

**ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU**

**SISTEMA ESPECIALISTA PARA AUTOMAÇÃO DO PROCESSO DE AERAÇÃO  
DE GRÃOS DE MILHO EM PEQUENAS PROPRIEDADES**

**ARIANGELO HAUER DIAS**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências  
Agronômicas da UNESP - Campus de  
Botucatu, para obtenção do título de Doutor  
em Agronomia - Área de Concentração em  
Energia na Agricultura.

**BOTUCATU-SP**

**Fevereiro – 2007**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**SISTEMA ESPECIALISTA PARA AUTOMAÇÃO DO PROCESSO DE AERAÇÃO  
DE GRÃOS DE MILHO EM PEQUENAS PROPRIEDADES**

**ARIANGELO HAUER DIAS**

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Martin Biaggioni

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Francisco da Cruz

Tese apresentada à Faculdade de Ciências  
Agronômicas da UNESP - Campus de  
Botucatu, para obtenção do título de Doutor  
em Agronomia - Área de Concentração em  
Energia na Agricultura.

BOTUCATU-SP

Fevereiro – 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO  
UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

D541s      Dias, Ariangelo Hauer, 1964-  
Sistema especialista para automação do processo de aeração de grãos de milho em pequenas propriedades / Ariângelo Hauer Dias. - Botucatu : [s.n.], 2007.  
ix, 70 f. : il. color., gráfs., tabs.

Tese (Doutorado) -Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2007  
Orientador: Marco Antonio Martin Biaggioni  
Co-orientador: Luiz Francisco da Cruz  
Inclui bibliografia

1. Lógica difusa. 2. Inteligência artificial. 3. Sistema computacional. I. Biaggioni, Marco Antonio Martin. II. Cruz, Luiz Francisco da. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. IV. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS**  
**CÂMPUS DE BOTUCATU**

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

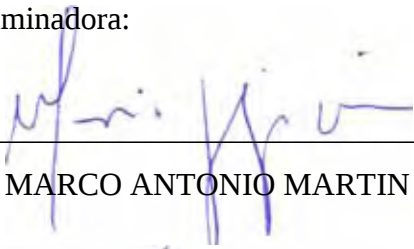
**TÍTULO: SISTEMA ESPECIALISTA PARA AUTOMAÇÃO DO PROCESSO DE  
AERAÇÃO DE GRÃOS DE MILHO EM PEQUENAS PROPRIEDADES**

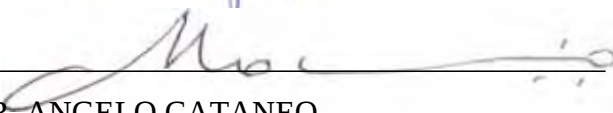
AUTOR: ARIANGELO HAUER DIAS

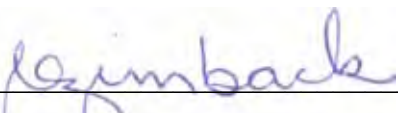
ORIENTADOR: PROF. DR. MARCO ANTONIO MARTIN BIAGGIONI

CO-ORIENTADOR: PROF. DR. LUIZ FRANCISCO DA CRUZ

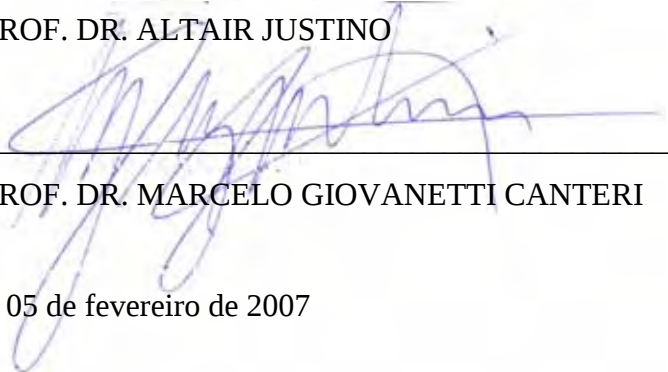
Aprovada pela Comissão Examinadora:

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. MARCO ANTONIO MARTIN BIAGGIONI

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. ANGELO CATANEO

  
\_\_\_\_\_  
PROFª. DRª. CÉLIA REGINA LOPES ZIMBACK

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. ALTAIR JUSTINO

  
\_\_\_\_\_  
PROF. DR. MARCELO GIOVANETTI CANTERI

Data de realização: 05 de fevereiro de 2007

Este trabalho é dedicado à minha esposa Delvana, aos meus filhos Ariangelo e Caio, aos meus pais, Ary e Aparecida, à minha irmã Elaine, à minha afilhada Virgínia e às minhas avós Dina e Verginia, razão e motivação de toda minha luta. Dedico também à minha sogra Ana Cacilda e *in memoriam* ao meu sogro Sebastião da Silva que foi, para mim, um grande exemplo de dignidade e dedicação.

"Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer. A mente que se abre a uma nova idéia jamais volta ao seu tamanho original."

Albert Einstein

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente A DEUS, pela saúde e energia que nunca faltaram para avançar nos estudos propiciando inspiração e dedicação para a conclusão deste trabalho.

Agradeço também a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para o êxito deste projeto, de modo especial, desejo registrar meus agradecimentos àqueles que dedicaram o seu tempo para analisar este trabalho.

Agradeço ao professor e amigo Dr. Marco Antonio Martin Biaggioni pela dedicação e atenção dispensada na orientação durante a elaboração desta tese. Suas sugestões e apoio foram fundamentais para o desenvolvimento desse trabalho.

Aos professores, professoras, funcionárias e funcionários ligados ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônômicas - Campus de Botucatu, meu reconhecimento pela seriedade e dedicação com que repassaram seus conhecimentos e meus agradecimentos pelo estímulo à linha de pesquisa adotada.

Aos colegas de turma, com os quais a troca de experiências e a convivência contribuíram para meu crescimento pessoal e intelectual, a minha amizade e reconhecimento. Em especial agradeço ao grande amigo Ivo Mário Mathias, pelo apoio e coleguismo dedicado durante o decorrer da realização do doutorado.

Ao Prof. Dr. Angelo Cataneo que com sua competência e seriedade me conduziu ao curso e à conseqüente realização deste trabalho.

Aos professores Marcelo Bilobrovec e Idomar Augusto Cerutti por terem viabilizado o meu afastamento, assumindo as atividades didáticas correlatas às disciplinas que ministrava.

Ao Departamento de Informática da Universidade Estadual de Ponta Grossa, instituição da qual me orgulho fazer parte, esperando que este trabalho possa de alguma forma contribuir para o seu desenvolvimento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES pelo apoio financeiro concedido.

## SUMÁRIO

|                                                                              | Pág. |
|------------------------------------------------------------------------------|------|
| LISTA DE TABELAS.....                                                        | VI   |
| LISTA DE FIGURAS.....                                                        | VII  |
| LISTA DE SIGLAS.....                                                         | IX   |
| 1 RESUMO.....                                                                | 1    |
| 2 SUMMARY.....                                                               | 3    |
| 3 INTRODUÇÃO.....                                                            | 4    |
| 3.1.1 Objetivo geral .....                                                   | 5    |
| 3.1.2 Objetivos específicos .....                                            | 5    |
| 4 REVISÃO DE LITERATURA.....                                                 | 6    |
| 4.1 Lógica <i>Fuzzy</i> .....                                                | 6    |
| 4.1.1 Princípios básicos .....                                               | 6    |
| 4.1.2 Modelagem lingüística das incertezas .....                             | 8    |
| 4.1.3 Sistemas baseados em regras .....                                      | 11   |
| 4.1.4 Estrutura do controlador <i>Fuzzy</i> .....                            | 16   |
| 4.1.5 Aplicações da teoria <i>Fuzzy</i> .....                                | 25   |
| 4.2 Aeração de grãos.....                                                    | 28   |
| 4.2.1 Principais características da aeração.....                             | 28   |
| 4.2.2 Histórico da aeração .....                                             | 30   |
| 4.2.3 Condução da aeração .....                                              | 31   |
| 5 MATERIAL E MÉTODOS.....                                                    | 33   |
| 5.1 Principais componentes eletrônicos.....                                  | 33   |
| 5.2 Sistema de comunicação.....                                              | 37   |
| 5.3 Sistema de aquisição de dados.....                                       | 38   |
| 5.4 Sistema computacional para interpretação e processamento dos dados ..... | 39   |
| 5.5 Testes do protótipo .....                                                | 40   |

|     |                                                      |    |
|-----|------------------------------------------------------|----|
| 6   | Resultados e Discussão .....                         | 48 |
| 6.1 | Sistema eletrônico do controlador <i>Fuzzy</i> ..... | 48 |
| 6.2 | Controlador <i>Fuzzy</i> .....                       | 53 |
| 6.3 | Avaliação do sistema de controle CICLONE .....       | 60 |
| 6.4 | Custo básico do sistema CICLONE .....                | 64 |
| 7   | Conclusões .....                                     | 66 |
| 8   | REFERÊNCIAS .....                                    | 67 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Regras básicas para manobra de veículos.....                                                                                                    | 13 |
| Tabela 2: Base completa de regras lingüísticas – Mapa de regras.....                                                                                      | 15 |
| Tabela 3: Operadores para aplicação da lógica <i>Fuzzy</i> .....                                                                                          | 19 |
| Tabela 4: Regras válidas para a situação do exemplo da manobra.....                                                                                       | 20 |
| Tabela 5: Distribuição dos sensores de temperatura nos cabos termométricos.....                                                                           | 45 |
| Tabela 6: Nomenclatura dos conjuntos e termos <i>Fuzzy</i> para Condução Racional da Aeração .                                                            | 56 |
| Tabela 7: Mapa de regras para a condução racional da aeração .....                                                                                        | 57 |
| Tabela 8: Resultado comparativo entre a análise gráfica da condução racional da aeração e a<br>resposta apresentada pelo sistema de controle CICLONE..... | 61 |
| Tabela 9: Resultado da <i>defuzzificação</i> apresentada pelo sistema de controle CICLONE.....                                                            | 63 |
| Tabela 10: Custo de desenvolvimento e instalação do sistema de controle automático da<br>aeração CICLONE .....                                            | 65 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Interpretação do grau de pertinência .....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 7  |
| Figura 2: Modelagem da incerteza .....                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 9  |
| Figura 3: Variáveis lingüísticas e seus respectivos valores .....                                                                                                                                                                                                                                                       | 10 |
| Figura 4: Automação de um processo de manobra.....                                                                                                                                                                                                                                                                      | 11 |
| Figura 5: Condições: Posição do veículo, Orientação e Ângulo de esterçamento .....                                                                                                                                                                                                                                      | 12 |
| Figura 6: Variáveis e termos lingüísticos para a posição do veículo – $x$ (m) .....                                                                                                                                                                                                                                     | 14 |
| Figura 7: Variáveis e termos lingüísticos para a orientação do veículo – $\beta$ ( $^{\circ}$ ) .....                                                                                                                                                                                                                   | 14 |
| Figura 8: Variáveis e termos lingüísticos para ângulo de esterçamento do veículo – $\varphi$ ( $^{\circ}$ ).....                                                                                                                                                                                                        | 14 |
| Figura 9: Estrutura completa de um controlador <i>Fuzzy</i> .....                                                                                                                                                                                                                                                       | 16 |
| Figura 10: <i>Fuzzificação</i> para a posição do veículo $x = 5,2$ m.....                                                                                                                                                                                                                                               | 17 |
| Figura 11: <i>Fuzzificação</i> para a orientação do veículo $\beta = 65^{\circ}$ .....                                                                                                                                                                                                                                  | 18 |
| Figura 12: <i>Defuzzificação</i> de acordo com o Centro das Áreas (CoA).....                                                                                                                                                                                                                                            | 22 |
| Figura 13: <i>Defuzzificação</i> de acordo com o Centro de Máximos (CoM).....                                                                                                                                                                                                                                           | 23 |
| Figura 14: Resumo do processo de inferência <i>Fuzzy</i> para o controle de manobra.....                                                                                                                                                                                                                                | 24 |
| Figura 15: Condições da massa de grãos e migração do ar e da umidade .....                                                                                                                                                                                                                                              | 29 |
| Figura 16: Sensor de temperatura LM335 (a) e configuração típica de instalação (b).....                                                                                                                                                                                                                                 | 34 |
| Figura 17: Conversor analógico digital MCP3208 – (a) formato, (b) pinagem e (c) diagrama de blocos .....                                                                                                                                                                                                                | 34 |
| Figura 18: Multiplexador/Demultiplexador CD4051B – (a) formato, (b) pinagem e (c) diagrama de blocos .....                                                                                                                                                                                                              | 35 |
| Figura 19: Sensor de temperatura e umidade do ar SHT1x/SHT7x – (a) formato, (b) pinagem e (c) diagrama de blocos .....                                                                                                                                                                                                  | 36 |
| Figura 20: Esquema básico do funcionamento de porta paralela .....                                                                                                                                                                                                                                                      | 38 |
| Figura 21: Principais componentes do sistema de aquisição.....                                                                                                                                                                                                                                                          | 39 |
| Figura 22: Laboratório de Ensaios em Secagem e Armazenamento (LESA).....                                                                                                                                                                                                                                                | 41 |
| Figura 23: Instrumentação do Silo de armazenamento 1. (a) Silo de armazenamento utilizado para teste, (b) Detalhes dos sensores do plenum e da camada mais baixa dos grãos, (c) Detalhes dos sensores da exaustão e da camada superior dos grãos e (d) Detalhes dos sensores das camadas intermediárias dos grãos ..... | 42 |

|                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 24: Planta Baixa do silo experimental usado para os testes do sistema .....                          | 43 |
| Figura 25: Detalhamento esquemático dos cabos termométricos e sensores de temperatura ...                   | 44 |
| Figura 26: Componentes do cabo termométrico para monitoramento das condições de<br>temperatura do silo..... | 45 |
| Figura 27: Conjunto do sensor termo-higrômetro para monitoramento das condições do ar<br>ambiente .....     | 46 |
| Figura 28: Placa de aquisição de dados .....                                                                | 46 |
| Figura 29: Interface de utilização do Controlador <i>Fuzzy</i> para condução racional da aeração...         | 47 |
| Figura 30: Sistema de aquisição de informações.....                                                         | 49 |
| Figura 31: Diagrama esquemático do sistema de aquisição no programa <i>Multisim 9</i> .....                 | 50 |
| Figura 32: Projeto da placa de circuito impresso no programa <i>Ultiboard 9</i> .....                       | 51 |
| Figura 33: Placa de aquisição de dados CICLONE.....                                                         | 52 |
| Figura 34: Interface de utilização do Controlador <i>Fuzzy</i> para condução racional da aeração...         | 52 |
| Figura 35: Diagrama da condução racional da aeração .....                                                   | 53 |
| Figura 36: Condições: Circunstância 1, Circunstância 2 e Fato .....                                         | 54 |
| Figura 37: Conjuntos <i>Fuzzy</i> para condução racional da aeração .....                                   | 55 |
| Figura 38: Estrutura completa do controlador <i>Fuzzy</i> para condução da aeração.....                     | 59 |
| Figura 39: Aplicação da “defuzzificação” na condução racional da aeração .....                              | 60 |
| Figura 40: Pontos discrepantes entre a análise gráfica e a saída do sistema de controle.....                | 62 |
| Figura 41: Representação esquemática de 4 situações aleatórias de condução da aeração .....                 | 63 |

## LISTA DE SIGLAS

|        |                                                         |
|--------|---------------------------------------------------------|
| ABNT   | Associação Brasileira de Normas Técnicas                |
| AWG    | American wire gauge                                     |
| CoA    | Centro das Áreas                                        |
| CoG    | Centro de Gravidade                                     |
| CoM    | Centro de Máximo                                        |
| DAQ    | Data Acquisition System                                 |
| FIS    | Fuzzy Inference System                                  |
| IDE    | Integrated Development Environment                      |
| Kbps   | Quilo bits por segundo                                  |
| LED    | Light Emitting Diode                                    |
| LPT    | Line Printer Terminal                                   |
| OGM    | Organismo Geneticamente Modificado                      |
| PCI    | Peripheral Component Interconnect                       |
| PCMCIA | Personal Computer Memory Card International Association |
| PDIP   | Plastic Dual Inline Package                             |
| pH     | Potencial Hidrogeniônico                                |
| RAD    | Rapid Application Development                           |
| RAM    | Random Access Memory                                    |
| SPI    | Serial Peripheral Interface                             |
| TTL    | Transistor-Transistor Logic                             |
| USB    | Universal Serial Bus                                    |
| UTP    | Unshielded Twisted Par                                  |

## 1 RESUMO

O Brasil tem dificuldade para armazenar excedentes de produção de grãos visando um melhor momento de comercialização. O uso intensivo da mecanização nos processos de produção diminuiu a duração da operação de colheita e aumentou a produtividade, porém, apenas cerca de 9% das propriedades rurais possuem capacidade de armazenagem. Para evitar uma crise ainda maior no setor, o governo federal na gestão 2003-2006 implementou uma nova política de investimentos para a armazenagem de produtos agropecuários incentivando as atividades armazenadoras, principalmente dentro das propriedades, permitindo assim, a exploração de um novo mercado formado por pequenos e médios produtores com unidades de armazenamento próprias. Desta forma, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver um sistema automático de baixo custo para aeração de grãos de milho, utilizando o modelo matemático baseado na Teoria *Fuzzy*, visando atender as necessidades de pequenos e médios agricultores, tendo em vista critérios técnicos, energéticos e econômicos. Para tanto, foi desenvolvido um equipamento eletrônico responsável pela aquisição dos dados ambientais necessários ao controle do processo de aeração de grãos de milho e um programa de computador responsável pelo processamento, controle e armazenamento dos dados coletados pelo sistema de aquisição de dados criado. O sistema como um todo tem por finalidade conduzir a aeração de forma racional, determinando o tempo de aeração necessário, com a conseqüente redução do consumo de energia elétrica. Os

resultados obtidos mostraram que o sistema desenvolvido baseado na Teoria *Fuzzy* mostrou-se eficiente e confiável na tarefa de controle da aeração. Também foi possível verificar que em relação aos sistemas de aeração já existentes no mercado, a nova proposta de desenvolvimento mostrou-se adequada às condições preestabelecidas de se criar um sistema de baixo custo com confiabilidade e robustez.

---

**Palavras-Chave:** lógica *Fuzzy*, controlador *Fuzzy*, inteligência artificial, sistema computacional.

**EXPERT SYSTEM FOR AUTOMATION OF THE MAIZE GRAINS AERATION PROCESS IN SMALL PROPERTIES**, Botucatu, 2007. 84p. Tese (Doutorado em agronomia – Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu - SP.

**Author:** Ariangelo Hauer Dias

**Adviser:** Marco Antonio Martin Biaggioni

**Co-Adviser:** Luiz Francisco da Cruz

## 2 SUMMARY

Brazil has difficulty to store production excesses waiting for a better moment for commercialization. The intensive use of mechanization, in the processes of grains production, reduces the harvest duration and increases the productivity, however, about only 9% of the farms have storage capacity. To prevent a bigger crisis in the sector, the government implemented a new politics of investments for the farming products storage stimulating the storing activities, mainly inside of the farms, allowing the exploration of a new market formed by the small and mediums producers with storage units in their own farms. In this way, the present work has the objective to develop a low cost automatic system for maize grains aeration, using the mathematical model based in the Fuzzy Theory, aiming at to fill small and mediums producers necessities, observing technician, energetic and economic criteria. In this way, was developed an electronic equipment for the data acquisition to collect the ambient data to the control of the maize grains aeration process and a computer program for processing and control the data collected for the acquisition system. The system will be able to lead the aeration of rational form determining the necessary aeration period allowing the reduction of the electric energy consumption. The results had shown the model of the aeration control based on the Fuzzy Theory revealed efficient and trustworthy in the task of aeration control. Also, it was possible to observe that in relation to the existing aeration systems already in the market the new proposal of development revealed adequate to the conditions preset of to create a low coast system, however with trustworthiness and robustness.

---

**Keywords:** Fuzzy logic, Fuzzy control, artificial intelligence, computational system.

### 3 INTRODUÇÃO

Aeração é atualmente a técnica mais utilizada para melhorar as condições de secagem e armazenamento de grãos. Os conjuntos que compõem um sistema de aeração prevêm a necessidade da distribuição uniforme do ar através da massa de grãos, de tal forma que a mesma seja aerada de forma homogênea.

A aeração é dependente da temperatura e teor de água do grão e da temperatura e umidade relativa do ar externo. No monitoramento da temperatura da massa de grãos tem-se uma rede de sensores de temperatura, dispostos de forma regular nas células de armazenamento, o mesmo ocorrendo no monitoramento do ambiente externo.

Nas propriedades rurais, a operação de secagem e manutenção do armazenamento pode ser realizada com menos danos ao produto. Além da melhor qualidade dos grãos, a secagem e armazenagem na própria propriedade facilita a obtenção do certificado de origem do produto (rastreabilidade), pois, com o advento de produtos orgânicos, não-orgânicos e organismos geneticamente modificados (OGM), sua identificação e separação fazem-se necessárias. Produtos com características diferentes devem ser separados e identificados individualmente, possibilitando a qualquer momento rastrear sua origem.

Outra preocupação dos produtores, principalmente dos pequenos e médios, é o consumo de energia elétrica do processo de aeração. O preço elevado da energia elétrica torna-se um dos principais responsáveis em agregar custo ao produto final. Em função

disto, são bem vindos esforços em desenvolvimento de tecnologia para sistemas de aeração em silos com o objetivo da racionalização do consumo de energia elétrica.

Na década de 1960, Lotfi. A. Zadeh, trabalhando com inteligência artificial sugeriu uma teoria alternativa de conjuntos, onde a passagem do verdadeiro para o falso fosse gradual e não abrupta. Dessa forma foi possível vislumbrar a criação de soluções no nível teórico da interpretação de fenômenos não quantitativos buscando formas de inferência a partir de informações teóricas.

Analisando-se os resultados do estudo de Cruz (2001), e observando o grande leque de possibilidades de aplicação da teoria *Fuzzy*, observa-se que a aeração de grãos, em função de representar um sistema de ambiência controlada, pode ser objeto de estudo no que diz respeito à aplicação da teoria *Fuzzy*.

### **3.1.1 Objetivo geral**

O presente trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um sistema automático de aeração de grãos de milho, utilizando o modelo matemático baseado na Teoria *Fuzzy* visando atender as necessidades de pequenos e médios agricultores, tendo em vista critérios técnicos, energéticos e econômicos.

### **3.1.2 Objetivos específicos**

- a) Desenvolvimento de equipamento eletrônico responsável pela aquisição dos dados ambientais necessários ao controle do processo de aeração de grãos de milho com entradas para sensores de temperatura e umidade relativa do ar, e saídas para controle de conjuntos moto ventiladores.
- b) Desenvolvimento de um sistema de controle *fuzzy* baseado no modelo matemático de Cruz (2001). O programa de computador será responsável pelo armazenamento, processamento e controle dos dados coletados pelo sistema de aquisição de dados criado visando conduzir a aeração de forma racional, e controlar o tempo de aeração necessário para que certa massa de grãos atinja as condições adequadas de armazenamento.

## 4 REVISÃO DE LITERATURA

### 4.1 Lógica *Fuzzy*

#### 4.1.1 Princípios básicos

Segundo Zadeh (1965, 1987), a lógica *Fuzzy* tem como objetivo modelar de forma aproximada o raciocínio humano, imitando a habilidade de tomar decisões racionais em um ambiente de incerteza. De acordo com Mendel (1995), a lógica *Fuzzy* é uma técnica que fornece um mecanismo para manipular informações imprecisas. Graças a esta característica ela pode ser usada para controlar processos, substituindo as tarefas que eram realizadas manualmente baseadas na experiência do operador (especialista).

Esta experiência pode ser traduzida como sendo o controle lingüístico que controla a operação, pois é descrita de forma intuitiva pelo especialista criando um conjunto de regras de funcionamento para o controlador.

A base da lógica *Fuzzy* foi desenvolvida por Lotfi Zadeh na década de 1960 e sua principal característica é dar um tratamento matemático a certos termos lingüísticos subjetivos, como: “aproximadamente”, “em torno de”, “pouco baixo” dentre outros, diferente da lógica clássica, onde os predicados são termos exatos como: “igual a”, “maior que”, “ímpar” dentre outros. Para Feitosa (1992), 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* de um intervalo unitário. Segundo Barros (2002), este aspecto facilita a programação e armazenagem de conceitos não exatos em computadores, permitindo a realização de cálculos com informações imprecisas, a exemplo do que fazem os seres humanos. Um exemplo seria a afirmação de que o dobro de uma quantidade de “aproximadamente 5” seria “aproximadamente 10”.

Um termo lingüístico pode ser definido quantitativamente por um conjunto *Fuzzy* e avaliado por uma função de pertinência. A função de pertinência, como o próprio nome sugere, define o grau de associação entre a expressão lingüística e o valor real da grandeza. Na Figura 1, é apresentado um exemplo deste conceito, onde se observa que, para um valor definido linguisticamente como sendo “Médio” e representado matematicamente entre as grandezas de 0 a 50, é possível considerar, que para o valor 25 temos um grau de pertinência de 1 ao conjunto *Fuzzy* denominado lingüisticamente de “Médio” (a), ao passo que, para o valor 30 temos um grau de pertinência de 0,80 para o conjunto “Médio” e 0,20 para o conjunto “Alto” (b). (BARROS, 2002)

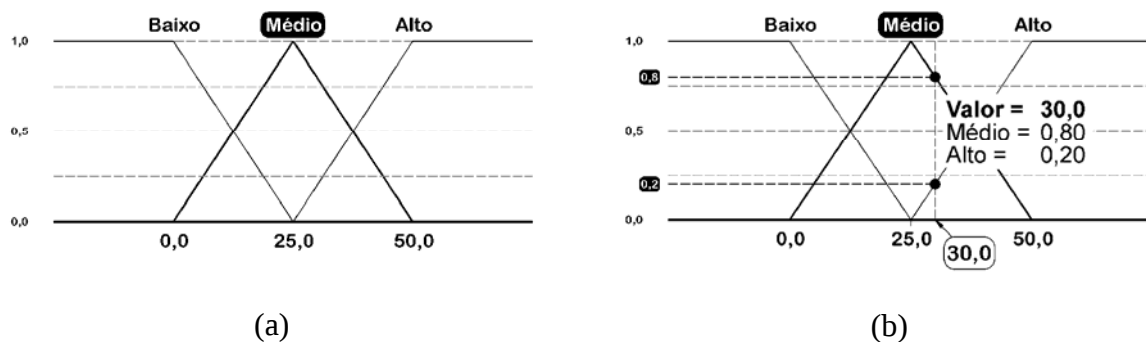


Figura 1: Interpretação do grau de pertinência

Especialistas em programação, como Tanaka e Mizumoto (1974), consideraram a lógica *Fuzzy*, no que diz respeito aos modelos matemáticos, muito mais adequada à programação, sugerindo sistemas computacionais *Fuzzy* de fácil entendimento, capazes de serem usados em várias situações reais. Estas afirmações são confirmadas por Chang (1974), que também trabalhou com interpretação e execução de programas *Fuzzy*, os quais traduzem de maneira mais real as simulações de fenômenos cotidianos. De uma forma geral, os programas *Fuzzy* são de fácil execução e suas etapas são de simples compreensão.

A seguir é apresentada uma compilação dos principais elementos que compõem um controlador *Fuzzy*, utilizando como referência, para o detalhamento e especificação do funcionamento da lógica *Fuzzy*, os exemplos e conceitos teóricos de National Instruments (1997), Yen et al. (1995) e Zimmermann (1987 e 1996).

O primeiro ponto a ser considerado é o controle lingüístico, que é responsável pela tradução do conhecimento de um especialista humano, o qual pode descrever intuitivamente e de forma geral uma situação real, transformando as regras de funcionamento do processo em um controlador *Fuzzy*. Ao se aplicar conceitos da lógica *Fuzzy*, há três tipos diferentes de incerteza a serem consideradas: a estocástica, a informal e a lingüística.

- A estocástica é o grau de incerteza da ocorrência de um determinado evento. O evento propriamente dito é bem definido e a incerteza estocástica não está relacionada à quando o evento ocorre. Normalmente, este tipo de incerteza, é usado na descrição de fenômenos com um grande número de possibilidades.
- A incerteza informal resulta de uma falta de informação e do conhecimento sobre uma situação.
- A incerteza lingüística resulta da imprecisão do método lingüístico, pois descreve categorias subjetivas com significados que dependem do contexto de sua utilização.

#### **4.1.2 Modelagem lingüística das incertezas**

A modelagem dos conjuntos *Fuzzy* depende diretamente do nível de incerteza do sistema ou situação a ser analisada pois, freqüentemente, existe a necessidade de tomada de decisões apoiados na imprecisão ou em informações subjetivas sobre um determinado assunto. Sempre que este tipo de situação ocorre, a lógica *Fuzzy* torna-se uma ótima ferramenta para a solução do problema.

Considerando o caso de um médico que atende a um paciente supostamente febril, é possível analisar o diagnóstico de duas formas:

|                |                                                                                   |                                                                                                                                                                                                           |
|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 <sup>a</sup> |  | Partindo-se da informação de que um ser humano encontra-se no estado febril a partir de 36,5 °C, é possível identificar este sintoma quando observamos a área considerada nebulosa na ilustração ao lado. |
| 2 <sup>a</sup> |  | Usando o limite de situação de febre como sendo 37 °C, se um paciente tiver os mesmos 36,5 °C do 1º caso, o mesmo será diagnosticado como sem febre.                                                      |

A representação matemática das situações acima pode ser observada nos gráficos mostrados na Figura 2.

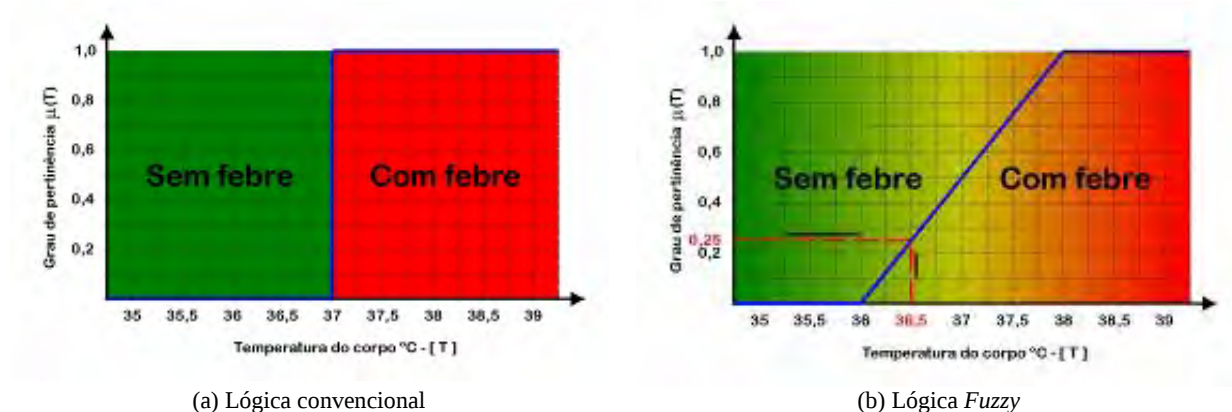


Figura 2: Modelagem da incerteza

A interpretação do resultado da Figura 2 (a) mostra que a situação apresentada não pode ser modelada satisfatoriamente usando a lógica convencional porque o paciente com uma temperatura corporal de 36,5 °C não cumpre o critério de estar “com febre”. Em contra partida, observando-se a Figura 2 (b) verifica-se que o valor de 36,5 °C demonstra que o paciente encontra-se em estado febril. Lingüisticamente tem-se, que o paciente está com uma “febre leve”, ou com “pouca febre”, ou ainda, aumentando a subjetividade do diagnóstico, que o mesmo está com uma “febre fraca”, pois o grau de pertinência  $\mu(T)$  é de 0,25.

Esta diferença de interpretação dos estados possíveis para o diagnóstico da situação de estar com febre, constitui o que se chama de sistema de variáveis lingüísticas. Uma variável lingüística é usada para combinar múltiplas categorias subjetivas que pertencem a um mesmo contexto. No exemplo mostrado na Figura 2 (b), são consideradas duas situações: “com febre” e “sem febre”, porém para representar melhor o problema é possível subdividir em três situações: “Sem febre”, “Febril” e “Febre alta”. Esta subdivisão permite analisar a incerteza separada por categorias de temperatura corporal, as quais são chamadas de termos lingüísticos e representam os possíveis valores que serão atribuídos as variáveis lingüísticas. Cada termo lingüístico é representado por um conjunto *Fuzzy* definido por uma função de pertinência  $\mu(T)$ . Na Figura 3, observa-se a transformação de um valor numérico, por exemplo, 36,5 °C, em sua descrição lingüística, ou seja, o paciente é “Febril”.

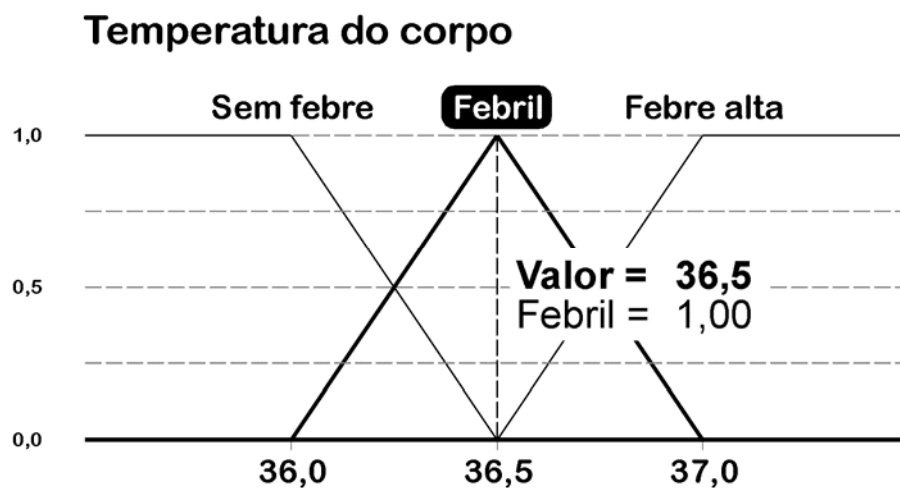


Figura 3: Variáveis lingüísticas e seus respectivos valores

Porém, o mais importante que pode ser observado é o fato de que existem regiões de sobreposição de termos lingüísticos, no intervalo de 36,0 até 36,5 °C é possível considerar o paciente como “Febril” ou “Sem febre”. A conclusão sobre o diagnóstico ficará a cargo da interpretação do valor do grau de pertinência  $\mu(T)$  de cada um dos termos lingüísticos. Estas sobreposições são especialmente importantes ao se utilizar de variáveis lingüísticas para a modelagem de sistemas de engenharia aplicados a controles automáticos, pois livra estes de limites fixos previamente estabelecidos em função da análise aplicando a lógica convencional.

### 4.1.3 Sistemas baseados em regras

Um outro conceito básico da lógica *Fuzzy* envolve processos de tomada de decisão baseados na interpretação de regras. Uma descrição matemática detalhada e precisa não é sempre necessária para a operação ideal de um processo de engenharia, ou seja, os operadores humanos são plenamente capazes de controlar situações complexas de uma planta industrial, sem necessariamente terem conhecimento sobre as equações diferenciais que regem o processo. Seu conhecimento a respeito da engenharia do processo está em grande parte disponível em um formulário lingüístico, tal como: "se a temperatura do líquido estiver morna e seu pH for demasiado elevado, então ajuste a quantidade de água a um nível mais elevado".

Graças a esta não linearidade dos parâmetros de operação e das constantes de tempo que são difíceis de determinar, é frequentemente impossível para um gerenciador de controle desenvolver um modelo matemático para o sistema. Com a lógica *Fuzzy* a representação lingüística do conhecimento de engenharia é usada para a execução de uma estratégia de controle. Suponha que se deseje automatizar o processo de manobra de um caminhão de um ponto inicial arbitrário até uma rampa de carregamento. O caminhão deve se locomover em uma velocidade baixa e constante e parar imediatamente após estar na rampa de carregamento. Um operador humano é capaz de controlar o caminhão constantemente avaliando a situação atual da movimentação definida, principalmente, pela distância da posição do alvo e da orientação do caminhão, para determinar o ângulo de esterçamento correto. Na Figura 4 é possível observar o esquema do processo de manobra.

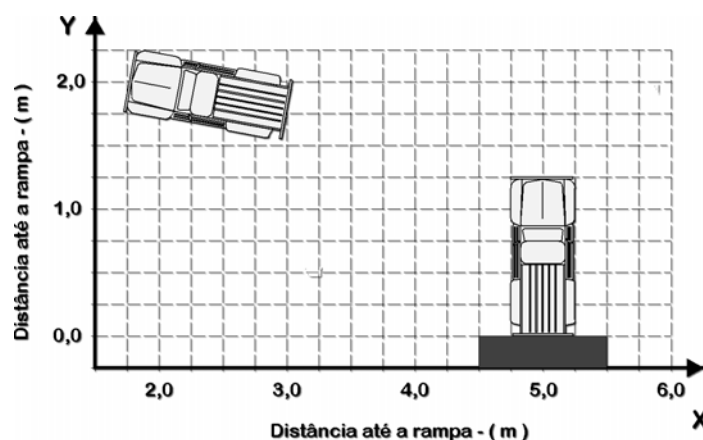


Figura 4: Automação de um processo de manobra

Para automatizar o controle de manobra do caminhão, um sensor ultrassônico de distância monitora a posição do caminhão no sentido  $x$ , e um compasso eletrônico monitora a orientação do caminhão. Cada situação de manobra é identificada pelo menos por duas circunstâncias: a primeira descreve a posição  $x$  do veículo da rampa de carregamento, e a segunda descreve o ângulo  $\beta$  que o veículo forma em relação a rampa de carregamento. Estas duas circunstâncias devem ser combinadas com o conectivo lógico E, representando o fato de que ambas as circunstâncias devem ser válidas para uma respectiva situação de manobra.

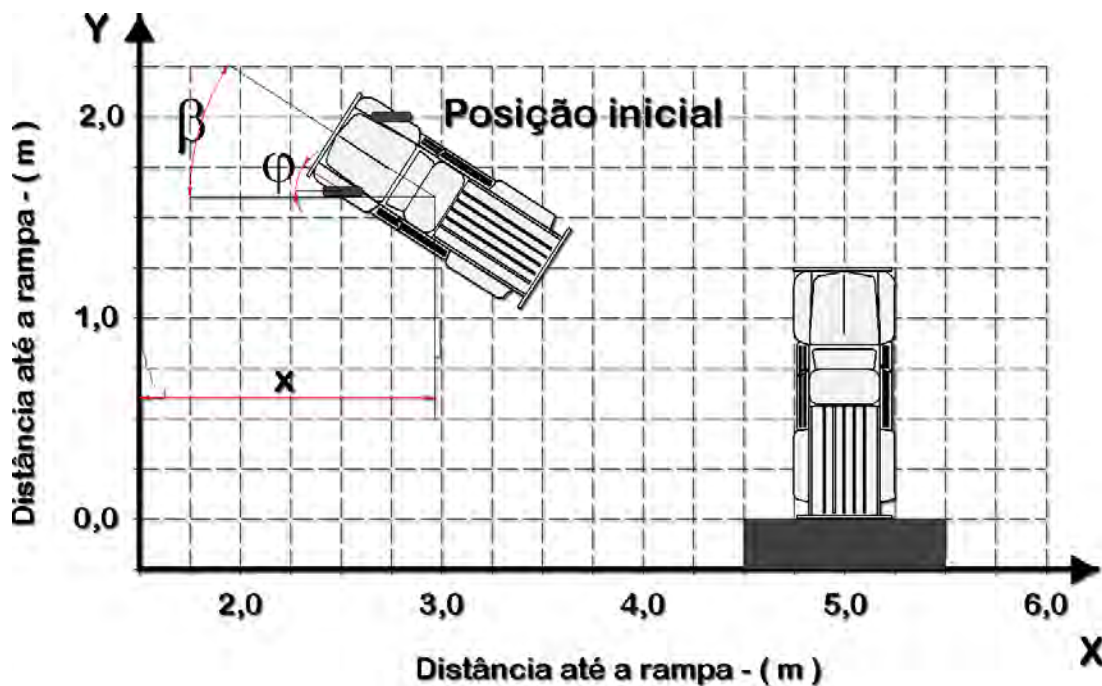


Figura 5: Condições: Posição do veículo, Orientação e Ângulo de esterçamento

A situação mostrada na Figura 5 descreve uma posição do veículo à esquerda do centro do alvo com uma orientação anti-horária para  $\beta$ , e um ângulo de esterçamento  $\phi$  com a roda de manobra. Uma estratégia de controle pode ser definida usando-se regras “SE” – “ENTÃO”, tal como o seguinte:

SE < situação > ENTÃO < ação >

Esta regra define a ação necessária (conclusão) para uma determinada situação (circunstância).

Solicitando a um especialista um conselho sobre como prosseguir na manobra do veículo até a posição do alvo, é possível determinar algumas regras “SE” – “ENTÃO” mostradas na Tabela 1.

Tabela 1: Regras básicas para manobra de veículos

| REGRA      | SE                                                     | E                                                   | ENTÃO                                                                   |
|------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| Situação 1 | Posição do veículo $x$ é a esquerda do centro do alvo. | A orientação do veículo $\beta$ é pouco a esquerda. | Ajuste o ângulo de esterçamento $\varphi$ para um pouco a direita.      |
| Situação 2 | Posição do veículo $x$ é no centro do alvo.            | A orientação do veículo $\beta$ é pouco a esquerda. | Ajuste o ângulo de esterçamento $\varphi$ para um pouco a esquerda.     |
| Situação 3 | Posição do veículo $x$ é a esquerda do centro do alvo. | A orientação do veículo $\beta$ é neutra            | Ajuste o ângulo de esterçamento $\varphi$ para mediantemente a direita. |
| Situação 4 | Posição do veículo $x$ é no centro do alvo.            | A orientação do veículo $\beta$ é neutra            | Ajuste o ângulo de esterçamento $\varphi$ para a posição neutra.        |

As condições de cada regra são compostas de termos lingüísticos incertos, tais como, “a esquerda do centro do alvo”, “pouco a esquerda”, e assim por diante. Mesmo a conclusão de cada regra contém fatos vagos e imprecisos tais como: “posição neutra”, “mediamente a direita”, etc. Isto ocorre porque não há nenhuma definição precisa das palavras usadas nas regras acima e nenhuma maneira de executá-las diretamente como regras “SE” – “ENTÃO” de uma linguagem de programação convencional.

A solução para o problema é utilizar uma estratégia lingüística para o controle usando a lógica *Fuzzy*, que é capaz de modelar fatos lingüísticos incertos como “a esquerda do centro do alvo” ou “febre alta”, com conjuntos *Fuzzy*. Para o exemplo, a posição  $x$  do veículo e a orientação  $\beta$  do veículo são variáveis de entrada, e o ângulo de esterçamento  $\varphi$  é uma variável de saída. Uma variável lingüística é composta de um número de termos lingüísticos que descrevem as interpretações lingüísticas das diferentes características do que está sendo modelado, bem como as respectivas funções de pertinências  $\mu(x)$ . As Figuras 6, 7 e 8 mostram as funções de pertinência para as variáveis lingüísticas de entrada e saída do controle de manobra do veículo.

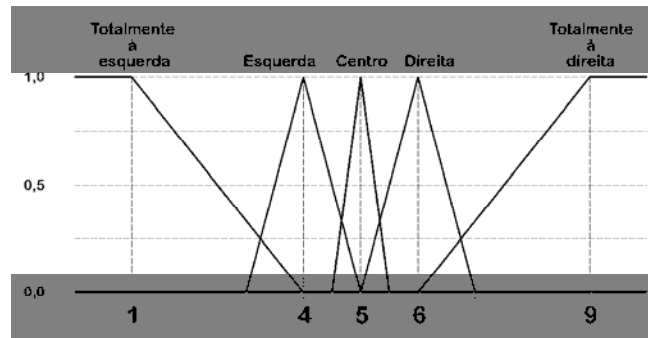


Figura 6: Variáveis e termos lingüísticos para a posição do veículo –  $x$  (m)

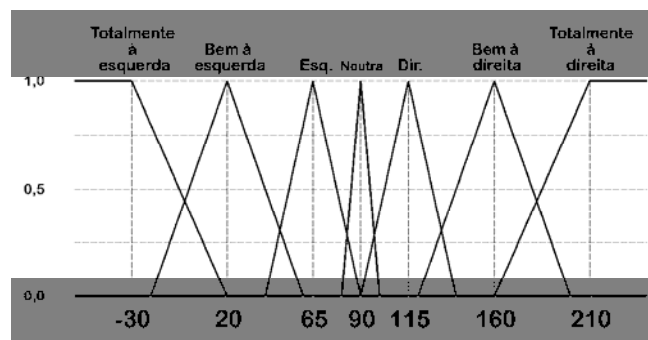


Figura 7: Variáveis e termos lingüísticos para a orientação do veículo –  $\beta$  (°)

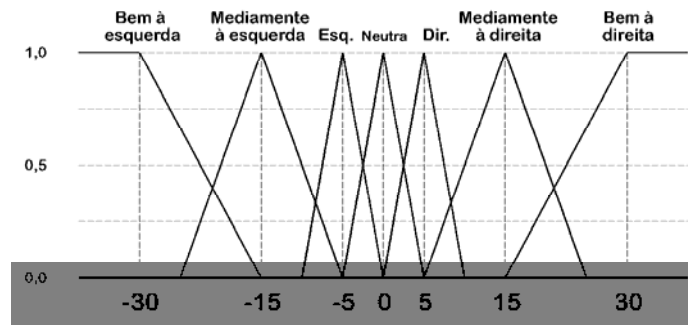


Figura 8: Variáveis e termos lingüísticos para ângulo de esterçamento do veículo –  $\phi$  (°)

Analisando a regra abaixo da estratégia lingüística do controle de manobra, temos:

SE a posição  $x$  do veículo for centro E a orientação do veículo  $\beta$  for neutra  
 ENTÃO ajustar o ângulo de esterçamento  $\phi$  para neutro

Esta condição é composta do termo lingüístico centro da variável lingüística, posição  $x$  do veículo, e o termo lingüístico neutra, da variável lingüística, orientação  $\beta$  do veículo, combinados pelo operador lógico E. Como são cinco termos lingüísticos para a posição do veículo  $x$  e sete para a orientação do veículo  $\beta$  existirão trinta e cinco regras diferentes disponíveis para dar forma a uma base consistente de regras de operação do controle de manobras. Como existem somente duas variáveis de entrada neste caso, a base completa de regras pode ser representada por uma matriz, conhecida por mapa de regras que é mostrada na Tabela 2.

Tabela 2: Base completa de regras lingüísticas – Mapa de regras

| E                                   |                       | Posição do veículo – $x$ (m) |                     |                     |                     |                      |
|-------------------------------------|-----------------------|------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
|                                     |                       | Totalmente à esquerda        | Esquerda            | Centro              | Direita             | Totalmente à direita |
| Orientação do veículo – $\beta$ (°) | Totalmente à esquerda | Esquerda                     | Mediamente esquerda | Mediamente esquerda | Bem esquerda        | Bem esquerda         |
|                                     | Bem à esquerda        | Direita                      | Esquerda            | Mediamente esquerda | Bem esquerda        | Bem esquerda         |
|                                     | Esquerda              | Mediamente direita           | Direita             | Esquerda            | Mediamente esquerda | Bem esquerda         |
|                                     | Neutra                | Mediamente direita           | Mediamente direita  | Neutro              | Mediamente esquerda | Mediamente esquerda  |
|                                     | Direita               | Bem direita                  | Mediamente direita  | Direita             | Esquerda            | Mediamente esquerda  |
|                                     | Bem à direita         | Bem direita                  | Bem direita         | Mediamente direita  | Direita             | Esquerda             |
|                                     | Totalmente à direita  | Bem direita                  | Bem direita         | Mediamente direita  | Mediamente direita  | Esquerda             |

Cada combinação de uma coluna e de uma linha descreve uma determinada situação do controle de manobras, que representa a execução de uma determinada regra. A ação que será executada pelo controle é dada pelo termo lingüístico da interseção da coluna e com linha. Como um exemplo, a seguinte regra é destacada na Tabela 2:

**SE** a posição  $x$  do veículo for esquerda **E** a orientação do veículo  $\beta$  for bem à esquerda  
**ENTÃO** ajustar o ângulo de esterçamento  $\phi$  para esquerda

#### 4.1.4 Estrutura do controlador *Fuzzy*

A estrutura de um controlador *Fuzzy* é representada na Figura 9, onde medidas do ambiente (variáveis reais) passam por um processo de “*Fuzzyficação*” (fatos) a fim de serem representadas por variáveis e termos lingüísticos *Fuzzy*. Através de um sistema de inferência, a partir de uma base de regras, é produzido um valor de saída, representado por uma variável *Fuzzy* de saída (conclusões), o valor é então “defuzzificado” a fim de ser representado por um valor preciso a ser fornecido para o ambiente, definindo assim as variáveis de controle.

Um sistema de inferência *Fuzzy* é capaz de utilizar o conhecimento adquirido pelo especialista, armazenando informações essenciais na base de regras a ele associado e desenvolvendo o “raciocínio *Fuzzy*” para inferir o valor da saída correspondente. Para construir um sistema de inferência *Fuzzy* (FIS – *Fuzzy Inference System*) é necessário definir o número de conjuntos *Fuzzy*, os operadores lógicos e a base de conhecimento.



Figura 9: Estrutura completa de um controlador *Fuzzy*

Na interpretação dos dados mostrados na Figura 9, observa-se que na primeira etapa todas as variáveis reais (sinais de sensores) devem ser traduzidas em variáveis lingüísticas. Para o exemplo, uma posição medida  $x$  do veículo de 5 m deve ser traduzida para a variável lingüística “Posição do veículo” como sendo centro. Esta etapa é chamada *Fuzzificação* porque usa conjuntos *Fuzzy* responsáveis pela tradução de variáveis reais em variáveis lingüísticas. Uma vez, todas as variáveis reais traduzidas em seus valores lingüísticos correspondentes, a etapa de inferência *Fuzzy* é executada para gerar uma conclusão em função da base de regras que representa a estratégia do controle. O resultado desta etapa é um valor lingüístico para a variável de saída. Para o exemplo, o resultado lingüístico para o ajuste do ângulo de esterçamento  $\phi$  é o ângulo neutro. A etapa de *Defuzzificação* traduz o resultado lingüístico em um valor real que representa o valor atual da variável do controle, no caso tem-se um ângulo de esterçamento  $\phi$  de  $0^\circ$ .

Para se ter uma idéia mais detalhada do processo de *fuzzificação*, pode-se considerar a seguinte situação de manobra do veículo: posição do veículo  $x = 5,2$  m e orientação do veículo  $\beta = 65^\circ$ .

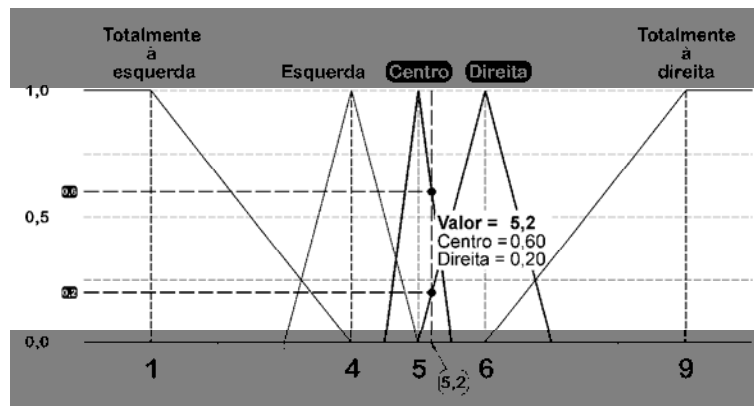


Figura 10: *Fuzzificação* para a posição do veículo  $x = 5,2$  m

Como observado na Figura 10, para o valor de posição do veículo  $x = 5,2$  m, temos os seguintes termos lingüísticos (Conjuntos *Fuzzy*):

| Posição $x$           | Grau de pertinência $\mu(x)$ |
|-----------------------|------------------------------|
| Totalmente à esquerda | 0,0                          |
| Esquerda              | 0,0                          |
| <b>Centro</b>         | <b>0,6</b>                   |
| <b>Direita</b>        | <b>0,2</b>                   |
| Totalmente à direita  | 0,0                          |

A posição atual do veículo de 5,2 m é traduzida no valor lingüístico  $\{0,0, 0,0, \mathbf{0,6}, \mathbf{0,2}, 0,0\}$ , que pode ser interpretado como manter a posição no centro, um pouco a direita.

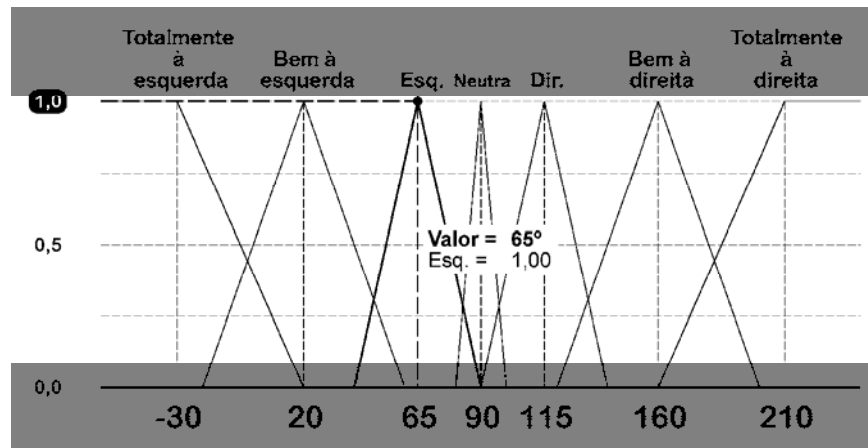


Figura 11: *Fuzzificação* para a orientação do veículo  $\beta = 65^\circ$

Como observado na Figura 11, para o valor da orientação do veículo  $\beta = 65^\circ$ , temos os seguintes termos lingüísticos (Conjuntos *Fuzzy*):

| Orientação do veículo $\beta$ | Grau de pertinência $\mu(\beta)$ |
|-------------------------------|----------------------------------|
| Tot. esquerda                 | 0,0                              |
| Bem Esq.                      | 0,0                              |
| <b>Esq.</b>                   | <b>1,0</b>                       |
| Neutra                        | 0,0                              |
| Dir.                          | 0,0                              |
| Bem Dir.                      | 0,0                              |
| Totalmente à direita          | 0,0                              |

A orientação atual do veículo de  $65^\circ$  é traduzida no valor lingüístico  $\{0,0, 0,0, \mathbf{1,0}, 0,0, 0,0, 0,0, 0,0\}$ , que pode ser interpretado como orientar o veículo à esquerda.

Depois que todos os valores reais das entradas são convertidos em valores lingüísticos, identificam-se todas as regras que se aplicam à situação da manobra. Estas regras são identificadas a fim de calcular os valores da variável de saída lingüística. A inferência *Fuzzy* possui duas etapas:

- Agregação: é a avaliação da circunstância de cada regra, ou seja, a análise da cláusula **SE**.
- Composição: é a avaliação da conclusão de cada regra, ou seja, a análise da cláusula **ENTÃO**.

No exemplo, nota-se que a cláusula **SE**, de cada regra, combina logicamente dois termos lingüísticos de diferentes variáveis lingüísticas com o conectivo **E**. Isto ocorre porque os termos lingüísticos utilizados representam as circunstâncias que são parcialmente verdadeiras. É importante esclarecer que o conectivo **E** utilizado aqui não tem o mesmo significado que o da lógica *booleana* convencional. Desta forma, é necessário definir novos operadores, para a lógica *Fuzzy*, que representem adequadamente as características dos operadores lógicos **E**, **OU** e **NÃO** da lógica *booleana* convencional.

Os três operadores usados na maioria de aplicações da lógica *Fuzzy* são definidos como mostrado na Tabela 3:

Tabela 3: Operadores para aplicação da lógica *Fuzzy*

| Operador                   | Definição                                    |
|----------------------------|----------------------------------------------|
| <i>Fuzzy E</i> = (f-E)     | A ( <b>f-E</b> ) B = $\min[\mu(A), \mu(B)]$  |
| <i>Fuzzy OU</i> = (f-OU)   | A ( <b>f-OR</b> ) B = $\max[\mu(A), \mu(B)]$ |
| <i>Fuzzy NÃO</i> = (f-NÃO) | ( <b>f-NÃO</b> ) A = $1 - \mu(A)$            |

Observa-se que estas definições concordam com os operadores lógicos usados na lógica *booleana*, a verificação através da tabela verdade de cada um deles produzirá resultados equivalentes ao dos operadores lógicos convencionais. O operador mínimo representa o conectivo **E**, e é aplicado na etapa de agregação para calcular um grau de verdade de cada regra para a condição **SE**, indicando assim, qual regra descreve adequadamente a situação atual do controle.

Na situação do exemplo, somente as regras apresentadas na Tabela 4 são descrições válidas da situação atual do controle. Estas regras são chamadas geralmente de regras ativas, todas as demais são chamadas inativas.

Tabela 4: Regras válidas para a situação do exemplo da manobra

| REGRAS ATIVAS (VÁLIDAS)                                       |                                                                                  |                                                                                                | E                                              |            |
|---------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|------------|
| (1) = SE                                                      | Posição do veículo $x$ é <u>centro</u><br>(grau de pertinência $\mu(x) = 0,6$ )  | A orientação do veículo $\beta$ é <u>esquerda</u><br>(grau de pertinência $\mu(\beta) = 1,0$ ) | $\min[\mu(x), \mu(\beta)]$<br>$\min[0,6, 1,0]$ | <b>0,6</b> |
| (2) = SE                                                      | Posição do veículo $x$ é <u>direita</u><br>(grau de pertinência $\mu(x) = 0,2$ ) | A orientação do veículo $\beta$ é <u>Esquerda</u><br>(grau de pertinência $\mu(\beta) = 1,0$ ) | $\min[\mu(x), \mu(\beta)]$<br>$\min[0,2, 1,0]$ | <b>0,2</b> |
| <b>ENTÃO</b>                                                  |                                                                                  |                                                                                                |                                                |            |
| Ajuste o ângulo de esterçamento $\phi$ para a <u>esquerda</u> |                                                                                  |                                                                                                |                                                |            |

Cada regra define uma ação (conclusão) a ser executada pela condição **ENTÃO**. O grau de verdade da ação é dado pelo grau de adequação da regra avaliada na solução da situação atual do controle. Este grau de adequação é o grau de pertinência da regra e é calculado na etapa de agregação como o grau de verdade desta circunstância para sua consideração na condição **SE**.

Neste caso, a regra indicada (1) terá como ação “Ajuste o ângulo de esterçamento  $\phi$  para a esquerda” com um grau de verdade de 0,6. Já a regra indicada (2) terá como resultado a ação “Ajuste o ângulo de esterçamento  $\phi$  para a mediamente esquerda” com um grau de verdade de 0,2. A conclusão resultante (ou a ação) deve ser composta pelas duas ações apontadas pela condição **ENTÃO**, considerando aquela que possuir o maior valor para o grau de verdade dentro das regras ativas, esta avaliação é feita dentro da etapa da composição.

A base completa de regras lingüísticas (Mapa de regras) é definida alternativamente, isto é, as regras são ligadas logicamente pela palavra **OU**. Isto ocorre porque as conclusões resultantes das regras são parcialmente verdadeiras, porém como já comentado, não se pode usar o operador **OU** da lógica *booleana* convencional para determinar a conclusão resultante. Na lógica *Fuzzy*, ao invés de se usar o operador lógico **OR** determinamos o máximo valor do grau de verdade, como apresentado na Tabela 3.

Para o exemplo, se tem duas regras que afirmam com graus diferentes de verdade duas ações diferentes a serem executadas. A regra indicada (1) sugere a ação “Ajuste o ângulo de esterçamento  $\phi$  para a esquerda” com um grau de verdade de 0,6, enquanto a regra indicada (2) afirma que a ação resultante é “Ajuste o ângulo de esterçamento  $\phi$  para a mediamente esquerda” com um grau de verdade de 0,2. Como estas duas regras apresentam-se relacionadas pelo conectivo **OU**, o resultado da inferência *Fuzzy* para o termo

lingüístico “ângulo de esterçamento  $\varphi$ ” é o valor de 0,6, que é o máximo valor para a comparação 0,6 e 0,2.

O resultado final da inferência *Fuzzy* para a variável lingüística “ângulo de esterçamento  $\varphi$ ” é mostrado a seguir:

| Ângulo de esterçamento $\varphi$ | Grau de verdade |
|----------------------------------|-----------------|
| Bem esquerda                     | 0,0             |
| <b>Mediamente esquerda</b>       | <b>0,2</b>      |
| <b>Esquerda</b>                  | <b>0,6</b>      |
| Neutra                           | 0,0             |
| Direita                          | 0,0             |
| Mediamente direita               | 0,0             |
| Bem direita                      | 0,0             |

Este tipo de inferência *Fuzzy* é chamado de inferência de Máximo-Mínimo. Em função de determinados procedimentos de otimização de sistemas *Fuzzy*, às vezes torna-se necessário a associação de pesos individuais a cada regra.

O processo de inferência *Fuzzy* resulta em um valor lingüístico para a variável de saída. Neste caso, é possível interpretar o valor lingüístico {0,0 , **0,2** , **0,6** , 0,0 , 0,0 , 0,0 , 0,0} como ainda “Mediamente a esquerda” ou apenas “Esquerda”. Para usar este valor lingüístico para ajustar o ângulo de esterçamento do volante, este deve ser traduzido em um valor (físico) real. Esta etapa é chamada de *defuzzificação*, conforme mostrado na Figura 9.

O relacionamento entre os valores lingüísticos e os valores reais correspondentes é dado sempre pelas definições da função de pertinência que descrevem os termos da variável de saída lingüística, já apresentados na Figura 8. No exemplo, obteve-se como resultado para a inferência *Fuzzy*, duas ações possíveis com graus de verdade diferentes de zero. É necessário então, combinar as duas ações, as quais são previamente definidas como conjuntos *Fuzzy*, e desta forma dar sentido ao valor real de solução, a qual deve encontrar a melhor combinação entre as duas conclusões diferentes. O método utilizado para calcular o melhor resultado é o método do Centro das Áreas (CoA), também conhecido como método do Centro de Gravidade (CoG).

Depois da aplicação do método de *defuzzificação*, todas as funções de pertinência que representam os termos lingüísticos da conclusão são truncadas no grau de verdade da regra a que o termo da conclusão pertence. As áreas sob a função resultante de todos os termos truncados são sobrepostas. O resultado é o centro geométrico desta área, como mostrado na Figura 12.

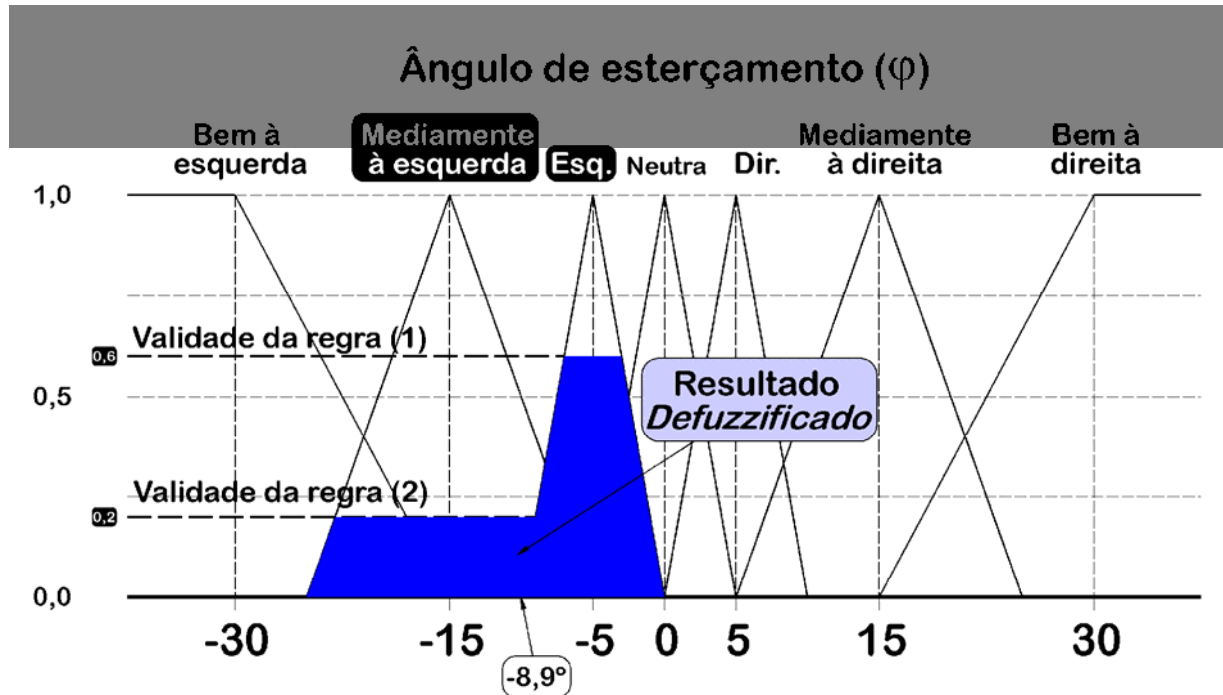


Figura 12: Defuzzificação de acordo com o Centro das Áreas (CoA)

Este método de *defuzzificação* requer muito esforço computacional em função da integração numérica necessária para calcular o centro da área.

Um segundo método de *defuzzificação* pode ser utilizado. Ele é chamado de Centro de Máximo (CoM), na primeira etapa deste método, determina-se o valor típico de cada termo na variável de saída lingüística. Na segunda etapa, calcula-se a melhor combinação entre eles de acordo com uma média ponderada dos valores típicos dos termos. A aproximação mais comum para determinar o valor típico de cada termo deve encontrar o máximo da respectiva função de pertinência.

Cada valor típico tem seu valor considerado mais significativo de acordo com o grau de verdade do termo lingüístico da ação. Então, o valor real da saída é

calculado por uma média aritmética ponderada entre os termos lingüísticos das ações possíveis e seus respectivos graus de verdade, conforme pode ser observado na Figura 13.

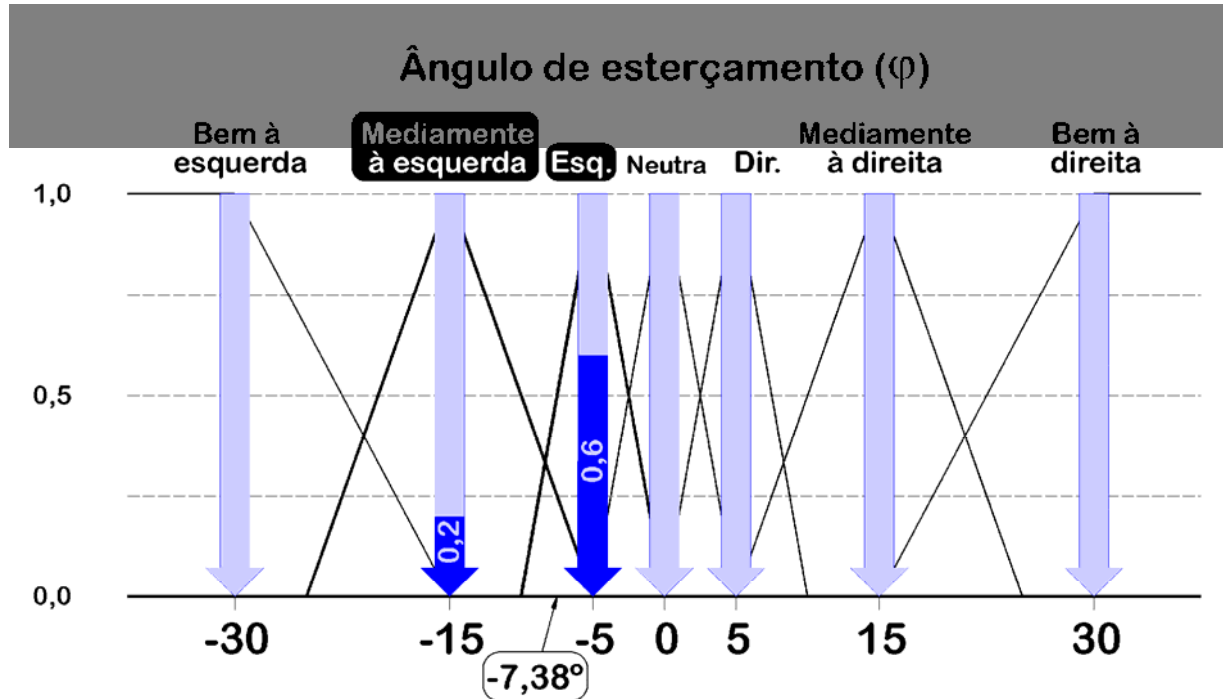
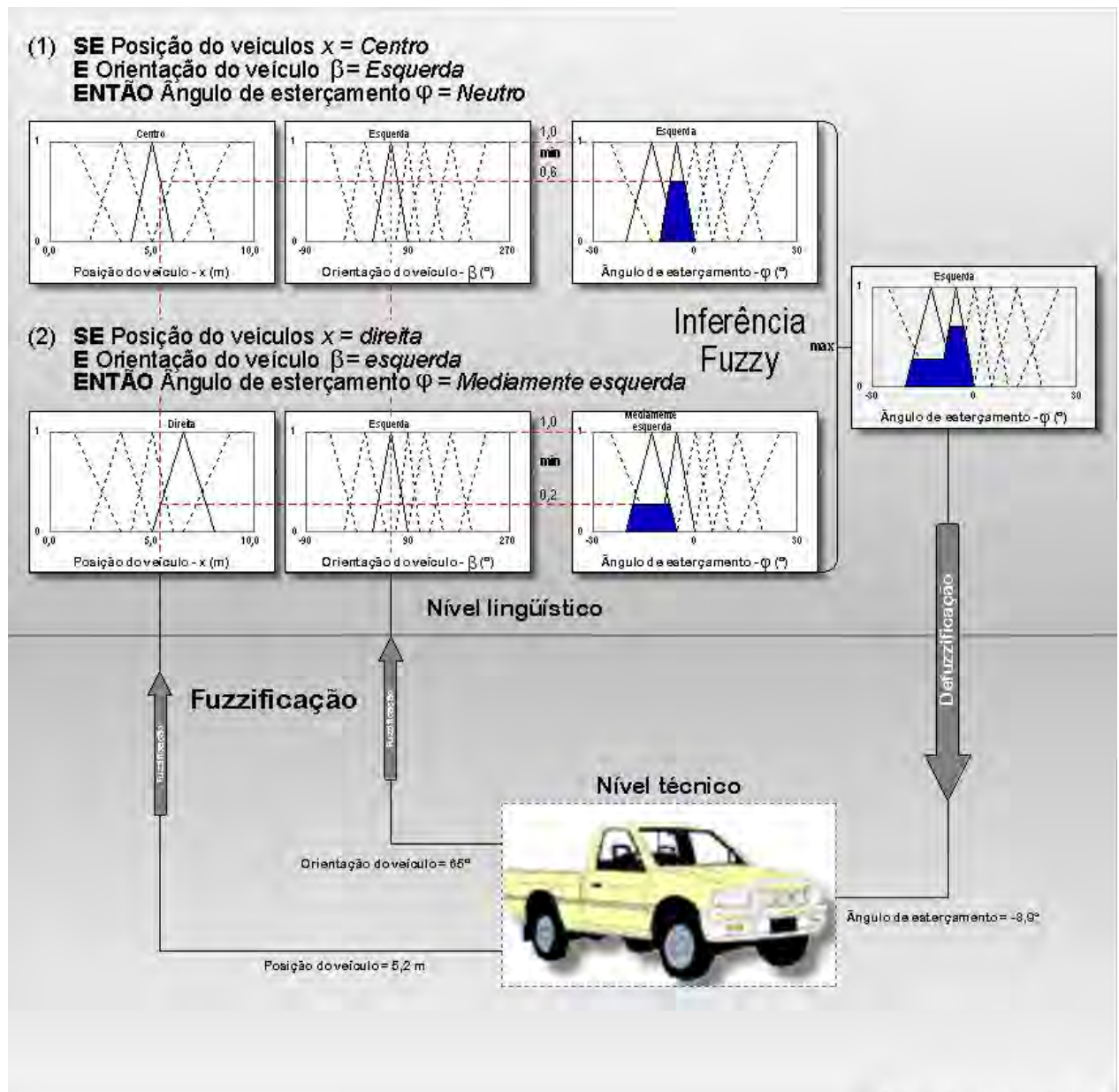


Figura 13: Defuzzificação de acordo com o Centro de Máximos (CoM)

Com ângulo de esterçamento  $\varphi_{(\text{Mediamente Esquerda})} = -15^\circ$  e ângulo de esterçamento  $\varphi_{(\text{Esquerda})} = -5^\circ$  como valores típicos dos respectivos termos lingüísticos, e com os valores do grau de verdade  $V_{(\text{regra } 1)} = 0,6$  e  $V_{(\text{regra } 2)} = 0,2$ , um dos resultados possíveis da defuzzificação é:

$$\varphi_{(\text{saída})} = \frac{\varphi_{(\text{Mediamente Esquerda})} * V_{(\text{regra } 2)} + \varphi_{(\text{Esquerda})} * V_{(\text{regra } 1)}}{V_{(\text{regra } 2)} + V_{(\text{regra } 1)}} = -7,38^\circ$$

O método de defuzzificação centro de máximo é idêntico ao método do centro de gravidade usando as funções de pertinência individualmente. A Figura 14 resume o processo Fuzzy de inferência para a situação de manobra descrita até agora (considerando o método CoA de defuzzificação).



Fonte: National Instruments (1997)

Figura 14: Resumo do processo de inferência *Fuzzy* para o controle de manobra

A análise da Figura 14 permite concluir que o sistema de inferência *Fuzzy* é um sistema que utiliza a teoria dos conjuntos *Fuzzy* para mapear entradas em saídas. A saída de um “modelo *Fuzzy*” se realiza através de seis passos, Knapp, (1998).

1º Determinação de um conjunto de regras *Fuzzy* (criação das regras);

- 2º *Fuzzificação* das entradas usando as funções de pertinência;
- 3º Combinação das entradas *fuzzificadas* em regras *Fuzzy* para estabelecer a condição de validação da regra;
- 4º Cálculo da parte conseqüente da regra;
- 5º Combinação das partes conseqüentes de todas as regras para obter a distribuição da saída;
- 6º E, finalmente, a *defuzzificação* da saída.

#### 4.1.5 Aplicações da teoria *Fuzzy*

Os pioneiros na utilização da lógica *Fuzzy* foram os japoneses, os quais adquiriram grande conhecimento de sua utilização e a fazem com frequência, aperfeiçoamentos nos aparelhos mais simples como os aspiradores de pó, os quais são controlados por micro controladores programados com algoritmos *Fuzzy* que interrogam sensores de pó. Outro exemplo simples que pode ser citado é o das máquinas de lavar Hitachi que usam controladores *Fuzzy* para controle de peso, verificação de tipo de tecido e detecção de sujeira, que automaticamente adapta os ciclos de lavagem para o uso otimizado de potência, água, e detergente.

O sistema *Fuzzy* não é utilizado apenas para facilitar a execução de tarefas cotidianas, mas também para diminuir gastos nas execuções de tarefas, como é o exemplo do ar condicionado industrial projetado pela Mitsubishi que utiliza vinte e cinco regras de aquecimento e vinte e cinco regras de resfriamento. Comparado com outros tipos de ar condicionado, o controlador *Fuzzy* aquece e esfria cinco vezes mais rápido, o que reduz o consumo de potência em 24%, sem contar que mantém a temperatura duas vezes mais estável e usa menos sensores.

A implementação da lógica *Fuzzy* vem crescendo cada dia mais, e nas mais diversas áreas, como no reconhecimento de caracteres, em sistemas óticos, robôs, helicópteros comandados por voz através de um robô, sistemas de elevadores e aterrissagem de naves espaciais. Este crescimento se deve a sua grande utilização e pequena limitação, além de exigir pouco investimento na sua implementação, o que melhora tanto para a indústria, que

diminui seus gastos, quanto para o cliente, que adquire um produto mais eficiente e que consome menos energia.

Atualmente existem muitas aplicações comerciais da lógica *Fuzzy*, por exemplo: um metrô em Sendai, Japão, usa um controlador *Fuzzy* pra controlar os vagões. Esse controlador supera os controladores convencionais e o controle humano por proporcionar uma viagem suave aos passageiros em todas as condições de terreno. Câmeras fotográficas e filmadoras usam lógica *Fuzzy* para ajustar os mecanismos de foco automático e eliminar os tremores causados pelas mãos. Alguns carros usam a lógica *Fuzzy* para diferentes aplicações de controle. A *Nissan* possui patentes em sistemas de freio, controle de transmissão e injetores de combustível. A *General Motors* também usa um sistema de transmissão que utiliza a lógica *Fuzzy*.

Um dos principais usos da teoria *Fuzzy*, na área da engenharia agrícola, é o controle de ambientes de alojamento e armazenamento de produtos e animais. Como o sucesso da produção de animais está diretamente relacionado ao manejo eficiente do ambiente em que os mesmos estão inseridos, torna-se necessário o desenvolvimento de dispositivos de controle capazes de gerenciarem de forma eficaz as condições de ambiência destes processos. Na maioria dos casos o controle do ambiente de alojamento é baseado em análises empíricas das medidas de temperatura e umidade relativa, porém, pesquisas apontam para a possibilidade de utilização de análises teóricas dessas medidas e, assim, estabelecer critérios objetivos nas decisões dos produtores utilizando-se a teoria *Fuzzy*, Amendola et al., (2004). O uso da teoria *Fuzzy* tem especial aplicação quando nas variáveis de controle são incorporadas respostas fisiológicas dos animais e agentes causadores de *stress* em função do ambiente, como, por exemplo, temperatura ambiente interferindo na resposta de temperatura corporal e produtividade.

A dificuldade de análise de grande volume de informações, referente às variáveis envolvidas na determinação de condições adequadas na construção de galpões para animais, é relatada na literatura nos trabalhos de pesquisa da área de Construções Rurais e Ambiência da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (FEAGRI/UNICAMP). Moura et al. (2004) analisaram o conforto térmico em edificações para frangos de corte, variando o uso de ventilação forçada e sombreamento lateral. Além disso, pesquisas com bovinos de leite, em áreas onde o conhecimento de especialistas fornece dados

importantes para a realização de tarefas, tais como a inseminação artificial, relatam a melhoria nos resultados quando se utiliza da teoria *Fuzzy*. (Firk et al., 2003).

Atividades, como pesagem de animais e dosagem de dietas utilizando a teoria *Fuzzy*, associada a um processo de tomada de decisão, permitem a criação de mais combinações de soluções possíveis, diminuindo tanto o processo de leitura, como a redução do custo. Cveticanin (2003) e Cadenas et al. (2005).

Lacey et al. (2000) também demonstraram a viabilidade de prever a temperatura corporal de aves em função de certo acréscimo de temperatura ambiente, utilizando a teoria *Fuzzy*. Os autores comentam que esse procedimento, apesar de apresentar validação limitada, proporciona grande potencial de reduzir o impacto dos efeitos fisiológicos negativos, uma vez que permite antecipar a tomada de decisão dos sistemas de climatização.

Gottschalk et al. (2003) descreveram a utilização de controladores de climatização em armazenamento de batatas utilizando a teoria *Fuzzy* visando a obtenção de condições apropriadas para a conservação da qualidade. Os autores afirmam que um controle convencionalmente projetado é de difícil adaptação para uma condição ótima de controle de qualidade. Entretanto, um controlador projetado com lógica *Fuzzy* é considerado como ideal para adaptar os parâmetros de controle e conseqüentemente melhorar a qualidade do produto.

Cellitto (2002) apresentou uma aplicação da lógica *Fuzzy* na indústria de processo contínuo. Essa técnica é discutida dentro do campo de conhecimentos da inteligência artificial, associada ao processo de tomada de decisões empresariais. O trabalho mostra uma rotina de tomada de decisão em um processo termoquímico na indústria do cimento conduzida por um sistema especialista.

Ruhoff et al. (2005) elaboraram uma proposta de zoneamento ambiental, para a Bacia do Arroio Grande no Rio Grande do Sul, partindo de um processo de variáveis ambientais (regionalização) utilizando a lógica *Fuzzy*. Com o estabelecimento dos fatores de importância (geologia, inclinação, solos e uso da terra), uma quadriculação numérica foi gerada em um espaço contínuo. Dentro desta perspectiva, o arroio foi classificado em cinco classes do risco ambiental, variando das áreas com risco baixo, moderado e áreas com risco elevado. Através disto foi possível estabelecer critérios da proteção ambiental a ser aplicada e a execução de estudos da gerência de recursos dos hídricos no arroio.

## 4.2 Aeração de grãos

### 4.2.1 Principais características da aeração

Durante o armazenamento de grãos, têm-se operações que devem ser realizadas para a adequada conservação do produto, uma delas é a aeração, que é o movimento forçado de ar através da massa de grãos, objetivando a diminuição e uniformização da temperatura, propiciando assim, condições favoráveis para a manutenção da qualidade, impedindo a migração da umidade e a formação de bolsas de calor.

Para Cloud e Morey (1979), a aeração é a prática de movimentar o ar através da massa de grãos armazenada, para desta forma, reduzir a taxa de deterioração do grão e assim, reduzir as perdas do armazenamento. Os danos causados pela atividade de insetos e de fungos estão relacionadas ao índice de umidade e à temperatura dos grãos armazenados. A aeração melhora sensivelmente as condições de armazenagem do grão mantendo um gradiente de temperatura pequeno e uniforme durante todo o armazenamento, reduzindo assim o desenvolvimento de fungos, a atividade de insetos e a migração da umidade.

Para Navarro e Calderon (1982), a aeração tem um objetivo final que é a melhoria das condições de armazenamento. Para os autores, isto pode ser conseguido movendo o ar com propriedades previamente conhecidas, criando assim, um micro clima novo capaz de manter os grãos armazenados livrando-os da conseqüente deterioração.

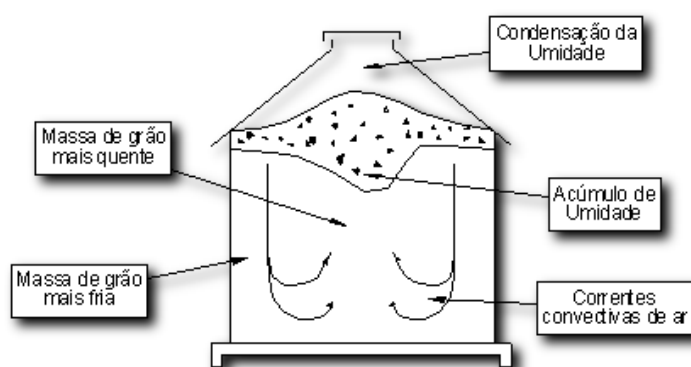
Os autores alertam que a aeração pode ter efeitos diferentes na massa de grãos armazenada, dependendo das propriedades do ar e na condição dos grãos armazenados. Conseqüentemente, antes de se operar o sistema é essencial prever o efeito que a aeração terá na massa de grãos. Esta previsão é baseada em dados climáticos disponíveis e na condição dos grãos. Sem este conhecimento, as melhorias nas condições de armazenamento, resultantes da aeração, não poderão ser antecipadas.

Desta forma, a aeração, por mais bem executada que seja, tem limites de eficiência, dependendo das condições de temperatura e umidade relativa do ar. A diferença de temperatura e umidade entre o grão e o ar pode gerar um processo de transferência de calor entre o ar insuflado e os grãos, resultando no reumedecimento dos grãos armazenados.

Para Fortin e Quenneville (2002), a aeração elimina o calor e a umidade que resultam da atividade biológica dos grãos e dos microorganismos existentes no silo. Ela também é usada para a refrigeração e equilíbrio da temperatura do silo, mantendo e corrigindo periodicamente as características do ar existente entre os grãos. Por fim, a aeração pode ser utilizada como um suplemento da secagem dos grãos.

Autores como Halderson e Sandvol (1980) e Lasseran (1981) definiram a aeração de grãos como sendo uma prática mecânica utilizada para ventilar massas de grãos armazenadas utilizando-se volumes relativamente pequenos de ar circulando uniformemente pela massa de grãos, reduzindo assim o gradiente de temperatura e impedindo a migração de umidade que poderia ocorrer no grão o qual é armazenado com um índice de umidade seguro.

A migração da umidade, ou movimento da umidade dentro da massa de grãos, ocorre geralmente em armazenamentos não aerados e é um problema comum associado com o armazenamento de longa duração de grãos. A migração da umidade é resultado das correntes convectivas de ar causadas por diferenças da temperatura dentro da massa de grãos. Este problema é especialmente observado quando o grão não foi corretamente manipulado antes do armazenamento, e correntes de ar movem a umidade para a área centro-superior do silo (Figura 15).



Fonte: Thompson e Shelton (1993)

Figura 15: Condições da massa de grãos e migração do ar e da umidade

#### 4.2.2 Histórico da aeração

Fenton e Swanson<sup>1</sup> apud Isaacs e Noyes (1999) apresentaram em 1930 a primeira pesquisa em armazenamento aerado. O objetivo deste trabalho era remover o excesso de umidade do trigo para que o armazenamento pudesse ser seguro, mesmo que por um longo período de tempo.

O desenvolvimento da aeração para controlar a migração da umidade foi dirigido inicialmente na década de 1940 por Robinson, Hukill, e Foster apud Isaacs e Noyes (1999). Nesta experiência, conduzida na universidade de estado de Iowa, em 1943, uma barreira parcial para a umidade foi criada com o uso de papel especial. A condensação da umidade não ocorreu abaixo da barreira exceto em torno das bordas onde a umidade que migra teve contato com os grãos mais frios que estavam perto das paredes do silo.

Os estudos citados geraram um impacto significativo em relação às práticas comuns para época. Por muitos anos, a indústria do armazenamento de grãos tinha como padrão a transilagem. Era prática comum deixar um silo vazio, de modo que todo o grão de cada silo pudesse ser transferido periodicamente para este silo vazio e depois voltar para o silo original. Esta prática aplicada à massa de grãos gera sua ventilação. A temperatura pode ser reduzida com a movimentação dos grãos e é possível eliminar bolsas de calor que tenham se formado no meio da massa.

Conforme Isaacs e Noyes (1999), o primeiro uso comercial da aeração em grandes silos de grãos foi feito no moinho de arroz de um produtor do Arkansas com um sistema projetado e coordenado por Meryl Todd, em 1950.

A aplicação da aeração aos armazenamentos comerciais de grãos foi realçada na década de 1950, principalmente, pelos produtores de milho que tinham grande dificuldade no armazenamento de suas produções.

A aeração tornou possível armazenar com sucesso grãos em algumas unidades incomuns de armazenamento. Segundo Isaacs e Noyes (1999), Holman em 1955

---

<sup>1</sup> FENTON, F.C., SWANSON, C.O. **Results of a Study to Determine the Effect of Ventilating Steel Grain Bins Upon the Quality of Combined Wheat.** Kansas Experiment Station Preliminary Report, 1930.

descreveu a instalação de sistemas de aeração para armazenar grãos em grandes embarcações de cargas remanescentes da 2ª Guerra Mundial que receberam o nome de navios da liberdade, em 1953, uma instituição de crédito agrícola usou estes navios para armazenar o excedente de produção.

Durante as décadas de 1960 e 1970, a tecnologia da aeração para armazenamentos de grãos se espalhou rapidamente nas propriedades rurais e companhias de armazenamento. A aeração de grãos transformou-se em assunto de muitos programas internacionais de transferência de tecnologia que envolviam o armazenamento de grãos. Por exemplo, segundo Hara et al. (2005), experimentos de armazenamento na Universidade Federal de Viçosa no Brasil foram iniciados por Paulo del Giudice e Tetuo Hara no final da década de 1960, alguns de seus experimentos demonstraram ser possível armazenar com sucesso feijões pretos por três anos com aeração.

A tecnologia da aeração para o armazenamento de grãos logo se espalhou por toda a América Latina e pelo mundo. Sem a tecnologia da aeração, manter uma massa de grãos ensilada de uma safra para outra não seria possível.

#### **4.2.3 Condução da aeração**

Autores como, Burrell (1973), De Beer (1972), Fortin e Quenneville (1999), Lasseran (1981), Puzzi (1986) e Silva (1995) realizaram estudos sobre a aeração buscando demonstrar a eficácia desta na manutenção dos grãos armazenados, sem prejuízo da qualidade e da quantidade da massa armazenada.

Alguns estudos revelam que para ser eficaz, a aeração com o ar ambiente deve ser iniciada somente quando a temperatura do ar externo for de 5 a 7°C mais baixa que a da massa de grãos, uma diferença demasiado significativa provocaria condensação na camada mais superior da massa de grãos armazenada.

Apesar desta estratégia de condução da aeração ser considerada eficaz, existem várias opiniões sobre o momento mais adequado para realizar a aeração. Fortin e Quenneville (1999) aconselham a aeração sempre que a temperatura do ar externo for de 5° a 6°C mais baixa que a da massa de grãos. Puzzi (1986) aconselha que a aeração seja realizada quando a temperatura do ar externo for exatamente 6°C inferior a temperatura da massa de

grãos, porém, neste caso, haverá uma dependência das condições da umidade relativa do ar externo ao silo.

Finalmente, Lasseran (1981) e Silva (1995) adotam uma simplificação, e afirmam que a aeração é sempre possível bastando para isso ser a temperatura do ar externo menor que a da massa de grãos. O que se observa, de uma forma geral, é que a maioria dos pesquisadores recomenda a aeração usando o critério da diferença de temperatura entre o ar e a massa de grãos.

O controle da aeração supõe assim, o conhecimento da temperatura da massa de grãos e do ar exterior ao silo. Uma instalação de equipamento de termometria passa a ser importante no processo de automação deste processo. A temperatura exterior pode ser medida por um termômetro simples, mas o indicado é um termostato que permita a ativação do ventilador somente quando esta diferença de temperatura, definida por um sistema de controle, for alcançada.

Como este processo normalmente é alimentado por eletricidade e consome energia, é apropriado ventilar preferivelmente durante as horas fora de pico de consumo, pois além de não sobrecarregar o sistema de distribuição de eletricidade, também permite ao usuário se apropriar de vantagens econômicas dos valores reduzidos de tarifa. Portanto além das preocupações com controle de termometria é necessário que o sistema seja equipado com um relógio e controlar a operação do ventilador nos períodos de tarifa reduzida.

## 5 MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do equipamento de controle da aeração foram necessários componentes eletrônicos, um sistema de comunicação e um sistema de aquisição de dados. Paralelamente foi desenvolvido o sistema computacional para interpretação e processamento dos dados. Os testes do equipamento eletrônico e do sistema computacional foram realizados em um protótipo sob condições de uso real.

### 5.1 Principais componentes eletrônicos

Para o controle da aeração, foi criado um protótipo de um sistema de aquisição de dados. Este sistema foi projetado de forma a possibilitar a coleta de dados de temperatura interna do silo, bem como as condições de temperatura e umidade relativa do ar fora do silo.

Com o objetivo de baratear e simplificar o processo de coleta de dados de temperatura interna do silo optou-se pela utilização de sensores não convencionais. Ao invés de termopares, foram utilizados sensores de alta precisão, porém de baixo custo. Os sensores adotados foram os sensores de temperatura LM335.

O sensor de temperatura LM335, mostrado na Figura 16 (a), produz uma saída de 10 mV por grau Kelvin, dado este, que é convertido para Celsius pelo programa computacional. A sensibilidade elevada destes sensores permite que sejam usadas tanto

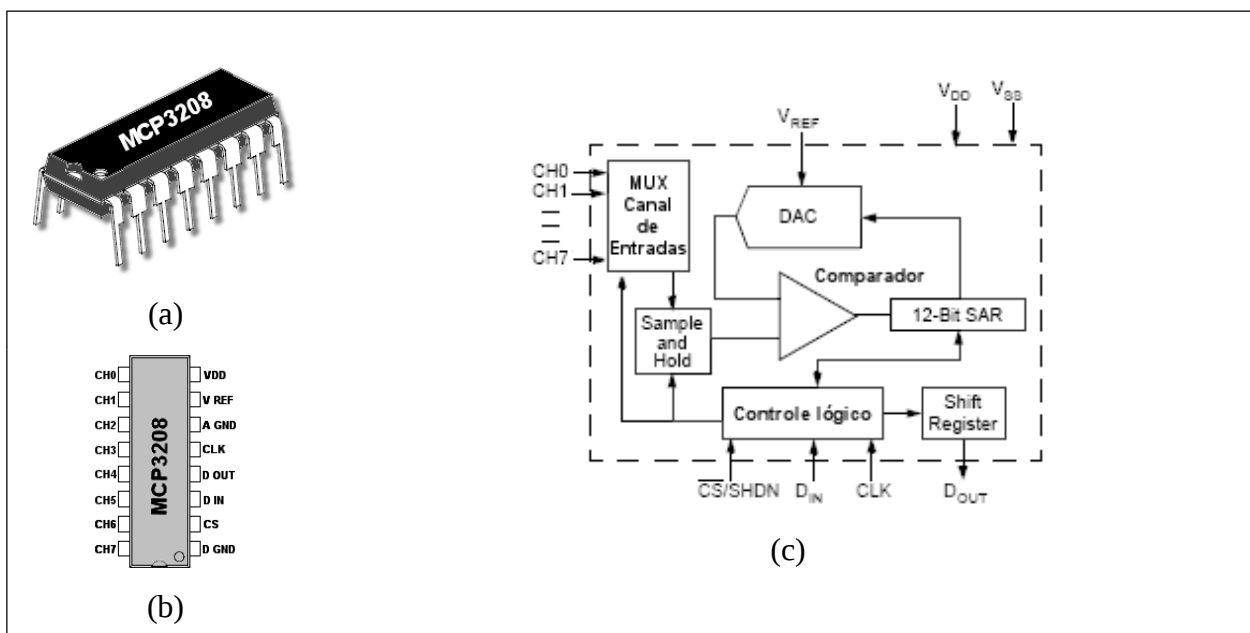
entradas analógicas de 10 *bits*, quanto 12 *bits*, bastando para isso, o uso de um resistor em paralelo de 1 k $\Omega$  mostrado na Figura 16 (b).



Fonte: National Semiconductor Corp.(2000)

Figura 16: Sensor de temperatura LM335 (a) e configuração típica de instalação (b)

Para realizar a conversão dos sinais analógicos gerados pelos sensores de temperatura foi utilizado o conversor analógico digital MCP3208, o qual é oferecido no formato PDIP (*Plastic Dual Inline Package*) de 16 pinos, conforme mostrado na Figura 17 (a).



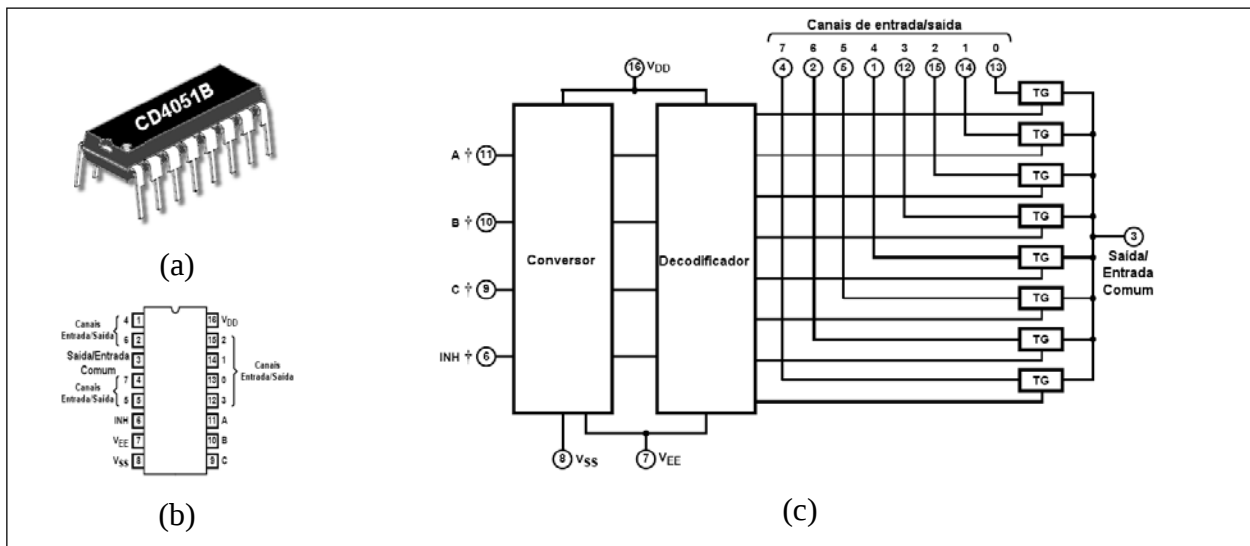
Fonte: Microchip Technology Inc. (2002)

Figura 17: Conversor analógico digital MCP3208 – (a) formato, (b) pinagem e (c) diagrama de blocos

Observa-se na Figura 17 (b) e (c) a pinagem e o diagrama de blocos do funcionamento do conversor A/D MCP3208, onde pode-se identificar os oito canais de entrada de informações analógicas.

Como o propósito do protótipo era monitorar a leitura de até 64 sensores de temperatura colocados na unidade de armazenamento, ainda foi necessário a multiplicação dos oito canais de entrada do MCP3408 para sessenta e quatro. Isto foi feito utilizando-se 8 circuitos integrados CD4051B da Texas Instruments Inc. O CD4051B é um multiplexador/demultiplexador de 8 canais que tem 3 entradas binárias para controle, A, B e C, estes três sinais binários selecionam os canais de 1 até 8, e conectam uma das 8 entradas à saída.

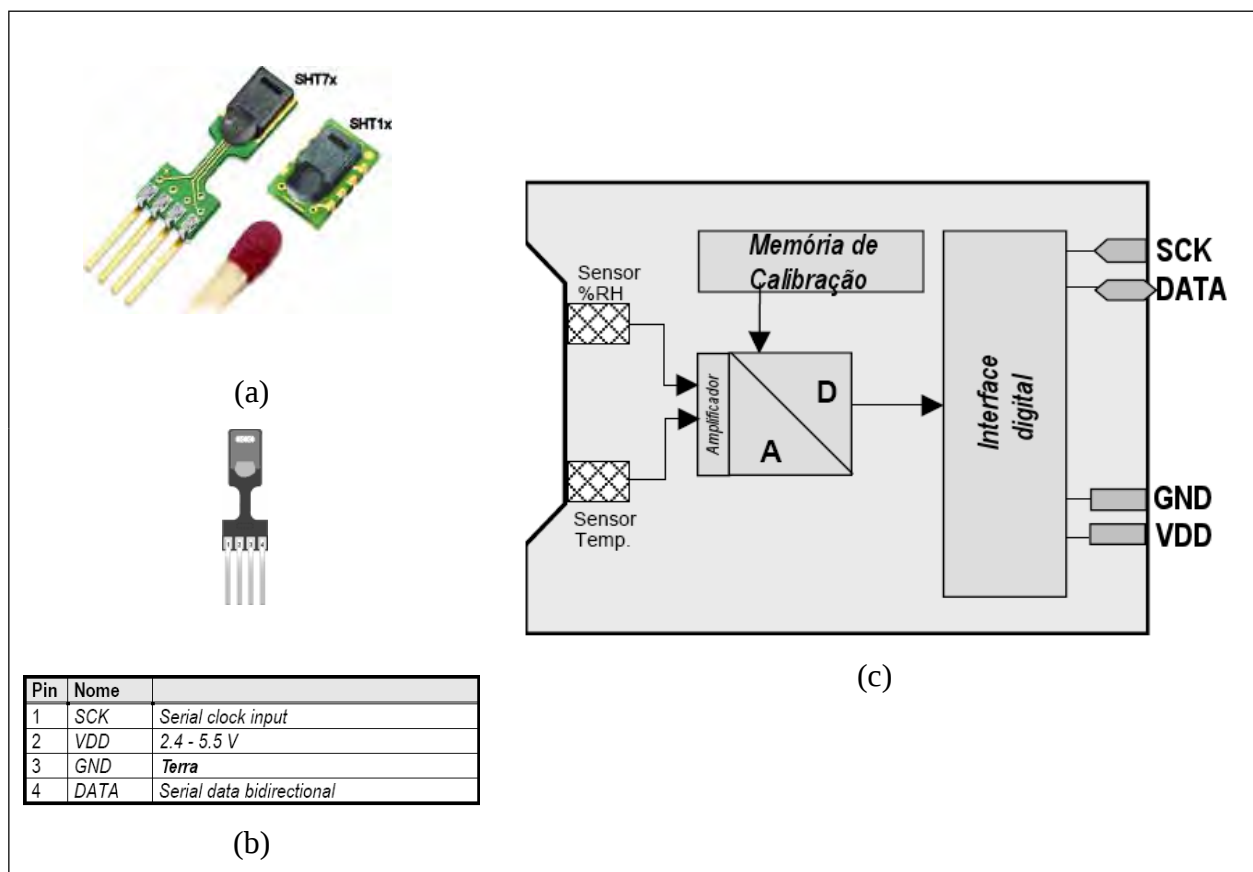
Os multiplexadores digitais são dispositivos que codificam as informações de duas ou mais fontes de dados em um único canal. Eles são utilizados em situações onde o custo de implementação de canais separados para cada fonte de dados é maior que o custo e a inconveniência de utilizar as funções de multiplexação/demultiplexação. Observa-se na Figura 18 (a), (b) e (c) o formato, a pinagem e o diagrama de blocos do funcionamento do multiplexador CD4051B, onde é possível identificar os oito canais de entrada/saída, bem como os controles A, B e C.



Fonte: Texas Instruments Inc. (2000)

Figura 18: Multiplexador/Demultiplexador CD4051B – (a) formato, (b) pinagem e (c) diagrama de blocos

Para coleta dos valores de temperatura e umidade relativa do ar externo ao silo optou-se pelo sensor SHT71 da família SHTxx, fabricado pela SENSIRION (SENSIRIUN, 2005). Esta linha de sensores agrupa em um único micro módulo o sensor da umidade relativa e da temperatura. O dispositivo inclui um elemento do tipo polímero capacitivo responsável pela determinação da umidade relativa e um sensor de temperatura que funciona segundo o princípio da abertura de faixa. Ambos são acoplados a um conversor analógico digital e a um circuito de comunicação em série. Isto resulta em uma qualidade superior do sinal e, conseqüente resposta rápida de leitura, bem como um preço competitivo. Uma característica marcante do SHTxx é que o mesmo é calibrado individualmente em uma câmara da umidade de precisão. Os coeficientes de calibração são programados internamente na memória do próprio micro circuito. Estes coeficientes são usados internamente durante a medida dos sinais dos sensores. Seu tamanho reduzido permite baixo consumo de energia.



Fonte: SENSIRIUN AG. (2005)

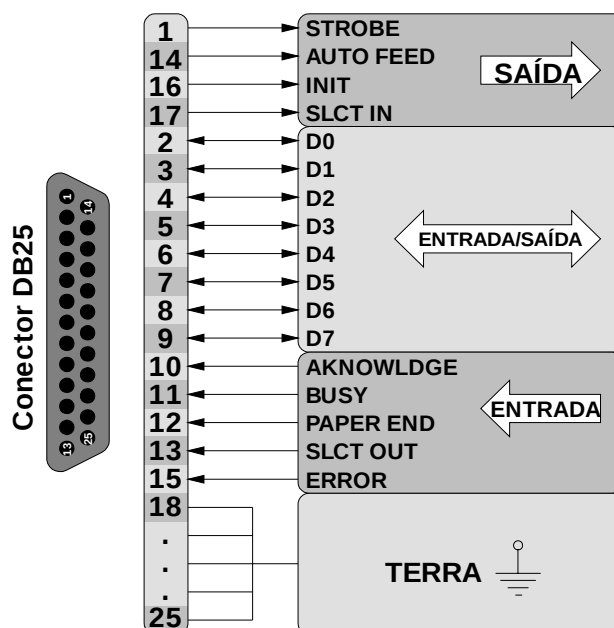
Figura 19: Sensor de temperatura e umidade do ar SHT1x/SHT7x – (a) formato, (b) pinagem e (c) diagrama de blocos

Observa-se na Figura 19 (a), (b) e (c), o formato, a pinagem e o diagrama de blocos do funcionamento do sensor SHTxx, onde é possível identificar as duas entradas analógicas (temperatura e umidade) e o canal digital (DATA) de saída.

## 5.2 Sistema de comunicação

No desenvolvimento deste trabalho optou-se pelo uso da porta paralela do microcomputador para transmissão dos dados dos sensores até o microcomputador. Segundo Axelson (2000), a porta paralela do microcomputador é o meio mais fácil para controlar dispositivos externos, como LED's (*Light Emitting Diode*), lâmpadas e até motores e inversores de frequência. Atualmente, a maioria das impressoras vendidas no mercado utilizam conexão USB (*Universal Serial Bus*), graças a isso, a porta paralela fica disponível, podendo ser usada para controlar circuitos externos ao microcomputador. A porta paralela é uma interface de comunicação paralela de oito bits, como cada bit de dados pode ser transmitido como “0” (desligado) ou como “1” (ligado), é possível ligar ou desligar diretamente os dispositivos, bastando para isso projetar circuitos de potência, já que a porta paralela do microcomputador não é capaz de fornecer corrente suficiente para dispositivos cuja demanda de potência seja alta. No microcomputador, a porta paralela usa um conector de 25 pinos (chamado DB-25, 25 pinos D-sub ou 25 pinos D-shell).

Além dos oito bits de dados, existem mais sinais disponíveis na porta paralela. A principal vantagem em se utilizar esta forma de comunicação reside no fato de ser o meio mais simples do protótipo acessar o microcomputador. Ela possui níveis de tensão compatíveis com padrão TTL (*Transistor-Transistor Logic*) entre 0 e 5 V, e pode ser acessada tanto em nível de bytes como bits, cada pino de saída ou entrada pode ser lido ou escrito de maneira independente. Na Figura 20 é possível conhecer a pinagem padrão da porta LPT (*Line Printer Terminal*) nos microcomputadores, montada sob um conector DB-25.



Fonte: Axelson (2000)

Figura 20: Esquema básico do funcionamento de porta paralela

### 5.3 Sistema de aquisição de dados

No protótipo proposto neste trabalho, como já detalhado anteriormente, foram utilizados os sensores LM335 e SHT71 para a obtenção dos dados ambientais necessários para o controle do processo. Os sinais utilizados foram tanto do tipo analógico quanto digital. Para elaboração do sistema de aquisição de dados foram utilizados um conversor analógico digital MCP3208, oito multiplexadores 4051B, resistores diversos, diodos, capacitores, reles de potência, LED's, transistores, foto acopladores e conectores (RJ11, RJ45 e DB25). Os principais componentes utilizados no sistema de aquisição são mostrados na Figura 21.

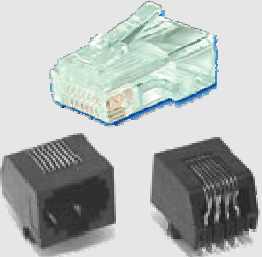
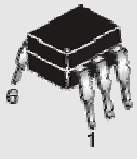
| Componente                                                                          | Descrição                                               | Componente                                                                           | Descrição     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
|    | Cabo e conector para comunicação paralela, padrão DB-25 |    | Relé          |
|    | LED - <i>Light Emitting Diode</i>                       |    | Capacitor     |
|    | Resistor                                                |    | Diodo         |
|   | Circuito integrado                                      |    | Transistor    |
|  | Conectores RJ45, RJ11                                   |  | Fotoacoplador |

Figura 21: Principais componentes do sistema de aquisição

#### 5.4 Sistema computacional para interpretação e processamento dos dados

O sistema computacional (programa de computador – *software*), para processar os dados e permitir a interpretação pelo usuário foi implementado usando o ambiente de programação Delphi da *Borland Software Corporation*, Borland (2005). Que é um compilador<sup>2</sup> e uma IDE (*Integrated Development Environment*) para a produção de programas de computadores aplicando técnica RAD (*Rapid Application Development*). Esta

<sup>2</sup> Programa que transforma um código escrito em uma linguagem entendida por seres humanos, o código fonte (do inglês *source code*), em um programa equivalente em outra linguagem, código objeto (do inglês *object code*) entendido pelo computador.

técnica possibilita obter uma maior otimização dos códigos dos programas e maior rapidez de desenvolvimento.

O sistema desenvolvido utilizou a versão 7.0 do Delphi pelo fato da mesma possuir uma grande quantidade de componentes prontos em sua biblioteca. Outros fatores importantes são: facilidade de uso, aprendizado, e velocidade de execução do código comparada apenas à Linguagem de programação C<sup>3</sup>.

Para a criação do sistema de aquisição, foi concebido um projeto eletroeletrônico seguindo as normas técnicas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). O primeiro passo no desenvolvimento do controlador foi a criação do projeto do mesmo, para isto foi utilizado como ferramenta de auxílio o programa *DesignSuite 9 Software* da empresa Electronics Workbench. O *DesignSuite 9* inclui uma versão inteiramente integrada de *Multicap*, do *Multisim*, do *Ultiboard* e do *Ultiroute*. Em todos os casos, este programa fornece o acesso a um conjunto completo para o desenho e construção de circuitos eletrônicos. A versão utilizada é de uso livre, porém com algumas limitações técnicas, que a diferenciam da versão comercial. O software foi obtido no endereço da internet: <<ftp://ftp.interactiv.ni.com/pub/interactiv/demo/dsfree9.exe>>.

## 5.5 Testes do protótipo

Para testes de funcionamento e operacionalidade do sistema desenvolvido foram utilizadas as instalações do Laboratório de Ensaio em Secagem e Armazenamento (LESA) da Fazenda Experimental do Lageado da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus de Botucatu (Figura 22), localizada na região central do estado de São Paulo.

---

<sup>3</sup> C é uma linguagem de programação estruturada e padronizada criada na década de 1970 por Dennis Ritchie e Ken Thompson para ser usada como referência no desenvolvimento de sistemas informatizados.



Figura 22: Laboratório de Ensaio em Secagem e Armazenamento (LESA)

No silo de armazenamento 1 (Primeiro a esquerda na Figura 22) foi instalado o conjunto de termometria necessário a monitoração da temperatura da massa de grãos ensilada, conforme detalhes apresentados na Figura 23.

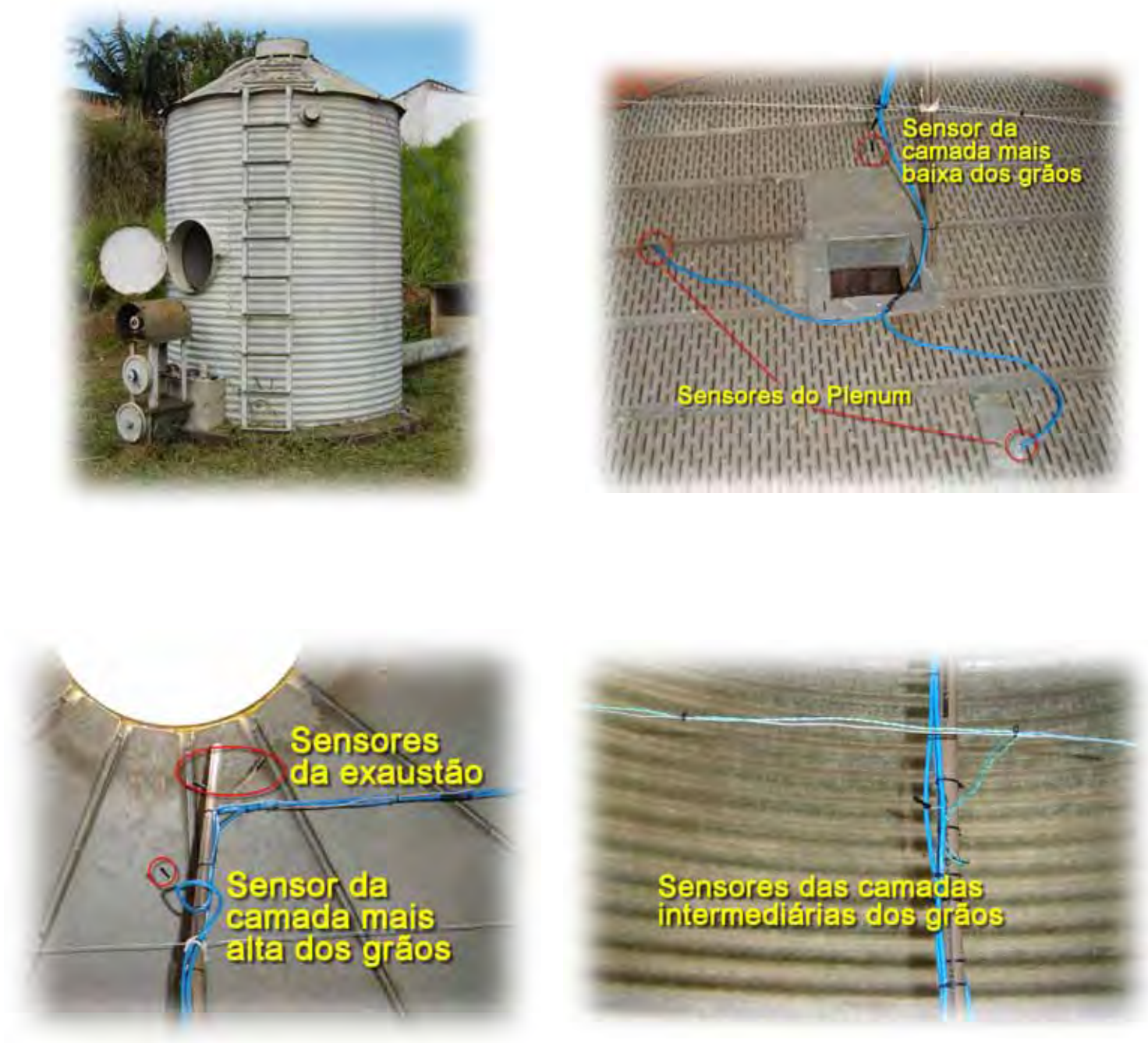


Figura 23: Instrumentação do Silo de armazenamento 1. (a) Silo de armazenamento utilizado para teste, (b) Detalhes dos sensores do plenum e da camada mais baixa dos grãos, (c) Detalhes dos sensores da exaustão e da camada superior dos grãos e (d) Detalhes dos sensores das camadas intermediárias dos grãos

A instrumentação do silo foi realizada segundo critério próprio, não obedecendo a norma da ABNT, uma vez que o silo utilizado é experimental. A legislação brasileira vem desde 1988 elaborando um projeto de norma para regulamentar o segmento de sistemas de termometria para grãos vegetais através de um conjunto de itens básicos para atender a demanda instalada. Na Figura 24 está representada a distribuição das principais construções que formam o conjunto que foi utilizado para a instalação do experimento, nela se observa o silo para a aeração, o duto de ventilação, o conjunto moto-ventilador, a estação de monitoramento e a disposição dos cabos termométricos.

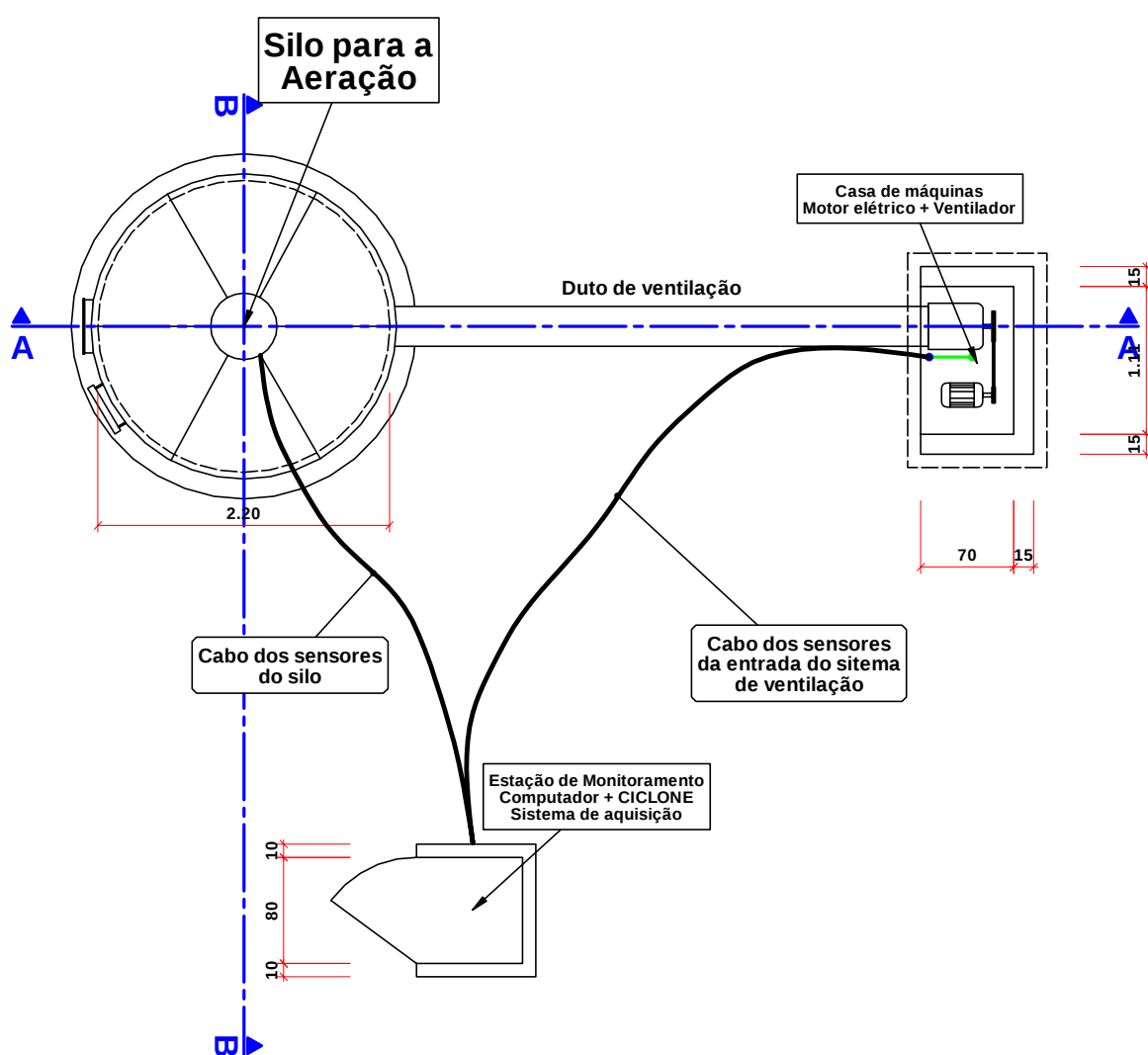


Figura 24: Planta Baixa do silo experimental usado para os testes do sistema

Os sensores de temperatura foram dispostos como apresentado na Figura 25. O equipamento de termometria contou com 14 sensores que foram conectados ao sistema de aquisição de dados instalado junto ao computador de controle do sistema.

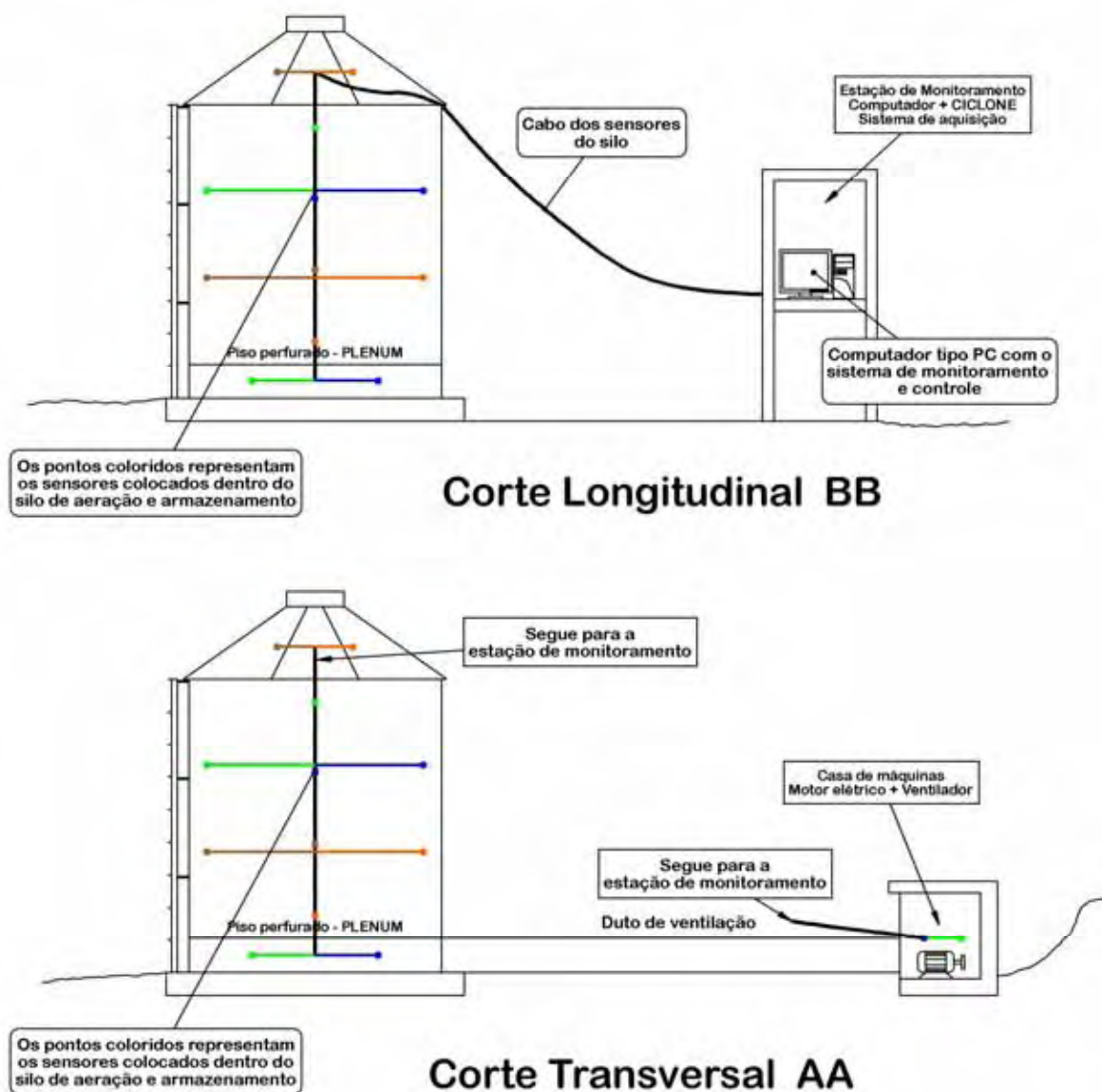


Figura 25: Detalhamento esquemático dos cabos termométricos e sensores de temperatura

Para monitoramento da temperatura da massa de grãos os sensores instalados seguiram a distribuição apresentada na Tabela 5. O monitoramento da temperatura

ambiente foi realizado pelo sensor termo-higrômetro, o qual foi colocado próximo ao equipamento de controle na estação de monitoramento.

Tabela 5: Distribuição dos sensores de temperatura nos cabos termométricos

| Identificação do Cabo | Nº de sensores | Função                                                                       |
|-----------------------|----------------|------------------------------------------------------------------------------|
| Exaustão              | 2              | Monitorar a temperatura na saída superior de ar do silo                      |
| Plenum                | 2              | Monitorar a temperatura na entrada de ar do silo (depois do ventilador)      |
| Grãos – Centro        | 4              | Monitorar a temperatura da parte central da massa de grãos                   |
| Grãos – Extremidade   | 4              | Monitorar a temperatura da parte externa da massa de grãos próximos à parede |
| Entrada               | 2              | Monitorar a temperatura na entrada de ar do silo (antes do ventilador)       |

Os sensores foram instalados usando cabos UTP (*Unshielded Twisted Par*), este tipo de cabo é composto de condutores sólidos de cobre 24 AWG (*American wire gauge*) trançados em pares, os quais são isolados com polietileno de alta densidade. Os cabos UTP são capazes de transmitir sinais a altas velocidades e em grandes distâncias, bem como apresentam características importantes: são leves, finos, de baixo custo por metro e por utilizarem conectores baratos para oito contatos.



Figura 26: Componentes do cabo termométrico para monitoramento das condições de temperatura do silo

O monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar externo ao silo foi feito pelo sensor SHT75 acoplado a um invólucro de proteção com conexão para conector RJ-11, tomada telefônica comum, conforme pode ser visto na Figura 27.



Figura 27: Conjunto do sensor termo-higrômetro para monitoramento das condições do ar ambiente

Uma vez definidos os meios necessários para a aquisição dos dados relativos ao controle da aeração de grãos, instalou-se o sistema de aquisição de dados. Na Figura 28 é mostrado o *layout* básico do sistema de aquisição desenvolvido.

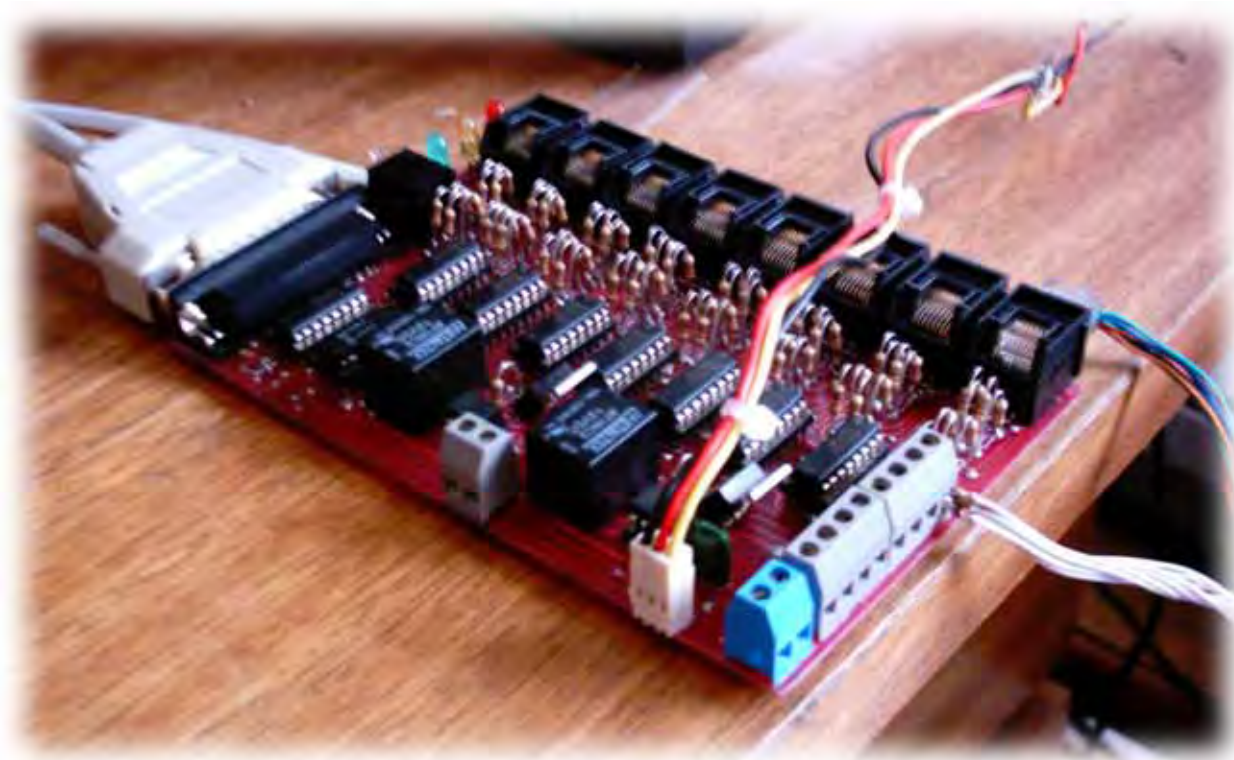


Figura 28: Placa de aquisição de dados

Com o sistema de aquisição configurado e conectado ao computador foi instalado o programa responsável pelo monitoramento e controle da condução racional da

aeração, na Figura 29 é possível observar a interface de utilização do sistema computacional, a qual foi projetada visando à simplicidade de operação por parte do usuário final.



Figura 29: Interface de utilização do Controlador *Fuzzy* para condução racional da aeração

O computador utilizado para a instalação do sistema, mostrado na Figura 29, foi um AMD K6-2 de 500 MHz com 128 MByte de memória RAM (*Random Access Memory*). Trata-se de uma máquina antiga e de pouca capacidade de processamento, se comparado aos computadores atuais. Optou-se pela utilização deste modelo de computador visando a redução do custo de instalação do sistema de controle, uma vez que este tipo de computador pode ser adquirido por um custo reduzido, na faixa de R\$ 350,00 (US\$ 163,00 considerando a cotação de R\$ 2,15 – fevereiro de 2007).

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 6.1 Sistema eletrônico do controlador *Fuzzy*

Sistemas de aquisição de dados são sistemas destinados a captar sinais de fontes de medidas diversas para posterior digitalização do sinal obtido pela captura, para desta forma, ser possível seu armazenamento, análise e apresentação dos resultados obtidos em um microcomputador. Os sistemas de aquisição de dados, também conhecidos por DAQ (*Data Acquisition System*), são encontrados utilizando várias formas de comunicação com o microcomputador. É possível escolher entre PCI (*Peripheral Component Interconnect*), PCMCIA (*Personal Computer Memory Card International Association*), USB (*Universal Serial Bus*), conexões sem fio (*firewire* e *bluetooth*), porta paralela, e também através do uso das portas seriais dos microcomputadores.

Há alguns componentes a serem considerados ao se construir um sistema básico de aquisição de dados, tais como: os transdutores e sensores, sinais, o condicionamento dos sinais e o programa computacional a ser utilizado para a interpretação e processamento dos dados obtidos. Na Figura 30 é possível observar um diagrama esquemático deste processo.

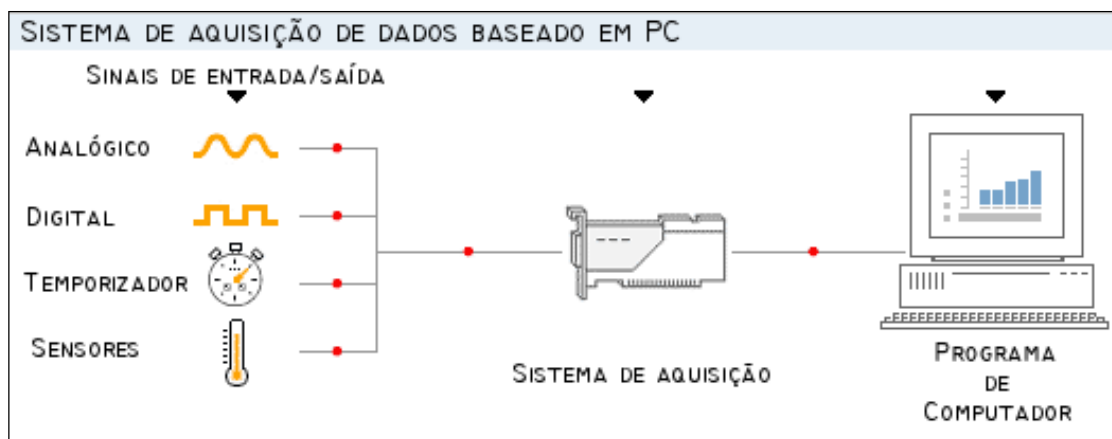


Figura 30: Sistema de aquisição de informações

O sistema de aquisição de dados foi desenvolvido segundo os princípios básicos dos sistemas automáticos de coleta de dados e o sistema de controle da aeração foi projetado prevendo o controle da unidade moto ventiladora.

No início dos testes foi utilizado um conversor analógico digital ADC0804. O conversor analógico digital ADC0804 é um circuito integrado da National Semicondutores, capaz de converter uma amostra analógica entre 0 e 5 V, em um valor binário de 8 bits. Infelizmente, não foi possível sua utilização, pois a resolução do valor convertido era de 2 °C, não mostrando-se adequada para o propósito desejado. Para a solução deste problema, optou-se pelo conversor analógico digital MCP3208 da Microchip Technology Inc., que, além de possuir resolução de conversão de 12 bits, é um multiplexador de 8 canais.

Como a comunicação com os dispositivos de leitura é realizada usando a transferência das informações em série, através do protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*), os dispositivos desenvolvidos são capazes de operar à taxas de conversão da ordem de 100 kbps (quilo bits por segundo). O conversor A/D MCP3208 opera em tensões de 2,7 V até 5,5 V. Todas estas características permitem ao projetista aplicar uma simplificação nos circuitos eletrônicos e conseqüente redução de custos, redução esta, que foi o objetivo principal do desenvolvimento deste protótipo.

Dos recursos disponíveis no *DesignSuite 9* foram utilizados o *Multisim* e o *Ultiboard*. O *Multisim* é uma ferramenta computacional de uso intuitivo, do tipo arraste e solte (*Drag and Drop*) que permite a criação de diagramas esquemáticos de circuitos

eletrônicos completos que contêm tanto componentes analógicos quanto digitais de uma forma extremamente rápida. Esse programa verifica a existência de erros antes que os mesmos se propaguem pelo projeto. A verificação do funcionamento é feita através de um conjunto de instrumentos virtuais que indicam formas de onda, sinais, tensões e correntes, além da própria resposta de frequência de um circuito. Na Figura 31 é possível identificar o diagrama esquemático do sistema de aquisição de dados.

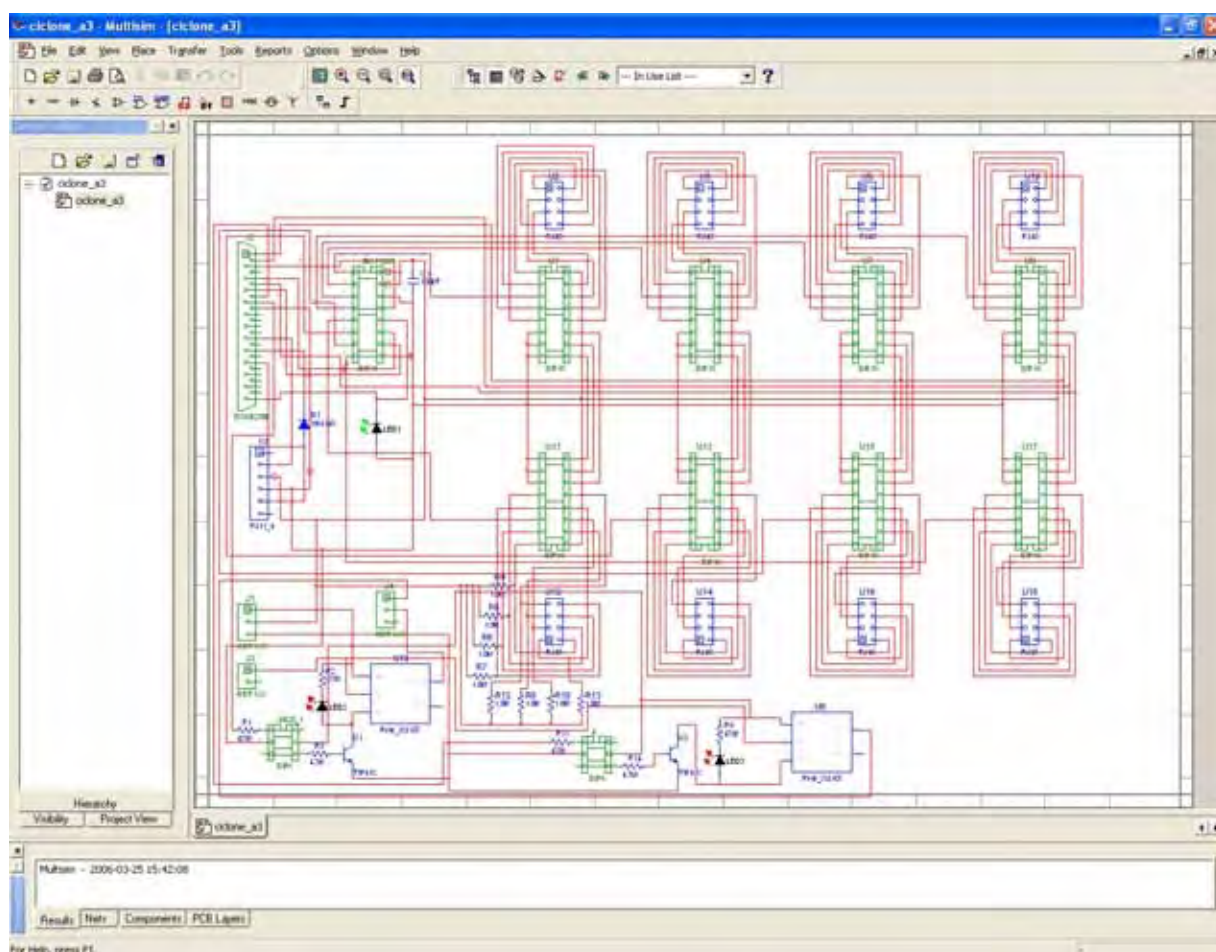


Figura 31: Diagrama esquemático do sistema de aquisição no programa *Multisim 9*

O *Ultiboard* é um programa que permite projetar a placa de circuito impresso para um projeto que tenha sido desenvolvido no *Multisim*. Através dele é possível acessar o *Ultirout*, que é o programa responsável pelo auto-roteamento das conexões da placa de circuito impresso de modo a se obter o melhor *layout* para o projeto, procurando as

conexões de menor comprimento. A Figura 32 mostra o projeto da placa de circuito impresso do sistema de aquisição de dados.

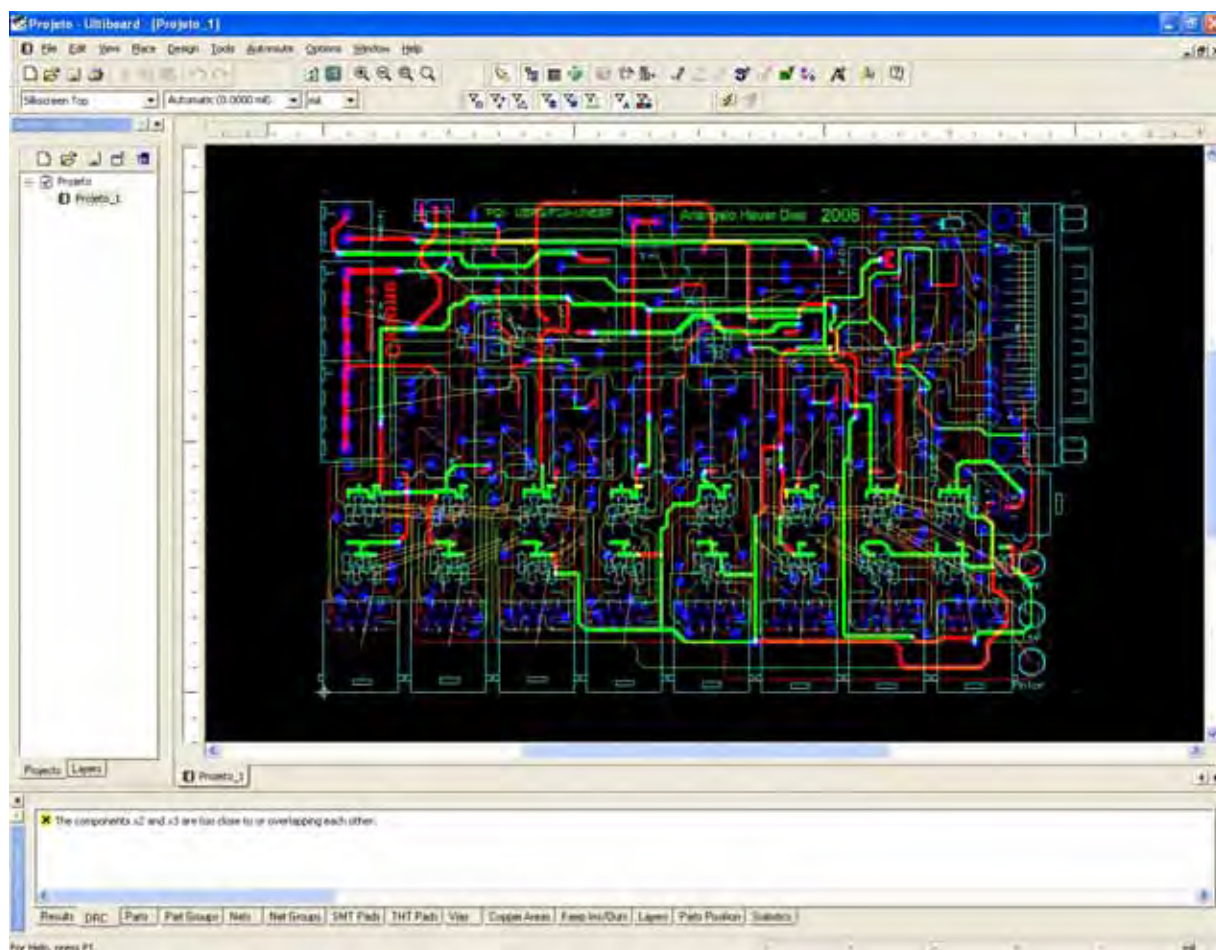


Figura 32: Projeto da placa de circuito impresso no programa *Ultiboard 9*

Uma importante característica utilizada durante o processo de criação da placa foi a utilização de malhas de ligação na camada inferior e superior da placa. A disposição dos componentes procurou obedecer a critérios que garantissem menor proximidade entre circuitos do mesmo grupo de função. Alguns componentes, como os LED's, foram colocados na parte superior da placa de forma a facilitar a visualização. Alguns circuitos semelhantes (ex. ligação do motor e inversor) utilizaram conceitos de simetria dos componentes, de forma a se ter uma boa disposição dos sinais em cada circuito. Para facilitar a depuração e acompanhamento dos sinais mais importantes da placa, foi colocada uma

identificação próxima a cada pino de ligação nos conectores que fazem a comunicação da placa com os elementos externos. Na Figura 33 é mostrado o *layout* básico do sistema de aquisição desenvolvido, o qual recebeu o nome de “CICLONE”.

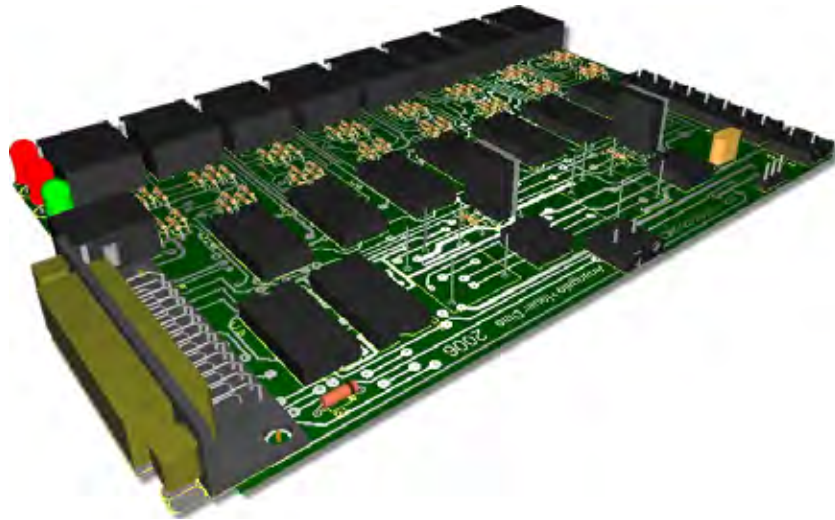


Figura 33: Placa de aquisição de dados CICLONE

Na Figura 34 é possível observar a interface de utilização do sistema computacional, a qual foi projetada visando à simplicidade de operação por parte do usuário final.



Figura 34: Interface de utilização do Controlador *Fuzzy* para condução racional da aeração

A linguagem utilizada pelo Delphi é o Object Pascal (Pascal com extensões orientadas a objetos). O Delphi originalmente é direcionado para o desenvolvimento de aplicações da plataforma Microsoft Windows, porém também é possível o desenvolvimento de aplicações nativas para Linux com o Kylix, e para o Microsoft .NET framework em suas versões mais recentes. O nome Delphi é inspirado na cidade de Delfos, o único local na Grécia antiga em que era possível consultar o Oráculo de Delfos. O Delphi é largamente utilizado no desenvolvimento de aplicações *desktop* (computadores de mesa) e aplicações multicamadas (cliente/servidor), compatível com os bancos de dados mais conhecidos no mercado. Como uma ferramenta de desenvolvimento genérica, o Delphi pode ser utilizado para diversos tipos de desenvolvimento de projetos.

## 6.2 Controlador *Fuzzy*

Conforme se observa na Figura 35, o processo de condução racional da aeração é função do valor da diferença de temperatura média da massa de grãos e o ar ambiente (externo), e da umidade relativa do ar ambiente (externo).

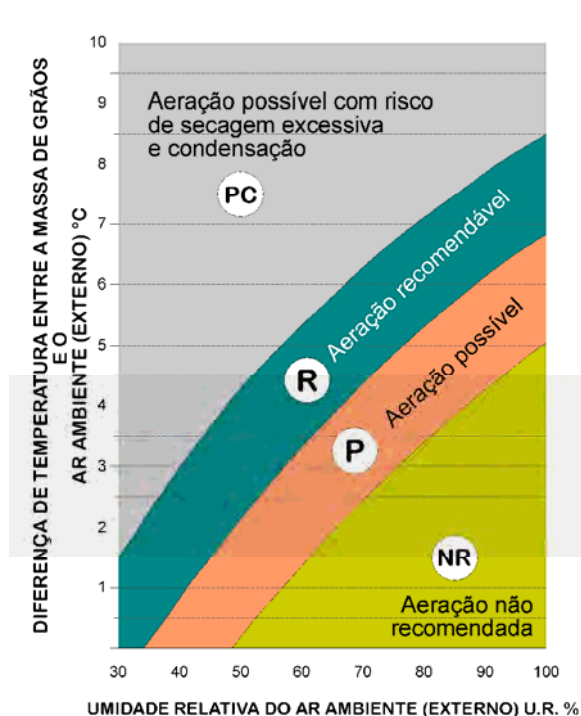


Figura 35: Diagrama da condução racional da aeração

Observando a Figura 35 e supondo a criação da condição de automatização deste processo, é possível aplicar os conceitos teóricos da lógica *Fuzzy*. O operador humano é capaz de controlar o processo constantemente, bastando para tanto, seguir o que é indicado pelo diagrama de condução racional da aeração.

Para automatizar o controle de aeração, sensores colocados dentro do silo monitoram a temperatura da massa de grãos ( $T_{\text{grão}}$ ). Um sensor do tipo termo-higrômetro monitora a condição do ar ambiente, temperatura do ar ( $T_{\text{ar}}$ ) e umidade relativa do ar (UR). Considerando a diferença de temperatura do grão e do ar como o resultado da operação  $T_{\text{grão}} - T_{\text{ar}}$  e a umidade relativa UR, têm-se as duas circunstâncias que deverão ser combinadas para produzir o fato, que será responsável pela ação a ser tomada pelo sistema de aeração.

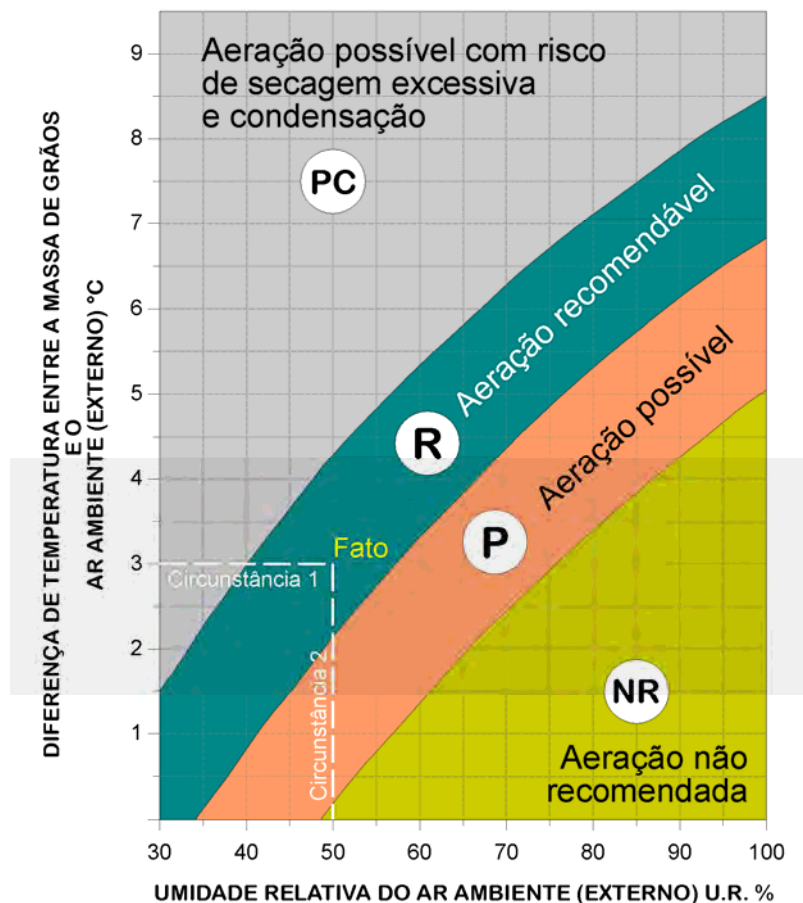


Figura 36: Condições: Circunstância 1, Circunstância 2 e Fato

A situação mostrada na Figura 36 descreve uma circunstância para a diferença de temperatura entra a massa de grãos e o ar ambiente (Circunstância 1) e outra para a umidade relativa do ar (Circunstância 2). As duas levam ao fato – Aeração recomendável, pois:

**SE (Circunstância 1) E (Circunstância 2) ENTÃO (Fato)**

A solução para o problema então, é utilizar uma estratégia lingüística para o controle usando a lógica *Fuzzy*. É necessário definir uma variável lingüística para cada característica do processo. Uma variável lingüística é composta de um número de termos lingüísticos que descrevem as interpretações lingüísticas das diferentes características do que está sendo modelado, bem como as respectivas funções de pertinências  $\mu(x)$ . Com base na Figura 36 têm-se os conjuntos *Fuzzy* mostrados na Figura 37.

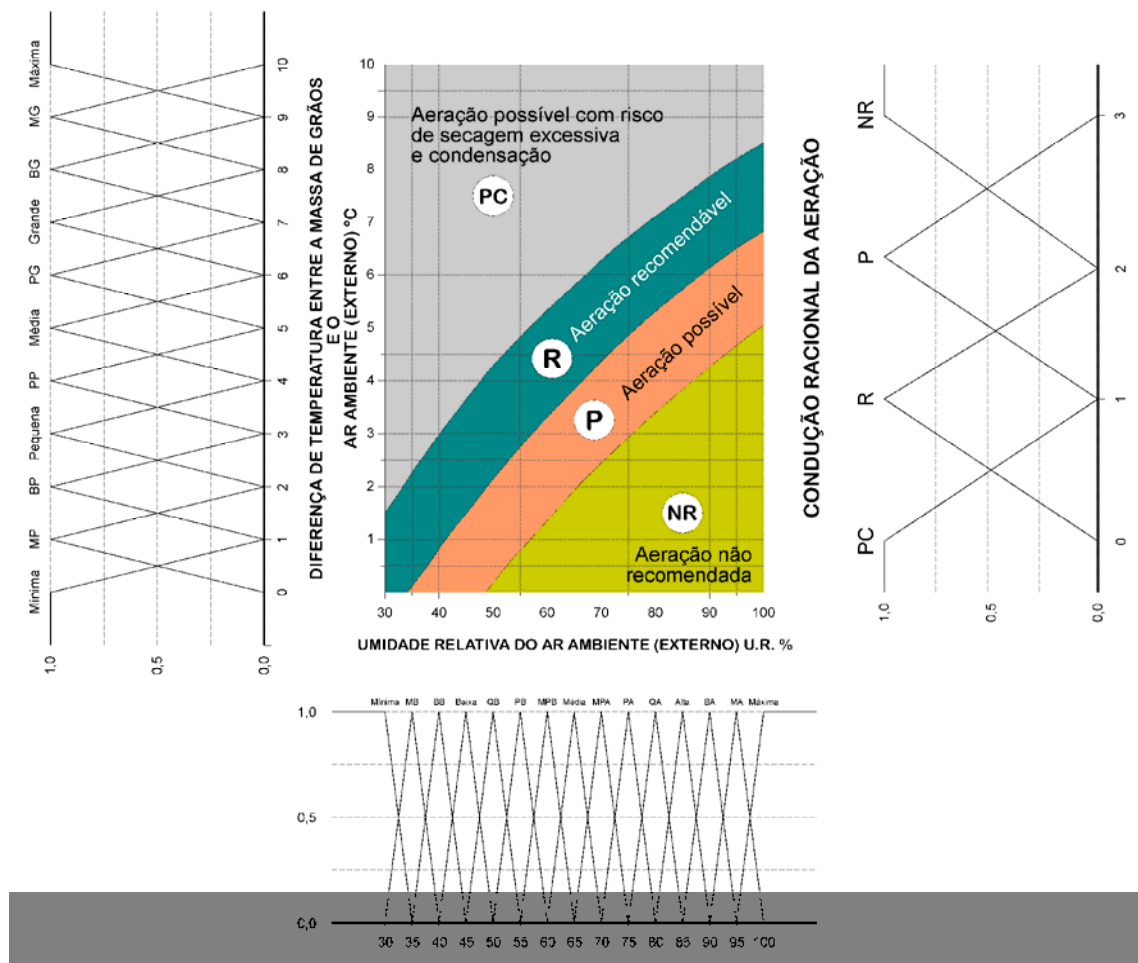


Figura 37: Conjuntos *Fuzzy* para condução racional da aeração

Para a criação dos conjuntos *Fuzzy* do processo de aeração de grãos foi utilizada a nomenclatura apresentada na Tabela 6.

Tabela 6: Nomenclatura dos conjuntos e termos *Fuzzy* para Condução Racional da Aeração

| Conjunto <i>Fuzzy</i>                                                        | Variável lingüística  | Termo lingüístico | Valor |
|------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------|-------|
| Diferença de temperatura entre a massa de grãos e o ar ambiente (externo) °C | Mínima                | Mínima            | 0     |
|                                                                              | Muito Pequena         | MP                | 1     |
|                                                                              | Bem Pequena           | BP                | 2     |
|                                                                              | Pequena               | Pequena           | 3     |
|                                                                              | Pouco Pequena         | PP                | 4     |
|                                                                              | Média                 | Média             | 5     |
|                                                                              | Pouco Grande          | PG                | 6     |
|                                                                              | Grande                | Grande            | 7     |
|                                                                              | Bem Grande            | BG                | 8     |
|                                                                              | Muito Grande          | MG                | 9     |
| Umidade relativa do ar ambiente (externo) U.R. %                             | Máxima                | Máxima            | 10    |
|                                                                              | Mínima                | Mínima            | 30    |
|                                                                              | Muito Baixa           | MB                | 35    |
|                                                                              | Bem Baixa             | BB                | 40    |
|                                                                              | Baixa                 | Baixa             | 45    |
|                                                                              | Quase Baixa           | QB                | 50    |
|                                                                              | Pouco Baixa           | PB                | 55    |
|                                                                              | Muito Pouco Baixa     | MPB               | 60    |
|                                                                              | Média                 | Média             | 65    |
|                                                                              | Muito Pouco Alta      | MPA               | 70    |
|                                                                              | Pouco Alta            | PA                | 75    |
|                                                                              | Quase Alta            | QA                | 80    |
|                                                                              | Alta                  | Ata               | 85    |
|                                                                              | Bem Alta              | BA                | 90    |
|                                                                              | Muito Alta            | MA                | 95    |
|                                                                              | Máxima                | Máxima            | 100   |
| Condução racional da aeração                                                 | Possível com Cuidados | PC                | 0     |
|                                                                              | Recomendada           | R                 | 1     |
|                                                                              | Possível              | P                 | 2     |
|                                                                              | Não Recomendada       | NR                | 3     |

Para a diferença de temperatura entre a massa de grãos e o ar ambiente ( $\Delta T = T_{gr\tilde{a}o} - T_{ar}$ ) foi adotado o limite inferior de 0 °C e o superior de 10 °C, com intervalos de 1 °C. Para a umidade relativa do ar ambiente foi adotado o limite inferior de 30% e o superior de 100%, com intervalos de 5%. Para o processo de *defuzzificação* da condução racional da aeração foi adotado os valores entre 0 e 3, com intervalo de uma unidade, ressalta-se, neste caso, que os limites inferior e superior e os intervalos, podem ser alterados para outros valores sem comprometer o resultado final do processo.

Na Figura 36 é possível identificar a especificação da seguinte regra para controle do sistema de aeração de grãos:

**SE** a diferença de temperatura entre a massa de grãos e o ar ambiente for 3 °C  
**E** a umidade relativa do ar ambiente for 50%  
**ENTÃO** a aeração é Recomendada

Esta regra é dada pelo valor 3°C da variável diferença de temperatura entre a massa de grãos e o ar ambiente, e pelo valor 50%, da variável umidade relativa do ar ambiente, combinados pelo operador lógico E. Como são onze termos lingüísticos para a diferença de temperatura entre a massa de grãos e o ar ambiente e quinze para a umidade relativa do ar ambiente existem cento e sessenta e cinco regras diferentes disponíveis para produzir uma base consistente de regras de condução racional da aeração. Desta forma, a base completa de regras é representada pelo mapa de regras que é mostrada na Tabela 7, onde é identificada a transformação para termos lingüísticos da regra apresentada anteriormente.

Tabela 7: Mapa de regras para a condução racional da aeração

| E                               |                   |     | DIFERENÇA DE TEMPERATURA ENTRE A MASSA DE GRÃOS E O AR AMBIENTE |               |             |         |               |       |              |        |            |              |        |
|---------------------------------|-------------------|-----|-----------------------------------------------------------------|---------------|-------------|---------|---------------|-------|--------------|--------|------------|--------------|--------|
|                                 |                   |     | Mínima                                                          | Muito Pequena | Bem Pequena | Pequena | Pouco Pequena | Média | Pouco Grande | Grande | Bem Grande | Muito Grande | Máxima |
|                                 |                   |     | Mi                                                              | MP            | BP          | P       | PP            | M     | PG           | G      | BG         | MG           | Mx     |
| UMIDADE RELATIVA DO AR AMBIENTE | Mínima            | Mi  | R                                                               | R             | PC          | PC      | PC            | PC    | PC           | PC     | PC         | PC           | PC     |
|                                 | Muito Baixa       | MB  | R                                                               | R             | R           | PC      | PC            | PC    | PC           | PC     | PC         | PC           | PC     |
|                                 | Bem Baixa         | BB  | P                                                               | R             | R           | R       | PC            | PC    | PC           | PC     | PC         | PC           | PC     |
|                                 | Baixa             | B   | P                                                               | P             | R           | R       | PC            | PC    | PC           | PC     | PC         | PC           | PC     |
|                                 | Quase Baixa       | QB  | P                                                               | P             | P           | R       | R             | PC    | PC           | PC     | PC         | PC           | PC     |
|                                 | Pouco Baixa       | PB  | NR                                                              | P             | P           | P       | R             | R     | PC           | PC     | PC         | PC           | PC     |
|                                 | Muito Pouco Baixa | MPB | NR                                                              | NR            | P           | P       | R             | R     | PC           | PC     | PC         | PC           | PC     |
|                                 | Média             | M   | NR                                                              | NR            | P           | P       | P             | R     | R            | PC     | PC         | PC           | PC     |
|                                 | Muito Pouco Alta  | MPA | NR                                                              | NR            | NR          | P       | P             | R     | R            | PC     | PC         | PC           | PC     |
|                                 | Pouco Alta        | PA  | NR                                                              | NR            | NR          | NR      | P             | P     | R            | R      | PC         | PC           | PC     |
|                                 | Quase Alta        | QA  | NR                                                              | NR            | NR          | NR      | P             | P     | R            | R      | PC         | PC           | PC     |
|                                 | Alta              | A   | NR                                                              | NR            | NR          | NR      | NR            | P     | P            | R      | R          | PC           | PC     |
|                                 | Bem Ala           | BA  | NR                                                              | NR            | NR          | NR      | NR            | P     | P            | R      | R          | PC           | PC     |
|                                 | Muito Alta        | MA  | NR                                                              | NR            | NR          | NR      | NR            | NR    | P            | P      | R          | R            | PC     |
|                                 | Máxima            | Mx  | NR                                                              | NR            | NR          | NR      | NR            | NR    | P            | P      | R          | R            | PC     |

Como cada combinação de uma coluna e de uma linha descreve uma determinada situação do controle da aeração. A ação que será executada pelo controle é dada pelo termo lingüístico da interseção da coluna com linha. Como exemplo, a seguinte regra poderia ser obtida usando-se as informações da Tabela 7.

**SE** a diferença de temperatura entre a massa de grãos e o ar ambiente for *Pequena (P)*  
**E** a umidade relativa do ar ambiente for *QuaseBaixa (QB)*  
**ENTÃO** a aeração é *Recomendada (R)*

A estrutura do controlador *Fuzzy* para o processo de condução racional da aeração é representada na Figura 38, na qual, medidas do ambiente (variáveis reais) passam por um processo de “*Fuzzyficação*” (fatos) a fim de serem representadas por variáveis e termos lingüísticos *Fuzzy*. Através de um sistema de inferência, a partir da base de regras, apresentada na Tabela 7 é produzido um valor de saída, representado por uma variável *Fuzzy* de saída (conclusões), que informará ao controlador qual a ação deverá ser realizada.

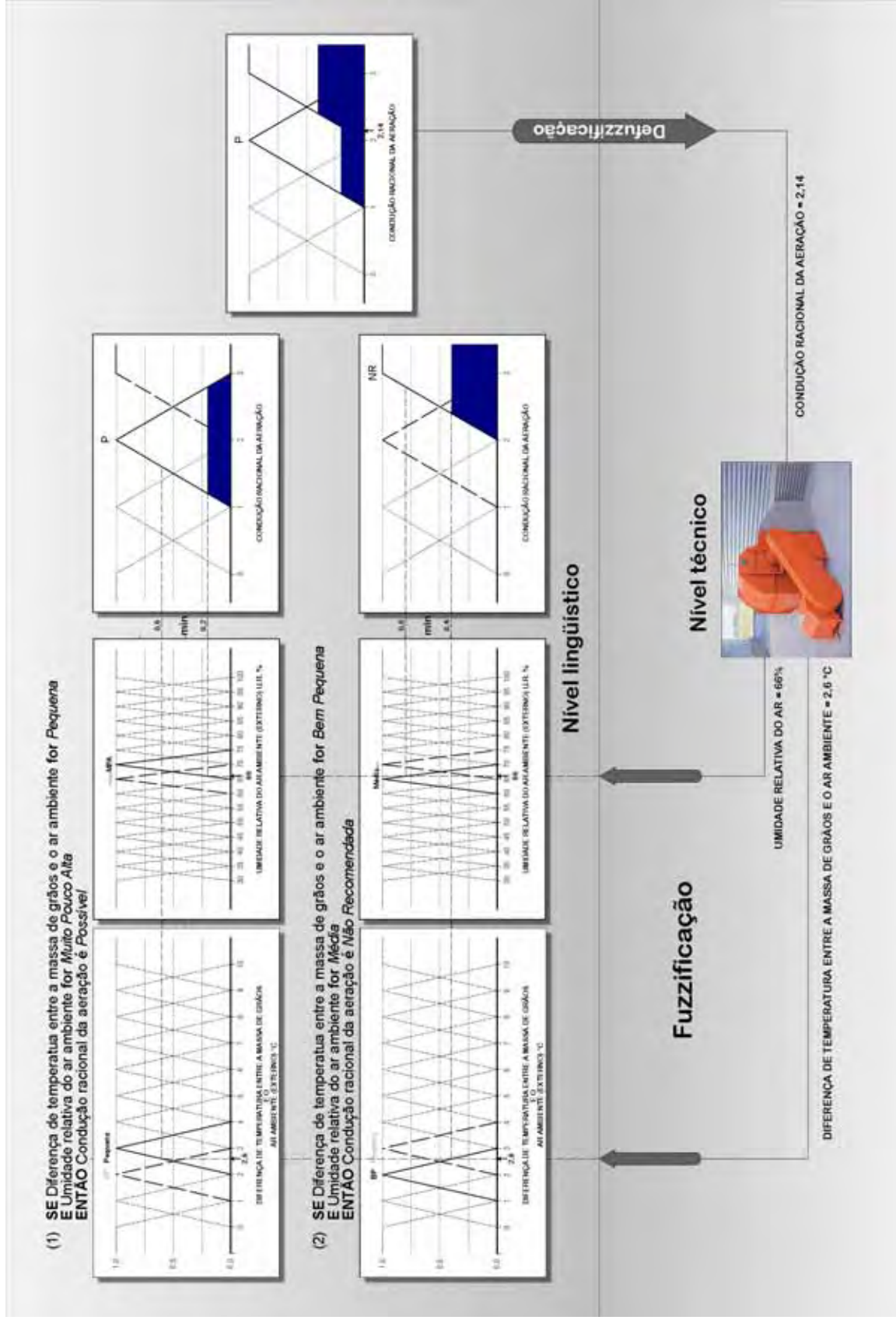


Figura 38: Estrutura completa do controlador *Fuzzy* para condução da aeração

Na interpretação dos dados mostrados na Figura 38 observa-se que na primeira etapa todas as variáveis reais (sinais de sensores) foram traduzidas em variáveis lingüísticas. Para o exemplo, uma diferença de temperatura entre o grão e o ar de **2,6 °C** e um valor de umidade relativa de **66%** criam a seguinte condição de ação do controlador: **A aeração é possível de ser realizada.**

### 6.3 Avaliação do sistema de controle CICLONE

Com o sistema instalado e operando foi possível confirmar a eficácia do sistema de aquisição de dados e controle para o monitoramento das condições ambientais e da massa de grãos de milho ensilada. A Figura 39 mostra a saída típica do controlador *Fuzzy* desenvolvido, onde se pode constatar que o modelo traduz, de forma confiável, o diagrama de condução da aeração, pois a partir dos dados analisados, 2,6°C para diferença de temperatura da massa de grãos e temperatura ambiente, e 66% para umidade relativa do ar ambiente, tem-se a seguinte recomendação: Aeração possível de ser realizada.

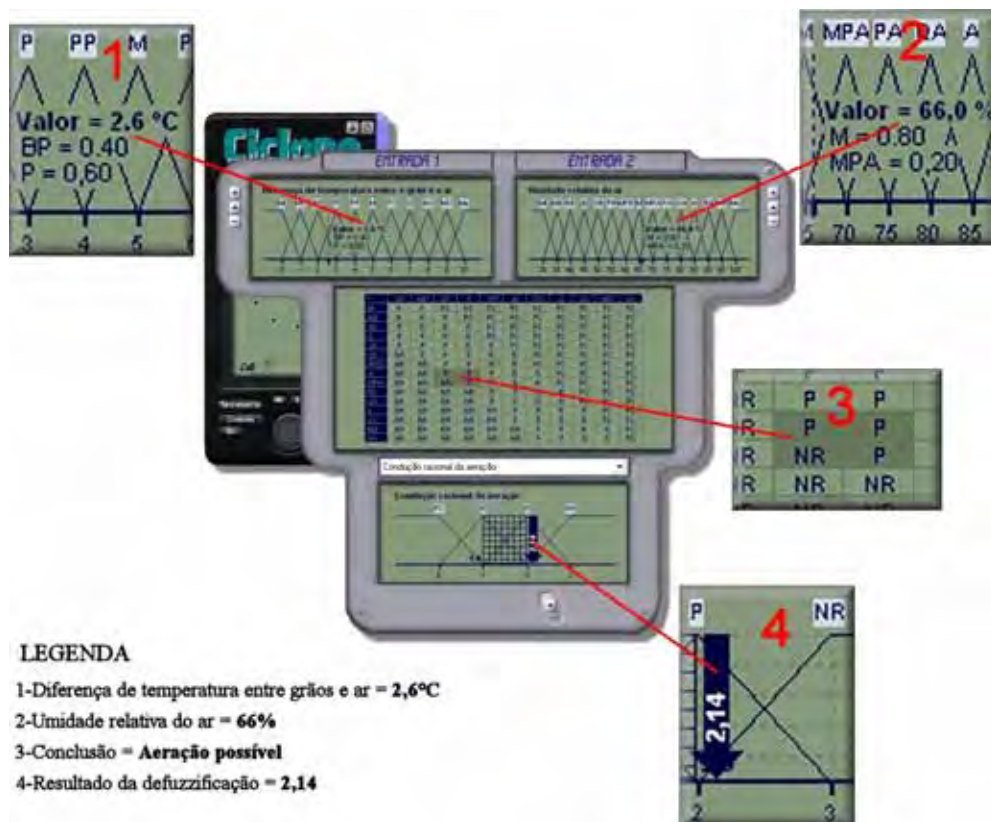


Figura 39: Aplicação da “defuzzificação” na condução racional da aeração

No detalhe 4, mostrado na Figura 39, é possível observar que o sistema automático não recomendou a aeração, tanto na sua forma lingüística quanto numericamente com o valor de 2,14, valor este que não situa-se na faixa de 1,0 e 2,0, que seria a faixa onde a aeração seria recomendada. Os valores que representam a faixa de operação (1,0 e 2,0) são os valores determinados pelo especialista e podem variar conforme a característica da região aonde a aeração será realizada.

Como as condições de armazenagem obtidas no silo do LESA não representariam todas as condições necessárias para uma verificação completa de funcionamento do sistema de controle foi necessário a criação de um conjunto completo de situações de armazenagem, obtendo-se assim, a simulação de um grande número de condições contempladas pelo gráfico de condução racional da aeração. Na Tabela 8 é possível observar a simulação do comportamento do controlador *fuzzy* desenvolvido, considerando-se 285 situações de análise resultantes da combinação de 15 condições de umidade relativa do ar ambiente e 19 condições de diferença de temperatura entre a massa de grãos e o ar ambiente.

Tabela 8: Resultado comparativo entre a análise gráfica da condução racional da aeração e a resposta apresentada pelo sistema de controle CICLONE

| Situação                            |     | Umidade Relativa (%)                                       |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    |
|-------------------------------------|-----|------------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|
|                                     |     | 30                                                         |    | 35 |    | 40 |    | 45 |    | 50 |    | 55 |    | 60 |    | 65 |    | 70 |    | 75 |    | 80 |    | 85 |    | 90 |    | 95 |    | 100 |    |    |    |    |
|                                     |     | Tipo de Análise (G = Gráfica e S = realizada pelo Sistema) |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    |    |    |
|                                     |     | G                                                          | S  | G  | S  | G  | S  | G  | S  | G  | S  | G  | S  | G  | S  | G  | S  | G  | S  | G  | S  | G  | S  | G  | S  | G  | S  | G  | S  | G   | S  | G  | S  |    |
| $\Delta T = T_{grão} - T_{ar} (°C)$ | 0,0 | R                                                          | R  | P  | R  | P  | P  | P  | P  | NR | P  | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR  | NR | NR | NR |    |
|                                     | 0,5 | R                                                          | R  | R  | R  | R  | R  | P  | P  | P  | P  | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR  | NR | NR | NR |    |
|                                     | 1,0 | R                                                          | R  | R  | R  | R  | R  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR  | NR | NR | NR |    |
|                                     | 1,5 | R                                                          | R  | R  | R  | R  | R  | R  | R  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR  | NR | NR | NR |    |
|                                     | 2,0 | PC                                                         | R  | R  | R  | R  | R  | R  | R  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR  | NR | NR | NR |    |
|                                     | 2,5 | PC                                                         | PC | PC | PC | PC | PC | R  | R  | R  | R  | R  | R  | R  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR | NR  | NR | NR | NR | NR |
|                                     | 3,0 | PC                                                         | PC | PC | PC | PC | PC | R  | R  | R  | R  | R  | R  | R  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | NR | NR | NR | NR | NR  | NR | NR | NR |    |
|                                     | 3,5 | PC                                                         | PC | PC | PC | PC | PC | PC | R  | R  | R  | R  | R  | R  | R  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | NR | NR | NR | NR  | NR | NR | NR |    |
|                                     | 4,0 | PC                                                         | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | R  | R  | R  | R  | R  | R  | R  | R  | R  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | NR | NR  | NR | NR | NR |    |
|                                     | 4,5 | PC                                                         | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | R  | R  | R  | R  | R  | R  | R  | R  | R  | R  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P   | P  | NR | NR |    |
|                                     | 5,0 | PC                                                         | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | R  | R  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P  | P   | P  | P  | NR |    |
|                                     | 5,5 | PC                                                         | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | R  | R  | R  | R  | R  | R  | R  | P  | P  | P   | P  | P  | P  | P  |
|                                     | 6,0 | PC                                                         | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | R  | R  | R  | R  | R  | R  | R  | P  | P   | P  | P  | P  | P  |
|                                     | 6,5 | PC                                                         | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | R  | R  | R  | R  | R  | R  | R  | R   | P  | P  | P  | P  |
|                                     | 7,0 | PC                                                         | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | R  | R  | R  | R  | R  | R  | R   | R  | R  | R  | R  |
| 7,5                                 | PC  | PC                                                         | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC  | PC | PC | PC |    |
| 8,0                                 | PC  | PC                                                         | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC  | PC | PC | PC |    |
| 8,5                                 | PC  | PC                                                         | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC  | PC | PC | PC |    |
| 9,0                                 | PC  | PC                                                         | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC | PC  | PC | PC | PC |    |

Legenda:

?

?

Situação aleatória para teste de funcionamento com detalhamento na Figura 41.

?

?

Situação na qual o sistema apresentou erro em relação a análise gráfica.

R

- Aeração recomendável.

P

- Aeração possível.

PC

- Aeração possível com cuidados

NR

- Aeração não recomendada

A análise da Tabela 8 demonstra a confiabilidade do controlador *fuzzy* desenvolvido, pois após a comparação de 285 situações apenas 20 não foram coincidentes. Este valor representa aproximadamente 7% das avaliações, um dado importante a ser considerado é que todas ocorreram nos limites de faixa, ou seja, nas situações de troca de procedimento de aeração, o que em alguns casos pode significar apenas uma particularidade de procedimento adotada pelo especialista. Ao se analisar as situações de forma individual observa-se que 10 delas ocorreram na situação limite entre aeração possível com cuidados (PC) e recomendada (R), 6 no limite de aeração recomendada (R) e possível (P) e apenas 4 na situação de não recomendada (NR) e possível (P).

Como visto, em nenhuma das análises a ação do controlador prejudicaria a qualidade do grão, pois teríamos situações do tipo a aeração é possível, mas com cuidados ou a aeração é possível, porém não recomendada. Neste ponto fica clara a capacidade de interpretação não linear do controlador *fuzzy*, pois em alguns casos é possível a tomada de decisão baseada em mais de uma situação. Na Figura 40 se observa os pontos que representam as situações que apresentaram diferença de interpretação entre a análise gráfica e o valor determinado pelo sistema de controle.

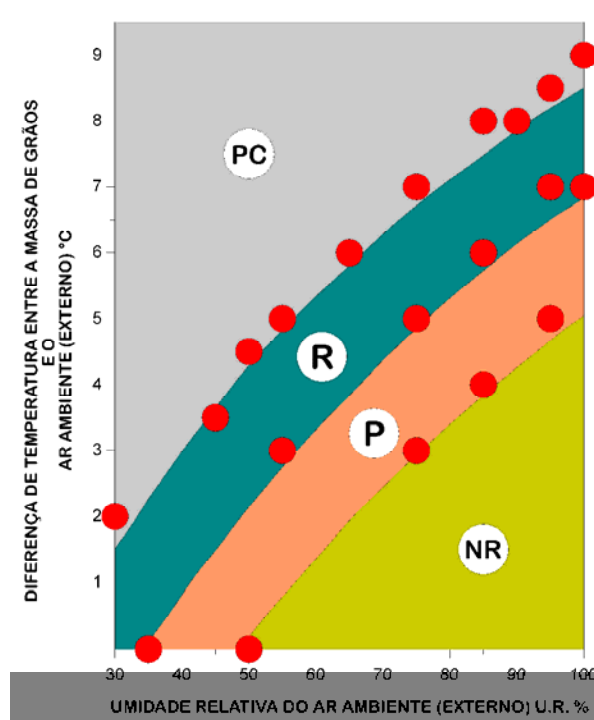


Figura 40: Pontos discrepantes entre a análise gráfica e a saída do sistema de controle

Na Figura 41 é possível observar as quatro situações aleatórias de análise sobre a condução racional da aeração, situações estas que foram também observadas no sistema de aquisição dados e controle CICLONE, conforme resultados apresentados na Tabela 9.

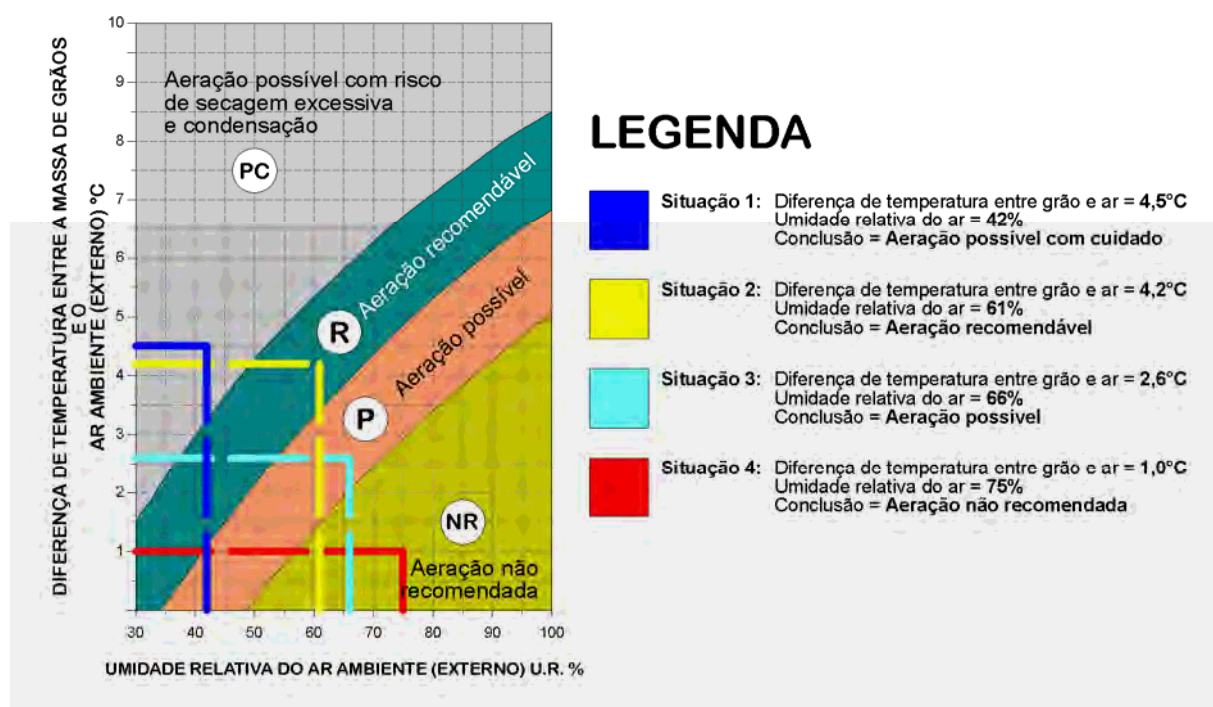


Figura 41: Representação esquemática de 4 situações aleatórias de condução da aeração

Na Tabela 9 pode-se observar os resultados apresentados pelo sistema CICLONE em comparação com os previstos pelo gráfico da condução racional da aeração apresentado por Lasseran (1981).

Tabela 9: Resultado da *defuzzificação* apresentada pelo sistema de controle CICLONE

| Situação | Condições do ambiente                              |                       | Análise do Gráfico da Condução Racional da Aeração | Análise do resultado apresentado pelo sistema de controle CICLONE |                |
|----------|----------------------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------|----------------|
|          | $\Delta T = T_{\text{grão}} - T_{\text{ar}}$<br>°C | Umidade relativa<br>% | Conclusão                                          | Conclusão                                                         | Defuzzificação |
| 1        | 4,5                                                | 42                    | Possível com Cuidados                              | Possível com Cuidados                                             | 0,00           |
| 2        | 4,2                                                | 61                    | Recomendável                                       | Recomendável                                                      | 1,14           |
| 3        | 2,6                                                | 66                    | Possível                                           | Possível                                                          | 2,14           |
| 4        | 1,0                                                | 75                    | Não Recomendada                                    | Não Recomendada                                                   | 3,00           |

#### 6.4 Custo básico do sistema CICLONE

A composição do custo de desenvolvimento do projeto é mostrada na Tabela 10, na qual se observa que o projeto apresenta valores reduzidos, quando comparado a outros existentes no mercado. O valor destes sistemas situa-se na faixa de R\$ 16.000,00. Esta redução de custos foi possível graças a adoção de novas tecnologias, destacando-se a nova geração de circuitos integrados e sensores de baixo custo. Graças ao uso deste aparato tecnológico foi possível o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados barato e com robustez suficiente para garantir o seu correto funcionamento. É também importante salientar as novas tecnologias no desenvolvimento de programas de computador, as quais permitem alta produtividade ao programador, pois graças aos recursos destas novas ferramentas foi possível a redução no tempo de desenvolvimento do sistema computacional.

Outro ponto de destaque está na portabilidade do sistema desenvolvido, pois o mesmo pode ser instalado em vários tipos de computadores, bastando apenas, que este tenha disponível a porta paralela para troca de informações com o sistema de aquisição. O sistema de controle não necessita de um computador com grande capacidade de processamento, como visto, utilizou-se um computador barato e de concepção antiga para a realização dos testes de funcionamento no LESA. Esta característica foi resultado da adoção de técnicas avançadas de programação que tornaram o sistema extremamente compacto e de fácil instalação.

A elaboração da composição de custos reflete, basicamente, que o sistema desenvolvido atende a seu principal objetivo, ou seja, uma solução barata e adequada às necessidades de pequenos e médios produtores de grãos.

O valor total do projeto foi de R\$ 2.855,24 (Tabela 10). O desenvolvimento do programa de computador e do projeto eletrônico do sistema de aquisição representaram R\$ 2.130,00 (74,60%) do total. A parte eletrônica, composta por componentes básicos, representou R\$ 74,61 (2,61%), os sensores R\$ 300,63 (10,53%) e o computador utilizado R\$ 350,00 (12,26%). Considerando que o custo de desenvolvimento do programa de computador e do projeto eletrônico são custos que podem ser apropriados por outras unidades do sistema, sem necessariamente representarem um custo de desenvolvimento, temos que,

para a implantação de novos protótipos seriam necessários R\$ 725,24, considerando apenas a utilização de um novo conjunto de componentes eletrônicos, sensores e um computador.

Tabela 10: Custo de desenvolvimento e instalação do sistema de controle automático da aeração CICLONE

| Componente                                       | Quantidade | Preço Unitário | Preço Total  |
|--------------------------------------------------|------------|----------------|--------------|
| Conversor analógico digital MCP3208              | 1          | R\$ 13,89      | R\$ 13,89    |
| Multiplexador/Demultiplexador CD4051B            | 8          | R\$ 0,85       | R\$ 6,80     |
| Placa de circuito impresso dupla face (10x15 cm) | 1          | R\$ 5,50       | R\$ 5,50     |
| LED 5 mm TIL                                     | 3          | R\$ 0,15       | R\$ 0,45     |
| Soquete CI 16 pinos torneado                     | 9          | R\$ 0,80       | R\$ 7,20     |
| Soquete CI 6 pinos torneado                      | 2          | R\$ 0,30       | R\$ 0,60     |
| Conector RJ11 fêmea                              | 1          | R\$ 0,45       | R\$ 0,45     |
| Conector RJ45 fêmea                              | 8          | R\$ 0,66       | R\$ 5,28     |
| Resistores diversos                              | 70         | R\$ 0,02       | R\$ 1,19     |
| Diodo 1N 4148                                    | 1          | R\$ 0,05       | R\$ 0,05     |
| Capacitor eletrolítico 100uF                     | 1          | R\$ 0,05       | R\$ 0,05     |
| Conector RS232 DB25 macho (PCI)                  | 1          | R\$ 1,85       | R\$ 1,85     |
| Serviço de serigrafia                            | 1          | R\$ 20,00      | R\$ 20,00    |
| Rele de potência (12V) 15 A                      | 2          | R\$ 2,00       | R\$ 4,00     |
| Borne multipolar 2 vias                          | 2          | R\$ 0,55       | R\$ 1,10     |
| Borne multipolar 4 vias                          | 2          | R\$ 1,10       | R\$ 2,20     |
| Transistor NPN TIP 31C                           | 2          | R\$ 1,20       | R\$ 2,40     |
| Fotoacoplador 4N25                               | 2          | R\$ 0,80       | R\$ 1,60     |
| Sensor de temperatura e umidade do ar SHT75      | 1          | R\$ 138,71     | R\$ 138,71   |
| Sensor de temperatura LM335                      | 64         | R\$ 2,53       | R\$ 161,92   |
| Horas no desenvolvimento do hardware do sistema  | 270        | R\$ 4,00*      | R\$ 1.080,00 |
| Horas no desenvolvimento do software do sistema  | 350        | R\$ 3,00*      | R\$ 1.050,00 |
| Computador AMD K6-2 500 MHz – 128 MBytes memória | 1          | R\$ 350,00     | R\$ 350,00   |
| Total                                            |            |                | R\$ 2.855,24 |

Considerando a cotação do dólar para fevereiro de 2007 de R\$ 2,15, tem-se para custo total do projeto US\$ 1.328,00.

---

\* Valor considerado supondo rateio para 20 protótipos

## 7 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente trabalho permitiram as seguintes conclusões:

- o modelo *fuzzy* de controle mostrou-se eficiente no processo de condução racional da aeração de grãos de milho nas condições estabelecidas, apresentando exatidão na modelagem do raciocínio incerto e aproximado em mais de 90% das avaliações;
- o sistema de aquisição e controle de dados desenvolvido (CICLONE) apresentou custo total próximo a 20% (R\$ 2.855,24) do custo médio de sistemas comerciais, possibilitando, assim, seu uso como ferramenta útil para os pequenos e médios produtores de milho que buscam armazenar na propriedade;
- em relação aos sistemas de aeração já existentes no mercado, o CICLONE possui ótima relação de custo/benefício, pois é um sistema que apresenta configuração de operação dinâmica e fácil instalação. Com relação ao módulo de aquisição de dados, tem-se um sistema autônomo, tendo em vista não necessitar da intervenção de um operador no local da aquisição.

## 8 REFERÊNCIAS

- AMENDOLA, M.; CASTANHO, M. J.; NÄÄS, I.A.; SOUZA, A.L. Análise matemática de condições de conforto térmico para avicultura usando a teoria dos conjuntos *Fuzzy*. **Biomatemática Brasil**, Campinas, v. 14, p. 87-92, 2004.
- AXELSON, J. **Parallel port complete: programming, interfacing & using the PC's parallel printer port**. Madison: Lakeview Research, 2000.
- BARROS, L. C. de. **Teoria Fuzzy x Biomatemática**. Campinas: IMECC- UNICAMP, 2002.
- BORLAND, Web: <http://www.borland.com>, acesso em janeiro/2005.
- BURRELL, N. J. **Aeration systems**. London Road: Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, 1973. 45p.
- CADENAS, J.M.; PELTA, D.A.; PELTA, H.R.; VERDEGAY, J.L. **Application of Fuzzy optimization to diet problems in Argentinean farms**. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com>>. Acesso em: 5 jul. 2005.
- CELLITTO, M. A., Inteligência Artificial: uma aplicação em uma indústria de processo contínuo. In: **Gestão & Produção**, São Carlos, vol.9 no.3, Dec. 2002.
- CLOUD, H. A.; MOREY, R.V. **Management of stored grain with aeration**. St. Paul: University of Minnesota, 1979. 8p.
- CHANG, C. L. Interpretation and execution of *Fuzzy* programs. **Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes**. New York: Academic Press, 1974. p. 191-218.

CRUZ, L. F. **Modelo Fuzzy para obtenção do tempo de aeração em silos verticais visando reduzir o consumo de energia elétrica**. 2001. 102 f. Tese (Doutorado em Agronomia / Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

CVETICANIN, D. New approach to the dynamic weighing of livestock. **Biosystems Engineering**, United Kingdom, v. 86, n. 3, p. 247-52, 2003.

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

FEITOSA, H. A. **Princípios fundamentais da teoria Fuzzy**. 1992. 89p. Dissertação (Mestrado em Matemática/Fundamentos da Matemática) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 1992.

FIRK, R.; STAMER, E.; JUNGE, W.; KRIETER, J. Improving oestrus detection by combination of activities measurements with information about previous oestrus cases. **Livestock Production Sciences**, Clare, v. 82, n. 1, p. 97-103, 2003.

FORTIN, S.; QUENNEVILLE, J. **La ventilation, toujours de mise pour la conservation des grains**. CÉROM, Saint Bruno de Montarville. Bulletin Technique – Séchage et entreposage, n. 99.04, 1999, 2 p. Disponível em: <[http://www.cerom.qc.ca/documentations/N99\\_04.pdf](http://www.cerom.qc.ca/documentations/N99_04.pdf)>. Acesso em: 27 jul. 2005.

FORTIN, S.; QUENNEVILLE, J. **Ventilateurs et systèmes de ventilation pour les grains**. CÉROM, Saint Bruno de Montarville. Bulletin Technique – Séchage et entreposage, nº 5.05, 2002, 6p. Disponível em: <<http://www.cerom.qc.ca/documentations/B505.pdf>>. Acesso em: 25 jul. 2005.

GOTTSCHALK, K.; NAGY, L.; FARKAS, I. Improved climate control for potato stores by *Fuzzy* controllers. **Computers and Electronics in Agriculture**, Gödöllő, Hungary, v. 40, p.1027-140, 2003.

HALDERSON, J. L.; SANDVOL, L. E. **Maintaining stored grain quality**. Aberdeen: University of Idaho, Current Information Series n. 518, 1980. 5 p.

HARA, T.; ANDRADE, E. T.; DEVILLA, I. A.; BROD, F. P. R. Armazenagem na fazenda. **Caderno técnico máquinas – mecanização**, encarte edição agosto n. 44, 2005. 12 p.

ISAACS, G. W; NOYES, R.T. **Early history of grain aeration in large storages**. *Nomination document submitted to ASAE in 1999*. Disponível em: <<http://pasture.ecn.purdue.edu/~grainlab/new-info/asae-plaque/aeration-history.htm>>. Acesso em: 23 jul. 2005.

KNAPP, R.B. **Fuzzy Sets and Pattern Recognition**. College of Engineering, San Jose State University. 1998. Disponível em: <<http://www.engr.sjsu.edu/~Knapp/HCIFUZZY/htframe.htm>>. Acesso em 15 ago. 2003.

LACEY, B.; HAMRITA, T.K.; MCCLENDON, R. Feasibility of using neural networks for a real-time prediction of poultry deep body temperature responses to stressful changes in ambient temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, St. Joseph, v. 16, n. 3, p. 303-8, 2000.

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

MENDEL, J. M. *Fuzzy Logic Systems for Engineering: A Tutorial*, **Proc. of the IEEE**, v. 83, n. 3, March 1995.

MICROCHIP Technology Inc. **MCP3204/3208 datasheet**. 2002. Disponível em: < <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/21298c.pdf>>. Acesso em 29 ago. 2005.

MOURA, D.J.; NÄÄS, I.A.; QUEIROZ, M.P.G. Estimating thermal comfort and solar orientation in broiler housing using *Fuzzy Logic*. In: **Congreso Latinoamericano y del Caribe de Ingenieria Agrícola**, 6., 2004, San José, Costa Rica. *Memória...* San José: Asociación Costaricense de Ingenieros Agrícolas, 2004. 1 CD-ROM.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Fuzzy Logic for G Toolkit, Reference Manual**. 1997.

NATIONAL Semiconductor Corp. **LM135/LM235/LM335, LM135A/LM235A/LM335A Precision Temperature Sensors datasheet**. 2000. Disponível em: < <http://www.national.com/ds/LM/LM135.pdf>>. Acesso em 21 maio 2005.

NAVARRO, S.; CALDERON, M. **Aeration of grain in subtropical climates**. FAO Agricultural Services Bulletin, Rome, n. 52, 1982. 119 p.

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

RUHOFF, A. L.; SOUZA, B. S. S.; GIOTTO, E.; PEREIRA, R. S. *Lógica Fuzzy e Zoneamento ambiental da Bacia do Arroio Grande*. In: **Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, 16-21 abril 2005, INPE, p. 2355-2362.

SENSIRIUN AG. **SHT1x / SHT7x Humidity & Temperature Sensor datasheet**. 2005. Disponível em: < <http://www.sensirion.com/images/getFile?id=25>>. Acesso em 4 maio 2005.

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

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.

TEXAS Instruments Corp. **CD4051B, CD4052B, CD4053B datasheet**. 2000. Disponível em: < <http://www.us.oup.com/us/pdf/microcircuits/students/logic/cd4051-ti.pdf>>. Acesso em 18 maio 2005.

THOMPSON, T. L.; SHELTON, D. P. **Aeration of stored grain**, Nebguide, G84-692. Cooperative Extension Service, University of Nebraska, Lincoln, NE. 1993

YEN, J.; LANGARI, R.; ZADEH, L.A. **Industrial Applications of Fuzzy Logic and Intelligent Systems**. Piscataway, NJ. IEEE Press, New York, 1995.

ZADEH, L. A., *Fuzzy Sets*. In: **Information and Control**, v. 8, 1965. p. 338-353.

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

ZIMMERMAN, H.J. **Fuzzy Sets, Decision Making, and Expert Systems**. Boston, Dordrecht, London: Kluwer Academic Publishers, 1987.

ZIMMERMANN, H.J., **Fuzzy set theory and its applications**, Kluwer, Boston, 3 edition, 1996.