cada um destes conjuntos *fuzzy* adota-se um valor numérico ao qual chamamos de valor atribuído. Os nomes dos conjuntos *fuzzy*, os valores atribuídos e os limites inferior e superior são mostrados na Figura 5.17. A nomenclatura dos símbolos adotados para os conjuntos estão descritos na Tabela 5.5.

Estes valores são adotados para resgatar numericamente (defuzzyficar) as variáveis lingüísticas usadas no Diagrama de Condução Racional da Aeração.

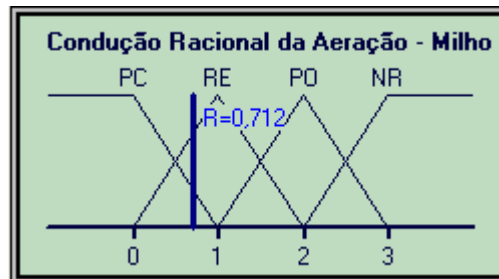


Figura 5.17 - Conjuntos *fuzzy* para a condução racional da aeração.

Tabela 5.5 - Processo de defuzzyficação

Nome	Identificação
PC	Possível com cuidados
RE	Recomendável
PO	Possível
NR	Não recomendável

6 ESPECIFICAÇÃO DO PROCESSO DE AERAÇÃO

É possível e desejável descrever a operação e a *performance* de instrumentos de medição e equipamentos associados de uma forma generalizada sem recorrer para especificações de *hardware*. A operação pode ser descrita em termos de estágios funcionais do sistema e a *performance* é definida em termos de características de *performance* dinâmica e estática. Esta linguagem, criada por Ernest O. Doebelin, é normalmente usada em especificações de instrumentos e processos de medida, pois facilita a compreensão das etapas e de seu funcionamento. A Figura 6.1 mostra um instrumento separado através de blocos, os quais levam a imaginar um aparato físico como sendo precisamente separado por etapas desenvolvendo funções específicas.

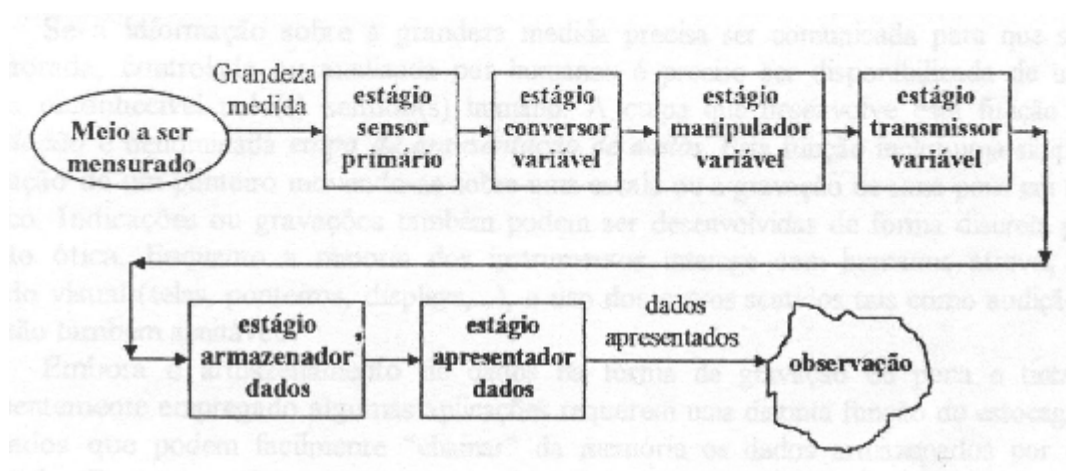


Figura 6.1 - Estágios funcionais de um instrumento ou um sistema de medição.

O **estágio sensor primário** é aquele que primeiro recebe a energia de um meio a ser mensurado e produz uma saída “dependendo de alguma forma” da grandeza medida. É importante notar que um instrumento sempre extrai alguma energia do meio mensurado. Portanto, a grandeza a ser medida é sempre perturbada pelo ato de medir, o qual tenta executar da melhor forma possível uma medida teoricamente perfeita. Bons instrumentos são desenvolvidos para minimizar este efeito, mas de alguma forma o efeito se faz presente.

O sinal de saída de um estágio primário é alguma variável física, tais como: deslocamento ou tensão. Para o instrumento desenvolver a função desejada pode

ser necessária a conversão de uma variável para uma outra mais apropriada, preservando a informação contida no sinal original.

O estágio que atua tal qual uma função é chamada de **estágio conversor de variável**. Nota-se que, nem todo instrumento inclui um estágio conversor de variável.

Um instrumento para desenvolver as suas tarefas desejadas pode requerer que o sinal representado por alguma variável física seja manipulado. Por manipulação, aqui se entende, por uma mudança de valores numéricos concordando com algumas regras definidas preservando-se a natureza física da variável.

O estágio chamado **estágio manipulador de variável** não necessariamente se encontra logo a seguir do estágio conversor de variável, mas pode, precede-lo, aparecer em qualquer etapa do processo ou não aparecer.

Quando os estágios funcionais de um instrumento estão separados fisicamente, torna-se necessário transmitir os dados de um ponto para outro. O estágio que desenvolve esta função recebe o nome de **estágio transmissor de dados**. Ele pode ser tão simples como um eixo, um cabo, uma haste e um conjunto de mancais ou tão complicado como um sistema de telemetria para transmissão de sinais via satélite por rádio.

Se a informação sobre a grandeza medida precisa ser comunicada para que seja monitorada, controlada ou analisada por humanos é preciso ser disponibilizada de uma forma reconhecível pelo(s) sentido(s) humano. A etapa que desenvolve esta função de translação é denominada **estágio de apresentação dos dados**. Esta função inclui uma simples indicação de um ponteiro movendo-se sobre uma escala ou a gravação de uma pena em um gráfico.

A etapa responsável pelo armazenamento dos dados recebe a denominação de **estágio armazenador de dados**. Embora o armazenamento de dados na forma de gravação de pena e tinta é freqüentemente empregado algumas aplicações requerem uma distinta função de estocagem de dados que podem facilmente “chamar” da memória os dados armazenados por um comando.

Faz-se uso da linguagem sugerida para a especificação do processo no qual o objetivo é a aeração de grãos de milho em silos verticais, Figura 6.2. O sensor utilizado é um SHT71 e baseia-se na leitura de valores de umidade e temperatura. O

sistema especialista desenvolvido utiliza a Lógica *Fuzzy* para diagnosticar a necessidade de aeração.

Em complemento a especificação do processo de aeração, no Apêndice A é demonstrado o Fluxograma do Sistema, onde está representado de forma esquemática o funcionamento do sistema desenvolvido.

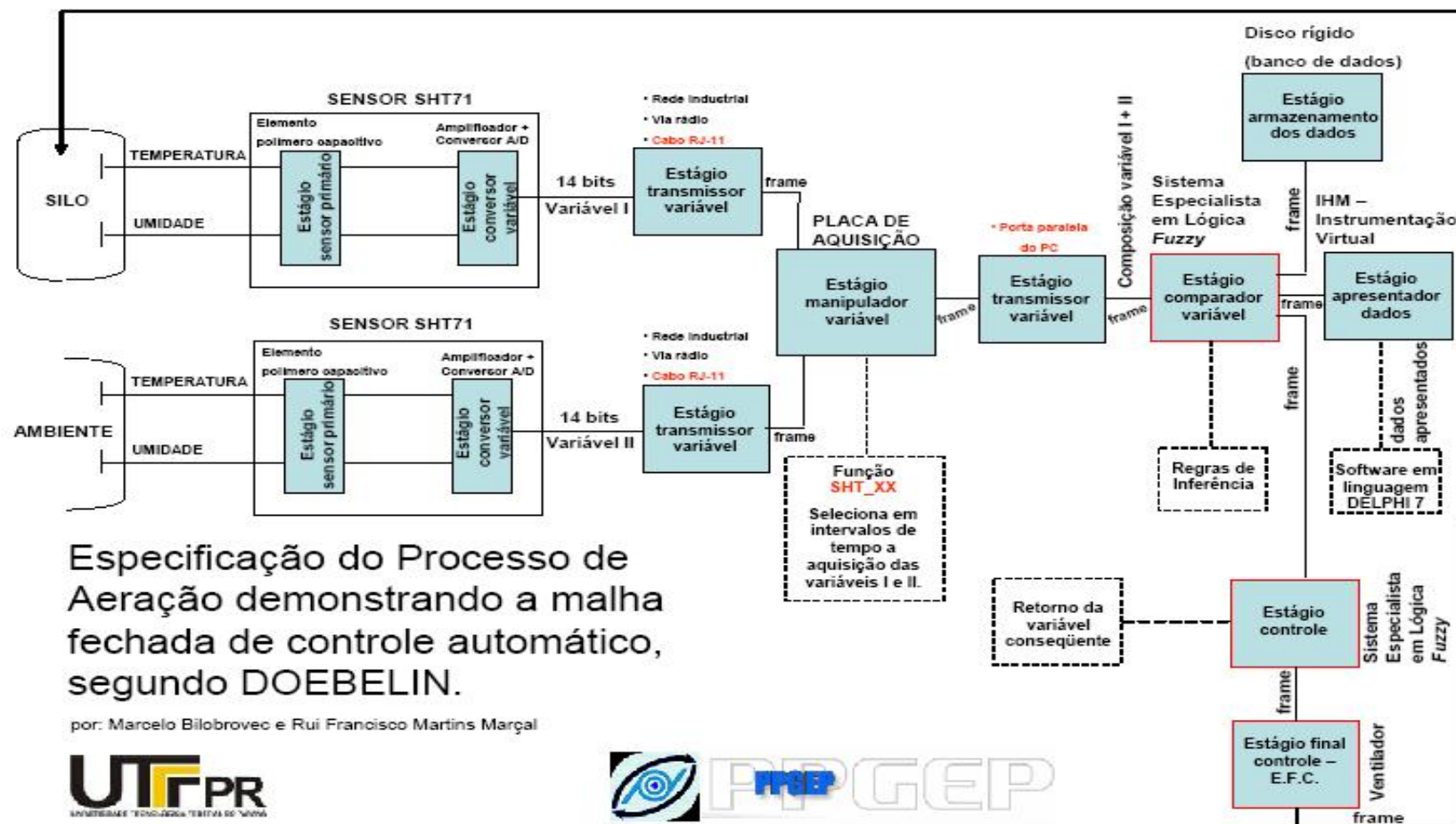


Figura 6.2 – Especificação do processo de aeração demonstrando a malha fechada de controle automático.

7 RESULTADOS

Como foi mencionado neste trabalho, a aeração é feita com base na diferença de temperatura entre o grão e o ar ambiente em função da umidade relativa do ar ambiente e do grão. O Diagrama da Condução Racional da Aeração vem sendo utilizado atualmente como procedimento de referência.

O objetivo deste trabalho foi implementar um sistema especialista para controle e gerenciamento automático do processo de aeração de grãos de milho utilizando os recursos da Lógica *Fuzzy* e através deste permitir ao operador do sistema controlá-lo. O sistema tem a capacidade de gerar e interpretar automaticamente as informações inseridas e contidas no Diagrama da Condução Racional da Aeração, baseadas no conhecimento de especialistas.

Segundo os resultados, pode-se constatar que o sistema opera conforme o diagrama (Figuras 7.1 e 7.2), pois a partir dos dados analisados, 5,769 °C para diferença de temperatura da massa de grãos e temperatura ambiente, e 69,233% para umidade relativa do ar ambiente, temos a seguinte recomendação: “Aeração recomendável”.

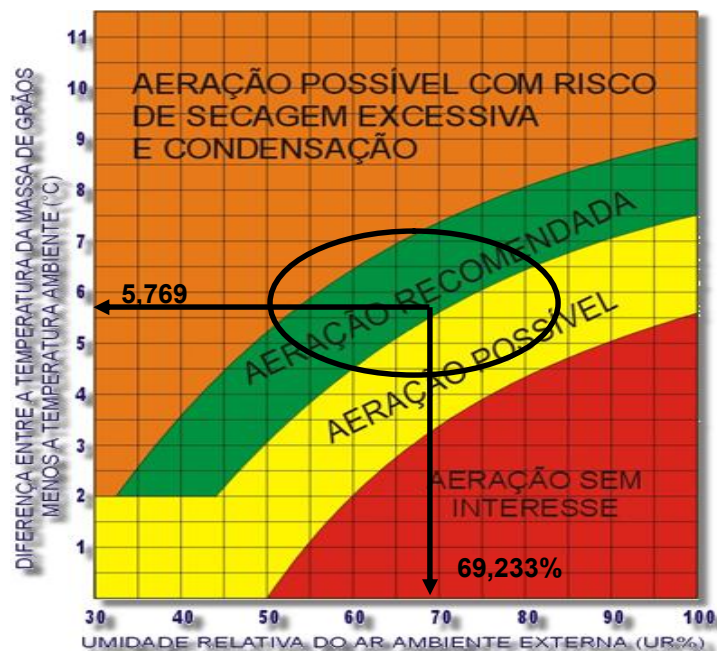


Figura 7.1 - Resultado numérico da defuzzyficação na condução racional da aeração.

U x T	MI	MB	B	M	PA	QA	A	BA	MX
MI	RE	RE	PC	PC	PC	PC	PC	PC	PC
PP	PO	RE	RE	PC	PC	PC	PC	PC	PC
P	PO	PO	RE	PC	PC	PC	PC	PC	PC
M	NR	NR	PO	RE	PC	PC	PC	PC	PC
G	NR	NR	NR	PO	RE	RE	PC	PC	PC
BG	NR	NR	NR	PO	RE	RE	PC	PC	PC
MX	NR	NR	NR	PO	PO	RE	RE	PC	PC

Figura 7.2 - Resultado lingüístico da defuzzyficação na condução racional da aeração.

No detalhe em destaque na Figura 7.1 e Figura 7.2 é possível observar que o sistema automático recomendou a aeração, tanto na sua forma lingüística quanto numérica com o valor de 0,712 (Figura 5.17), valor este que se situa na faixa de 0,5 e 1,5, que é a faixa aonde a aeração é recomendada.

A Figura 7.3 mostra o Sistema em funcionamento realizando a condução racional da aeração.

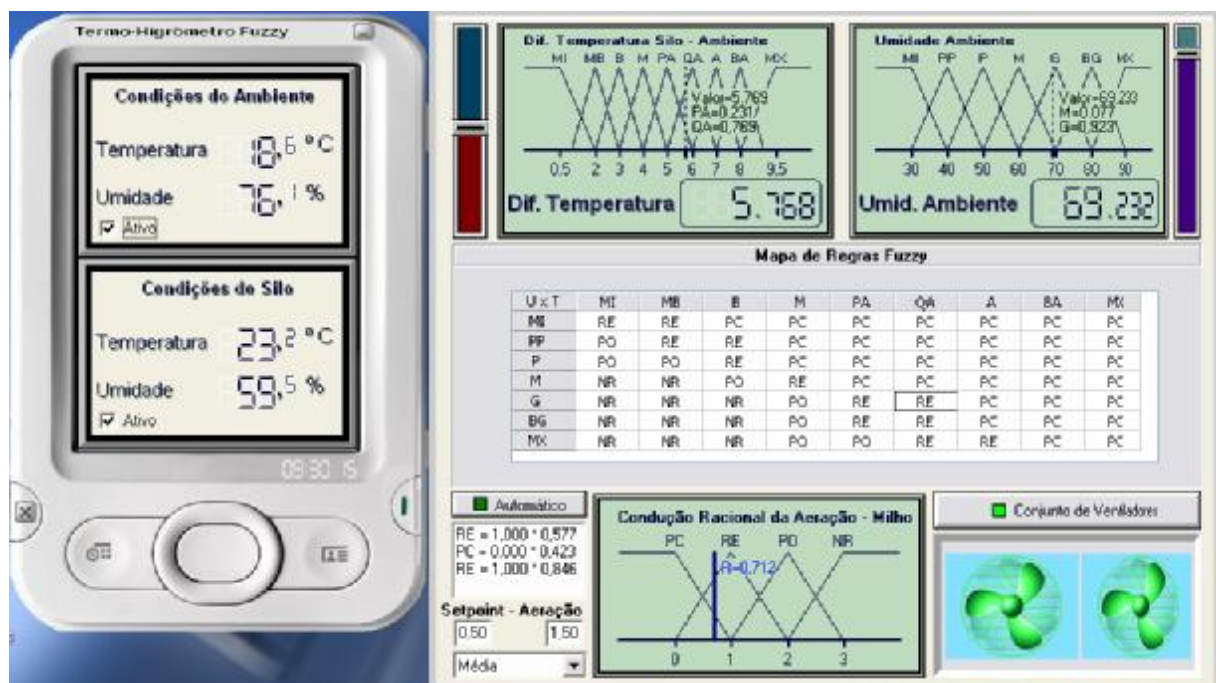


Figura 7.3 - Sistema em funcionamento realizando a condução racional da aeração.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

No desenvolvimento deste trabalho, a técnica de controle *fuzzy* foi aplicada no desenvolvimento de um sistema especialista baseado em Lógica *Fuzzy*, para o controle e gerenciamento automático do processo de aeração de grãos de milho, através da leitura das variáveis de processo: temperatura e umidade usando-se sensores SHT71 instalados e uma placa de aquisição de dados desenvolvida especialmente para esta finalidade.

O *software* de controle foi desenvolvido com base na linguagem de programação BORLAND Delphi 7 – Versão Enterprise e usou um conjunto de bibliotecas adicionais que permitiu a elaboração das estratégias de controles.

Considera-se que o sistema especialista desenvolvido no trabalho permite a aeração de grãos baseado em informações a respeito de umidade e temperatura, tanto no modo automático como no modo manual.

A contribuição do trabalho do ponto de vista de sistemas de controle, foi o desenvolvimento e implementação em *hardware* e *software* de um controlador *fuzzy* adaptativo para o controle do processo de aeração de grãos.

O sistema desenvolvido certamente pode ser aprimorado. Numa situação particular, que venha a exigir um maior número de variáveis ou, até mesmo de sensores de temperatura e umidade, como um sistema mais complexo de maior porte, que demande o monitoramento e as intervenções de controle simultaneamente.

A possibilidade de monitoramento de forma remota, através da internet, seria uma grande melhoria para o sistema, pois permitiria ao operador acompanhar o processo de aeração de qualquer computador em qualquer lugar do mundo, bastando para isto estar conectado à rede.

Também com grande desenvolvimento hoje da tecnologia *wireless* (sem fio), este aprimoramento no sistema também seria de grande utilidade, pois permitiria ao operador uma maior mobilidade do sistema. Além do fato de que a operacionalização permitiria o uso em *notebooks*, PDA's e até mesmo em telefones celulares.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, V. B. **Aplicação da lógica fuzzy no controle de um motor CC.** São José dos Campos: 1º ENCITA, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 1995.

BILOBROVEC, Marcelo; MARÇAL, Rui Francisco Martins; KOVALESKI, João Luís. **Implementação de um sistema de controle inteligente utilizando a lógica fuzzy** In: XI Simpósio de Engenharia de Produção, Bauru, 2004.

BOSE, B. K. **“Expert system, fuzzy logic, and neural networks in power electronics and drives,”** Power Electronics and Variable Frequency Drives, IEEE Press, NJ: 1996.

BURREL, N. J. **Aeration systems.** London Road: Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, 1973

CABRAL, R. B. **Adaptação Computacional de Sistemas de Inferência Difusos: um caso aplicado.** Dissertação de Mestrado. Florianópolis, 1994.

CHANG, C. L. **Interpretation and execution of fuzzy programs.** In: Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes. New York: Academic Press, 1974.

COUTINHO, L. **A Terceira revolução industrial e tecnologia.** Revista Economia e Sociedade, N. 1, agosto de 1992, pg. 69-87.

CRUZ, L. F. **Sistematizações da teoria fuzzy.** Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 1996.

DE BEER, A. G. **Drying and storing agricultural products on farm.** Farming in South África, [s. 1.], p.29-68, 1972.

DIAS, H. Ariangelo; MATHIAS, M. Ivo; BIAGIONNI, M.A. Marco; CRUZ, F. Luiz; BILOBROVEC, Marcelo. **Teoria Fuzzy aplicada à automação da condução racional da aeração de grãos de milho** In: V Congresso Brasileiro de AgroInformática, Londrina, 2005.

DOEBELIN, E. O. **Measurement Systems: application and design**. Departament of Mechanical Engineering the Ohio State University. McGraw – Hill Publishing Company; New York; 4 th ed.; 1990.

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

FEITOSA, H. A. **Princípios fundamentais da teoria fuzzy**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 1992.

FERNANDES, A. P. S. **Sistema Especialista Difuso de Apoio ao Aprendizado do traumatismo Dento-Alveolar utilizando Recursos Multimídia**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

FERNANDES, A. M. R. **Sistema Especialista Difuso Aplicado ao Processo de Análise Química Qualitativa de Amostras de Minerais**. Dissertação de Mestrado, curso de Pós Graduação em Ciências da Computação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

GONÇALVES, V. A. **Desenvolvimento de um sistema computacional para o controle automático do processo de aeração de grãos de milho**. Tese de Doutorado. Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 1992.

GOODMAN, D. e outros, **Da lavoura às biotecnologias**. Agricultura e indústria no sistema internacional. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1990.

GRAZIANO da Silva, J. **"Fim do "Agribusiness" ou emergência da biotecnologia?"**. Revista Economia e Sociedade, n.1, agosto de 1992, pg. 163-167.

GRAZIANO da Silva, J. **Progresso técnico e relações de trabalho na agricultura**, São Paulo: Editora Hucitec, 1981.

GUILLEMIN, P. **Fuzzy logic applied to motor control**. In: INTERNATIONAL APPLIANCE INDUSTRY TECHNICAL CONFERENCE, 1995, Madison. IEEE

Transactions on industry applications. Rousset: SGS-Thomson Microelectronics, 1996. v.32, n.1, p.51-6.

IVANQUI, J. **Esteira eletrônica com velocidade controlada por lógica fuzzy**. Dissertação de Mestrado. Curitiba, 2005. 104p.

LASSERAN, J. C. **Aeração de grãos**. Viçosa: CENTREINAR, 1981, 131p.

MARÇAL, Rui Francisco Martins, SUSIN, Altamiro A. **O emprego de inteligência artificial como ferramenta de apoio à tomada de decisão na manutenção industrial**. In: III Seminário Catarinense – ABRAMAN 2005. Joinville/SC.

MARÇAL, Rui Francisco Martins. **Uma Metodologia para detectar Falhas Incipientes em Máquinas Rotativas baseada em Análise de Vibração e Lógica Fuzzy**. Tese de Doutorado UFRGS - Porto Alegre – RS. 2000.

MARÇAL, Rui F. M.; NEGREIROS, M.; SUSIN, Altamiro A.; KOVALESKI, João L. **Detecting faults in rotating machines**. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, New York, v. 3, n. 4, december 2000.

MATTOS; Merisandra Côrtes de. **Sistema Difuso de Controle da Assistência Respiratória em Neonatos – SARE**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2001.

MESSIAS, A. R. A porta paralela do PC. Disponível em <<http://www.rogercom.com>> Acesso em: 10 Abril 2005.

METZGER, J. F. **Aeration of stored wheat in the Canadian Prairies**. Winnipeg: Dissertação de Mestrado – Universidade de Manitoba. 1980. 159p.

PUZZI, D. **Abastecimento e armazenagem de grãos**. Grãos - Armazenagem. Campinas, SP: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1986. p. 355-432.

PUZZI, D. **Conservação dos grãos armazenados**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1973. 405p.

RIFKIN, Jeremy. **Fim dos Empregos: o declínio inevitável dos níveis dos empregos e a redução da força global de trabalho**. São Paulo: Makron Books, 1995.

ROSS, T. **Fuzzy Logic with Engineering Applications**, McGraw-Hill. 1995.

SHT71 - **SENSIRION**. Disponível em
<<http://www.sensirion.com/images/getFile?id=25>> Acesso em: 15 Abril 2005.

SILVA, J. S. **Pré-processamento de produtos agrícolas**. Juiz de Fora: Instituto Maria, 1995, 500p.

TANAKA, K., MIZUMOTO, M. **Fuzzy programs and their execution**. In: Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes. New York: Academic Press, 1974. p.41-76.

VIEIRA, R. S. **Protótipo de um sistema de monitoramento remoto inteligente**. Dissertação de mestrado, 1999, UFSC.

ZADEH, L. A. **Fuzzy sets and applications**. USA: John Wiley & Sons, 1987. 684p.

APÊNDICE A - FLUXOGRAMA DO SISTEMA

