

Paulo Marcos de Barros Monteiro

**Tecnologia 1-Wire™ Aplicada ao Controle em Tempo
Real de Sistemas de Aeração de Grãos**

**Tese apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola,
para obtenção do título de “Doctor
Scientiae”.**

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2002**

Paulo Marcos de Barros Monteiro

**Tecnologia 1-Wire™ Aplicada ao Controle em Tempo
Real de Sistemas de Aeração de Grãos**

**Tese apresentada à Universidade
Federal de Viçosa, como parte das
exigências do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Agrícola,
para obtenção do título de “Doctor
Scientiae”.**

Aprovada em: 27 de fevereiro de 2002.

**Prof. Delly Oliveira Filho
(Conselheiro)**

**Prof. Paulo César Corrêa
(Conselheiro)**

Prof. José Emanuel Lopes Gomes

Dr. Wathney Hermsdorff

**Prof. José Helvecio Martins
(Orientador)**

Aos meus pais, Ney e Zina, e a Clarisse, que me ensinaram o mais importante
e a todos com quem pude aprender alguma coisa, dedico.

Nada é oco, nada é vazio.

Atrás da grade, sempre um segredo vigia.

(Moacyr Laterza)

AGRADECIMENTOS

Ao concluir este trabalho, sinto-me na obrigação de registrar meu reconhecimento a todos que, com sua acolhida e apoio, me acompanharam, direta ou indiretamente, durante sua realização. Estes podem não ter sido meus melhores momentos, mas, com certeza, vocês foram imprescindíveis para tornar horas difíceis menos árduas. Eu lhes manifesto, aqui, meu agradecimento mais sincero. Entretanto, a alguns, eu gostaria de fazê-lo nominalmente.

Ao Departamento de Engenharia de Controle e Automação (DECAT) da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, na pessoa do professor Jaime Roberto Teixeira Rios, por ter me liberado para fazer este curso e, em especial, aos professores José Emanuel Lopes Gomes, Luís Fernando Rispoli Alves e Sávio Augusto Lopes da Silva, por assumirem minhas atividades acadêmicas durante este afastamento.

À CAPES e à FAPEMIG pelo apoio financeiro.

Ao Departamento de Eletrónica e Telecomunicações da Universidade de Aveiro, Portugal, na pessoa do Prof. José Alberto Fonseca, por me permitir fazer um estágio no Laboratório de Controle e, em especial, ao Prof. Alexandre Manuel M. N. da Mota que me orientou durante este estágio e me iniciou no estudo da tecnologia *1-wire*TM.

Ao Centro de Treinamento e Transferência de Tecnologia da Fundação Gorceix, na pessoa do engenheiro Rogério Raimundo de Souza, pelo suporte na confecção dos circuitos eletrônicos utilizados no silo protótipo.

Aos companheiros Wathney Hermsdorff, José Márcio Costa e Roberto Precci Lopes pela amizade e atenção com que sempre me escutaram e pelo interesse e disposição com que me ajudaram a solucionar problemas. Aos demais colegas, pelo convívio e amizade ao longo destes quatro anos.

Aos meus conselheiros, professores Delly Oliveira Filho, Paulo César Corrêa e Sérgio Zolnier, pelo constante estímulo, acompanhamento e sugestões.

Ao Prof. José Helvecio Martins, por ter aceitado orientar este trabalho e pela forma como o fez. Com certeza, sem sua dedicação, empenho e, principalmente, paciência ele jamais teria sido concluído. Obrigado por seu apoio e compreensão, suas idéias e seu incentivo constante; principalmente, quando tudo parecia dar errado. Acima de tudo, obrigado pela amizade com que fui brindado.

BIOGRAFIA

Paulo Marcos de Barros Monteiro, filho de Ney de Albuquerque Monteiro e Maria Joana de Barros Monteiro, nasceu em Ouro Preto, MG, em 09 de março de 1954. Graduou-se em Engenharia Eletrônica na PUC - MG, fez cursos de especialização em Metodologia de Ensino e de Cultura e Arte Barroca na UFOP. Mestre em Engenharia Mecânica pela UFU em 1994, concluiu, em fevereiro de 2002, o doutorado em Engenharia Agrícola na área de Controle de Processos Agrícolas, na Universidade Federal de Viçosa.

Profissionalmente, é professor do Departamento de Engenharia de Controle e Automação da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, desde 1979.

ÍNDICE

Lista de Figuras	xi
Lista de Quadros	xv
RESUMO	xvi
ABSTRACT	xvii
1. SISTEMA DE AERAÇÃO DE GRÃOS	1
1.1. INTRODUÇÃO	1
1.2. O PROCESSO DE AERAÇÃO	2
1.3. SISTEMAS DE AERAÇÃO	6
1.4. MANEJO DO SISTEMA DE AERAÇÃO	8
1.5. FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA DE AERAÇÃO	11
2. CONTROLE DE SISTEMAS DE AERAÇÃO	14
2.1. INTRODUÇÃO	14
2.2. CONTROLE E MONITORAMENTO DO SISTEMA DE AERAÇÃO	16
3. PSICROMETRIA	22
3.1. INTRODUÇÃO	22
3.2. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS E PROCESSOS DA MISTURA AR-VAPOR D'ÁGUA	25
3.2.1 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS DO AR	26
3.2.2 AQUECIMENTO OU RESFRIAMENTO DE UMA MASSA DE AR	27
3.2.3 MISTURA DE DUAS MASSAS DE AR	28

4.	SISTEMAS DE CONTROLE	31
4.1.	INTRODUÇÃO	31
4.2.	SISTEMAS DE CONTROLE	32
4.3.	ESTRATÉGIAS DE CONTROLE	36
4.4.	CONTROLE LIGA-DESLIGA	37
4.5.	CONTROLE PROPORCIONAL	38
4.6.	CONTROLE PROPORCIONAL E INTEGRAL	41
4.7.	CONTROLE PROPORCIONAL, INTEGRAL E DERIVATIVO	43
4.7.1	PARÂMETROS DE UM CONTROLE PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO (PID)	46
4.7.2	ANÁLISE DE UM SISTEMA DE CONTROLE PID IMPLEMENTADO COM AMPLIFICADORES OPERACIONAIS	47
4.8.	APLICAÇÕES DOS CONTROLADORES	49
4.9.	CONTROLE ADAPTATIVO	51
5.	SISTEMA <i>1-WIRE</i>	52
5.1.	INTRODUÇÃO	52
5.2.	CONFIGURAÇÃO DE HARDWARE	56
5.3.	SEQÜÊNCIA DE TRANSMISSÃO DE DADOS	57
5.3.1	INICIALIZAÇÃO	57
5.3.2	COMANDOS DE FUNÇÃO ROM	58
5.4.	SINALIZAÇÃO DE ENTRADA E SAÍDA	64
5.5.	FUNÇÕES DE COMANDO DE MEMÓRIA	65
5.5.1	WRITE SCRATCHPAD (4Eh)	69
5.5.2	READ SCRATCHPAD (BEh)	69
5.5.3	COPY SCRATCHPAD (48h)	69
5.5.4	CONVERT T (44h)	69
5.5.5	RECALL E² (B8h)	70
5.5.6	READ POWER SUPPLY (B4h)	70

5.6.	READ/WRITE TIME SLOTS	70
5.6.1	WRITE TIME SLOTS	71
5.6.2	READ TIME SLOTS	71
5.7.	SEQÜÊNCIA DE ACESSO	72
6.	DS1820 – TERMÔMETRO DIGITAL <i>1-WIRE</i>	75
6.1.	INTRODUÇÃO	75
6.2.	GENERALIDADES	77
6.3.	ALIMENTAÇÃO PARASITA	79
6.4.	FUNCIONAMENTO DO DS1820	82
6.5.	SINALIZAÇÃO DE ALARME	86
6.6.	MEMÓRIA ROM DE 64 BITS GRAVADA A LASER	86
6.7.	VERIFICAÇÃO DE REDUNDÂNCIA CÍCLICA (CRC)	87
6.8.	MEMÓRIA	88
7.	OBJETIVOS	90
8.	MATERIAL E MÉTODOS	91
8.1.	INTRODUÇÃO	91
8.2.	DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE TEMPERATURA	92
8.3.	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE COMANDO PARA ACIONAMENTO AUTOMÁTICO DE MOTORES ELÉTRICOS	96
8.4.	DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL	98
8.5.	TESTE DO SISTEMA COMPUTACIONAL E DO SISTEMA DE CONTROLE PROPOSTA	108
8.5.1	O SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	108
8.5.2	O PROTÓTIPO DO SILO	109
8.5.3	VAZÃO DE AR DE AERAÇÃO	112
8.5.4	UMIDADE RELATIVA DO AR AMBIENTE	112

9.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	113
9.1.	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE TEMPERATURA	113
9.2.	COMANDO DO MOTOR DO VENTILADOR	113
9.3.	TESTES EXPERIMENTAIS DE AERAÇÃO	114
10.	RESUMO E CONCLUSÕES	128
11.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	TÍTULO	PÁGINA
1.1 -	Migração de umidade em grãos armazenados quando a temperatura externa está decrescendo	5
1.2 -	Migração de umidade em grãos armazenados quando a temperatura externa é maior que a temperatura da massa de grãos	5
1.3 -	Elementos básicos de um sistema convencional de controle de aeração	8
1.4 -	Diagrama de condução da aeração e conservação de grãos	10
1.5 -	Diagrama de conservação de grãos	11
1.6 -	Temperatura das camadas de grãos durante pequeno período de aeração	12
2.1 -	Diagrama de perdas por atividades biológicas	14
3.1 -	Gráfico psicrométrico mostrando o ponto de estado	27
3.2 -	Processo de aquecimento ou resfriamento do ar a calor sensível	28
3.3 -	Processo de aquecimento ou resfriamento adiabático do ar	28
3.4 -	Temperatura de bulbo seco	29
3.5 -	Mistura de duas massas de ar	29
4,1 -	Sistema de controle em malha aberta	33
4,2 -	Sistema de controle em malha fechada	34
4.3 -	Sistema de controle digital em malha fechada	35
4.4 -	Sinais em um sistema de controle liga-desliga	38
4.5 -	Sinal de controle de um controlador proporcional	39
4.6 -	Diagrama de blocos de um sistema de controle convencional	40
4.7 -	Sinais de controle de um controlador proporcional de temperatura	41
4.8 -	Sinal de erro integral	42
4.9 -	Elemento integrador com reinicialização automática	43

4.10 - Situação de controle PI em que os sinais de saída são idênticos	44
4.11 - Efeito dos três elementos sobre o sinal de erro	45
4.12 - Diagrama de blocos de um controlador PID	47
4.13 - Controlador PID implementado com amplificadores operacionais	48
4.14 - Sinais de um controlador PID	49
5.1 - DS1411 – Interface da porta serial RS232C com a linha <i>1-wireTM</i>	53
5.2 - Esquema do conector DS1820	54
5.3 - Código de identificação dos dispositivos	54
5.4 - Níveis lógicos utilizados no sistema <i>1-wireTM</i>	55
5.5 - Configuração de hardware	56
5.6 - Lógica de execução das funções de memória apenas de leitura	63
5.7 - Procedimento de inicialização do DS1820: pulsos de inicialização e de presença	64
5.8 - Lógica de funcionamento dos comandos de função memória	66
5.9 - Seqüência de pulsos	70
5.10 - Pulsos de escrita e leitura	72
6.1 - Sensores de temperatura DS1820	76
6.2 - Diagrama de blocos do DS1820	78
6.3 - Circuito de alimentação parasita do DS1820	80
6.4 - Utilização da linha I/O para alimentação do DS1820	80
6.5 - Polarização robusta (strong pull up) para alimentação do DS1820 durante a conversão de temperatura	81
6.6 - Utilização da fonte externa para alimentação do DS1820	82
6.7 - Diagrama de Blocos do circuito de medição de temperatura do Ds1820	84
6.8 - Gerador de código de CRC do sistema <i>1-wireTM</i>	88
6.9 - Organização da memória do DS1820	89
8.1 - O sistema <i>1-wireTM</i>	92

8.2 - Níveis lógicos CMOS/TTL	93
8.3 - Seqüência de comunicação entre o mestre e um escravo	94
8.4 - Sensor de temperatura DS1820 alimentado por uma fonte externa	95
8.5 - Circuito com o sensor de temperatura DS1820 e o regulador de tensão 7805 alimentado por uma fonte externa	95
8.6 - Circuito impresso com o DS1820 instalado em condutele	96
8.7 - Circuito de comando do motor que aciona o ventilador	97
8.8 - Fluxograma do programa computacional	105
8.9 - Conexão da linha de transmissão de dados <i>1-wire™</i> com a porta serial do computador por meio do conector DS1411	109
8.10 - O silo protótipo para testes experimentais	110
8.11 - Distribuição de sensores no interior do silo	111
9.1 - Variação da temperatura máxima e média da massa de grãos durante 342 hora de aeração e estado do motor. Data do teste: 28/12/2001; horário de início: 9 h 13 min; produto: milho; teor de umidade inicial: 13% bu; Fluxo de ar: 0,065 m ³ /min.t	116
9.2 - Variação da temperatura máxima da massa de grãos durante as primeiras 100 horas de aeração	116
9.3 - Variação da temperatura máxima da massa de grãos entre a 100 ^a e a 200 ^a hora de aeração	117
9.4 - Variação da temperatura máxima da massa de grãos entre a 200 ^a e a 300 ^a hora de aeração	117
9.5 - Variação da temperatura máxima da massa de grãos entre a 300 ^a e a 350 ^a hora de aeração	118
9.6 - Variação da temperatura e da umidade relativa do ar e da temperatura de entrada do ar durante 342 horas de aeração. Data do teste: 28/12/2001; horário de início: 9 h 13 min; produto: milho; teor de umidade inicial: 13% bu; Fluxo de ar: 0,065 m ³ /min.t	118
9.7 - Variação da temperatura máxima da massa de grãos e estados do motor entre a 140 ^a e 170 ^a hora de aeração	119
9.8 - Variação da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente e da temperatura de entrada do ar durante as primeiras 100 horas de aeração	120

9.9 - Variação da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente e da temperatura de entrada do ar durante a 100 ^a e a 200 ^a hora de aeração	121
9.10 - Variação da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente e da temperatura de entrada do ar durante a 200 ^a e a 300 ^a hora de aeração	121
9.11 - Variação da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente e da temperatura de entrada do ar durante a 300 ^a e a 350 ^a hora de aeração	122
9.12 - Progressão da frente de resfriamento no interior da massa de grãos durante 342 horas de aeração. Data do teste: 28/12/2001; horário de início: 9 h 13 min; produto: milho; teor de umidade inicial: 13% bu; Fluxo de ar: 0,065 m ³ /min.t	123
9.13 - Progressão da frente de resfriamento no interior da massa de grãos durante as primeiras 100 horas de aeração	124
9.14 - Progressão da frente de resfriamento no interior da massa de grãos entre a 100 ^a e a 200 ^a hora de aeração	124
9.15 - Progressão da frente de resfriamento no interior da massa de grãos entre a 200 ^a e a 300 ^a hora de aeração	125
9.16 - Progressão da frente de resfriamento no interior da massa de grãos entre a 300 ^a e a 350 ^a hora de aeração	125

LISTA DE QUADROS

QUADRO	TÍTULO	PÁGINA
1.1	Recomendação de fluxos de ar para aeração de grãos	6
2.1	Tempo em horas para se obter uma elevação de 5°C na massa de grãos (LASSERAN, 1981)	15
3.1	Composição aproximada de ar seco (SILVA 2000)	22
5.1	Conjunto de comandos de memória do DS1820	65
5.2	Seqüência de comandos de conversão de temperatura	73
5.3	Seqüência de comandos de gravação de dados na memória temporária	74
6.1	Descrição dos terminais dos sensores de temperatura DS1820	76
6.2	Relação entre os dados de saída e a temperatura medida mostrando o byte menos significativo (LSB) e o byte mais significativo (MSB)	84
6.3	Exemplos de alguns valores de temperatura convertidos em binário	85
6.4	Código de identificação de memória ROM de 64 bits gravada a laser	87

RESUMO

Monteiro, Paulo Marcos de Barros, DS, Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2002. **Tecnologia 1-wire™ aplicada ao controle em tempo real de sistemas de aeração de grãos.** Orientador: José Helvecio Martins. Conselheiros: Delly Oliveira Filho, Paulo César Corrêa e Sérgio Zolnier.

Neste trabalho, desenvolveu-se um sistema de controle inteligente, em tempo real, para aeração de grãos armazenados, utilizando-se a tecnologia *1-wire™* da *Dallas Semiconductor*. No lugar dos termopares convencionais, utilizaram-se sensores de temperatura DS1820. Esta tecnologia, proposta pela *Dallas Semiconductor*, permite uma transferência bidirecional de dados ao mesmo tempo em que alimenta dispositivos remotos por meio da própria linha de dados. Cada um destes dispositivos pode ser endereçado, pois possui um código de endereçamento individual e único. Trata-se de um sistema com um mestre e múltiplos escravos ligados por meio de um único condutor, com saída em dreno aberto, alimentado por uma fonte de 5 V CC, através de um resistor de polarização. Para testar o sistema de controle proposto, construiu-se um silo protótipo e desenvolveu-se um programa computacional que realiza a aquisição de dados de temperatura em tempo real, faz os cálculos necessários e, baseado nas condições psicrométricas do ar e da massa de grãos, juntamente com a estratégia de manejo utilizada, gerencia o sistema de controle.

ABSTRACT

Monteiro, Paulo Marcos de Barros, DS, Universidade Federal de Viçosa, February, 2002. **The 1-wire™ technology applied to real time control of grain aeration systems.** Adviser: José Helvecio Martins. Committee Members: Delly Oliveira Filho, Paulo César Corrêa and Sérgio Zolnier.

In this work, a real time intelligent control system for stored grain aeration systems was developed, employing the *1-wire™* technology developed by Dallas Semiconductor. The standard thermocouples, commonly used in aeration systems, were replaced by DS1820 digital temperature sensors. This technology allows for a half duplex data transfer and each device connected to the system can be addressed, because each one contains a unique individual identification code. The *1-wire™* system is an open drain master-slave system connected by a single conductor and powered by a 5 V DC, through a pull up resistor, at the master. For testing the control system, a grain bin prototype was built and a software was developed to perform real time temperature data acquisition. The program makes the necessary calculations and, based on psychrometric conditions of the air and of the grain mass, and the aeration strategy used, monitors the control system.

Keywords: Control Systems, *1-Wire™* System, Automation, Grain Aeration, DS1820.

1. SISTEMA DE AERAÇÃO DE GRÃOS

1.1. INTRODUÇÃO

Grãos são armazenados por diversos motivos, até mesmo para especulação de melhores preços no mercado e uso na alimentação de animais. Por serem organismos vivos e estarem sujeitos a diversas transformações, durante o período de armazenamento, um programa de gerenciamento adequado é necessário para manter a qualidade do produto, inibindo a ação de fungos, insetos, ácaros e roedores. A respiração dos grãos também contribui para a perda de matéria seca, embora estas perdas sejam pequenas quando comparadas com aquelas causadas por organismos vivos (CHANG e STEELE, 1995).

A interação entre as variáveis químicas, físicas e biológicas do sistema de armazenamento resulta na deterioração do produto armazenado. A deterioração dos grãos é um processo complexo, lento e pouco perceptível no início. Porém, poderá acelerar-se se as variáveis químicas, físicas e biológicas estiverem favoráveis à atividade biológica do grão e de outros organismos vivos que compõem o meio ecológico criado pela massa de grãos (FOCKINK, 1994).

O segredo para que os grãos sejam armazenados em condições adequadas consiste em armazená-los limpos e em ambiente seco e de baixa temperatura (MAIER e MONTROSS, 1997; SINÍCIO e MUIR, 1998), pois baixas temperaturas diminuem as atividades biológicas no ecossistema dos grãos e previnem contra migração de umidade.

Em unidades armazenadoras mais antigas, sempre que se verificava qualquer problema de armazenagem relacionado à não uniformidade do teor de umidade na massa de grãos ou aumento de temperatura que pudesse comprometer a qualidade do produto, fazia-se a transilagem, isto é, a movimentação dos grãos através do ar ambiente. Este processo, ainda hoje utilizado, pode até resolver o problema, mas trás alguns inconvenientes como

perdas quantitativas e qualitativas durante a movimentação dos grãos, necessidade de sempre haver uma célula de estocagem vazia que permita a remoção do produto transilado, tempo de execução elevado e um alto custo operacional (WEBER, 1995; SILVA, 2000).

Para solucionar alguns problemas oriundos da transilagem, surgiu a técnica de aeração, que consiste na passagem forçada de ar, com um fluxo adequado, através da massa de grãos. Esta técnica, conhecida desde o século XVIII, tornou-se uma prática comum em todo o mundo, mas somente nas últimas décadas começou a ser utilizada no Brasil (PEREIRA, 1998).

Entretanto, depois de aplicações sucessivas do processo de aeração, sempre que houver formação de blocos de grãos e concentração de finos, que dificultam a passagem do ar, é imprescindível submeter o produto a uma transilagem e, se possível, passá-lo pelo sistema de limpeza (SILVA, 2000).

O uso da aeração, em absolutamente nada, melhora a qualidade do produto estocado, apenas preserva suas características iniciais por mais tempo. Portanto, a aeração é uma técnica de conservação para ser usada de maneira preventiva. Entretanto, no Brasil ela tem sido empregada para solucionar problemas de aquecimento da massa de grãos, ou seja, como uma técnica corretiva, aplicada depois da ocorrência dos problemas (PEREIRA, 1998).

1.2. O PROCESSO DE AERAÇÃO

A aeração consiste, basicamente, na circulação forçada do ar ambiente através da massa de grãos armazenados com a finalidade de estabelecer e manter uma temperatura moderadamente baixa e uniforme em todo o volume de grãos (HARA e CORRÊA, 1981). Visa reduzir a taxa de deterioração e prevenir perdas no armazenamento, pois a deterioração dos grãos armazenados é causada pelo desenvolvimento de mofo e atividade de insetos, e está relacionada com o teor de umidade e a temperatura do produto (CLOUD e MOREY, 1991).

Dependendo do fluxo de ar, a aeração também pode ser empregada para secagem de grãos (LASSERAN, 1981). Com efeito, quando as condições

ambientais são adequadas, pode ocorrer uma pequena secagem do produto. Entretanto, segundo MAIER e MONTROSS (1997), a vazão de ar utilizada na aeração é tão baixa que a variação no teor de umidade do grão não ultrapassa 0,5 ponto percentual.

As técnicas de aeração podem ser aplicadas em qualquer estrutura de armazenamento de grãos a granel. Porém, tanto em silos quanto em graneleiros, sem a utilização de um sistema de aeração bem projetado e conduzido corretamente, a armazenagem eficiente de grãos durante períodos prolongados torna-se impraticável.

Embora seu emprego não melhore em nada a qualidade do produto estocado, a aeração preserva suas características iniciais por mais tempo. Com relação à transilagem, a principal vantagem da aeração consiste na possibilidade de supervisionar o sistema e o produto durante o período de operação, por meio da monitoração e controle do sistema de aquisição de dados de temperatura da massa de grãos, dados climáticos e atuação no sistema de movimentação do ar (SILVA, 2000).

Como, em sistemas de aeração de grãos, as vazões de ar normalmente utilizadas são muito pequenas, o processo de resfriamento e uniformização da temperatura do produto é lento e exige muitas horas para ser plenamente realizado. Porém, para se usufruir de todos os benefícios que esta técnica pode oferecer, é necessário que o ar ambiente insuflado através da massa de grãos esteja em condições de temperatura e umidade relativa adequadas pois, dependendo das condições em que se encontram o ambiente e o produto, a aeração pode ter efeitos prejudiciais sobre os grãos armazenados (PEREIRA, 1998).

Segundo WEBER (1995), os principais objetivos para utilização das técnicas de aeração em um sistema de armazenagem são:

- diminuição da temperatura e do teor de umidade dos grãos;
- controle de insetos e fungos;
- aplicação de fumigantes (expurgo);
- evitar as correntes de ar de convecção (migração de umidade);
- evitar a transilagem, diminuindo os custos de armazenagem;

- evitar danos mecânicos aos grãos;
- conservar as qualidades químicas, físicas e biológicas dos grãos.

PUZZI (1986) considera ainda a redução de maus odores e a seca-aeração, embora a principal função da aeração seja o resfriamento da massa de grãos e, conseqüentemente, a criação de um microclima que favoreça a sua conservação, inibindo a atividade de insetos e o desenvolvimento da microflora.

Os grãos, depois de terem sido secados, resfriados e colocados no armazém com teor de umidade entre 13 e 15% b.u. (base úmida), têm sua temperatura, freqüentemente, superior à temperatura média do ambiente. Assim, os grãos próximos às paredes do silo e os da superfície começam a resfriar-se até atingirem uma temperatura inferior à temperatura do interior da massa de grãos (FOSTER e TUIITE, 1983). Segundo LASSERAN (1981), com este teor de umidade é conveniente manter a temperatura da massa de grãos em torno de 18°C.

Variações na entalpia do ar ambiente criam gradientes de temperatura nos grãos armazenados. Por esta razão, ocorre a convecção natural do ar intergranular. A umidade tende a deslocar-se de regiões mais quentes para regiões mais frias, podendo provocar condensação de umidade na superfície mais fria da massa de grãos.

O acúmulo de umidade em determinadas áreas da massa de grãos estimula o aparecimento e o desenvolvimento de fungos e o encrustamento da massa no centro do silo. Portanto, pelo exposto, vê-se que temperatura e umidade são os principais fatores que, direta ou indiretamente, afetam a qualidade do grão durante o período de armazenamento (FOSTER e TUIITE, 1983). As Figuras 1.1 e 1.2 ilustram a localização de um ponto úmido causado pela migração de umidade quando a temperatura do ambiente está diminuindo ou aumentando, respectivamente.

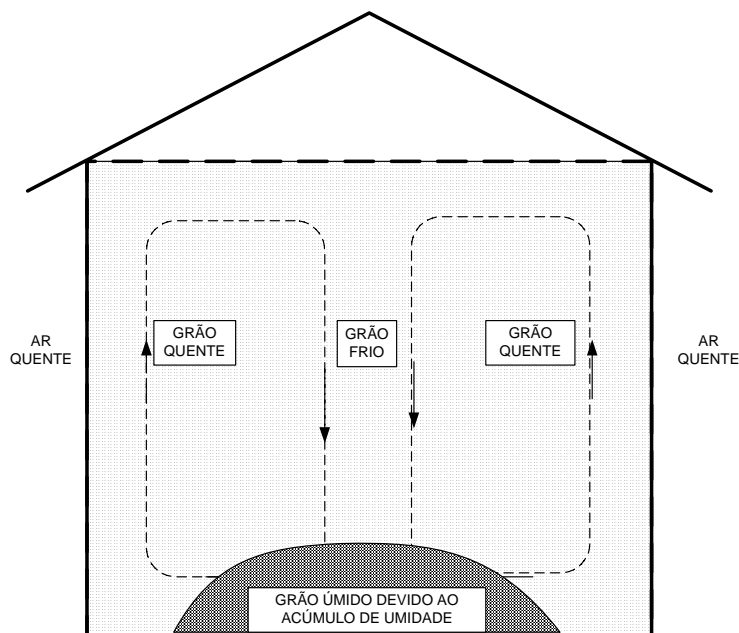


FIGURA 1.1 - Migração de umidade em grãos armazenados quando a temperatura externa é inferior à temperatura da massa de grãos.

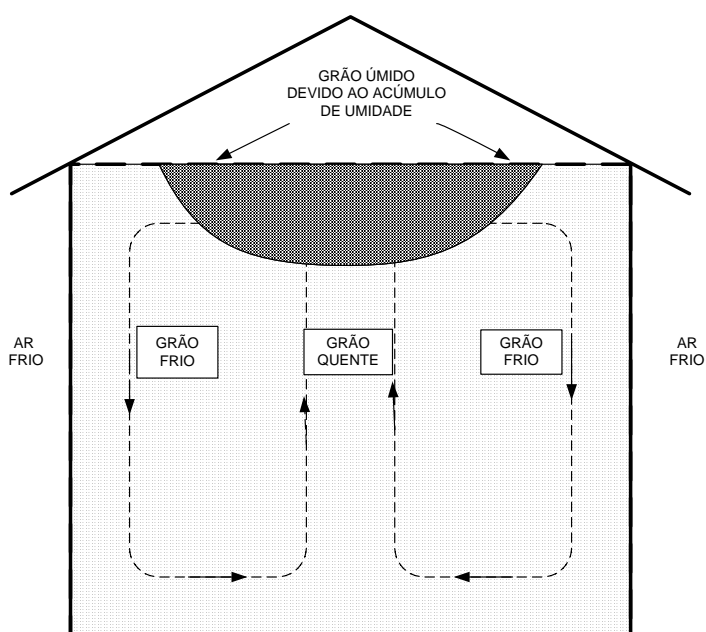


FIGURA 1.2 - Migração de umidade em grãos armazenados quando a temperatura ambiente é superior à temperatura da massa de grãos.

1.3. SISTEMAS DE AERAÇÃO

Um sistema de aeração é constituído, basicamente, por um ventilador acionado por um motor elétrico, um duto de suprimento de ar, dutos de aeração ou fundo perfurado, e dispositivos para monitorar, acionar e controlar o sistema (SILVA, 2000). Eles podem variar desde um simples controlador liga-desliga, operado manualmente, até um sistema controlado por um computador de última geração (MAIER e MONTROSS, 1997).

O ventilador deve fornecer a quantidade de ar necessária para vencer a resistência à passagem do ar através da massa de grãos (BROOKER et al., 1992). Ele pode ser do tipo centrífugo ou radial, dependendo da pressão estática e do fluxo de ar demandado pela unidade de armazenamento (ARAÚJO, 1998). Nos ventiladores axiais, o ar entra e sai paralelamente ao eixo. São mais indicados quando se necessitam de baixas pressões e elevadas vazões de ar. Caso contrário, os ventiladores centrífugos são mais eficientes. Nestes, o ar entra paralela e sai perpendicularmente ao eixo do ventilador. Porém, o importante é que o ventilador seja corretamente dimensionado para poder fornecer o fluxo de ar necessário para cada situação.

Tabelas e programas computacionais podem ser consultados para dimensionamento de novas unidades ou adequação das instalações já existentes (MAIER e MONTROSS, 1997). O Quadro 1.1 apresenta a indicação de alguns fluxos de ar para a aeração. Podem ocorrer algumas variações em função do tipo de grão, finalidade e tempo de aeração, entre outros.

QUADRO 1.1 - Recomendação de fluxos de ar para aeração de grãos

Tipo de armazém / Finalidade	Fluxo de ar (m ³ /min.t de grãos)					
	Regiões frias			Regiões quentes		
Horizontais	0,05	a	0,10	0,10	a	0,20
Verticais	0,025	a	0,05	0,05	a	0,10
Manter grãos úmidos	0,30	a	0,60	0,30	a	0,60
Seca-aeração	0,50	a	1,00	0,50	a	1,00

Fonte: LACERDA FILHO e AFONSO (1992)

Quanto ao movimento do ar, este pode ser ascendente ou descendente. No primeiro caso, o ventilador é instalado na base do silo e o ar é insuflado no interior do silo. No segundo, há uma sucção. Diversos pontos devem ser analisados antes de se decidir por qualquer um deles, pois há na literatura bastante controvérsias sobre as vantagens e desvantagens de cada um. Entretanto, deve-se considerar que todo ventilador e sistema de distribuição de ar promovem um aquecimento, devido ao atrito e à compressão, que pode atingir até 5°C (PEREIRA, 1998).

O ar é distribuído no interior do silo por meio de dutos de aeração ou fundo perfurado, que são ligados ao ventilador por meio de dutos de suprimento. Os dutos de aeração, embora mais baratos, não distribuem o ar tão uniformemente quanto o fundo perfurado. Porém, uma distribuição correta dos dutos de aeração no armazém contribui para diminuir esta não uniformidade (SILVA, 2000).

O monitoramento do sistema de aeração em silos ou em graneleiros é feito, normalmente, por meio de um sistema de termometria, constituído por um conjunto de sensores de temperatura dispostos de forma regular no interior da estrutura de armazenagem.

Os sensores de temperatura ou elementos termossensíveis são constituídos por termopares, termistores ou resistores de platina (LASSERAN, 1981). Na prática, porém, os termopares de liga de cobre-constantan são os mais utilizados. Utilizam-se diversos fios de cobre ligados a um único fio de constantan, suportados por um cabo de aço (LACERDA FILHO e AFONSO, 1992).

A instalação destes cabos é feita em pontos estratégicos da massa de grãos, determinados por critérios técnicos e econômicos. Entretanto, WEBER (1995) recomenda uma distância máxima de 6,0 m entre cabos e 2,0 m entre pontos de um mesmo cabo. Desta forma, cada sensor faz o monitoramento de um raio de 3,0 m.

Os sensores de temperatura servem para verificar as condições dos ambientes internos e externos da massa de grãos. Sempre que se detectar que a temperatura da massa de grãos atingiu um valor crítico acima da temperatura

do ambiente, o conjunto motor-ventilador deve ser acionado, a fim de se fazer a circulação de ar através da massa de grãos, em quantidade suficiente para promover o seu resfriamento (SILVA, 2000). O sistema de aeração, ao ser acionado, deve funcionar o tempo necessário para remover a frente quente da massa de grãos. A Figura 1.3 apresenta os componentes básicos de um sistema de aeração em um silo, conforme descrito anteriormente.

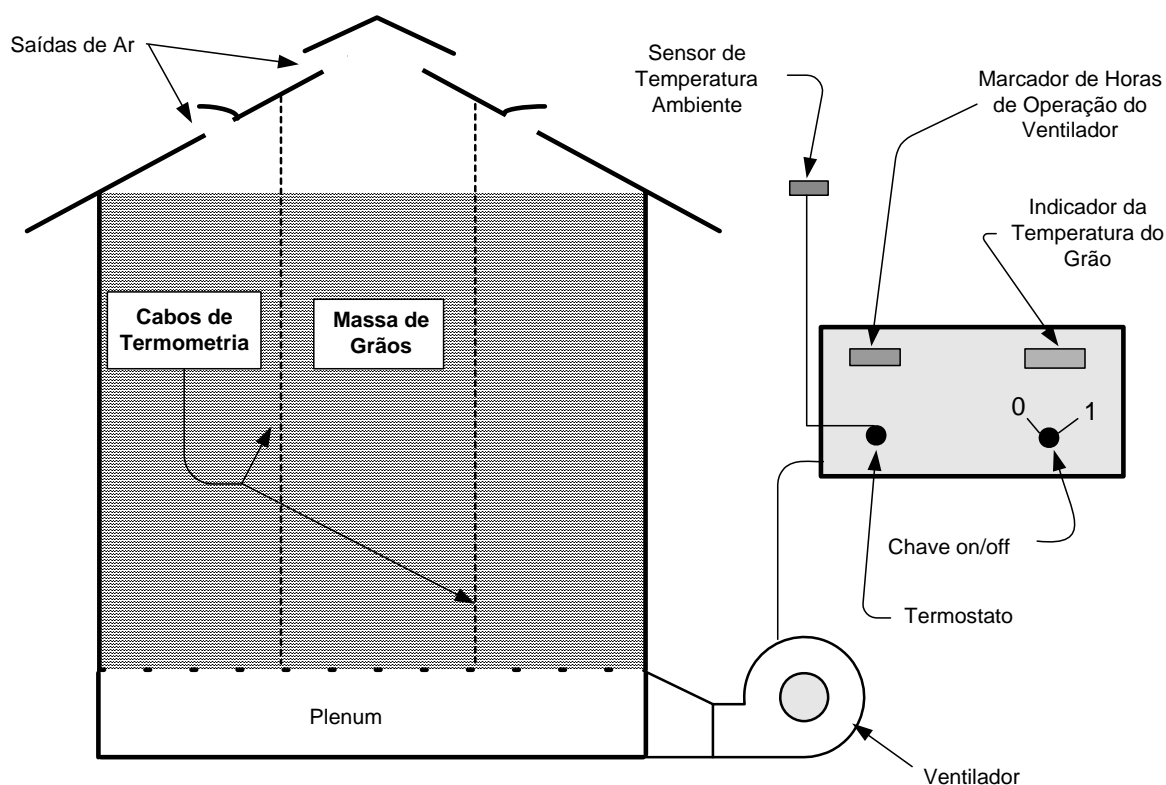


FIGURA 1.3 - Elementos básicos de um sistema convencional de controle de aeração.

1.4. MANEJO DE SISTEMAS DE AERAÇÃO

O princípio básico para a condução da aeração é a necessidade de se reduzir a temperatura da massa de grãos. O processo deve ser conduzido sempre que a temperatura do ambiente for inferior, em alguns graus, à temperatura da massa de grãos. Deve-se considerar também a umidade

relativa do ar ambiente e a diferença entre esta e a umidade relativa do ar intergranular.

Dependendo das condições de temperatura, da umidade relativa e da diferença de temperatura entre a massa de grãos e o ar, o efeito da aeração pode ser de secagem, de reumedecimento ou de manutenção do equilíbrio higroscópico do produto. Portanto, antes de se optar pelo uso de um sistema de aeração, deve-se avaliar as condições climáticas para atender aos objetivos propostos (SILVA, 2000).

Baseado no gráfico psicrométrico e nas curvas de equilíbrio entre a umidade relativa do ar e o teor de umidade da massa de grãos, LASSERAN (1981) desenvolveu um método bastante simples para conduzir racionalmente o processo de aeração. Por meio dele, pode-se prever a natureza dos riscos a que o produto ficará sujeito durante o processo (SILVA, 2000).

Para utilizar este método, é necessário definir três parâmetros: (i) a temperatura da massa de grãos, (ii) a temperatura do ar ambiente e (iii) a umidade relativa do ar ambiente. Colocando-se a umidade relativa do ar na abscissa e a diferença entre as temperaturas do grão e do ar na ordenada, o ponto de interseção destes dois valores define a situação em que o produto se encontra.

Desta forma, tem-se que:

- resfriamento inferior a 3° C implica em aeração sem interesse;
- resfriamento compreendido entre 3 e 5° C implica em aeração possível;
- resfriamento compreendido entre 5 e 7° C implica em aeração recomendada;
- resfriamento superior a 7° C implica em aeração recomendada com riscos de condensações locais ou de sobre-secagem geral.

Neste diagrama, verifica-se que a melhor condição para armazenar a massa de grãos está definida pela área definida entre as curvas A e B.

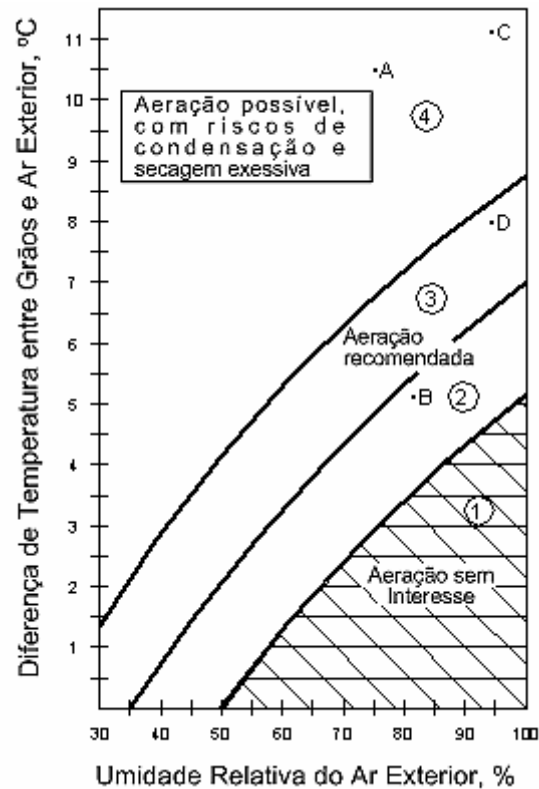


FIGURA 1.4 - Diagrama de condução da aeração e conservação de grãos.

LACERDA FILHO e AFONSO (1992) apresentam um diagrama proposto por Burgs e Burrell em 1973 que estabelece outras variáveis que permitem uma análise técnica sobre o uso da aeração. Com ele, é possível prever a natureza dos riscos dos grãos armazenados por meio das relações entre a temperatura e o teor de umidade de uma massa de grãos. Por este diagrama, mostrado na Figura 1.5, pode-se estabelecer as seguintes condições:

- A área superior, definida pela linha de 18° C, indica as condições favoráveis ao desenvolvimento de insetos;
- A área à direita da linha B indica as condições da perda de germinação;
- A área superior de B, acima da linha A indica as condições em que a perda de germinação e o ataque de insetos podem ocorrer simultaneamente;
- A área à esquerda da linha B e abaixo da linha A indica as melhores condições de armazenamento.

Deve-se salientar que, em nenhuma hipótese, deve-se armazenar grãos nas condições estabelecidas pela área delimitada à direita da linha C.

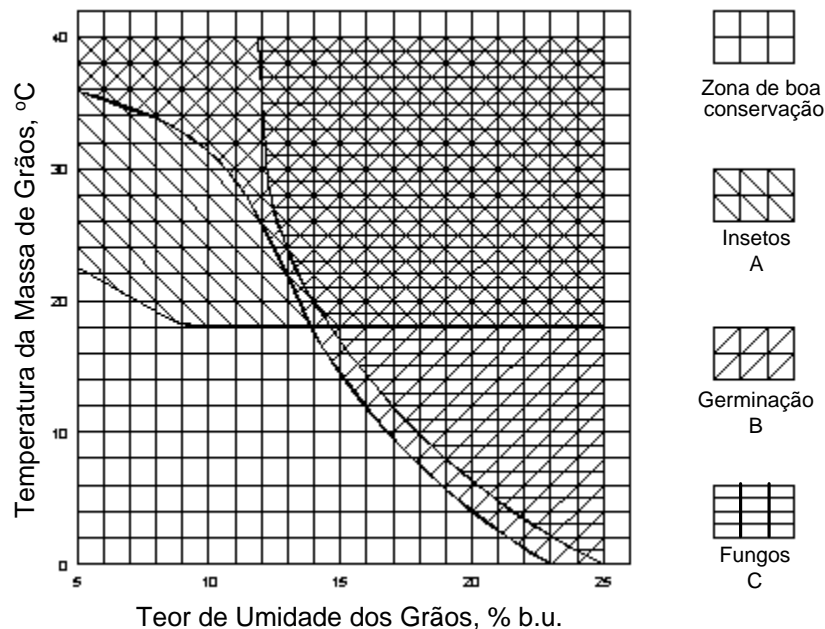


FIGURA 1.5 - Diagrama de Conservação de grãos.

1.5. FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA DE AERAÇÃO

O acionamento do sistema de aeração por poucas horas não irá resfriar toda a massa de grãos contida em um silo, a não ser que ele esteja carregado com uma camada de grãos muito pequena. Em um silo cheio, os grãos próximos à entrada de ar serão resfriados à temperatura do ar de entrada enquanto a temperatura dos grãos nas camadas superiores permanecerá praticamente nas mesmas condições iniciais, exceto na faixa em que está ocorrendo o resfriamento, conforme mostrado na Figura 1.6. A operação deve durar até que a frente de resfriamento tenha varrido toda a massa de grãos e a camada superior tenha atingido a temperatura do ar de aeração (SILVA, 2000).

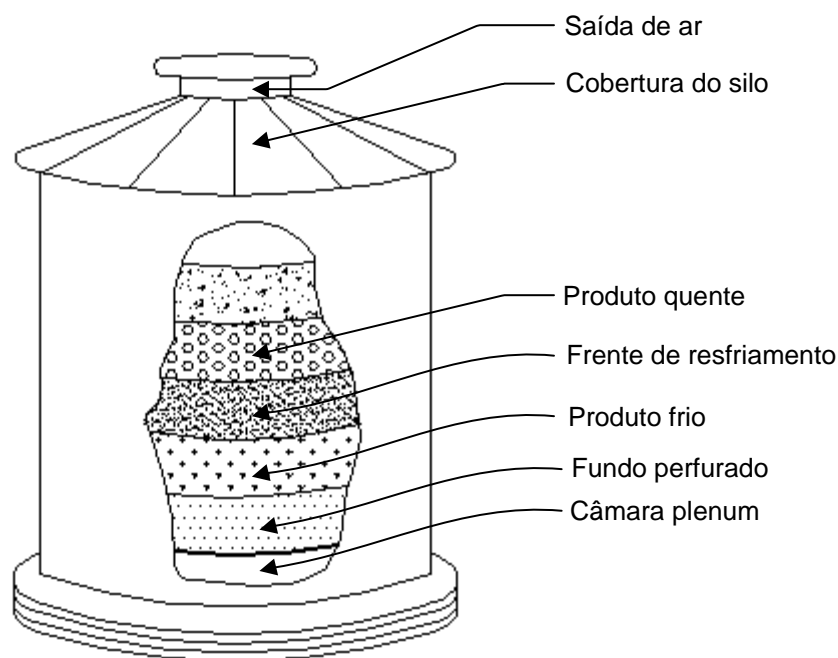


FIGURA 1.6 - Temperatura das camadas de grãos durante o processo de aeração.

Caso a aeração seja interrompida antes da frente de resfriamento varrer toda a massa de grãos, as diferenças de temperatura entre as camadas resfriadas, camadas em resfriamento e camadas ainda não resfriadas podem provocar migração de umidade e acelerar o processo de deterioração do produto.

Uma vez que um dos principais objetivos da aeração é manter a temperatura da massa de grãos o mais uniforme possível e próxima das condições do ar exterior, o processo de aeração só pode ser interrompido quando a frente de resfriamento atingir a superfície do produto.

Para evitar a migração de umidade e promover o resfriamento da massa de grãos, deve-se operar o sistema de aeração sempre que a temperatura externa cair 7°C abaixo da temperatura dos grãos, considerando-se que a umidade relativa média do ar de resfriamento deve ser igual ou ligeiramente inferior à umidade relativa de equilíbrio do produto. Entretanto, devido à flutuação diária de umidade relativa, deve-se operar o sistema de aeração

sempre que a umidade relativa do ar estiver 10 pontos percentuais acima da umidade relativa de equilíbrio do grão (SILVA, 2000).

Segundo LASSERAN (1981), aerações realizadas com grandes diferenças de temperatura entre o ar e o grão são desaconselháveis. Nestas condições corre-se o risco de produzir condensação de água sobre as paredes e na superfície da massa de grãos, provocando a formação de crostas impermeáveis às correntes de ar.

2. CONTROLE DE SISTEMAS DE AERAÇÃO

2.1. INTRODUÇÃO

Para garantir as condições de conservação dos grãos, não deve haver elevação de temperatura. Qualquer aumento de temperatura indica que está havendo perda de produto causada por fungos, bactérias, insetos ou mesmo a própria respiração dos grãos. Portanto, medindo-se e acompanhando-se a variação de temperatura da massa de grãos têm-se, indiretamente, informações, sobre o estado do produto armazenado (S. Filho, 1996).

Embora a elevação de temperatura seja consequência dos processos biológicos, ela desencadeia ou acelera outros processos de deterioração, agindo, assim, como causa de perdas. Portanto, se o problema existente na massa de grãos não for corrigido tão logo seja detectado, em pouco tempo, perde-se todo o produto, principalmente se os grãos apresentarem alto teor de umidade.

O diagrama de perdas por atividades biológicas, apresentado por S. Filho (1996) e mostrado na Figura 2.1, ilustra este fato. Se o problema for detectado na fase I, com pouca aeração consegue-se reduzir a temperatura antes de a fase II ser atingida e evitar a evolução do ciclo (fases II e III).

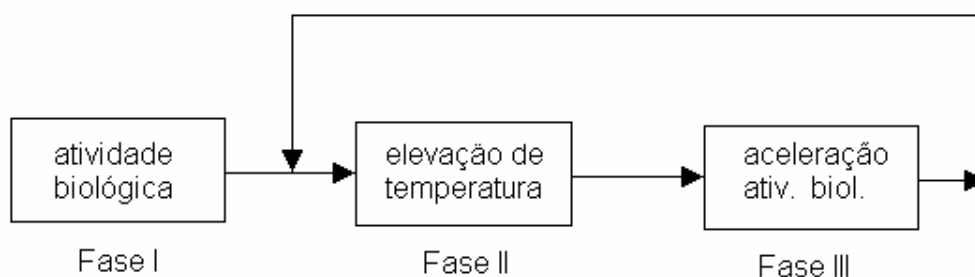


FIGURA 2.1 - Diagrama de perdas por atividades biológicas (S. FILHO, 1996).

O Quadro 2.1, apresentado por LASSERAN (1981), mostra o tempo teórico para se obter uma elevação de temperatura de 5°C na massa de grãos armazenados, para vários teores de umidade, a partir de uma determinada temperatura inicial. Verifica-se que, para grãos com teor de umidade superior a 20% bu, a uma temperatura de 15°C, dependendo do grão, gastam-se cerca de 10 a 15 dias para aumentar a temperatura em 5°C. Nesta situação, bastam mais cinco ou 10 dias para aumentar a temperatura em mais 5°C. Depois de atingir a faixa de 25°C, a temperatura aumenta em 5°C a cada um ou dois dias (WEBER, 1995).

QUADRO 2.1 - Tempo em horas para se obter uma elevação de 5°C na massa de grãos

Grãos	Teor de Umidade (% b.u.)	Temperatura inicial da massa de grãos (°C)				
		5	10	15	20	25
Milho	16	1.500	750	400	175	100
	20	540	270	145	60	36
	24	360	180	100	40	24
	35	175	90	150	20	12
Trigo e Cevada	16	4.100	2.000	1.000	480	240
	20	1.200	600	300	145	72
Colza	10	11.500	2.000	700	170	50

Para medir e monitorar a temperatura em diversos pontos da massa de grãos armazenados utiliza-se um sistema de termometria. O sistema de termometria convencional é constituído por termopares instalados em cabos de aço fixados na estrutura de sustentação do armazém. Na prática, o termopar cobre-constantan é o mais empregado. Utilizam-se diversos fios de cobre ligados a um único fio de constantan (LACERDA FILHO e SILVA, 1995).

A quantidade mínima e a distribuição dos termopares em um armazém devem obedecer às normas estabelecidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). WEBER (1995) recomenda, porém, uma distância máxima de 6,0 m entre cabos e de 2,0 m entre pontos do mesmo cabo. Desta

forma, todos os sensores ficam imersos na massa de grãos e cada um deles monitora um raio de, aproximadamente, 3 m em torno de si.

2.2. CONTROLE E MONITORAMENTO DO SISTEMA DE AERAÇÃO

O resfriamento da massa de grãos por meio de aeração tem sido uma maneira bastante comum de conter a deterioração do produto armazenado, uma vez que, reduzindo-se a temperatura da massa de grãos, o mofo, atividade de insetos e o deslocamento de umidade são minimizados ou mesmo suprimidos. Porém, para ser eficiente, a aeração precisa ser controlada com precisão. Isto significa que o sistema de aeração deve ser ligado e desligado em situações que garantam os melhores resultados possíveis (FUSAE, 1999).

Controle e ajuste manuais tradicionais do sistema de aeração de grãos ainda existem em muitas instalações. Verifica-se, porém, que a eficiência destes sistemas de aeração é reduzida porque, como dados de desempenho relevantes não são corretamente apresentados e interpretados pelo operador, o sistema acaba sendo acionado durante períodos em que as condições ambientais não são as mais adequadas (ELDER, 1971; CHANG e STEELE, 1995).

Segundo FUSAE (1999), o pior tipo de sistema de controle automático de aeração é o temporizador. Ele, simplesmente, liga e desliga os ventiladores em instantes pré-determinados, não levando em consideração as condições ambientais. Muitas vezes, acionando-se o sistema de aeração, consegue-se desfazer algumas vantagens obtidas em aerações anteriores. Como o temporizador aciona o sistema de aeração independentemente da temperatura ambiente, pode-se produzir, alternativamente, frentes quentes e frias na massa de grãos, provocando justamente as diferenças de temperatura que se deseja evitar.

Sistemas de aeração são normalmente controlados por meio de termostatos e umidistatos capazes de colocar o sistema em operação sempre que a temperatura e umidade relativa do ambiente caírem abaixo de um valor pré-fixado. Mesmo nestes casos, necessita-se da supervisão de um operador

para garantir que os pontos de operação ajustados reduzirão a temperatura a um nível satisfatório em um período de tempo adequado (ELDER, 1971).

Com os avanços na tecnologia de sensores e a queda no preço de equipamentos de instrumentação baseados em microprocessadores, controladores auto-reguláveis estão sendo estudados, buscando eliminar a necessidade do operador para tomada de decisões (ELDER, 1971). O desenvolvimento destes sistemas permite economia de energia e trabalho e garante a qualidade do produto armazenado.

O uso de controladores automáticos para otimizar o tempo de operação deveria ser uma tecnologia largamente utilizada no gerenciamento dos sistemas de armazenamento de grãos. Seu principal objetivo seria fazer com que a temperatura da massa de grãos acompanhasse a temperatura média do ar ambiente com uma tolerância de cinco a 10° C, sem alterar o teor de umidade médio do grão (MAIER e MONTROSS, 1997).

Controladores simples para aeração, feitos com temporizadores que comandam ventiladores baseados na temperatura de ajuste de um termostato, costumam ser eficientes para controlar a temperatura da massa de grãos. Costuma-se ajustar dois limites de temperatura, inferior e superior, a fim de se manter a diferença de temperatura entre o ambiente e a massa de grãos entre cinco e 10° C.

Enquanto nos sistemas de aeração comandados manualmente, dois ou três ciclos completos de aeração, com os ventiladores funcionando continuamente, seriam necessários para reduzir a temperatura da massa de grãos, nos sistemas automáticos a mesma temperatura seria atingida com os ventiladores funcionando de maneira intermitente. Esses sistemas de controle são simples, de baixo custo e se pagam, geralmente, com menos de um ano de uso (MAIER e MONTROSS, 1997).

Controles de umidade acrescentam custos ao sistema e não são necessários para o controle da maioria dos grãos armazenados, exceto, possivelmente, nos trópicos úmidos ou então quando se necessita de um controle muito preciso das condições da massa de grãos. Umidistatos são dispositivos de difícil manutenção, limitam o tempo útil de resfriamento e, se

suas informações não forem corretamente entendidas, podem causar mais problemas do que solução (MAIER e MONTROSS, 1997).

Outra estratégia empregada para controle de aeração é baseada no teor de umidade da massa de grãos. Ela implica no uso de um microprocessador para calcular o teor de umidade dos grãos baseado em medidas da temperatura e da umidade relativa do ambiente e são programados para acionar o ventilador sempre que as condições forem favoráveis. A maioria dos controladores utiliza as condições de umidade relativa e temperatura como referências para manter um teor de umidade desejado dos grãos.

Estes controladores costumam também ser programados para operar o sistema a fim de se obter um determinado teor de umidade, aumentando ou diminuindo o teor de umidade médio da massa de grãos. O sucesso desta estratégia depende, principalmente, da exposição dos grãos a uma combinação adequada de temperatura e umidade relativa, durante um intervalo de tempo conveniente.

Para executar o controle do sistema de aeração, um controlador comandado por microprocessador precisa avaliar, com precisão, por meio de sensores, a temperatura e a umidade relativa do ar para calcular o teor de umidade e definir o tempo necessário de operação do ventilador para se obter a temperatura e a umidade dos grãos desejadas.

Alguns controladores são programados pelo usuário, com informações sobre a temperatura desejada da massa de grãos para cada mês do ano. Outros monitoram, constantemente, a temperatura do ambiente e operam o ventilador, sempre que necessário, para manter os grãos a esta temperatura. Existem aqueles que medem continuamente a temperatura da massa de grãos e a comparam com a temperatura desejada, previamente ajustada, a fim de decidir quando é necessário acionar o sistema de aeração, e os que são programados para atuar o menor tempo de operação possível, em função da vazão do ar de aeração. Há ainda os programados para operar o sistema somente fora dos períodos de ponta, de modo a aproveitar as melhores tarifas de energia elétrica (MAIER e MONTROSS, 1997).

Estratégias de controle mais sofisticadas exigem, além de sensores precisos calibrados regularmente, microprocessadores programáveis que tanto podem ser baseados em computadores convencionais quanto em componentes dedicados.

FERREIRA et al. (1993) estudaram, por meio de simulação, quatro métodos de controle de aeração para grãos de milho, a saber: controle por umidistato, controle por termostato, controle manual e controle por microprocessador.

O controle por umidistato permite a operação do ventilador somente se a umidade relativa do ar ambiente for inferior à umidade relativa de controle previamente ajustada no dispositivo controlador.

O controle por termostato só permite a operação do sistema de ventilação se a temperatura do ar ambiente for igual ou inferior à temperatura de controle previamente calibrada.

O controle por microprocessador faz a monitoração contínua do sistema por meio de um programa computacional que calcula a diferença de temperatura entre o ar e o grão e aciona o ventilador sempre que a temperatura cai abaixo de um valor preestabelecido.

Embora todas as opções de controle analisadas tenham apresentado redução do teor de umidade e resfriamento, a simulação dos procedimentos de acionamento do ventilador por meio de microprocessador mostrou-se a mais eficiente (FERREIRA et al., 1993).

Segundo SINÍCIO e MUIR (1998), os cinco métodos mais comuns para controle dos sistemas de aeração de grãos e os problemas relacionados com cada um deles são:

1. Controle por termostato baseado somente na temperatura do grão. Neste caso, a temperatura e umidade relativa do ar ambiente e o teor de umidade da massa de grãos não são considerados.
2. Controle do tempo de operação do sistema. Este processo não considera a temperatura e umidade relativa do ar ambiente nem a temperatura e o teor de umidade da massa de grãos.

3. Termostato, umidistato ou utilização simultânea de ambos. Neste caso, as variações climáticas de ano para ano e as condições dos grãos armazenados não são consideradas.
4. Termostato diferencial baseado na temperatura média da massa de grãos. O teor de umidade da massa de grãos e a umidade relativa do ar ambiente não são considerados.
5. Termostato diferencial baseado na temperatura da camada superficial. Não considera as modificações que ocorrem no interior da massa de grãos durante o período de armazenamento.

Por meio de simulação de sistemas de distribuição de fluxo de ar em climas tropical e subtropical, SINÍCIO e MUIR (1998) concluíram que o método mais eficiente para controle do sistema de aeração é o termostato diferencial.

Uma outra estratégia de controle do ventilador do sistema de aeração baseia-se no teor de umidade de equilíbrio do grão. Ela exige um microprocessador para se calcular o teor de umidade de equilíbrio em função da temperatura e umidade relativa do ar ambiente. Esses microprocessadores podem ser programados para operar os ventiladores do sistema de aeração sempre que as condições climáticas forem favoráveis (MAIER e MONTROSS, 1997).

Na maioria das vezes, os controladores são ajustados para manterem as condições de temperatura e umidade relativa adequadas para uma determinada umidade da massa de grãos. Entretanto, às vezes eles são programados para se conseguir teores de umidade pré-determinado. Neste caso, atua-se nos ventiladores fazendo-se com que o teor de umidade médio da massa de grãos seja aumentado ou reduzido adequadamente até se atingir o valor desejado (MAIER e MONTROSS, 1997).

No Brasil, o método tradicionalmente empregado para controlar os ventiladores dos sistemas de armazenamento de grãos utiliza termostatos e com base exclusivamente na temperatura da massa de grãos. O termostato é regulado para acionar o ventilador quando a temperatura da massa de grãos atinge 30° C no período quente (novembro a abril) e 25° C no período frio (maio a outubro). Entretanto, até o momento, nenhuma pesquisa foi feita a fim de se

determinar os ajustes ideais do termostato para este método tradicional (SINÍCIO e MUIR, 1998).

Segundo FUSAE (1999), em sistemas de aeração com ar natural, a determinação do tempo de operação do ventilador é de uma importância tão vital que levou a Agridry Rimik Pty, da Austrália, a desenvolver o TPC, um controle de tempo proporcional, ao mesmo tempo simples e confiável.

No Brasil, a Dryeration, do Rio Grande do Sul, desenvolveu um sistema automático para controlar e fazer o gerenciamento operacional de secagem, resfriamento e conservação de grãos armazenados, denominado GISMA_R - Gerenciador Inteligente de Sistema de Manutenção da Qualidade da Massa de Grão, que opera baseado em dados históricos.

3. PSICROMETRIA

3.1. INTRODUÇÃO

O ar é uma mistura gasosa composta por nitrogênio, oxigênio, dióxido de carbono e outros gases. Considera-se que o vapor de água, proveniente da evaporação de água da superfície, embora existente na atmosfera, não faz parte de sua composição. Utiliza-o apenas como meio de transporte (CUNHA, 2000).

Quando se removem todo o vapor de água e os contaminantes do ar, tem-se o ar seco, cuja composição é relativamente constante, apesar de pequenas variações devido à localização geográfica e à altitude.

No Quadro 3.1, apresenta-se a composição percentual média do ar seco.

QUADRO 3.1 - Composição aproximada do ar seco00 (SILVA, 2000)

Componente	Fórmula	Conteúdo (% por volume)
Nitrogênio	N ₂	78,084
Oxigênio	O ₂	20,948
Argônio	Ar	0,934
Dióxido de carbono	CO ₂	0,033
Outros	-	0,001

O conhecimento das condições de umidade do ar, isto é da mistura de ar seco e vapor de água, é de grande importância para a secagem, armazenamento, processamento e conservação de grãos. O estudo detalhado desta mistura é denominado psicrometria. Psicrometria é, portanto, a parte da termodinâmica que estuda as propriedades e os estados do ar, bem como os processos a que ele se sujeita.

Existem quatro propriedades utilizadas para definir a quantidade de vapor de água contida no ar seco e três referentes à temperatura da mistura:

1. pressão parcial de vapor;
2. pressão de vapor saturado;
3. umidade relativa;
4. umidade absoluta;
5. temperatura de bulbo seco;
6. temperatura de bulbo molhado;
7. temperatura de ponto de orvalho.

Além destas, a entalpia e o volume específico são propriedades do ar úmido normalmente utilizadas. A seguir, definem-se estas nove propriedades.

Pressão de vapor (P_v) é a pressão parcial exercida pelas moléculas de vapor de água no ar úmido. A pressão parcial de vapor pode ser calculada pela seguinte expressão:

$$P_v = P_{vm} - A \frac{(T_{bs} - T_{bm})(T_{bs} + 273)}{h_{fg}} \quad (3.1)$$

em que

- P_v = Pressão parcial de vapor, Pa;
- P_{vm} = Pressão de saturação de vapor à temperatura de bulbo molhado, Pa;
- T_{bs} = Temperatura de bulbo seco, °C;
- T_{bm} = Temperatura de bulbo molhado, °C;
- A = Constante psicrométrica, $8,6189 \times 10^5 \text{ J}^2/\text{kg m}^3 \text{ } ^\circ\text{C}^2$;
- h_{fg} = Entalpia de evaporação da água líquida à temperatura de ponto de orvalho, J/kg.

Quando o ar está completamente saturado (4% de vapor de água), sua pressão de vapor é chamada pressão de vapor de saturação (P_{vs}).

A pressão de vapor de saturação, em Pa, pode ser calculada pelas expressões a seguir:

$$P_{vs} = \exp \left\{ 60,43 - \frac{6834,27}{T_{bs} + 273} - 5,17 \ln (T_{bs} + 273) \right\} \quad (3.2)$$

para $0 \leq T \leq 90^\circ\text{C}$.

$$P_{vs} = \exp \left\{ 31,96 - \frac{6270}{T_{bs} + 273} - 0,46 \ln (T_{bs} + 273) \right\} \quad (3.3)$$

para $-18 \leq T \leq 0^\circ\text{C}$.

Umidade relativa (U_R) do ar é a relação entre a pressão parcial de vapor (P_v) exercida pelas moléculas de água presente no ar e a pressão de saturação (P_{vs}) à mesma temperatura. Normalmente é expressa em porcentagem.

$$U_R = \frac{P_v}{P_{vs}} \times 100 \quad (3.4)$$

Umidade absoluta (w) é a razão entre a massa de vapor de água e a massa de ar seco em um determinado volume da mistura. É expressa em kg de vapor por kg de ar seco.

$$w = 0,622 \frac{P_v}{(P_{at} - P_v)} \quad (3.5)$$

em que

- w = Umidade absoluta, kg.m^{-3} ;
- P_{at} = Pressão atmosférica local, Pa.

Temperatura de bulbo seco (T_{bs}) do ar é a temperatura do ar úmido, medida com termômetro comum.

Temperatura de bulbo molhado (T_{bm}) é a temperatura do ar medida em um termômetro comum com o bulbo coberto por um tecido de algodão embebido em água destilada, e ventilado com ar cuja temperatura se deseja medir, a uma velocidade mínima de 3,5 m/s. Pode ser expressa pelas seguintes equações:

$$T_{bm} = T_{bs} + \frac{P_{vm} - P_v}{B} \quad (3.6)$$

$$B = \frac{1007(P_{vm} - P_{at}) \left[1 + 0,156 \left(\frac{P_v}{P_{at}} \right) \right]}{0,622 h_{fg}} \quad (3.7)$$

Temperatura do ponto de orvalho (T_{po}) é a temperatura em que o ar úmido se torna saturado, isto é, a temperatura em que o vapor de água começa a condensar-se por um processo de resfriamento.

$$T_{po} = \frac{238,3 \ln\left(\frac{P_v}{610,78}\right)}{17,294 - \ln\left(\frac{P_v}{610,78}\right)} \quad (3.8)$$

em que

$$\begin{aligned} T_{po} &= \text{Temperatura do ponto de orvalho, } ^\circ\text{C}; \\ P_v &= \text{Pressão de vapor atual, Pa;} \end{aligned}$$

Quando o ar está saturado, as temperaturas de bulbo seco, de bulbo molhado e de ponto de orvalho são idênticas.

Entalpia (h) de uma mistura de ar seco e vapor de água é a energia contida no ar úmido por unidade de massa de ar seco, para temperaturas superiores a uma determinada temperatura de referência (0°C). É expressa em J por kg de ar seco.

$$h = 1007 T_{bs} + w \left(2,5 \times 10^6 + 1876 T_{bs} \right) \quad (3.9)$$

Volume específico (v_e) é o volume de uma mistura de ar seco e vapor de água por unidade de massa de ar seco, medido em m^3 por kg de ar seco.

$$v_e = \frac{287 (T_{bs} + 273)}{P_{at} - P_v} \quad (3.10)$$

Medindo-se a temperatura de bulbo seco (T_{bs}) e de bulbo molhado (T_{bm}), por meio de um psicrômetro, e conhecendo-se a pressão atmosférica do local (P_{at}), é possível calcular todas as propriedades do ar que o envolve.

3.2. DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES PSICROMÉTRICAS E PROCESSOS DA MISTURA AR-VAPOR D'ÁGUA

Com base nas equações psicrométricas descritas anteriormente, podem se determinar todas as propriedades psicrométricas do ar, realizar os

processos de aquecimento e de resfriamento de uma massa de ar, e o processo de mistura de duas massas de ar, dentre outros. A metodologia para obtenção dessas propriedades e a realização de alguns dos processos, utilizando o gráfico psicrométrico, é descrita a seguir. Essa metodologia também foi implementada em várias sub-rotinas computacionais, em linguagem C++, especialmente desenvolvidas para este trabalho.

3.2.1 Determinação das Propriedades Psicrométricas do Ar

As propriedades psicrométricas do ar podem ser, facilmente, determinadas utilizando-se um gráfico psicrométrico ou equações que as descrevem. Propriedades do ar, tais como temperaturas de bulbo seco e de bulbo molhado, umidade relativa, umidade absoluta, volume específico, temperatura de ponto de orvalho e entalpia estão, todas, relacionadas no gráfico psicrométrico.

Com apenas duas destas propriedades é possível caracterizar o ar, pois o ponto de interseção destas duas propriedades no gráfico psicrométrico define o ponto de estado do ar. Com o ponto de estado determinado, obtêm-se, diretamente, no gráfico, as outras propriedades (STROBEL e STROWELL, 1999). A Figura 3.1 mostra um gráfico psicrométrico feito para uma determinada pressão atmosférica. Fazendo-se as devidas correções, este gráfico poderá ser utilizado em qualquer condição.

A temperatura do ar, medida em um termômetro de bulbo seco, é representada no eixo das abscissas e serve como um indicador da quantidade de calor contida nele. Linhas perpendiculares partindo deste eixo definem pontos do gráfico de temperatura de bulbo seco constante.

No eixo das ordenadas, tem-se, à direita, a umidade absoluta, expressa em kg de vapor d'água por kg de ar seco, e à esquerda a pressão de vapor, expressa em Pa. As linhas perpendiculares a este eixo são linhas de umidade absoluta e pressão de vapor constante.

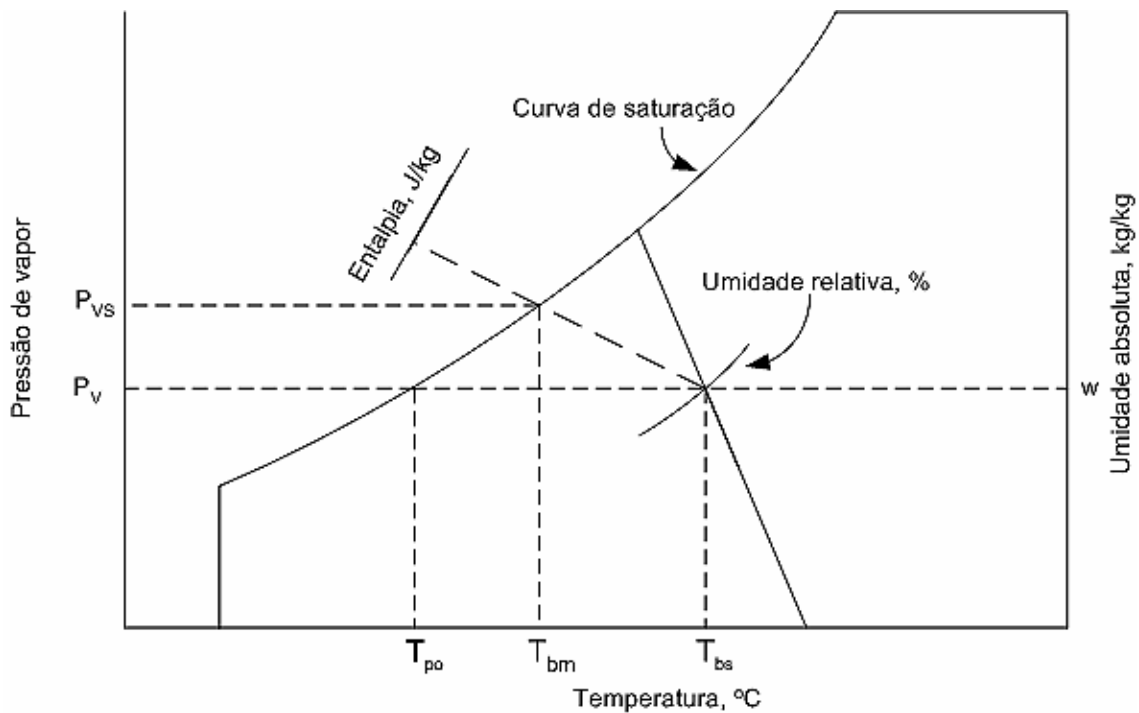


FIGURA 3.1 - Gráfico psicrométrico mostrando o ponto de estado.

As linhas curvas entre os três eixos, que vão da parte esquerda inferior para a direita superior, são linhas de umidade relativa constante. A linha curva mais alta é a linha de umidade relativa de 100%, chamada de curva de saturação, sobre a qual se lêem as temperaturas de bulbo molhado e de ponto de orvalho. Em qualquer ponto desta linha tem-se ar saturado.

Nos segmentos de reta situados acima da curva de saturação lê-se a entalpia, isto é, a quantidade de calor envolvida na mudança de estado, em J por kg de ar seco. Finalmente, partindo-se do eixo das abscissas e inclinadas para a esquerda, tem-se as linhas de volume específico do ar seco em m^3 de ar por kg de ar seco.

3.2.2 Aquecimento ou Resfriamento de uma Massa de Ar

A Figura 3.2 representa um processo de aquecimento ou resfriamento sensível. Neste processo, a temperatura de bulbo seco do ar aumenta ou diminui, enquanto a umidade absoluta do ar permanece constante. Neste processo, o ponto de estado desloca-se paralelamente ao eixo das abscissas.

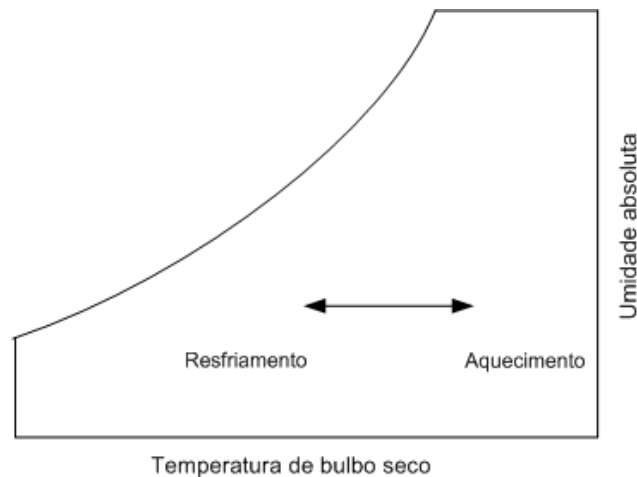


FIGURA 3.2 - Processo de aquecimento ou resfriamento do ar a calor sensível.

Na Figura 3.3 tem-se um processo adiabático. Neste caso, tanto a temperatura de bulbo seco do ar quanto a umidade absoluta variam, porém não há troca de calor com o meio externo. Nota-se que, neste caso, o ponto de estado desloca-se sobre linha de entalpia constante.

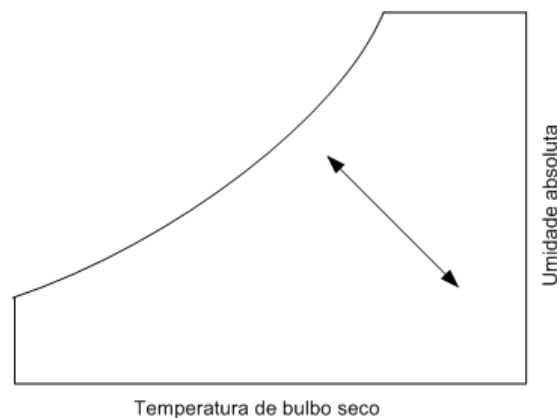


FIGURA 3.3 - Processo de aquecimento ou resfriamento adiabático do ar.

3.2.3 Mistura de Duas Massas de Ar

Em diversos processos é preciso misturar-se duas massas de ar com fluxos e propriedades termodinâmicas diferentes. As condições finais desta mistura podem ser determinadas utilizando-se o gráfico psicrométrico,

conforme mostrado na Figura 3.4, ou equações de balanço de massa e energia.

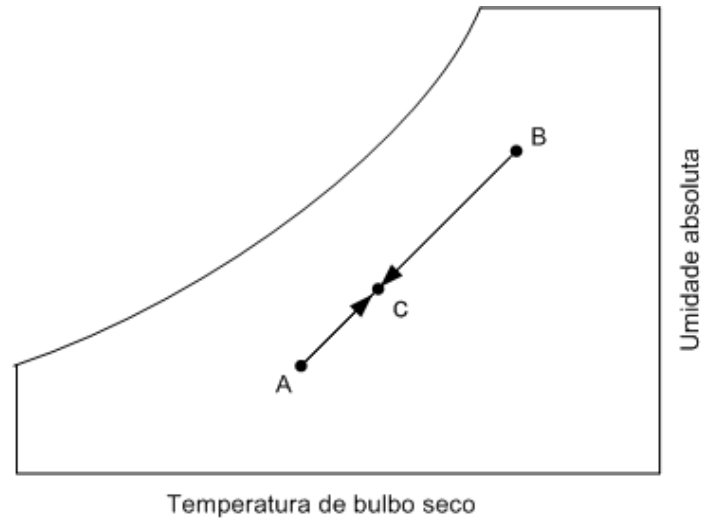


FIGURA 3.4 - Processo de mistura de dois fluxos de ar.

Sejam dois fluxos de ar, respectivamente, com massa m_1 e m_2 , temperatura T_1 e T_2 , entalpia h_1 e h_2 e de umidade absoluta w_1 e w_2 , que se misturam resultando um fluxo de massa m_3 , com temperatura T_3 , entalpia h_3 e umidade absoluta w_3 , conforme mostrado na Figura 3.5.

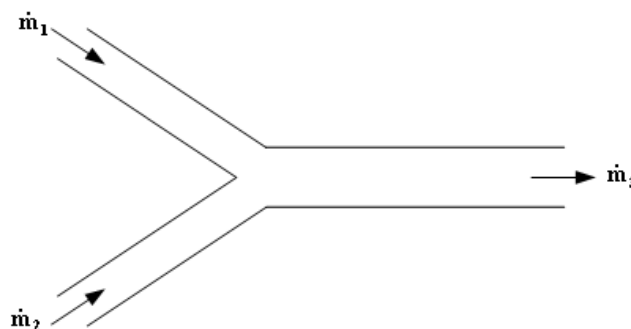


FIGURA 3.5 - Mistura de duas massas de ar.

Para este processo, os balanços de energia e de massa podem ser escritos como segue:

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3 \quad (3.11)$$

$$\dot{m}_1 w_1 + \dot{m}_2 w_2 = \dot{m}_3 w_3 \quad (3.12)$$

$$\dot{m}_1 h_1 + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3 \quad (3.13)$$

Substituindo-se a equação (3.11) nas equações (3.12) e (3.13), tem-se:

$$\dot{m}_1 (h_3 - h_1) = \dot{m}_2 (h_2 - h_3) \quad (3.14)$$

$$\dot{m}_1 (w_3 - w_1) = \dot{m}_2 (w_2 - w_3) \quad (3.15)$$

Desta forma obtém-se:

$$\frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_2} = \frac{h_2 - h_3}{h_3 - h_1} = \frac{w_2 - w_3}{w_3 - w_1} \quad (3.16)$$

As condições finais da mistura ar-vapor d'água podem ser obtidas algebricamente, utilizando-se a equação (3.16) ou por meio do gráfico psicrométrico, conforme mostrado na Figura 3.4.

O ponto A representa o ponto de estado do fluido de fluxo de massa \dot{m}_1 , definido pelo encontro das linhas h_1 e w_1 , enquanto o ponto B, ponto de encontro das linhas que partem de h_2 e w_2 , define o ponto de estado do fluido de fluxo de massa \dot{m}_2 . O ponto de estado do fluido resultante desta mistura encontra-se sobre a linha que une os pontos A e B e pode ser determinado aplicando-se propriedades de triângulos semelhantes.

4. SISTEMAS DE CONTROLE

4.1. INTRODUÇÃO

Um sistema pode ser definido como um conjunto de componentes interconectados capaz de realizar uma determinada tarefa. Estes componentes tanto podem ser elementos discretos de uma instalação, quanto elementos de um destes componentes (SCHWARZENBACH e GILL, 1984). Por exemplo, o sistema de interesse pode ser uma usina hidroelétrica, uma turbina desta usina ou mesmo um dispositivo qualquer desta turbina. Portanto, o sistema deve englobar somente aquilo que é de interesse para a análise que se pretende realizar.

Um sistema pode ser considerado também como sendo uma caixa preta com uma ou mais entradas, uma ou mais saídas, e as relações entre estas entrada e saídas (BOLTON, 1995).

Nenhum sistema é estanque. Ele interage com o ambiente no qual está inserido. Portanto, é preciso definir claramente o que é o sistema e o que é o seu entorno, ou seja, é necessário limitar suas fronteiras, bem como caracterizar os sinais de interesse que as atravessam e ajudam a descrever e definir seu comportamento.

Em particular, um sistema é dito de controle quando sua saída é controlada para assumir um valor particular ou seguir uma determinada entrada (BOLTON, 1995). O termo é usado para caracterizar as interações específicas entre homem e máquina como, por exemplo, dirigir um automóvel. Neste caso, como o homem intervém diretamente no processo, tem-se um controle manual. O controle é dito automático quando é feito sem intervenção humana, como no caso do controle da temperatura de uma sala por meio de um termostato (FRANKLIN et al., 1991). Atualmente, os sistemas de controle manuais, que exigem a presença de um operário para acioná-los, vêm sendo, cada vez mais, substituídos por controles automáticos.

Um sistema de controle apresenta uma ou mais variáveis controladas ou dinâmicas. Estas variáveis são aquelas que se deseja manter constantes. Tem

também uma ou mais variáveis que controlam o processo e ainda as perturbações ou distúrbios, que tendem a alterar as variáveis controladas.

A função do sistema de controle é regular o valor da variável controlada, quando perturbações a modificam, por meio de um dispositivo controlador (HUMPHIES e SHEETS, 1999).

Em escala industrial, o primeiro sistema de controle automático surgiu em 1788, quando James Watt desenvolveu um regulador centrífugo para o controle da velocidade de uma máquina a vapor (SILVEIRA e SANTOS, 1999). Aos reguladores mecânicos, seguiram os controladores pneumáticos e hidráulicos.

Ao fim da segunda guerra mundial, surgiram os controladores eletrônicos baseados em circuitos analógicos e, posteriormente, os digitais. Estes, além de utilizarem um circuito eletrônico, exigem ainda um programa para comandá-los.

4.2. TEORIA DE CONTROLE

A teoria de controle convencional ou controle clássico é, usualmente, aplicável somente a sistemas monovariáveis, lineares e invariantes no tempo, normalmente denominados de sistemas de Entrada Única e Saída Única (SISO - Single Input, Single Output) e está centrada no domínio da frequência complexa (OGATA, 1998).

O surgimento de sistemas de engenharia cada vez mais complexos, a necessidade de satisfazer requisitos cada vez mais rigorosos quanto ao desempenho do sistema de controle e a facilidade de acesso aos computadores deram ensejo ao desenvolvimento, na década de 60, da teoria de controle moderno (OGATA, 1998).

A teoria de controle moderno apresenta uma nova forma de analisar e projetar sistemas de controle complexos, baseados nos conceitos de estado e variáveis de estado e pode ser aplicada a sistemas de entradas e saídas múltiplas, lineares ou não, variantes ou invariantes no tempo. Além disto, está centrada, essencialmente, no domínio do tempo (OGATA, 1998).

Um sistema de controle apresenta entradas ou ajustes, que representam os comandos dados ao sistema, perturbações, que são variáveis que causam alterações não esperadas ao sistema e saídas, que são as variáveis que devem ser controladas pelo sistema. Seu objetivo é fazer com que os sinais de saída acompanhem os sinais de ajuste o mais próximo possível (HÄGGLUND, 1991).

Existem duas formas básicas de sistemas de controle: sistemas em malha aberta e sistemas em malha fechada ou com retroalimentação. Um sistema de controle é dito em malha aberta quando a variável de saída não tem influência sobre a ação de controle, isto é, a variável de saída não é medida nem realimentada para ser comparada com a entrada. Neste caso, um sinal de entrada ou comando é aplicado ao controlador e o sinal de saída do controlador atua no processo, colocando a variável controlada na condição desejada (D'AZZO e HOUPIS, 1995; KUO, 1995).

Nos sistemas de controle em malha aberta, como a saída não é comparada com a entrada de referência, a cada entrada de referência corresponde uma condição de saída prefixada. A precisão do sistema depende exclusivamente de sua calibração. Na presença de distúrbios internos ou externos ao sistema, este tipo de controle não conseguirá realizar a tarefa desejada com precisão, devido à ausência de correção para os erros (OGATA, 1998).

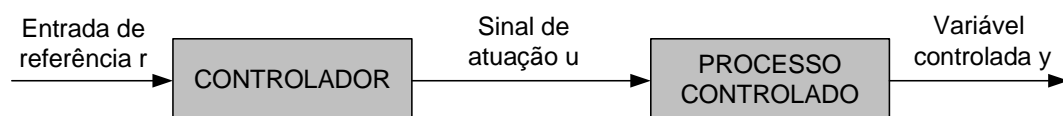


FIGURA 4.1 - Sistema de controle em malha aberta.

Mesmo assim, apesar de sua pouca precisão, graças à sua simplicidade e baixo custo, sistemas de controle em malha aberta costumam ser largamente empregados nos casos de controle mais simples, como as torradeiras elétricas, quando as entradas são conhecidas antecipadamente no

tempo e não há distúrbios, ou ainda quando o custo é considerado um fator preponderante para sua implantação (RIGBY e DALBY, 1995).

Um sistema de controle é dito em malha fechada quando o sinal de saída tem efeito direto sobre a ação de controle, ou seja, quando o sistema de controle é realimentado. Neste caso, um sinal de erro, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal realimentado, é constantemente monitorado e aplicado ao controlador de modo a reduzir o erro e levar o sinal de saída para o valor desejado (DORF e BISHOP, 1998).

A principal vantagem dos sistemas de controle em malha fechada é o fato de que o uso da realimentação torna a resposta do sistema relativamente insensível a perturbações externas e variações internas de parâmetros do sistema e, portanto, muito mais preciso (OGATA, 1998). Por outro lado, são mais complexos, têm custo mais elevado e menor ganho (NISE, 1998; BOLTON, 1995).

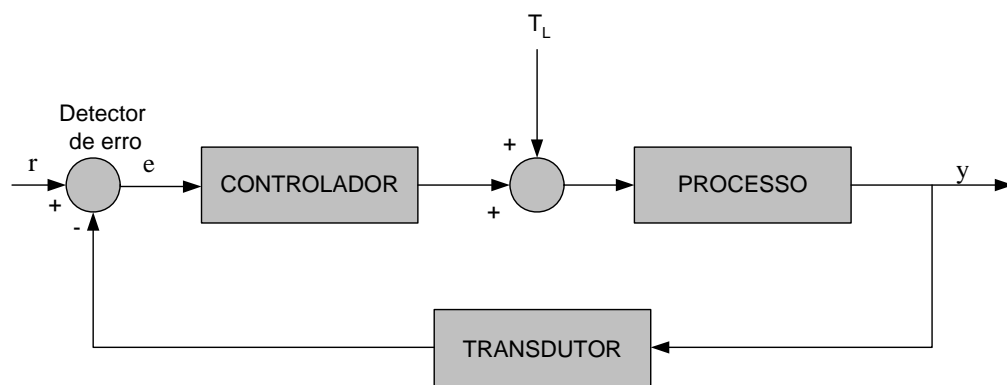


FIGURA 4.2 - Sistema de controle em malha fechada.

Em muitos sistemas de controle moderno, o controlador ou compensador é um computador digital. A grande vantagem da utilização de um computador é que várias malhas podem ser controladas pelo mesmo computador ao mesmo tempo. Além disto, qualquer modificação nos ajustes do sistema de controle é feita atuando-se no programa computacional (*software*) e não na sua estrutura física (*hardware*). O computador pode ainda fazer a função de supervisionar todo o sistema (NISE, 1998).

Nos sistemas de controle digital, o sinal de entrada passa, primeiramente, por um conversor analógico-digital, que converte o sinal analógico em sinal digital. O controlador digital tem um temporizador que envia pulsos em intervalos de tempo regulares. Cada vez que o conversor recebe um pulso, ele envia para o controlador um sinal digital que implementa a estratégia de controle determinada por um programa computacional armazenado. O sinal de saída do controlador é convertido em sinal analógico, por meio de um conversor digital-analógico, de forma que possa atuar no elemento de correção e então provocar a modificação desejada na variável do processo (WARWICK e REES, 1986).

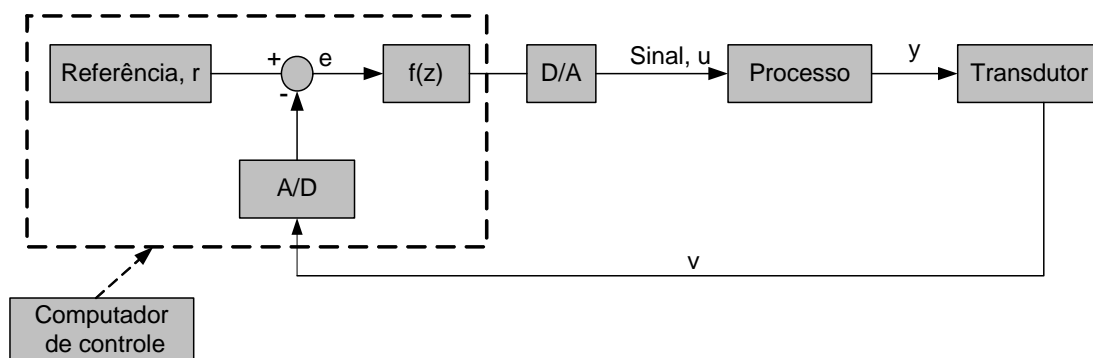


FIGURA 4.3 - Sistema de controle digital em malha fechada.

Sistemas de controle são dinâmicos. Eles respondem a uma entrada passando, primeiramente, por uma resposta transiente antes de atingir a resposta em regime estacionário que, geralmente assemelha-se à entrada. Pois se espera que, após o transitório, a saída se estabilize no valor proporcional ao comando. Para a completa caracterização de um sistema é preciso conhecer estas duas componentes (BOLTON, 1995; NISE, 1998).

A resposta transiente é a componente da resposta que ocorre quando a entrada é sujeita a uma variação e que termina após um certo intervalo de tempo. A resposta em regime estacionário é a parcela da resposta que permanece após o transiente cair a zero, ou seja, após cessarem os efeitos da ocorrência de uma perturbação (MOTA, 1998).

Discussões a respeito da resposta transiente e do erro em regime permanente são controvertidas se o sistema não tem estabilidade (NISE, 1998). Em geral, um sistema é dito ser estável se, quando sujeito a uma entrada limitada ou distúrbio, sua saída também é limitada. Uma entrada ou saída limitada é aquela de tamanho finito. A condição para estabilidade estabelece que se um sistema de controle é estável, quando sujeito a um impulso, sua saída retorna a zero (BOLTON, 1995).

Sistemas em malha aberta são inerentemente estáveis. Uma entrada finita provoca uma saída finita que não varia indefinidamente com o tempo. Aumentos na função de transferência de um elemento do sistema não afetam sua estabilidade. Sistemas em malha fechada podem, entretanto, apresentar instabilidade.

4.3. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

Todo sistema de controle tem três características comuns. Primeiramente, ele faz a medida da variável controlada, por meio de um sensor ou transdutor. Em seguida, compara o valor medido pelo sensor com o valor de referência adotado. Se os dois valores forem diferentes, o sistema detecta uma condição de erro e o controlador analisa se este erro é aceitável ou não. Finalmente, caso o erro não seja aceitável, o elemento de controle atua para corrigi-lo e trazer a variável controlada para o ponto de ajuste (HUMPHIES e SHEETS, 1999).

Nos sistemas em malha aberta, o tipo de controle mais conveniente é o liga-desliga e suas variações: ações temporizadas ou seqüência de chaveamentos temporizados como, por exemplo, nas torradeiras elétricas ou nas máquinas de lavar.

Em malha fechada, os sistemas de controle podem ser, além do tipo liga-desliga, do tipo proporcional ou proporcional combinado com alguma outra ação (BOLTON, 1995; HÄGGLUND, 1991).

4.4. CONTROLE LIGA-DESLIGA

O controlador liga-desliga é o tipo de controle mais simples e mais popular na indústria. Tem, também, inúmeras aplicações domésticas e nos sistemas de segurança. Costuma ser também chamado de sistema de controle de duas posições, (liga-desliga).

Para o sinal de controle do sistema, u , só existe dois valores possíveis: valor máximo de u ($u_{\text{máx}}$) ou valor mínimo de u ($u_{\text{mín}}$). A variável controlada é medida e comparada com a referência. Dependendo do sinal de erro ser positivo ou negativo, o sinal de controle assume o nível alto ou baixo e, simplesmente, energiza ou desenergiza o sistema.

No caso, por exemplo, de um aquecedor de ambiente controlado por um termostato, este envia o sinal que controla o aquecedor. Se a temperatura do ambiente for inferior à temperatura de ajuste do termostato (sinal de referência), ele é ligado com a potência máxima. Quando a temperatura do ambiente atingir a temperatura de referência, ele é completamente desligado.

A grande desvantagem deste tipo de controlador é que ao atingir o valor de referência, ele fica oscilando em torno deste ponto. A fim de se evitar que o controlador oscile, as referências de ligar e desligar são mantidas, deliberadamente, diferentes entre si de uma certa quantidade, chamadas de histerese (HÄGGLUND, 1991).

A Figura 4.4 mostra os diversos sinais de um sistema de controle de temperatura liga-desliga. A curva 1 representa a temperatura de referência. Nota-se que ela é sempre constante. Em um determinado instante, ela dá um salto, mas se mantém constante no novo valor de referência. A curva 2 mostra a temperatura real da sala (sinal de saída). Ela flutua acima e abaixo da referência e, sempre que vence a histerese, o sistema atua, ligando e desligando o aquecedor, como indicado pela curva 3.

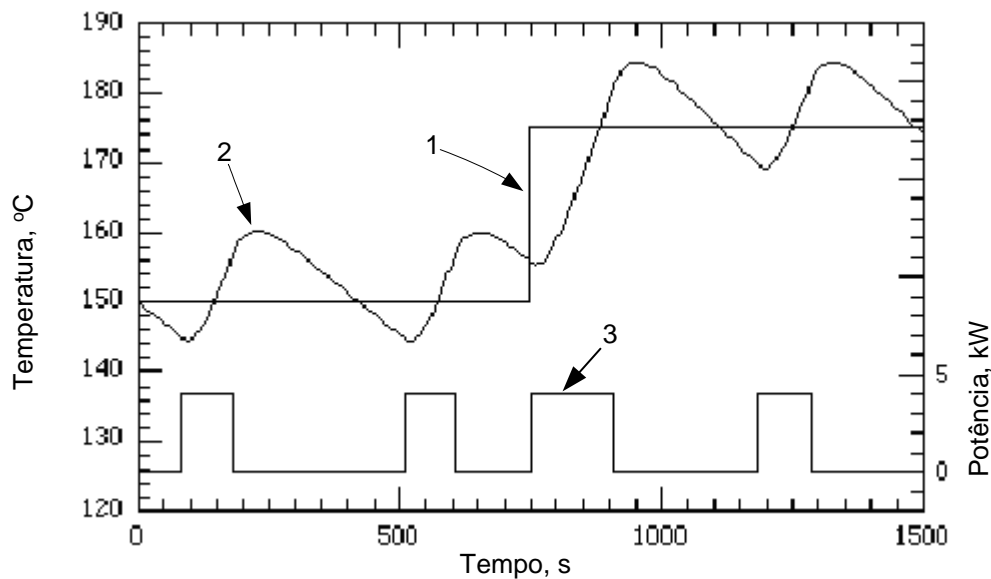


FIGURA 4.4 - Sinais em um sistema de controle liga-desliga.

4.5. CONTROLE PROPORCIONAL

Uma das maneiras de se corrigir as oscilações do controlador liga-desliga é reduzir o ganho do sistema quando se tem pequenos sinais de erro. Assim, quanto menor for o sinal de erro, menor será o sinal de saída. Portanto, a intensidade do sinal de saída será função da quantidade de correção necessária e estará em um ponto intermediário entre os dois limites do controlador liga-desliga, dependendo da relação entre a variável controlada e o ponto de ajuste (HUMPHRIES e SHEETS, 1999).

O controle proporcional é feito com a introdução de uma faixa proporcional entre os dois limites, u_{\min} e u_{\max} , do controlador liga-desliga. Neste caso o sinal de controle é dado por:

$$u = u_{\max}, \quad \text{se } e > e_o \quad (4.1)$$

$$u = u_o + K e, \quad \text{se } -e_o < e < e_o \quad (4.2)$$

$$u = u_{\min}, \quad \text{se } e < -e_o \quad (4.3)$$

em que u_o é o nível do sinal de controle quando o erro é nulo e K é o ganho do controlador, conforme mostrado na Figura 4.5.

O ganho do sistema é a relação entre a variação do sinal de saída e a variação do sinal de entrada:

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (4.4)$$

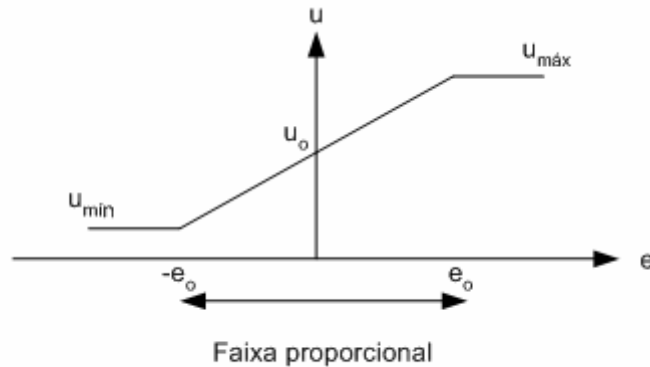


FIGURA 4.5 - Sinal de controle de um controlador proporcional.

A Figura 4.6 representa um sistema de controle com realimentação, composto por um processo e por um regulador. Considerando-se que o regulador tem ação proporcional, pode-se escrever as seguintes equações para o sistema:

$$y = x + n \quad (4.5)$$

$$x = K_p (u + \ell) \quad (4.6)$$

$$u = K_r (u - y) \quad (4.7)$$

em que

x = Variável de processo;

r = Sinal de ajuste;

ℓ = Perturbação que afeta as cargas;

n = Ruídos;

K_r = Ganho do regulador;

K_p = Ganho do processo.

Eliminando-se as variáveis intermediárias nessas equações, tem-se:

$$x = \left(\frac{K_r K_p}{1 + K_r K_p} \right) (r - n) + \left(\frac{K_p}{1 + K_r K_p} \right) \ell \quad (4.7)$$

O produto $K_r K_p$ é adimensional e representa o ganho de malha aberta.

Analisando-se a equação (4.7), observa-se que o ganho da malha deve ser alto a fim de garantir que o valor do sinal de saída seja bastante próximo do sinal de referência e deixar o sistema menos sensível às perturbações. Observa-se também que os ruídos afetam o sinal de saída do mesmo modo que o sinal de ajuste, ou seja, um ganho de malha elevado torna o sistema mais sensível aos ruídos.

O sinal de entrada é dado por:

$$u(t) = K e(t) \quad (4.8)$$

Deduz-se, então, que, se o sinal de erro for nulo, o sinal de controle também o será. Portanto, no funcionamento em regime estacionário, a existência de um sinal de erro é necessária para assegurar a existência do sinal de controle. Para tal, costuma-se introduzir um sinal de reajuste, ℓ , para manter o sistema sob controle. Neste caso, $u(t)$ passa a ser escrito como:

$$u(t) = K e(t) + \ell \quad (4.9)$$

As considerações acima valem se o processo puder ser descrito por um modelo estático. Em um processo dinâmico, se o ganho de malha for muito elevado, o sistema normalmente torna-se instável. Portanto, na prática, a intensidade do ganho é determinada pela dinâmica do processo (ASTRÖN e HÄGGLUND, 1988).

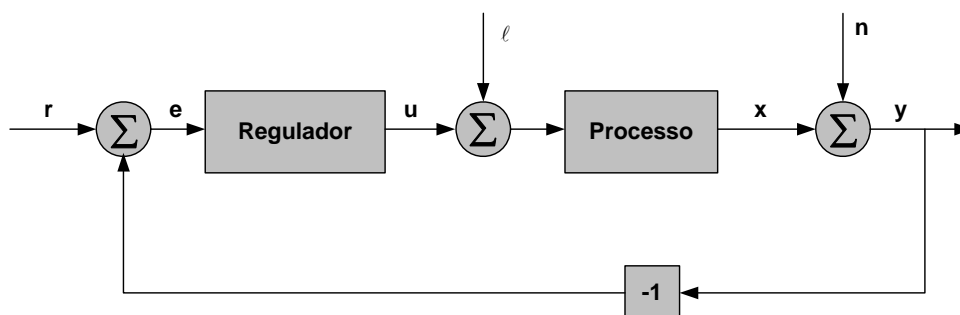


FIGURA 4.6 - Diagrama de blocos de um sistema de controle convencional.

A Figura 4.7 representa o sinal de saída de um controlador proporcional de temperatura, em que as curvas 1, 2 e 3 representam temperaturas controladas e a curva 4 representa a temperatura de referência.

Verifica-se que a temperatura final (curva 2) é ligeiramente inferior à referência, conforme descrito anteriormente, já que uma pequena diferença é necessária a fim de manter o aquecedor funcionando.

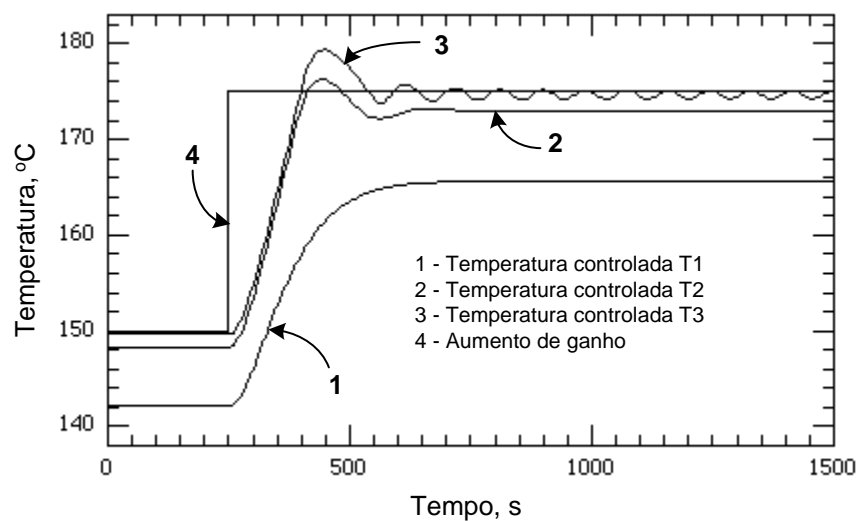


FIGURA 4.7 - Sinais de controle de um controlador proporcional de temperatura.

4.6. CONTROLE PROPORCIONAL E INTEGRAL

Em algumas situações não se pode admitir o erro estacionário causado pelo controlador proporcional. Às vezes, o sinal de saída do processo tem que acompanhar rigorosamente o sinal de referência. A introdução de uma ação integral corrige este erro. Ela faz com que um pequeno sinal de erro positivo provoque o surgimento de um sinal de controle crescente enquanto um sinal de erro negativo ocasiona um sinal de controle decrescente, não importando quão pequeno este sinal de erro seja.

O sinal de controle de um controlador proporcional e integral é dado por:

$$u = K \left(\frac{1}{T_i} \int e(t) dt + e(t) \right) \quad (4.10)$$

em que K é o ganho e T_i é a constante de tempo de integração do controlador.

O componente integral do sinal de controle é proporcional à área sob a curva da Figura 4.8. Analisando-se esta curva, verifica-se que o elemento integral do sistema de controle tem a capacidade de eliminar o erro remanescente.

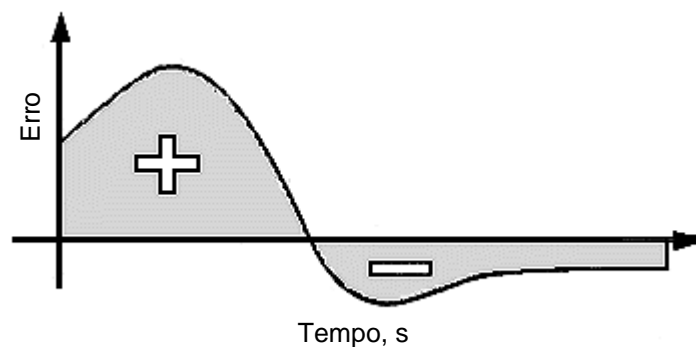


FIGURA 4.8 - Sinal de erro integral.

Considerando-se que o sistema de controle proporcional integral encontra-se operando em regime permanente, com um sinal de controle constante (u_o) e um sinal de erro também constante (e), o sinal de controle pode ser escrito como:

$$u_o = K \left[e_o + \frac{e_o}{T_i} t \right] \quad (4.11)$$

Pela equação (4.11), tem-se que se e_o fosse diferente de zero, u_o variaria em função do tempo, contrariando a consideração feita de que u_o é constante. Portanto, um controlador com ação integral, obrigatoriamente, terá um sinal de erro nulo em regime permanente (ASTRÖN e HÄGGLUND, 1988).

A ação integral do controlador pode também ser analisada como um dispositivo que, automaticamente, ajusta o sinal de reinicialização do controlador proporcional. A Figura 4.9 mostra o diagrama de blocos de um controlador proporcional com um sinal de reinicialização que é ajustado automaticamente. O ajuste é feito por meio da realimentação de um sinal de saída modificado para um elemento somador do controlador.

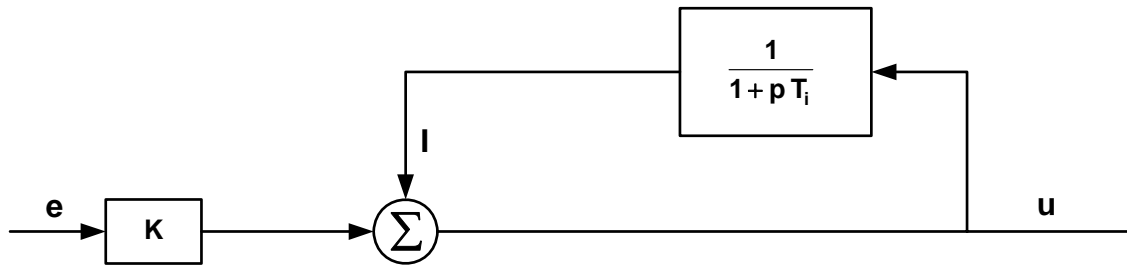


FIGURA 4.9 - Elemento integrador com reinicialização automática.

Analisando-se o diagrama de blocos da Figura 4.9, em que $p = \frac{d}{dt}$ é o operador diferencial, podem se escrever as seguintes equações:

$$u = K e + I \quad (4.12)$$

$$I = \frac{1}{1 + \frac{dT_i}{dt}} u \quad (4.13)$$

em que I é o sinal corrigido.

As equações (4.12) e (4.13) implicam em que:

$$T_i \frac{dI}{dt} + I = u = K e + I \quad (4.14)$$

Portanto, tem-se:

$$T_i \frac{dI}{dt} = K e \quad (4.15)$$

Isto mostra que este controlador é, de fato, um controlador integrador.

Como o controlador integrador resolve o problema do erro estacionário remanescente e os problemas de oscilação encontrados nos controladores liga-desliga, ele pode ser considerado um controlador extremamente robusto (HÄGGLUND, 1991). Muitas vezes, quando as exigências não são muito severas, ele é suficiente para fazer a maioria dos controles de processos. Esta é a razão de ele ser tão comum na indústria.

4.7. CONTROLE PROPORCIONAL, INTEGRAL E DERIVATIVO

Alguns sistemas de controle operam com sinais de erro que variam de forma extremamente rápida. Devido à dinâmica do processo, nem o controlador

proporcional nem o controlador integral respondem bem a este tipo de erro, pois só conseguem detectar o que já ocorreu ao sistema. A fim de se corrigir estas variações bruscas, introduz-se no sistema um elemento derivativo, capaz de antever o que poderá ocorrer com o sinal de erro e atuar forma de preventiva, aumentando a estabilidade do sistema (OGATA, 1998, HÄGGLUND, 1991).

A Figura 4.10 mostra a marcha de dois sistemas de controle que apresentam a mesma correção proporcional no instante t . Considerando-se que as áreas sob as duas curvas são idênticas, a correção integral é a mesma nos dois casos. Isto significa que o controle PI fornece o mesmo sinal de controle aos dois sistemas. Porém, verifica-se uma enorme diferença entre eles. Enquanto a curva da esquerda decai rapidamente, a curva da direita que vinha decaindo, repentinamente começa a crescer. O sinal de controle, neste caso, deveria agir imediatamente, a fim de fazer o sinal de saída voltar a decair. O elemento derivativo é capaz de fazer esta compensação (HAGGLUND, 1991).

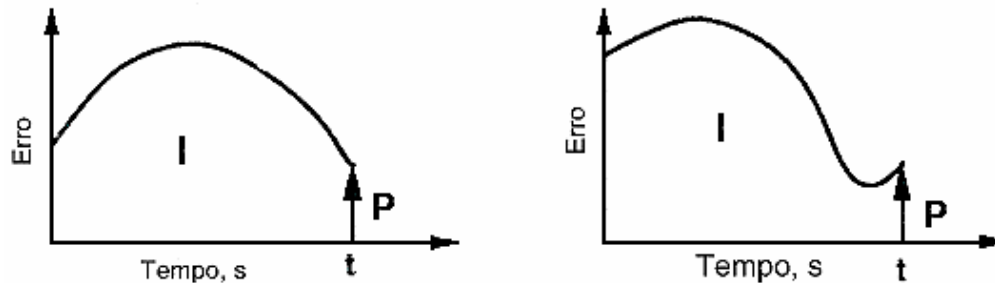


FIGURA 4.10 - Situações de controle **PI** em que os sinais de saída são idênticos.

Introduzindo-se o elemento derivativo, o sinal de controle passa a ser dado pela expressão:

$$u = K \left[e + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt - T_d \frac{de}{dt} \right] \quad (4.16)$$

em T_d é a constante de tempo de derivação do controlador.

A parcela derivativa do sinal de controle é proporcional à variação do erro, isto é, sua derivada. Ela antecipa o que irá ocorrer com sinal de erro.

Na prática, em vez de considerar o sinal de erro, o elemento derivativo considera a própria variável de processo. Neste caso, a expressão (4.16) se transforma em:

$$u = K \left[e + \frac{1}{T_i} \int e(t) dt - T_d \frac{dy}{dt} \right] \quad (4.17)$$

De acordo com a expressão (4.17), a parcela derivativa fornece um sinal que é proporcional à taxa de variação da variável de entrada. Isto significa que ruídos de alta frequência são altamente amplificados junto com o sinal de controle. Para reduzir o efeito dos ruídos, costuma-se conectar um filtro passa-baixa ao elemento derivativo. A Figura 4.11 mostra a ação dos três efeitos sobre o sinal de erro.

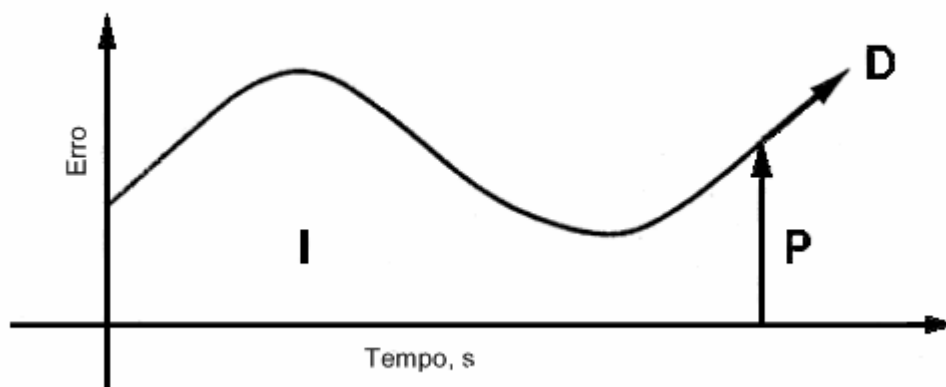


FIGURA 4.11 - Efeito dos três elementos sobre o sinal de erro.

O controlador derivativo nunca deve ser usado isoladamente, pois ele reage somente enquanto o sinal de erro está variando. Ele não reage a sinais de erro em regime estacionário (HUMPHIES e SHEETS, 1999).

4.7.1 Parâmetros de um Controlador Proporcional, Integral e Derivativo (PID)

O controlador PID apresenta três parâmetros que podem ser alterados a fim de se obter a combinação entre tempo de resposta e estabilidade mais adequada ao processo: o ganho proporcional, K , a constante de tempo de integração, T_i e a constante de tempo de derivação, T_d . O ganho proporcional é adimensional, mas as constantes de tempo de integração e derivação têm, logicamente, dimensões de tempo.

Existem métodos especificamente desenvolvidos para determinação e ajuste dos parâmetros do sistema de controle como, por exemplo, o método de Ziegler–Nichols ou o de Cohen–Coon, além do método de tentativa e erro. Porém, de uma maneira geral, pode-se dizer que:

- aumentado-se o ganho proporcional, a velocidade de atuação do sistema de controle aumenta mas a sua estabilidade diminui;
- aumentado-se a constante de tempo de integração, a velocidade de atuação do sistema de controle diminui, mas aumenta-se a sua estabilidade;
- aumentado-se a constante de tempo de derivação, aumenta-se a velocidade de atuação do sistema e a sua estabilidade.

Quando se ajusta o controlador manualmente, deve-se, primeiro, ajustar o ganho proporcional, em seguida a constante de tempo de integração e, finalmente, a constante de tempo de derivação.

Primeiramente, faz-se T_i muito elevado, T_d nula e ajusta-se K até conseguir-se um controle mais ou menos correto. Em seguida, reduz-se T_i e, conseqüentemente, de acordo com o que foi dito anteriormente, perde-se estabilidade. Esta perda de estabilidade, por sua vez, exige uma diminuição do ganho K .

Quando o controlador PI fornece um controle satisfatório, introduz-se a constante de tempo derivativa. Como a introdução do elemento derivativo melhora a estabilidade do sistema, pode-se, novamente, aumentar o ganho proporcional e diminuir a constante de tempo de integração.

Detalhes sobre determinação e ajustes destes parâmetros podem ser encontrados na literatura especializada como ASTRÖN e HÄGGLUND (1988).

4.7.2 Análise de um Sistema de Controle PID Implementado com Amplificadores Operacionais

A Figura 4.12 representa o diagrama de blocos de um controlador PID do tipo paralelo, e a Figura 4.13 mostra a sua implementação com amplificadores operacionais.

A equação de saída, y , para uma entrada de erro, e , é dada por:

$$y = K_p e + K_i \int_0^t e dt + K_d \frac{de}{dt} \quad (4.18)$$

A função de transferência do controlador é:

$$G_s = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (4.19)$$

em que s é o operador de Laplace.

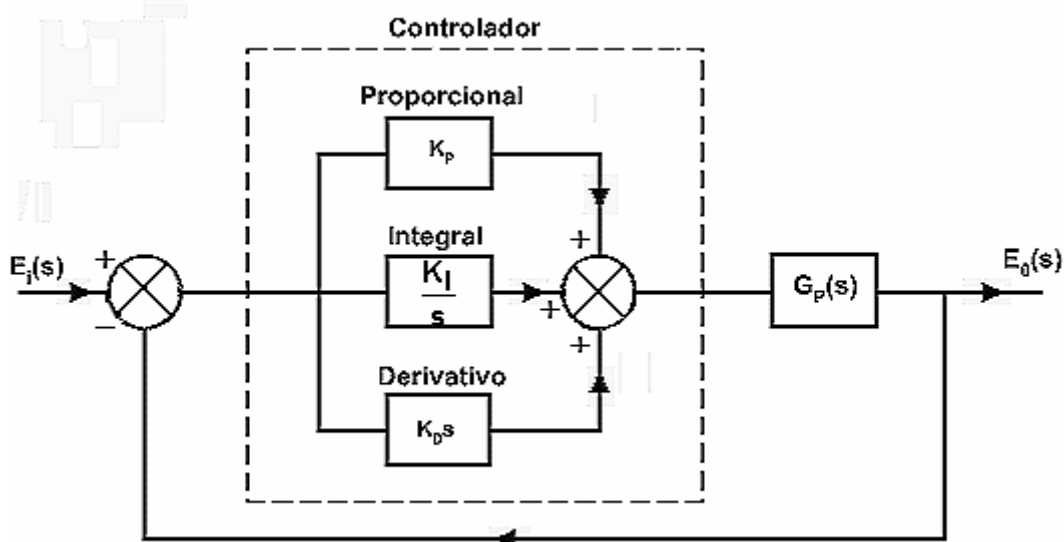


FIGURA 4.12 - Diagrama de blocos de um controlador PID.

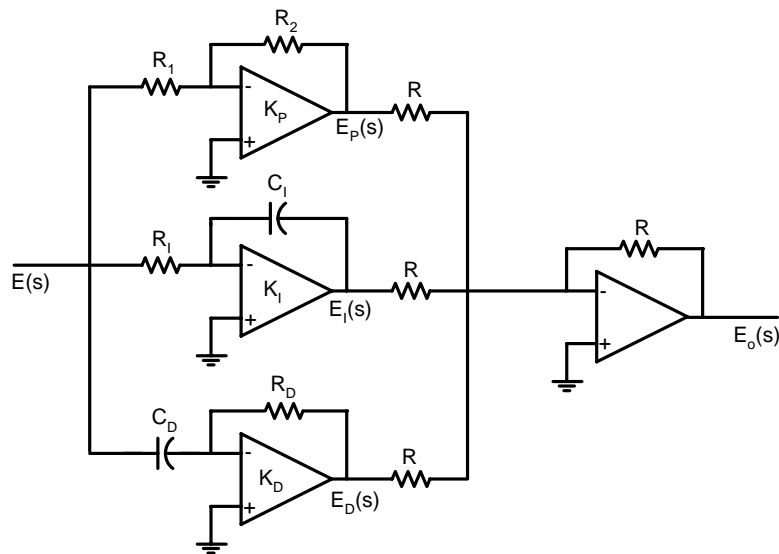


FIGURA 4.13 - Controlador PID implementado com amplificadores operacionais.

O primeiro amplificador operacional está montado como amplificador multiplicador, representa o elemento proporcional e fornece a seguinte função de transferência:

$$K_p = \frac{E_p(s)}{E(s)} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (4.20)$$

O segundo amplificador operacional está montado como amplificador integrador. Sua função de transferência é dada por:

$$K_i = \frac{E_i(s)}{E(s)} = -\frac{1}{R_i C_i s} \quad (4.21)$$

O terceiro amplificador operacional está montado como amplificador derivador e fornece a seguinte função de transferência:

$$K_d = \frac{E_d(s)}{E(s)} = -R_d C_d s \quad (4.22)$$

Por se tratar de um sistema linear, pode se aplicar o princípio da superposição e escrever a função de transferência do sistema como:

$$G(s) = \frac{E_o(s)}{E(s)} = \frac{R_2}{R_1} + \frac{1}{R_1 C_1 s} + R_d C_d s \quad (4.23)$$

A Figura 4.14 mostra os sinais de sistema de controle PID. Como era de se esperar, não existe qualquer oscilação e o sinal de saída segue rigorosamente o sinal de ajuste.

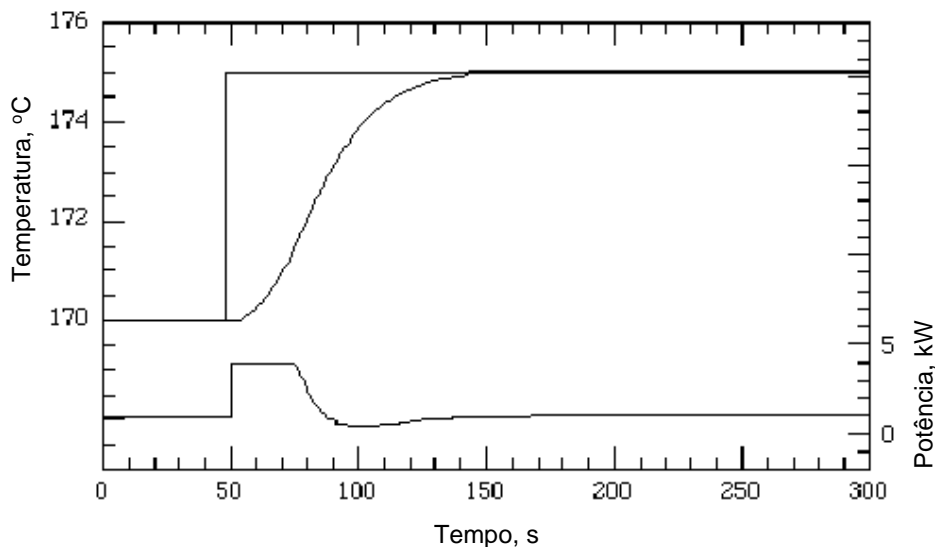


FIGURA 4.14 - Sinais de um controlador PID.

4.8. APLICAÇÕES DOS CONTROLADORES

O sistema de controle mais simples, o liga-desliga, tem a desvantagem de introduzir oscilações na variável de processo. Porém, ele tem grandes vantagens, pois, tem baixo custo e não exige ajuste de qualquer parâmetro. Ele é útil em processos onde estas oscilações são aceitáveis, quando o custo não deve ser elevado, ou ainda, quando se quer evitar problemas na determinação de parâmetros de controle. Estas características fazem dele um dos sistemas de controle mais utilizados nas aplicações convencionais, principalmente nos eletrodomésticos.

Em certos tipos de processos, pode-se trabalhar com altos ganhos no controlador sem problemas de estabilidade. Discutiu-se que, em um controlador proporcional, ganho elevado representa um sinal de erro remanescente pequeno. Nestes sistemas, um simples controlador proporcional pode ser empregado, principalmente quando, ao invés de um nível exato, aceita-se que o nível permaneça dentro de uma determinada faixa. Por esta

razão, este tipo de controlador costuma ser muito empregado nos circuitos intermediários de sistemas de controle em cascata.

O elemento derivativo só se justifica se o sistema a ser controlado apresentar um alto nível de inércia, isto é, resposta lenta às variações, ou estiver sujeito a variações muito bruscas.

Em um processo térmico bem isolado, um controlador proporcional costuma ser suficiente para controlá-lo. Porém, algumas vezes, a transferência de calor entre os materiais exige a presença de um elemento derivativo. Este elemento impedirá o fluxo de energia antes que o sistema seja afetado. Algumas vezes, é necessário não um, mas dois elementos derivativos. O primeiro para controlar as variações de temperatura e o segundo para controlar a aceleração destas variações.

Deve-se levar em conta, porém, que o controlador proporcional derivativo é muito sensível aos ruídos, devido ao elevado ganho que apresenta quando opera em altas frequências. Entretanto, como variáveis de processo térmico normalmente apresentam baixo nível de ruídos, controladores PD funcionam bem nestes casos (HÄGGLUND, 1991).

Na indústria, o sistema de controle mais comum é o proporcional integral, pois é a estrutura mais simples capaz de não causar oscilações ou erro de controle remanescente. Ele opera muito bem quando não se necessita de muita rapidez na ação de controle.

Outra grande aplicação dos controladores PI é o controle de sistemas com longos tempos mortos, pois, como o tempo morto é um atraso antes do efeito da ação de controle sobre a variável de processo, o efeito de previsão do elemento derivativo, neste caso, não funciona.

O controlador proporcional integral derivativo, PID, reúne as vantagens dos três elementos. A parcela proporcional produz uma saída proporcional à diferença entre o sinal medido e o sinal de referência. A ação integral fornece um sinal de saída proporcional à intensidade e ao tempo que o sinal de erro está presente e o elemento derivativo produz um sinal proporcional à taxa de variação do erro.

Este tipo de controlador é indicado para controle de processos com pequenos tempos mortos e sinais de erro tanto em regime transiente quanto estacionário (HUMPHIES e SHEETS, 1999).

4.9. CONTROLE ADAPTATIVO

Os primeiros controladores PID surgiram na década de 40 e eram pneumáticos. Embora tenham evoluído enormemente, principalmente com o surgimento dos controladores baseados em microcomputadores, na década de 70, seus princípios básicos não se alteraram (HÄGGLUND, 1991).

Porém, como os processos industriais são, normalmente, bastante complexos, não lineares e com dinâmicas que variam ao longo do tempo, é difícil manter os controladores corretamente ajustados. Para sanar este problema, surge o controlador adaptativo, como uma evolução do controlador PID convencional.

Um controlador adaptativo é um sistema capaz de modificar o seu comportamento em resposta a variações da dinâmica do processo a ser controlado, variações do ponto de operação, ou mesmo variações das perturbações.

A grande diferença deste tipo de controlador é que, em vez de ajustar os parâmetros do sistema de controle, o operador fornece a descrição dos objetivos de desempenho do sistema. Esta descrição é que vai atuar sobre o controlador de lógica variável e manter os parâmetros do sistema sempre ajustados (OLIVEIRA, 1997).

5. SISTEMA 1-WIRE

5.1. INTRODUÇÃO

O número de dispositivos ligados aos computadores aumenta continuamente, devido à demanda cada vez maior de conexões de comunicação e instrumentação. Normalmente, este fluxo de informação é feito por meio de cabos com múltiplos condutores que interligam e alimentam, individualmente, cada um deles. Uma nova tecnologia, conhecida como *1-WireTM*, possibilita uma transferência bidirecional de informação, por meio de um único condutor, ao mesmo tempo em que alimenta dispositivos remotos, por meio da própria linha de dados (AWTREY, 1997).

Existem outros sistemas semelhantes, embora não tão versáteis quanto estes proposto pela *Dallas Semiconductor*, tais como os denominados de I^2C , desenvolvido pela Philips (ELETRÔNICA, 2001) e *CANBAN and DeviceNet*, desenvolvidos pela *Invensys Systems* (LAW, 2001).

O sistema *1-WireTM*, proposto pela *Dallas Semiconductor*, também conhecido como MicroLAN, é uma rede de comunicação de dados baseada em um computador ou um microcontrolador. Trata-se de um sistema *mestre-escravo* capaz de interligar, com apenas um condutor, além do condutor de referência, dispositivos da série *1-WireTM* da *Dallas Semiconductor*, tais como sensores de temperatura, dispositivos de entradas e saídas digitais, conversores analógicos-digitais, interfaces, memórias, e outros, por meio de saída em dreno. Esta rede é alimentada por uma fonte de corrente contínua de 5V, por meio de um resistor de polarização (*pull up resistor*) ligado ao condutor de dados.

Por *mestre*, entende-se o dispositivo que inicia, gerencia e termina uma transferência de dados. Por *escravo*, entende-se o dispositivo endereçado e gerenciado pelo *mestre*.

Por saída em dreno aberto, entende-se a saída de um circuito com um transistor MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) que, a

cada instante, ou apresenta uma baixa impedância de saída, capaz de permitir, efetivamente, a circulação de corrente, fornecendo uma baixa tensão de saída, considerada como nível lógico baixo (0) ou então apresenta uma impedância de saída muito elevada, que impede a circulação de corrente e que corresponde ao nível lógico alto (1), ou seja, o transistor conduz ou está em corte.

Neste trabalho, utiliza-se um computador como *mestre*, enquanto diversos sensores de temperatura DS1820, da série *1-Wire™*, da *Dallas Semiconductor*, funcionam como *escravos*, conectados ao *mestre* por meio de um circuito integrado DS2480, instalado em um conector designado por DS1411 *Serial Port iButton™ Holde*, mostrado na Figura 5.1, também da *Dallas Semiconductor* que faz a interface com a porta serial RS-232C do computador.

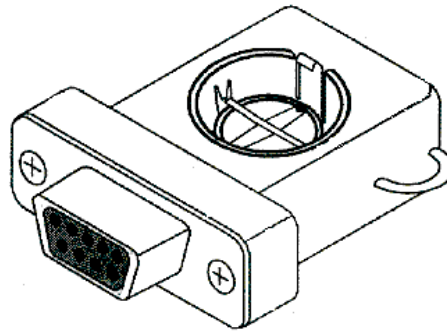


FIGURA 5.1 - DS1411 – Interface da porta serial RS232C com a linha *1-Wire™*.

O conector DS1411, cujo esquema é mostrado na Figura 5.2, é um circuito de interface entre a linha serial RS-232C e o barramento *1-Wire™* que pode ser ligado diretamente a uma saída DB9, da qual recebe a própria alimentação. O circuito integrado DS2480 é denominado pela *Dallas Semiconductor* de acionador de linha. Dele sai um único condutor que, juntamente com o condutor de referência, interliga todos os dispositivos escravos ligados ao sistema.

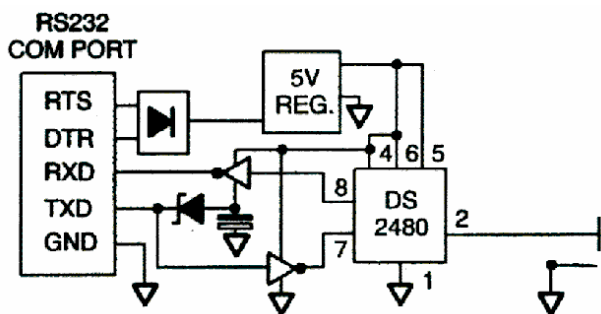


FIGURA 5.2 - Esquema do conector de DS 1411.

Cada dispositivos *1-Wire™* possui um código único de identificação de 64 bits (8 bytes), definidos pela própria *Dallas Semiconductor*, que o identifica e um controlador auto temporizado. Neste código, representado na Figura 5.3, o primeiro byte é o que determina o código de família do dispositivo, os seis bytes seguintes correspondem ao número de série que caracteriza o dispositivo e o último byte representa a verificação de redundância cíclica (CRC) dos sete primeiros bytes, utilizada para garantir a integridade dos dados.

A obtenção dos códigos dos dispositivos ligados a um barramento *1-Wire™* pode ser feita por um processo recursivo de procura em árvore, por meio de um programa específico, ou então utilizando-se o programa de identificação de dispositivos WINDIAG, disponibilizado em rede pela *Dallas Semiconductor*.

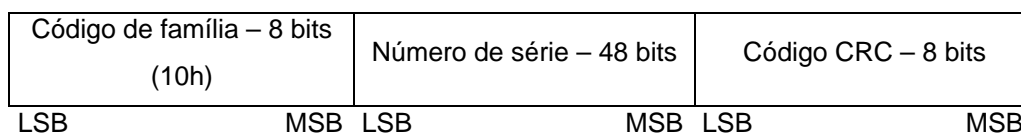


FIGURA 5.3 - Código de identificação dos dispositivos.

O protocolo da rede *1-Wire™* utiliza níveis lógicos CMOS/TTL convencionais, em que uma tensão igual ou inferior a 0,8V representa um nível lógico baixo (zero lógico) e tensões iguais ou superiores a 2,2V correspondem a um nível lógico alto (um lógico). Tanto o *mestre* como os escravos ligados a ele são configurados como transreceptores, isto é, permitem o fluxo de dados em

ambas as direções, mas em uma única direção de cada vez, ou seja, a transferência de dados é via única e seqüencial, a partir do bit menos significativo (Figura 5.4).

No sistema *1-Wire™*, os dados são transmitidos em função da duração do intervalo de tempo em que a linha permanece no nível lógico baixo. Para se escrever um 1 lógico, o barramento é mantido em nível lógico baixo (massa) por 15µs ou menos. Para escrever um 0 lógico, o barramento deve ser mantido no nível baixo durante pelo menos 60µs. O nível lógico baixo é obtido por meio de um transistor de efeito de campo (MOSFET), ao passo que um nível lógico alto é obtido por meio de um simples resistor.

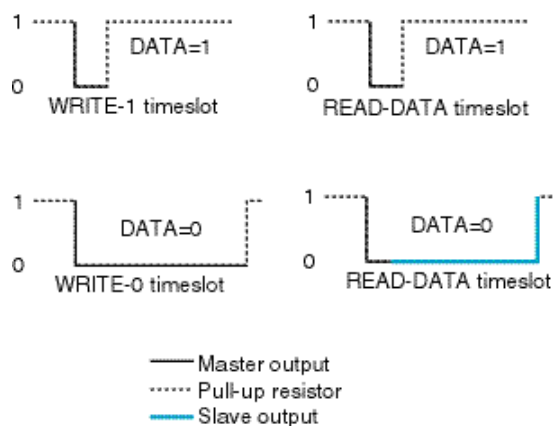


FIGURA 5.4 - Níveis lógicos utilizados no sistema *1-Wire™*.

Quando em operação, o mestre inicializa a rede, colocando o barramento ao potencial da massa por pelo menos 480µs. Os *escravos* conectados respondem com um pulso de presença com duração entre 15 e 60µs. Em seguida, o *mestre* acessa um determinado *escravo*, chamando seu endereço e enviando algum comando específico exigido pelo dispositivo e, finalmente, promovendo a transferência de dados entre eles.

O sistema *1-Wire*TM não necessita de um sistema de contagem de tempo, pois cada elemento do sistema é auto temporizado por meio de seu próprio oscilador interno, que é sincronizado pelo fim do pulso emitido pelo *mestre*.

A análise deste sistema de barramento é feita em três etapas:

- (i) configuração de hardware;
- (ii) seqüência de transmissão de dados;
- (iii) sinalização do sistema.

5.2. CONFIGURAÇÃO DE *HARDWARE*

Por definição, o sistema *1-Wire*TM possui apenas um único condutor ao qual são ligados todos os dispositivos, já que, por convenção, o condutor de referência ou aterramento não é considerado. Cada um dos dispositivos ligados a este barramento deve ser capaz de acioná-lo no instante apropriado e, para isto, devem ter saída em dreno aberto ou de três estados.

O medidor de temperatura DS1820 é um dispositivo escravo, com saída em dreno aberto, disponível no pino de entrada e saída (I/O), com um circuito interno equivalente ao mostrado na Figura 5.5. Quando mais de um dispositivo escravo é ligado ao barramento, como normalmente acontece, o sistema *1-Wire*TM é dito de múltiplas saídas.

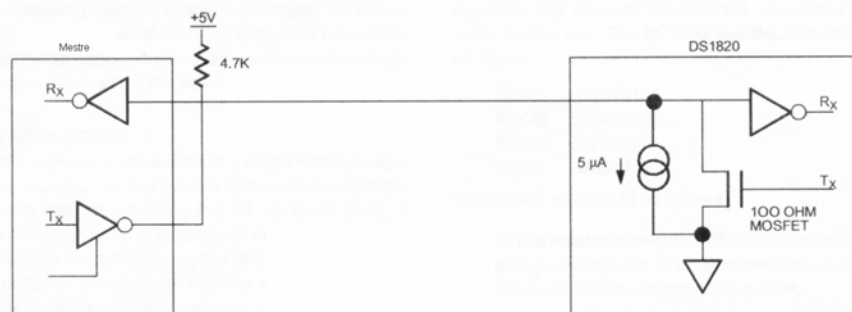


FIGURA 5.5 - Configuração de *hardware*.

Para funcionar, o barramento *1-Wire™* deve ser alimentado por meio de um resistor de polarização de, aproximadamente, $5k\Omega$, ligado ao terminal positivo da fonte de alimentação, com a finalidade de manter, durante o período de repouso, a tensão do barramento em estado de nível lógico alto.

O estado de repouso (ativo) do sistema *1-Wire™* é, portanto, de nível lógico alto. Se, por alguma razão, uma transmissão tiver que ser interrompida, o barramento tem que ser levado ao estado de repouso para que a transição possa ser retomada. Caso isto não ocorra e o barramento permaneça no estado de nível lógico baixo por mais de $480\mu s$, todos os componentes ligados a ele serão reinicializados.

5.3. SEQÜÊNCIA DE TRANSMISSÃO DE DADOS

O protocolo para acessar os dispositivos DS1820 conectados à linha, por meio do barramento *1-Wire™* e a porta serial RS232c, é o seguinte:

- Inicialização;
- Comando de função ROM;
- Comando de função Memória;
- Transferência de dados.

5.3.1 Inicialização

Toda transmissão de dados através do barramento *1-Wire™* começa com uma seqüência de inicialização. A seqüência de inicialização inicia-se com um pulso de reinicialização (*reset pulse*), transmitido pelo barramento mestre, que consiste em colocar o barramento *1-Wire™* em nível lógico baixo, por meio do transistor de efeito de campo (MOSFET), por pelo menos $480\mu s$. O pulso de reinicialização é respondido por pulsos de presença, transmitidos pelos dispositivos escravos ligados ao barramento. O pulso de presença informa ao barramento mestre a presença destes dispositivos escravos (DS1820) e indica que eles estão prontos para operar.

5.3.2 Comandos de função ROM

Uma vez que o barramento mestre detectou a presença de um ou mais dispositivos conectados à linha, ele pode acessar qualquer um deles, enviando um dos cinco comandos de função ROM. Todos estes comandos de função ROM têm comprimento de oito bits e instruem o dispositivo escravo a executar uma determinada tarefa especificada pelo mestre. A relação destes comandos é apresentada a seguir e refere-se ao fluxograma da Figura 5.6.

5.3.2.1 Comando Read ROM (33h)

Este comando é utilizado quando há um único dispositivo escravo ligado ao barramento e serve para identificá-lo. Ele habilita o barramento mestre a ler o código de família, de oito bits, do dispositivo, o número serial de identificação de 48 bits e o controle de redundância cíclica (CRC), de oito bits. Caso mais de um escravo esteja conectado ao barramento, este comando provocará uma colisão de dados quando todos eles tentarem transmitir seu código ao mesmo tempo. Neste caso, as ligações em dreno aberto dos diversos dispositivos funcionarão como uma ligação lógica E (AND).

5.3.2.2 Match ROM (55h)

Em um barramento com diversos escravos ligados, este comando, seguido de uma seqüência ROM de 64 bits, permite ao barramento mestre acessar o dispositivo especificado pela seqüência. Somente o dispositivo que se identificar perfeitamente com aquela seqüência de 64 bits responderá ao comando de função de memória que vier em seguida. Todos os demais dispositivos ligados ao barramento esperarão por um pulso de reinicialização para poder operar. Este comando também pode ser utilizado caso haja um único dispositivo escravo ligado ao barramento.

5.3.2.3 Skip ROM (CCh)

Este comando diminui o tempo de operação quando um único dispositivo escravo é ligado ao barramento, pois possibilita ao mestre acessar as funções de memória sem necessidade de fornecer o código de 64 bits que especifica o dispositivo. Caso haja mais de um dispositivo escravo ligado ao barramento e um comando de leitura for expedido após o comando SKIP, haverá uma colisão de dados, pois, novamente, as ligações em dreno aberto dos dispositivos escravos produzirão como resultado uma ligação lógica E (AND).

5.3.2.4 Search ROM (F0h)

Quando um sistema *1-WireTM* é inicialmente energizado, o barramento mestre nem sempre conhece a quantidade nem o código de identificação de 64 bits dos dispositivos escravos ligados a ele. Este comando, por um processo de eliminação, permite ao barramento mestre determinar a quantidade e identificar o código de 64 bits de cada um destes dispositivos escravos.

O processo de procura da ROM consiste na repetição de uma simples rotina de três passos: ler um bit, ler o complemento deste bit e, em seguida, escrever o valor desejado deste bit. O barramento mestre executa esta rotina para cada bit da ROM de um dispositivo. Ao concluí-la, determina o conteúdo desta ROM, que corresponde ao código de identificação do dispositivo. O número de dispositivos restantes e seus códigos ROM podem ser identificados repetindo-se o processo para cada um deles.

5.3.2.5 Alarm search (Ech)

A lógica de funcionamento deste comando é idêntica à do comando *Search ROM*, porém o DS1820 só responderá a este comando se, na última medição de temperatura realizada, uma condição de alarme tiver sido atingida, isto é, se o sensor mediu uma temperatura fora da faixa permitida. A condição de alarme permanece ativada enquanto o DS1820 permanecer energizado ou até que outra medida de temperatura indique um valor dentro desta faixa. A faixa permitida é

definida pelos valores TL (limite inferior de temperatura) e TH (limite superior de temperatura) armazenados na EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*) do dispositivo.

5.3.2.6 Identificação de dispositivos *1-Wire*TM com o comando *ROM Search*

Apresenta-se, em seguida, um exemplo de identificação de dispositivos *1-Wire*TM supondo quatro dispositivos distintos ligados ao mesmo barramento mestre com os seguintes dados gravados na ROM:

ROM1	00110101
ROM2	10101010
ROM3	11110101
ROM4	00010001

Neste caso, o procedimento será o seguinte:

- (a) O barramento mestre começa a seqüência de inicialização enviando um pulso de reinicialização. Os dispositivos escravos respondem, enviando pulsos de presença.
- (b) Em seguida, o barramento mestre envia o comando *Search ROM* através da linha *1-Wire*TM.
- (c) O barramento mestre lê um bit do barramento *1-Wire*TM. Cada dispositivo escravo acoplado responderá colocando o valor do primeiro bit de seu respectivo conteúdo gravado na ROM na linha *1-Wire*TM. ROM1 e ROM4 colocarão um 0 (zero) no barramento *1-Wire*TM, fazendo com que a linha fique no nível lógico baixo e ROM2 e ROM3 colocarão um 1 (um), fazendo com que a linha fique no nível lógico alto. O resultado é o E (AND) lógico de todos os dispositivos acoplados à linha. Então o barramento mestre detecta um 0 (zero). Em seguida, o barramento mestre lê um outro bit. Uma vez que o comando *Search ROM* está sendo executado, todos os dispositivos acoplados respondem a esta segunda leitura colocando o complemento do primeiro bit de seus respectivos ROM's *data* no barramento *1-Wire*TM. ROM1 e ROM4

colocarão um 1 (um), enquanto ROM2 e ROM3 colocarão um 0 (zero). O barramento mestre novamente detecta um 0 (zero) para o complemento do primeiro *ROM DATA bit*. O barramento mestre determinou, então, que há alguns dispositivos ligados ao barramento que têm um 0 (zero) na primeira posição e outros que têm um 1 (um). Os dados obtidos destas duas leituras da rotina de três passos permitem a seguinte interpretação:

00 ⇒ ainda há dispositivos acoplados que têm bits conflitantes nesta posição.

01 ⇒ todos os dispositivos ainda ligados têm um bit 0 nesta posição.

10 ⇒ todos os dispositivos ainda ligados têm um bit 1 nesta posição.

11 ⇒ Não há dispositivos ligados ao barramento *1-Wire™*.

- (d) O barramento mestre escreve um 0. Isto desabilita ROM2 e ROM3 para o restante deste passo da investigação, deixando apenas ROM1 e ROM4 conectados ao barramento.
- (e) O barramento mestre executa mais duas leituras e recebe um bit 0 (zero), seguido de um bit 1 (um). Isto indica que o segundo *ROM DATA bit* de todos os dispositivos ainda acoplados ao barramento é 1 (um).
- (f) O barramento mestre, então, escreve um 0 (zero), a fim de manter ROM1 e ROM4 acoplados.
- (g) O barramento mestre executa duas leituras e recebe dois bits 0 (zero). Isto indica que no terceiro bit do *ROM DATA* dos dispositivos acoplados existem 0's e 1's (zeros e uns).
- (h) O barramento mestre escreve um bit 0 (zero). Isto desacopla ROM1, ficando ROM4 como o único dispositivo ainda acoplado.
- (i) O barramento mestre lê os bits restantes dos *ROM bits* de ROM4 e continua a acessar a parte que for requisitada. Isto completa o primeiro passo e identifica de modo único uma parte do barramento *1-Wire™*.
- (j) O barramento mestre inicia uma nova seqüência de comandos *ROM Search*, repetindo as etapas de (a) a (g).
- (k) O barramento mestre escreve um bit 1 (um). Isto desacopla ROM4 e deixa ROM1 acoplado.

- (l) O barramento mestre lê os bits restantes da memória apenas de leitura de ROM1 e comunica à lógica de base se for solicitado. Isto completa o segundo passo do comando *ROM Search*, no qual uma outra das ROM's foi determinada.
- (m) O barramento mestre inicia uma nova busca, repetindo os passos de (a) a (b).
- (n) O barramento mestre escreve um bit 1 (um). Isto desacopla ROM1 e ROM4 e deixa somente ROM1 e ROM2 acoplados ao sistema.
- (o) O barramento mestre executa mais duas leituras e recebe dois 0 (zero).
- (p) O barramento mestre escreve um bit 0 (zero). Isto desacopla ROM3 e deixa unicamente ROM2 acoplado.
- (q) O barramento mestre lê os bits restantes da memória apenas de leitura de ROM2 e comunica à lógica de base se for solicitado. Isto completa o terceiro passo do comando *ROM Search*, no qual uma outra das ROM's foi determinada.
- (r) O barramento mestre inicia uma nova busca, repetindo os passos de (m) a (o).
- (s) O barramento mestre escreve um bit 1 (um). Isto desacopla ROM2 e deixa unicamente ROM 3 acoplado.
- (t) O barramento mestre lê os bits restantes da memória apenas de leitura de ROM3 e comunica à lógica de base se for solicitado. Isto completa o quarto passo do comando *ROM Search*, no qual uma outra das ROM's foi determinada.

Verifica-se que o barramento mestre identifica um único dispositivo em cada operação do comando *ROM Search*, por meio do código identificador único. O tempo necessário para deduzir um código é:

$$t_{\text{cod}} = 960\mu\text{s} + (8 + 3 \times 64) 61\mu\text{s} = 13.160\mu\text{s} = 13,16\text{ms} \quad (5.1)$$

Portanto, o barramento mestre é capaz de identificar 75 dispositivos diferentes por segundo.

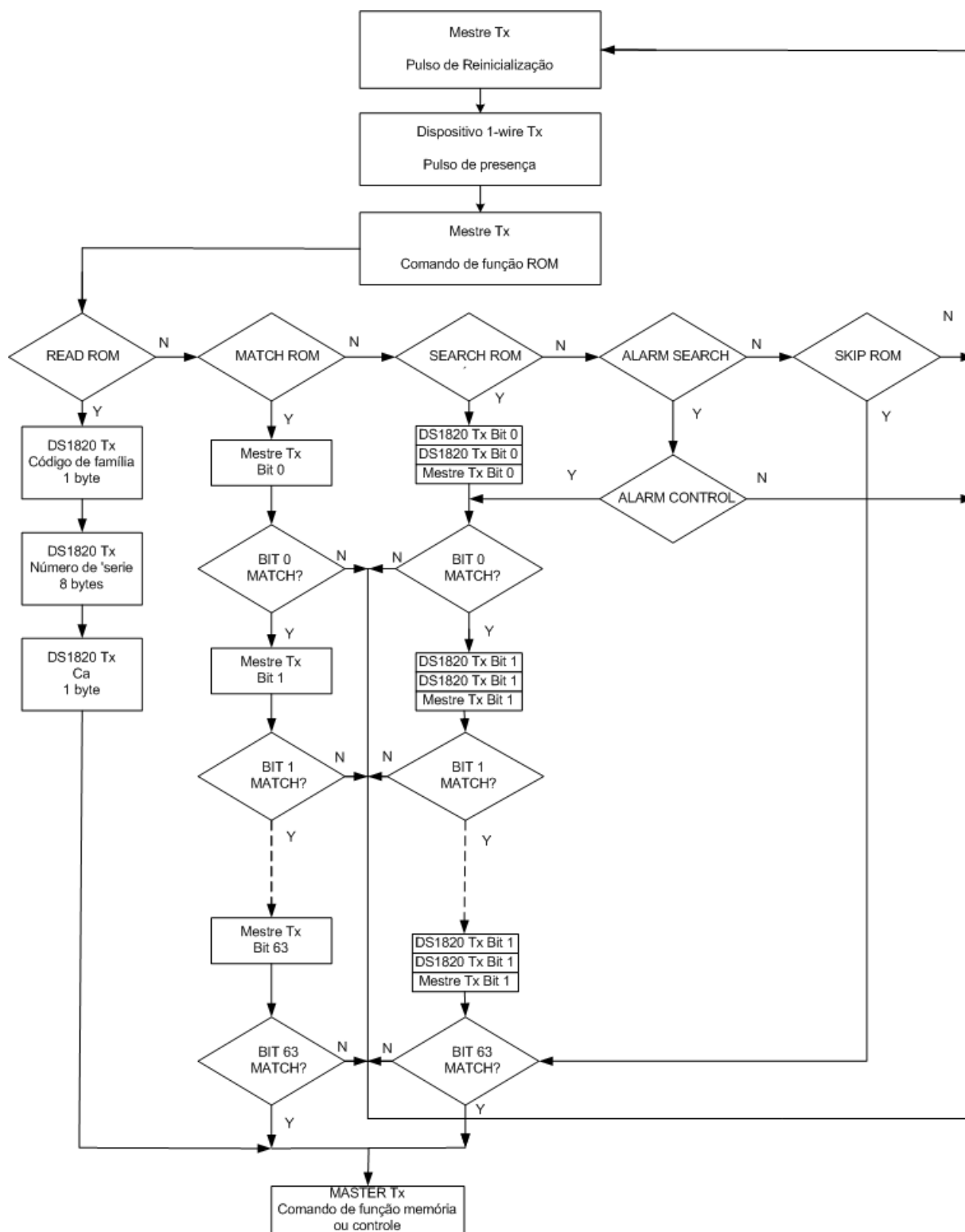


FIGURA 5.6 - Lógica de execução das funções de memória de apenas leitura (ROM).

5.4. SINALIZAÇÃO DE ENTRADA E SAÍDA

O sensor de temperatura DS1820 exige protocolos específicos para garantir a integridade dos dados transmitidos. O protocolo consiste de vários tipos de sinalização em uma linha:

- (i) pulso de reinicialização;
- (ii) pulso de presença;
- (iii) escrita de 0;
- (iv) escrita de 1;
- (v) leitura de 0;
- (vi) leitura de 1.

Todos estes sinais são inicializados pelo barramento mestre, com exceção dos pulsos de presença, que são enviados pelos dispositivos escravos.

A seqüência de sinalização necessária para iniciar qualquer comunicação com o DS1820 é mostrada na Figura 5.9. Um pulso de *reinicialização*, seguido por um pulso de presença indica que o DS1820 está pronto para enviar ou receber dados, em função do comando ROM e dos comandos seguintes de função memória.

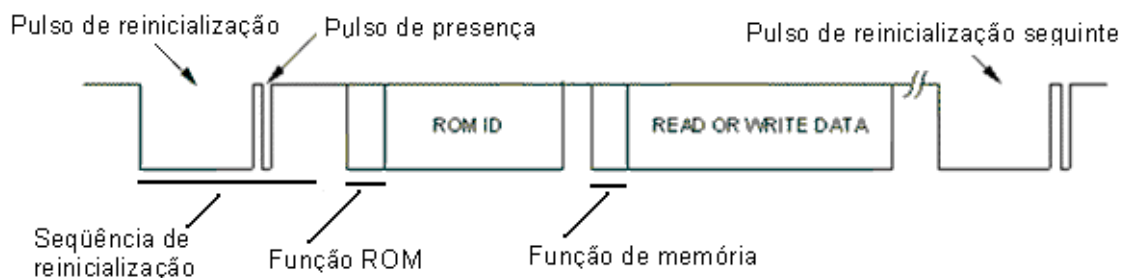


FIGURA 5.7 - Procedimento de inicialização do DS1820: pulsos de reinicialização e de presença.

O barramento mestre transmite um pulso de reinicialização, TX (um sinal de nível lógico baixo durante um tempo mínimo de 480 μ s). Em seguida, o mestre libera a linha e entra em modo de recepção, RX. O barramento *1-Wire™* é, então, levado para o estado de nível lógico alto, por meio do resistor de polarização de

5k Ω . Depois de detectar o fim do pulso no terminal de entrada e saída (I/O), o DS1820 espera de 15 a 60 μ s e, então, transmite um pulso de presença, que é um sinal de nível lógico baixo de 60 a 240 μ s. Este pulso de reinicialização deve ser enviado antes de qualquer comando ROM.

5.5. FUNÇÕES DE COMANDO DE MEMÓRIA

Os protocolos de comando a seguir, resumidos no Quadro 5.1 e no fluxograma da Figura 5.10, são denominados comandos de função de memória e instruem o dispositivo escravo a executar uma tarefa determinada pelo elemento mestre.

Quadro 5.1 – Conjunto de comandos de memória do DS1820

Instrução	Descrição	Protocolo	Barramento 1-Wire depois de expedir o protocolo
Comandos de conversão de temperatura			
ConvertT	Inicializa a conversão de temperatura	44h	lê a temperatura do sensor
Comandos de memória			
Read scratchpad	lê bytes do <i>scratchpad</i> e lê o <i>byte</i> CRC	BEh	lê dados de até 9 bytes
Write scratchpad	Escreve bytes no <i>scratchpad</i> nos endereços 2 e 3 (TH e TL temperatures triggers)	4Eh	Escreve dados em 2 bytes nos endereços 2 e 3
Copy scratchpad	Copia <i>scratchpad</i> nas memórias não voláteis (endereços 2 e 3)	48h	Lê o estado de cópia
Recall EEPROM	Retorna valores armazenados nas memórias não voláteis <i>scratchpad</i>	B8h	lê a temperatura do sensor
Read power supply	Sinaliza o modo da fonte de alimentação do DS1820 para o mestre	B4h	lê o estado da fonte

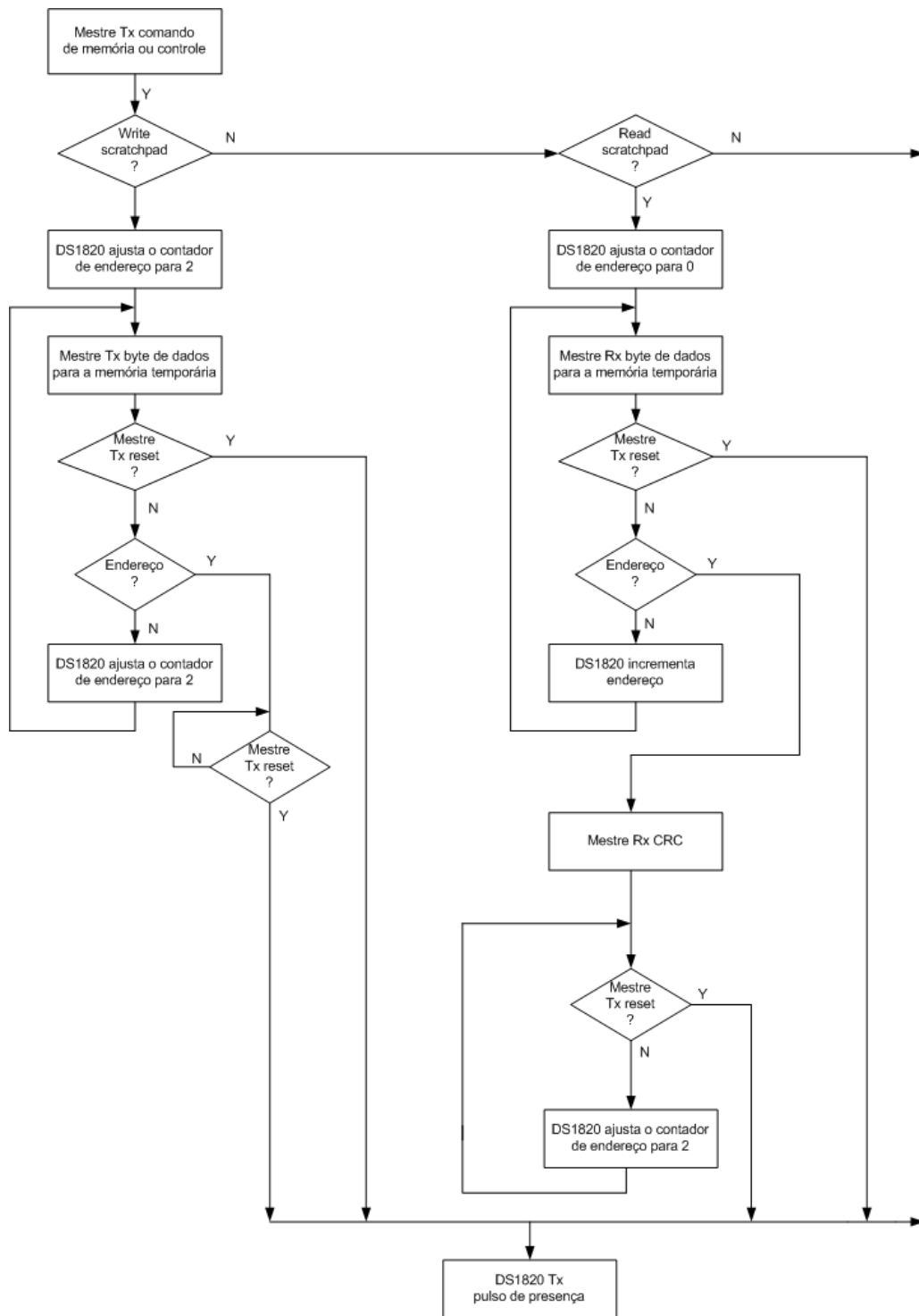


FIGURA 5.8 - Lógica de funcionamento dos comandos de função de memória.

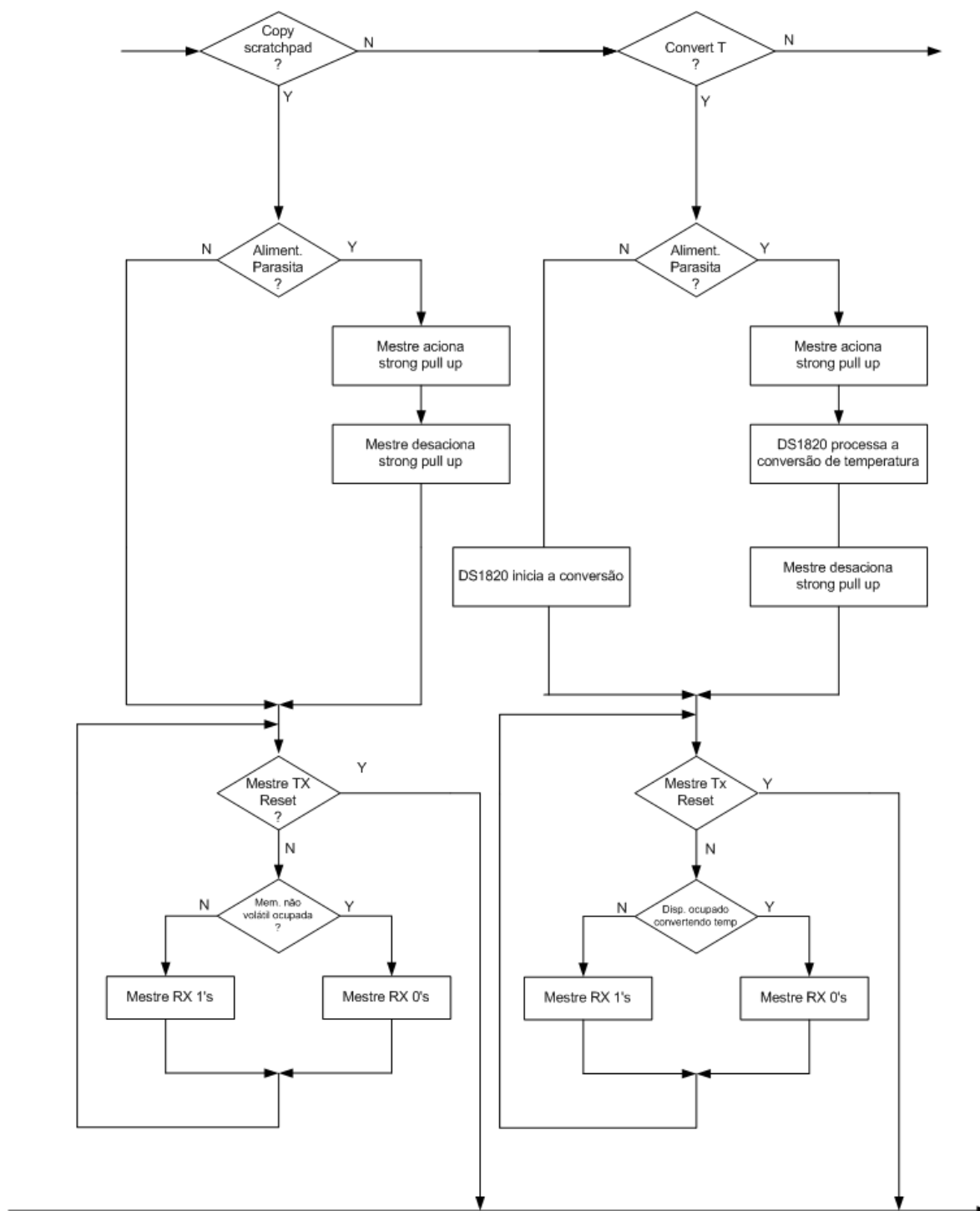


FIGURA 5.8 - Lógica de funcionamento dos comandos de função de memória (cont.).

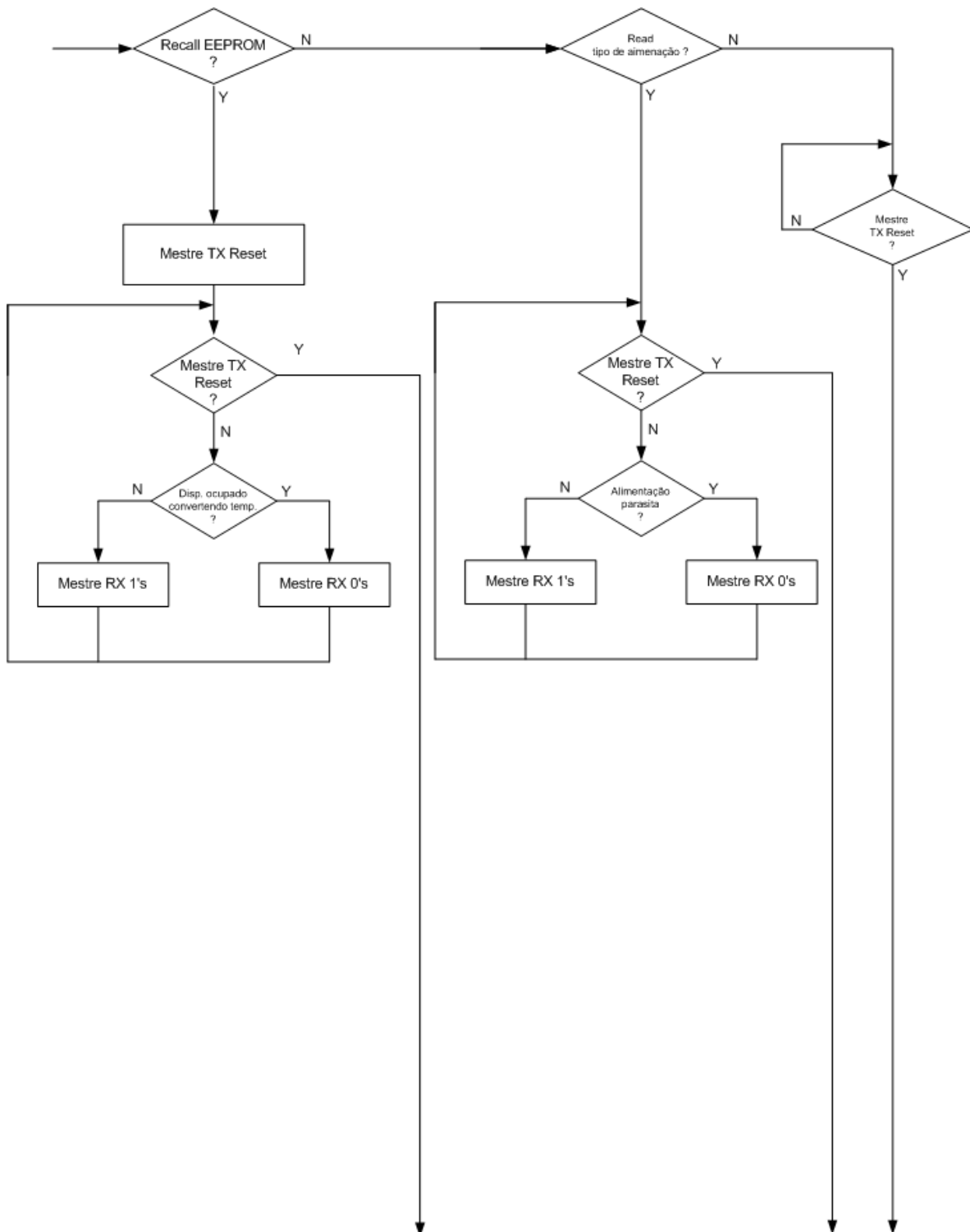


FIGURA 5.10 - Lógica de funcionamento dos comandos de função de memória.

5.5.1 Write Scratchpad (4Eh)

Este comando escreve na memória temporária (*scratchpad*) do dispositivo escravo a informação que vem em seguida.

5.5.2 Read Scratchpad (BEh)

Este comando lê o conteúdo da memória temporária (*scratchpad*). A leitura começa pelo byte 0 (zero) e continuará até que o último byte, que é o CRC, seja lido. Caso nem todas as locações precisarem ser lidas, o mestre pode enviar um pulso de reinicialização e interromper a leitura a qualquer instante.

5.5.3 Copy Scratchpad (48h)

Este comando copia o conteúdo da memória temporária (*scratchpad*) em uma memória apagável eletricamente (EEPROM) do DS1820, armazenando os bytes das temperaturas de limite superior (TH) e de limite inferior (TL) na memória não volátil. Se o barramento mestre enviar o comando *read time slots* em seguida a este comando, o DS1820 emitirá um 0 (zero) enquanto ele estiver ocupado copiando o conteúdo da memória temporária para a memória E² (*Electrically Erasable memory*). Ele retornará 1 (um) quando o processo de cópia estiver concluído.

5.5.4 ConvertT (44h)

Este comando instrui o sensor DS1820 para executar uma conversão de temperatura. Nenhum outro dado é necessário. O DS1820, simplesmente, executa a conversão de temperatura e permanece em repouso. Como no comando anterior, se o barramento mestre enviar o comando *read time slots* em seguida a este comando, o sensor enviará um 0 (zero) em resposta enquanto ele estiver executando a conversão de temperatura. Ele retornará 1 (um) quando o processo de conversão estiver terminado.

5.5.5 Recall E² (B8h)

Este comando copia as temperaturas de limite superior (TH) e de limite inferior (TL), armazenadas nas memórias não voláteis, de volta para a memória temporária (*scratchpad*). Esta operação não precisa ser ordenada, pois ela ocorre automaticamente assim que o sensor de temperatura for energizado.

5.5.6 Read Power Supply (B4h)

Este comando solicita ao DS1820 que informe ao mestre se ele está alimentado diretamente pela linha de dados (*parasite power*) ou por uma fonte externa. O dispositivo indicará sua forma de alimentação: 0 (zero) para alimentação parasita e 1 (um) para fonte de alimentação externa.

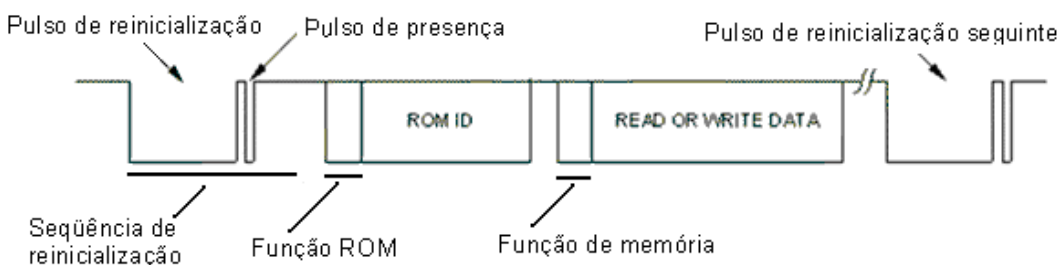


FIGURA 5.11 - Seqüência de pulsos.

5.6. READ/WRITE TIME SLOTS

Os dados do DS1820 são lidos e escritos em função da duração dos intervalos de tempo (*time slots*) utilizados para manipular bits e da função de comando que especifica a operação a ser executada. Um intervalo de tempo é predeterminado e se inicia quando a linha de transmissão de dados, que se encontra inicialmente em repouso, é colocada no estado ativo.

Existem dois tipos de pulsos de intervalo de tempo (*time slots*): pulso de reinicialização (*reset*) e pulso de transferência de dados (*data*). O pulso de reinicialização tem duração de, pelo menos, 480µs e um tempo de resposta

inferior a 300 μ s. Os pulsos de transferência de dados não são superiores a 120 μ s (BACHIONI).

5.6.1 Write Time Slots

A operação escrever ou gravar um pulso (*write time slots*) é inicializada quando o computador passa a linha de transmissão de dados do nível lógico alto (estado de repouso) para o nível lógico baixo. Existem dois tipos de comando *write time slots*: escrever um pulso equivalente a um 1 (um) lógico (*write one time slot*) e escrever um pulso equivalente a um 0 (zero) lógico. (*write zero time slot*). Ambos devem ter duração mínima de 60 μ s, com um tempo de recuperação mínimo de 1 μ s entre ciclos de escritas individuais.

O DS1820 analisa a linha de entrada e saída (I/O) em um intervalo de 15 μ s a 60 μ s depois que a linha I/O tiver sido colocada em nível lógico baixo. Se a linha estiver no nível lógico alto, significa escrever um 1 (um) lógico (*write one*), caso encontre-se no nível lógico baixo, significa escrever um 0 (zero) lógico (*write zero*).

Para o computador escrever um 1 (um) lógico (*write one time slot*) a linha de dados deve ser levada para o nível lógico baixo e, então, liberada, permitindo que ela passe para o nível lógico alto dentro de 15 μ s depois do início do pulso (*time slot*). Para o computador gerar um 0 (zero) lógico (*write zero time slot*), a linha de dados deve ser colocada no nível lógico baixo e permanecer assim durante 60 μ s.

5.6.2 Read time slots

O computador envia um comando de leitura de um pulso (*read time slots*) quando dados armazenados no dispositivo escravo, DS1820, devem ser lidos. De maneira análoga ao comando *write time slot*, um *read time slot* é inicializado quando o mestre leva a linha de transmissão de dados do nível lógico alto para o nível lógico baixo. A linha de dados deve ser mantida no nível lógico baixo durante

um tempo mínimo de $1\mu\text{s}$. Os dados de saída do DS1820 são válidos durante $15\mu\text{s}$ depois do término do pulso.

Como o dispositivo escravo não é capaz de iniciar uma transferência de dados, para ler um pulso, o dispositivo mestre deve colocar a linha de transferência de dados no nível lógico baixo. Para ler um 1 (um) lógico, o mestre coloca a linha no nível lógico baixo durante $15\mu\text{s}$ e, quando o mestre a libera, ela volta para a posição de repouso. Para ler um 0 (zero) lógico, quando o mestre libera a linha, o dispositivo escravo mantém a linha no nível lógico baixo até completar o pulso.

Verifica-se, portanto que ao escrever um dado, o mestre controla a linha e, ao ler um dado é o escravo que a controla.

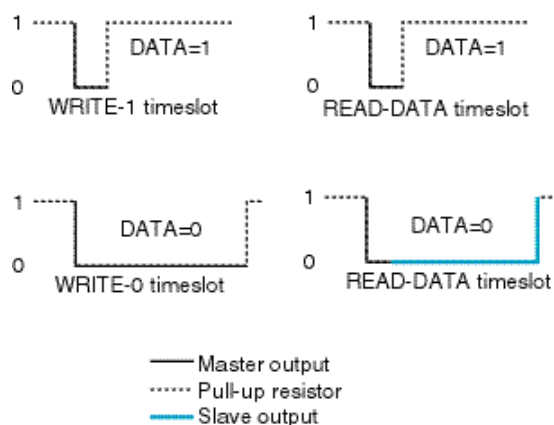


FIGURA 5.12 - Pulsos de escrita e leitura.

5.7. SEQÜÊNCIA DE ACESSO

Apresentam-se algumas seqüências de dados referentes à transferência de dados entre um dispositivo DS1820 e um computador com interface entre a porta serial e uma rede *1-Wire*TM efetuada com base em um circuito DS2480.

O Quadro 5.2 apresenta a seqüência de comandos necessários para que o dispositivo mestre inicie uma conversão de temperatura em um determinado

sensor e, em seguida, leia a temperatura medida. Considera-se que o sensor de temperatura esteja alimentado pela própria linha de dados.

QUADRO 5.2. Seqüência de comandos de conversão de temperatura

Modo do mestre	Dado transmitido	Comentários
TX	Reset	Pulso de reinicialização
RX	Presence	Pulso de presença
TX	55h	Comando Match ROM
TX	ROM ID	Indica o endereço do dispositivo
TX	44h	Instrui a conversão de temperatura
TX	I/O – line high	Mantém a linha em nível lógico alto para garantir a conversão
TX	Reinicialização	Pulso de reinicialização
RX	Presença	Pulso de presença
TX	55h	Comando Match ROM
TX	ROM ID	Identifica o dispositivo
TX	Beh	Comando read Scratchpad
RX	9 bytes de dados	Transferência de dados
TX	Reinicialização	Pulso de reinicialização
RX	Presença	Pulso de presença

No Quadro 5.2 e no seguinte, TX representa um caracter ou byte enviado pelo mestre e RX um caracter ou byte recebido por ele.

Segundo MOTA (2001), para se fazer uma conversão de temperatura em todos os dispositivos do tipo DS1820 presentes na rede, basta substituir o comando *Match ROM* pelo comando *Skip ROM*, suprimir o código de identificação do dispositivo e enviar, em seguida, o comando *ConvertT*.

O Quadro 5.3 apresenta a seqüência de comandos necessários para que o único dispositivo escravo, DS1820, presente no barramento, alimentado pela

própria linha de dados, escreva os dados armazenados na memória temporária. Neste caso, o comando *Skip ROM* está sendo utilizado de forma convencional.

QUADRO 5.3. Seqüência de comandos de gravação de dados na memória temporária

Modo do mestre	Dado	Comentários
TX	Reset	Pulso de reinicialização
RX	Presence	Pulso de presença
TX	CCh	Comando Skip ROM
TX	4Eh	Comando Write Scratchpad
TX	2 bytes de dados	Escreve TH e TL na memória temporária
TX	Reset	Pulso de reinicialização
RX	Presence	Pulso de presença
TX	CCh	Comando Skip ROM
TX	Beh	Comando Read Scratchpad
RX	9 bytes de dados	Transferência de dados
TX	Reset	Pulso de reinicialização
RX	Presence	Pulso de presença
TX	CCh	Comando Skip ROM
TX	48h	Comando Copy Scratchpad
TX	Reset	Pulso de reinicialização
RX	Presence	Pulso de presença

6. DS 1820 – TERMÔMETRO DIGITAL 1-WIRE™

6.1. INTRODUÇÃO

O termômetro digital DS1820 da *Dallas Semiconductor* é um sensor de temperatura, cuja leitura é uma palavra digital com comprimento de nove bits, que indica a temperatura do ambiente em que o dispositivo se encontra.

As informações são enviadas do DS1820, ou para ele, por meio de uma interface *1-wire™*, de modo que somente um condutor, além do condutor terra de referência é necessário para conectar o dispositivo ao microprocessador ou ao computador. A energia necessária para saída (*reading*), entrada (*writing*) ou conversão (*convert*) de temperatura é entregue ao dispositivo pela própria linha de comunicação de dados, sem que haja necessidade de uma fonte externa. Entretanto, se necessário, uma fonte de alimentação externa pode ser utilizada, ligada ao terminal V_{DD} do dispositivo.

Uma vez que cada dispositivo DS1820 possui um número de código próprio (*silicon serial number*), que o identifica, diversos dispositivos DS1820 podem ser ligados ao mesmo barramento *1-wire™* permitindo, assim, endereçá-los individualmente e monitorar a temperatura em diversos pontos do sistema.

Estes sensores de temperatura estão disponíveis no mercado de duas formas, o DS1820 com encapsulamento PR35, de três terminais e o DS1820S com encapsulamento SSOP, de 16 terminais, conforme mostrado na Figura 6.1. No Quadro 6.1, tem-se a descrição de cada um destes terminais para cada tipo de encapsulamento.

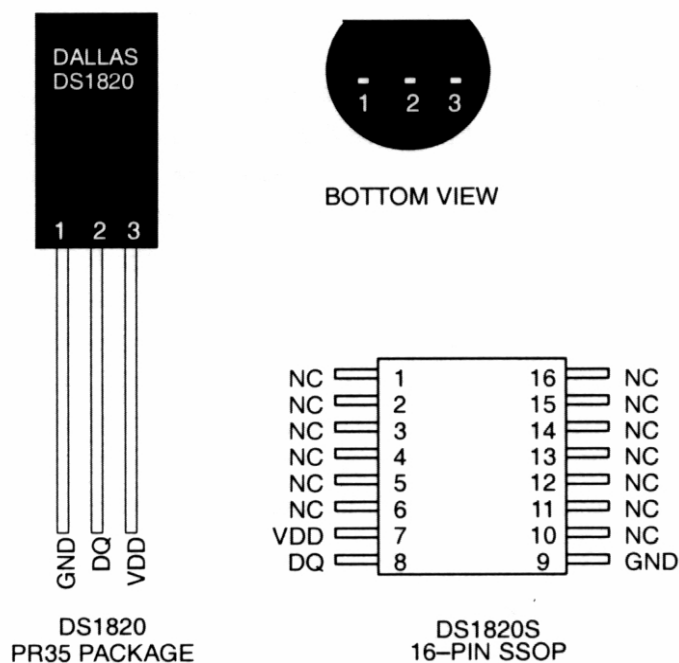


FIGURA 6.1 - Sensores de temperatura DS1820.

QUADRO 6.1 - Descrição dos terminais dos sensores de temperatura DS 1820

Terminal SSOP	Terminal PR35	Símbolo	Descrição
9	1	GND	Terminal de Referência
8	2	DQ	Terminal de entrada e saída de dados
7	3	V _{DD}	Terminal para alimentação externa do sensor

Nos sensores com 16 pinos e encapsulamento SSOP, os terminais não especificados no Quadro 6.1 não precisam ser conectados.

As principais características destes dispositivos são:

- (a) a interface *1-wire*TM requer somente um condutor para comunicação de dados;
- (b) permite a utilização de diversos sensores ligados ao mesmo condutor de dados;

- (c) não necessita de componentes externos;
- (d) pode ser alimentado pela própria linha de transmissão de dados;
- (e) requer uma ligação à tensão de referência (0 V);
- (f) a temperatura é lida como uma palavra digital de 9 bits;
- (g) a conversão de temperatura em palavra digital é feita em 200 μ s;
- (h) mede temperatura na faixa de $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $125\text{ }^{\circ}\text{C}$, com precisão de $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- (i) o comando *alarm search* identifica os sensores cuja temperatura estão fora dos limites especificados;
- (j) podem ser utilizados em qualquer sistema termicamente sensível.

6.2. GENERALIDADES

O termômetro digital DS1820, cujo diagrama de blocos é mostrado na Figura 6.2 é constituído, basicamente, por três principais componentes:

- (a) uma memória apenas de leitura (*ROM*) de 64 bits, gravada a laser;
- (b) um sensor de temperatura;
- (c) dois acionadores dos alarmes de temperatura, não voláteis, TH e TL.

O dispositivo absorve energia da linha de comunicação *1-wire*TM, armazenando-a em um capacitor interno durante os intervalos de tempo em que a linha de sinal está no estado lógico alto. Quando a linha de sinal está no estado lógico baixo, o dispositivo continua a operar por meio da descarga deste capacitor, até que, quando a linha volta à condição de estado lógico alto a fonte parasita, ou seja, o capacitor, é novamente recarregado. Uma outra alternativa para a alimentação deste dispositivo é a utilização de uma fonte externa de 5Vcc.

As comunicações com o DS1820 são feitas, via porta serial, por meio de uma interface *1-wire*TM, mas as funções de memória e controle não estarão disponíveis antes que o protocolo de inicialização (*ROM function protocol*) tenha sido estabelecido. O mestre deve, primeiramente, fornecer um dos cinco comandos de função ROM (*ROM function command*):

- (a) *Read ROM*;
- (b) *Match ROM*;
- (c) *Search ROM*;
- (d) *Skip ROM*;
- (e) *Alarm search*.

Estes comandos operam na parte da memória apenas de leitura (*ROM*) de 64 bits gravada a laser de cada dispositivo e selecionam um dispositivo específico, quando existe mais de um elemento ligado à linha *1-wire™*, bem como indicam ao barramento mestre quantos e quais os tipos dos dispositivos que estão presentes na linha.

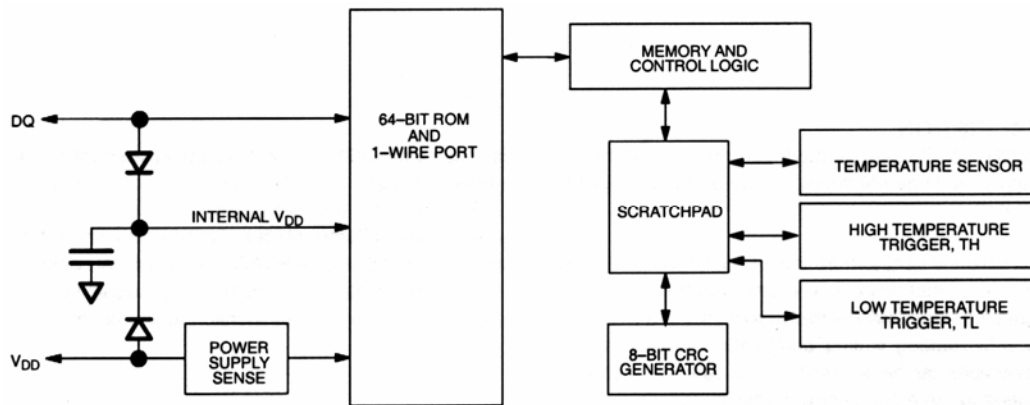


FIGURA 6.2 - Diagrama de blocos do DS1820.

Depois que a seqüência de funções da memória apenas de leitura (*ROM function sequence*) ter sido executada, as funções de controle e memória (*memory and control functions*) tornam-se acessíveis e o mestre pode, então, enviar qualquer um dos seis comandos de função de controle e memória.

Um dos comandos de função de controle (*control function command*) instrui o DS1820 para executar uma medida de temperatura. O resultado desta medida será colocado na memória temporária (*scratchpad memory*) do DS1820. Esta memória temporária tem capacidade limitada, mas é capaz de interfacear-se com altíssima velocidade com o processador de um computador e pode ser lida por

meio do envio de um comando de função de memória, que lê o conteúdo da memória temporária (*scratchpad memory*).

Cada um dos acionadores dos alarmes de temperatura, TH e TL, consiste de uma memória apenas de leitura de um *byte* que pode ser apagada eletricamente (*EEPROM - electrically erasable programmable read only memory*). Se o comando de verificação de alarme não estiver sendo empregado ao DS1820, estes registradores podem ser usados como memória de uso geral. Para escrever TH e TL utiliza-se um comando de função de memória. O acesso de leitura a estes registradores é feito por meio da memória temporária (*scratchpad*). Todos os dados são lidos ou escritos a partir do bit menos significativo.

6.3. ALIMENTAÇÃO PARASITA

A Figura 6.3 representa o circuito de alimentação parasita do sistema *1-wire™*. Sempre que a linha de transmissão de dados (*Data*) é colocada no nível alto, por meio do resistor de polarização, o diodo do retificador de meia onda conduz e carrega o capacitor interno. Quando a tensão da linha de transmissão de dados cai abaixo da tensão do capacitor, o diodo fica polarizado reversamente, isolando a carga. A carga armazenada no capacitor fornece, então, energia para alimentar o dispositivo escravo durante o intervalo de tempo em que a linha de transmissão de dados encontra-se no estado lógico baixo. Este conceito de utilizar energia da própria linha de transmissão de dados por meio de um retificador de meia onda é definido pela *Dallas Semiconductor* como Alimentação Parasita.

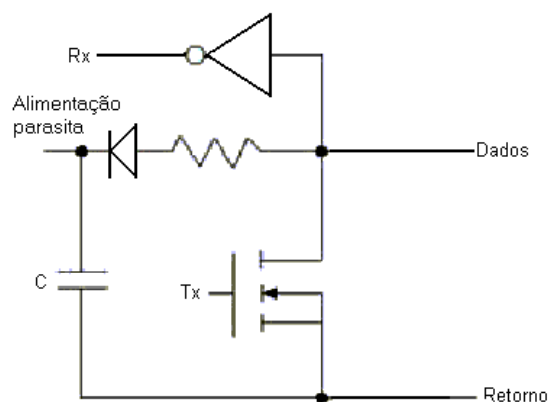


FIGURA 6.3 - Circuito de alimentação parasita do sistema *1-wire*TM.

O diagrama de blocos da Figura 6.4 mostra o esquema de alimentação parasita do DS1820. Nesta ligação, o terminal V_{DD} deve ser ligado à terra. Este circuito absorve energia da rede *1-wire*TM sempre que o terminal de entrada e saída (I/O) ou o terminal V_{DD} estiver no nível lógico alto. As vantagens da alimentação parasita são que, além da não necessidade de fonte no local para medição da temperatura em pontos remotos, a memória apenas de leitura (ROM) pode ser lida sem necessidade de uma fonte convencional.

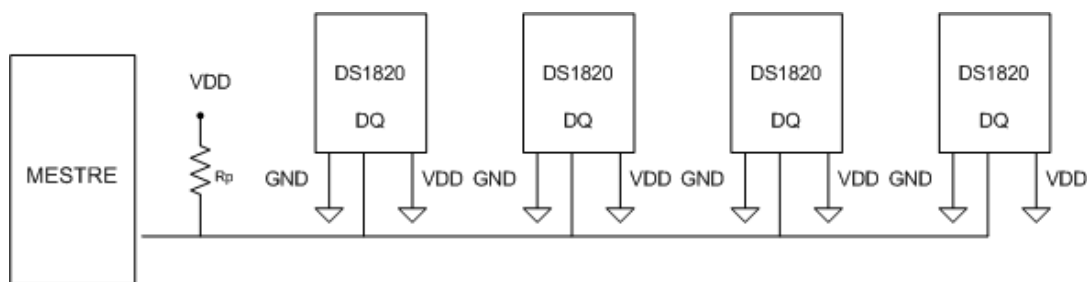


FIGURA 6.4 - Utilização da linha I/O para alimentação do DS1820.

Para que o DS1820 seja capaz de executar conversões de temperatura com precisão, é preciso que se tenha energia suficiente na linha de entrada e saída (I/O) no momento em que se faz a conversão. Este problema se agrava

quando diversos DS1820 são ligados à mesma linha de entrada e saída (I/O) e devem fazer conversões de temperatura simultaneamente.

Existem duas maneiras de garantir que o DS1820 disponha de energia suficiente para processar a conversão de temperatura. A primeira consiste em criar uma polarização robusta (*strong pull up*) na linha de entrada e saída (I/O) sempre que as conversões de temperatura ou cópias para a memória E² (*electrically erasable*) estiverem ocorrendo. Isto pode ser obtido usando-se um transistor MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) para colocar a linha de entrada e saída (I/O) diretamente acoplada à fonte de alimentação, como mostrado na Figura 6.5.

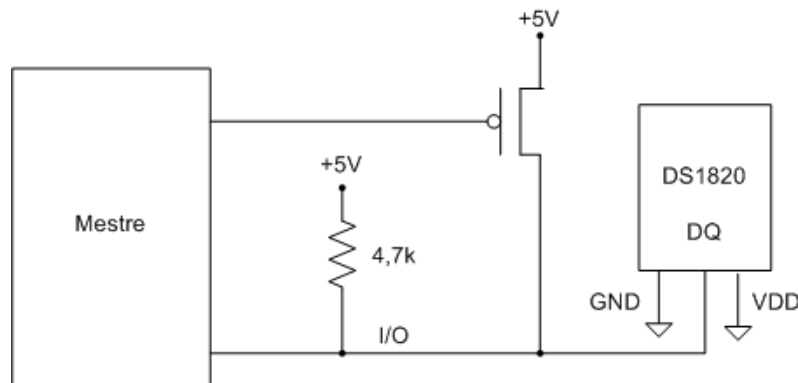


FIGURA 6.5 - Polarização robusta (*strong pull up*) para alimentação do DS1820 durante a conversão de temperatura.

Uma outra maneira de alimentar o DS1820 é utilizando uma fonte externa ligada ao terminal V_{DD} do dispositivo, como mostrado na Figura 6.6. A vantagem da utilização de uma fonte externa é que, como o barramento mestre não necessita ser ligado ao dispositivo, durante a conversão de temperatura, ele pode ser utilizado para transferência de outros dados.

Além disto, quando diversos DS1820 são ligados ao mesmo barramento *1-wire*TM, e todos são alimentados por uma fonte externa, eles podem fazer

conversões de temperatura simultaneamente, enviando o comando *Skip* e então o comando *ConvertT*.

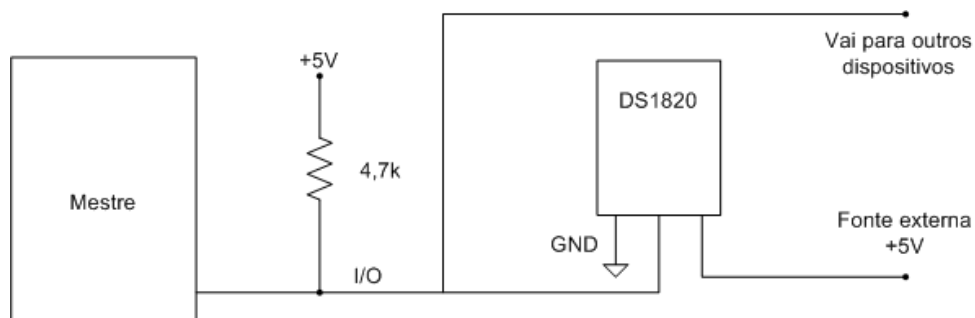


FIGURA 6.6 - Utilização da fonte externa para alimentação do DS1820.

Para se medir temperaturas na faixa de 100°C não é recomendável utilizar alimentação parasita, devido às elevadas correntes de escoamento que o DS1820 exibe nestas condições. Neste caso, é praticamente obrigatório o uso do DS1820 com alimentação externa.

Quando se inicia um processo de medição de temperatura, o barramento mestre pode não conhecer ainda como os dispositivos ligados a ele estão alimentados, se com alimentação parasita ou por meio de uma fonte externa. Faz-se então uma investigação no DS1820 para se determinar o tipo de alimentação empregado. O DS1820 responderá enviando um 1 (um) lógico se estiver alimentado por uma fonte externa ou um 0 (zero) lógico se for alimentação parasita.

6.4. FUNCIONAMENTO DO DS1820

O DS1820 mede temperatura utilizando-se uma técnica de medição própria, mostrada no diagrama de blocos da Figura 6.7. A medida de temperatura é feita pela contagem do número de pulsos (*clock cycles*) que um oscilador com baixo coeficiente de temperatura executa durante um período determinado por um oscilador de alto coeficiente de temperatura.

O contador é preparado anteriormente com uma base de contagem (*count base*) que corresponde a -55°C . Se o contador atinge zero antes que o período tenha se esgotado, o registrador de temperatura, que também é pré-ajustado para o valor de -55°C , é incrementado, indicando que a temperatura medida é superior a -55°C .

Ao mesmo tempo, o contador é ajustado com o valor determinado pelo registrador temporário (*slope accumulator*) do sistema. Este esquema é necessário para compensar o comportamento parabólico linear dos osciladores sobre a temperatura. O contador é, então, inicializado (*clocked*) novamente, até que ele atinja o zero. Se o período ainda não estiver terminado, este processo se repete.

Os osciladores são constituídos por resistores de polissilício sensíveis à temperatura e a variação de resistência provoca uma variação na frequência dos osciladores de temperatura.

O registrador temporário é usado para compensar o comportamento não linear dos osciladores sobre a temperatura, permitindo uma medida de temperatura de elevada resolução. Isto é feito variando-se o número de contagens necessárias para o contador passar por cada grau incremental em temperatura. Para se obter a resolução desejada, então, tanto o valor do contador quanto o número de contagens por grau centígrado, a uma dada temperatura, devem ser conhecidos.

Este cálculo é feito internamente no DS1820 para fornecer uma resolução de $0,5^{\circ}\text{C}$, entretanto o dispositivo pode ser programado para operar com maior resolução. O valor da temperatura é fornecido por meio de uma leitura complemento-de-dois com extensão, de 16 bits. Os dados são transferidos de forma serial através de uma interface *1-wire*TM. O sensor DS1820 mede temperaturas na faixa de -55°C a 125°C com incrementos de $0,5^{\circ}\text{C}$.

Para exemplificar, apresenta-se a conversão de temperatura realizada pelo DS1820 para uma temperatura, T, de 25°C e outra de -25°C.

Para T = 25°C tem-se:

$$25 = 16 + 8 + 1 = 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1}$$

$$T = 25_{10} \text{ } ^\circ\text{C} = 00110010_2$$

Isto implica que, em binário, a temperatura T de 25°C é:

$$T = 0011 \ 0010$$

Como o sinal de T é positivo, o byte mais significativo (*MSB*) é 0000 0000 e o menos significativo (*LSB*) é 0011 0010.

Para T = -25°C, de acordo com as operações da álgebra *booleana*, tem-se:

$$25 = 16 + 8 + 1 = 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1}$$

$$T = 00110010$$

$$\bar{T} = 1100 \ 1101 \quad \text{complemento de } T$$

$$\bar{T} + 1 = 1100 \ 1110$$

$$T = -25_{10} \text{ } ^\circ\text{C} = 1100 \ 1110_2$$

Isto implica que, em binário, a temperatura T de -25°C é:

$$T = 0011 \ 0010$$

O Quadro 6.3 apresenta outros valores de temperatura, em binário, convertidos usando o procedimento anterior.

QUADRO 6.3. - Exemplos de alguns valores de temperatura convertidos em binário

Temperatura °C	Saída digital
+125,0	0000 0000 1111 1010
+25,0	0000 0000 0011 0010
+0,5	0000 0000 0000 0001
0	0000 0000 0000 0000
-0,5	1111 1111 1111 1111
-25,0	1111 1111 1100 1110
-55,0	1111 1111 1001 0010

6.5. SINALIZAÇÃO DE ALARME

Depois de o DS1820 ter feito a conversão de temperatura, o valor da temperatura medido é comparado aos valores limites armazenados nos registradores TH e TL. Como estes registradores têm palavra digital com comprimento de oito bits, o bit menos significativo, referente a 0,5°C é desprezado na comparação. O bit mais significativo (*msb*) de TH ou de TL corresponde diretamente ao bit de sinal do registrador de temperatura de 16 bits. Se o resultado de uma medida de temperatura for superior a TH ou inferior a TL, uma mensagem de erro interna ao dispositivo (*alarm flag*) é enviada.

Esta mensagem de erro é atualizada a cada medida de temperatura. Enquanto a mensagem de erro estiver ativa, o sensor de temperatura DS1820 responderá ao comando *alarm search*. Isto permite instalar diversos dispositivos em paralelo, para medir temperaturas simultaneamente e, se em um dispositivo, a temperatura exceder os limites, este dispositivo será identificado e lido imediatamente sem a necessidade de ler os demais sensores.

6.6. MEMÓRIA ROM DE 64 BITS GRAVADA A LASER

Cada dispositivo DS1820 contém um código de identificação único com comprimento de 64 bits, gravados a laser em uma memória apenas de leitura (*ROM*). Os primeiros oito bits representam o código da família *1-wire™* a que pertence o dispositivo. Para o DS1820, o código de família é 00010000, que corresponde a 10 em hexadecimal ou 16 na base 10. Os próximos 48 bits correspondem ao código de identificação (*serial number*) específico para cada dispositivo. Os últimos oito bits referem-se ao verificador de redundância cíclica (*CRC*) dos primeiros 56 bits e servem para garantir a integridade dos dados transmitidos, conforme mostrado no Quadro 6.4.

As memórias de apenas leitura (*ROM*) de 64 bits e os controles da função *ROM* permitem ao DS1820 operar como um dispositivo *1-wire™* e seguir os protocolos descritos no capítulo sobre o sistema *1-wire™*.

QUADRO 6.4 - Código de identificação de Memória ROM de 64 bits gravada a laser

CRC - 8 bits		Identificação – 48 bits		Família – 8 bits	
msb	lsb	Msb	lsb	msb	lsb

6.7. VERIFICAÇÃO DE REDUNDÂNCIA CÍCLICA – CRC

O controle de redundância cíclica (CRC) é um número decorrente de um conjunto de dados a serem transmitidos. Depois da transmissão, este valor deve ser recalculado e comparado com o valor original a fim de detectar se houve algum tipo de erro na transmissão. O DS1820 tem um CRC de oito bits armazenado no byte mais significativo da ROM de 64 bits gravada a laser.

O barramento mestre pode calcular um valor CRC a partir dos 56 primeiros bits da ROM de 64 bits e compará-lo com o valor armazenado no DS1820 para determinar se o conteúdo desta foi recebido livre de erros. A função polinomial equivalente deste controle de redundância cíclica é:

$$\text{CRC} = X^8 + X^5 + X^4 + 1 \quad (6.1)$$

O DS1820 também gera um valor de CRC de oito bits usando a mesma função polinomial da Equação (1) e fornece este valor ao barramento mestre para validar a transferência de dados. Quando o CRC é usado para validação de transferência de dados, o barramento mestre deve calcular um valor de CRC, utilizando a Equação (1) e comparar este valor ao valor de CRC de oito bits armazenado no byte mais significativo da ROM de 64 bits do DS1820, ou com o valor de CRC de oito bits interno do DS1820, que é lido como o nono byte quando se lê o conteúdo da memória temporária (*scratchpad*). A comparação dos valores de CRC e a decisão de continuar ou não a operação é determinada pelo barramento mestre. Não há circuito interno ao DS1820 que evite uma seqüência de prosseguir se o valor de CRC calculado ou armazenado no DS1820 não coincidir com o valor gerado pelo barramento mestre.

A memória temporária (*scratchpad*) é organizada em oito bytes, numerados de 0 a 8. Os dois primeiros bytes contêm informações da temperatura medida. O terceiro e o quarto bytes são cópias voláteis das temperaturas limites (TH e TL) e são renovadas a cada vez que o sistema é energizado ou reinicializado. O quinto e o sexto byte não são usados. Ao se fazer a leitura de volta, todos eles assumem o nível lógico 1 (um). Os dois últimos bytes são registradores de contagem. Eles podem ser usados para se obter melhor resolução nas medições de temperatura, conforme discutido no item sobre medição de temperatura.

Há ainda um nono byte, que pode ser lido por meio do comando *Read Scratchpad*. Este byte contém o byte de controle de redundância cíclica (CRC) dos oito bytes anteriores, implementado conforme descrito anteriormente.

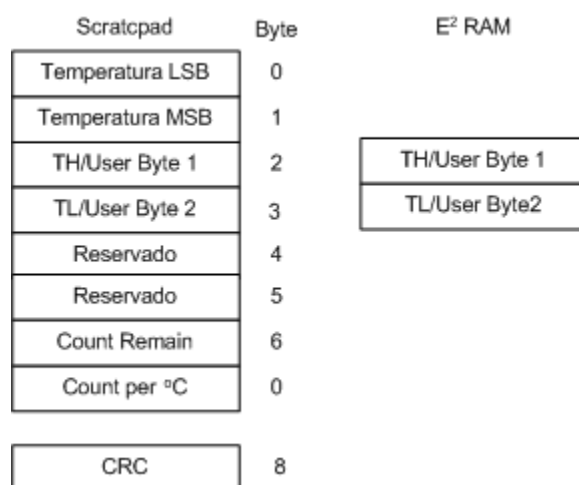


FIGURA 6.9 - Organização da memória do DS1820.

7. OBJETIVOS

Este trabalho foi realizado com o principal objetivo de desenvolver um sistema de controle eletrônico digital, baseado na aquisição de dados em tempo real, para aeração de grãos armazenados, utilizando-se a tecnologia *1-wireTM*, desenvolvida pela *Dallas Semiconductor*, com vistas à substituição do sistema de termometria convencional.

Especificamente visou-se neste trabalho:

1. Desenvolver um sistema de aquisição automática de dados de temperatura, em tempo real, utilizando os sensores digitais DS1820 da *Dallas Semiconductor*;
2. Desenvolver um sistema de comando para acionamento automático de motores elétricos;
3. Desenvolver um programa computacional para controlar o sistema de aeração baseado em diferentes estratégias de manejo;
4. Testar o programa computacional e o sistema de controle proposto, aplicando-se alguma estratégia de manejo em um protótipo de sistema de aeração.

8. MATERIAL E MÉTODOS

8.1. INTRODUÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido na Área de Energia do Departamento de Engenharia Agrícola, DEA, do Centro de Ciências Agrárias, CCA, da Universidade Federal de Viçosa, UFV, com a colaboração do Centro de Treinamento e Transferência de Tecnologia, CT³, da Fundação Gorceix, Ouro Preto, e do Departamento de Eletrônica e Telecomunicações da Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

O trabalho foi dividido em quatro etapas:

1. Desenvolvimento de um sistema de aquisição automática de dados de temperatura, em tempo real, utilizando-se a tecnologia *1-wire*TM proposta pela *Dallas Semiconductor*;
2. Desenvolvimento de um sistema de comando para acionamento automático de motores elétricos;
3. Desenvolvimento de um programa computacional para controlar o sistema de aeração baseado em alguma estratégia de manejo;
4. Teste do programa computacional e do sistema de controle proposto, aplicando-se alguma estratégia de manejo em um protótipo de sistema de aeração.

Para este trabalho, construiu-se um protótipo de silo com capacidade de, aproximadamente, 0,5m³ e, no lugar dos termopares normalmente empregados para medir a temperatura da massa de grãos, utilizou-se sensores de temperatura eletrônicos DS1820 da série *1-wire*TM da *Dallas Semiconductor* controlados por um computador. A conexão dos sensores ao computador foi feita por meio de um circuito integrado DS2480 instalado em um conector *iButton*TM DS1411, também da *Dallas Semiconductor*.

8.2. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO AUTOMÁTICA DE DADOS DE TEMPERATURA

O sistema de aquisição de dados utilizado neste trabalho foi desenvolvido com base na tecnologia *1-wireTM*, também conhecida como *MicroLAN*, proposta pela *Dallas Semiconductor*. Esta tecnologia permite uma transferência bidirecional de informação, ao mesmo tempo em que dispositivos remotos são energizados por meio da própria linha de transmissão de dados.

O sistema *1-wireTM* é uma rede de comunicação de dados de baixo custo, que permite a microcontroladores e computadores comunicarem-se digitalmente com dispositivos *1-wireTM* por meio de uma única linha de dados (SDL – serial data line). Trata-se de um sistema mestre-escravo com uma interface *1-wireTM* externa e saída em dreno aberto, alimentado por uma fonte de CC de 5V, por meio de um resistor de polarização (*pull up resistor*). Neste trabalho, um computador do tipo PC, funcionando como mestre, comunica-se com diversos sensores de temperatura DS1820, que operam como escravos, conforme mostrado na Figura 8.1.

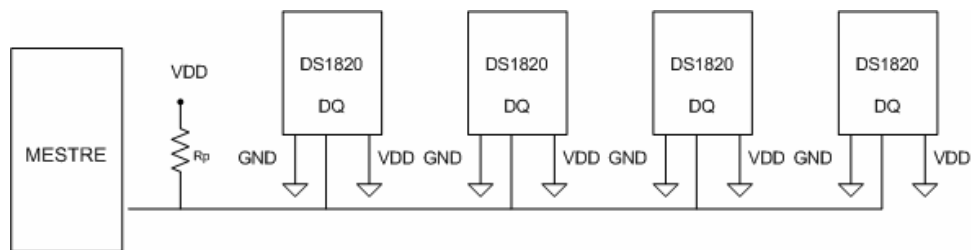


FIGURA 8.1 - O sistema *1-wireTM*.

O sistema *1-wireTM* utiliza os níveis lógicos convencionais CMOS/TTL em que tensão igual ou inferior a 0,8V indica um nível lógico baixo (0) e tensão igual ou superior a 2,2V corresponde ao nível lógico alto (1). Os dados são transmitidos em função do tempo em que o barramento permanece no nível lógico baixo. Assim, para se obter um nível lógico 1(um), o barramento é mantido em nível

lógico baixo durante $15\mu\text{s}$ ou menos e para se obter um nível lógico 0 (zero), o barramento é mantido em nível lógico baixo durante, pelo menos, $60\mu\text{s}$. Um nível lógico baixo é obtido por meio de um transistor de efeito de campo (MOSFET), ao passo que um nível lógico alto é obtido por meio de um simples resistor (Figura 8.2).

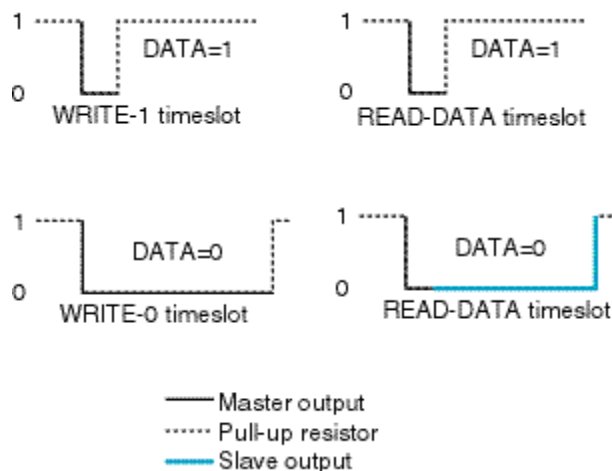


FIGURA 8.2 - Níveis lógicos CMOS/TTL.

Quando em operação, o mestre inicializa a rede, colocando o barramento ao potencial da massa durante pelo menos $480\mu\text{s}$. Os escravos conectados respondem com um pulso de presença com duração entre 15 e $60\mu\text{s}$. Em seguida, o mestre acessa um determinado escravo, chamando seu endereço e enviando algum comando específico exigido pelo dispositivo e, finalmente, promovendo a transferência de dados entre eles. A Figura 8.3 mostra uma seqüência de comunicação entre o mestre e um escravo.

De acordo com a Figura 8.3, depois da seqüência de reinicialização, o mestre, por meio de um comando de função ROM, acessa um determinado escravo e, em seguida, por meio de um comando de função de memória, ordena que o dispositivo acessado execute uma determinada tarefa.

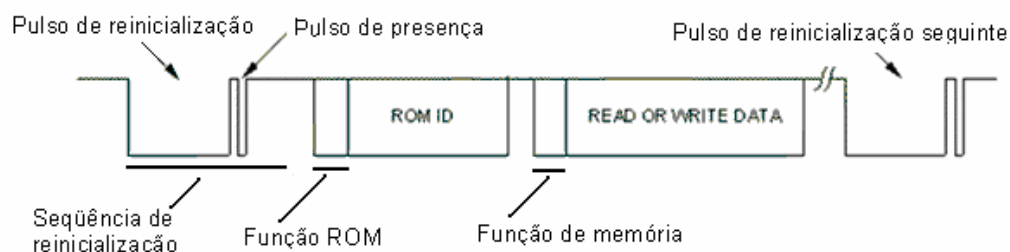


FIGURA 8.3 - Seqüência de comunicação entre o mestre e um escravo.

Para se medir temperatura, utilizou-se sensores de temperatura DS1820. Estes sensores são termômetros digitais da linha *1-wire™*, desenvolvidos pela *Dallas Semiconductor*, que indicam a temperatura do local em que se encontram.

Embora estes sensores possam ser alimentados pelo mesmo condutor que transmite os dados, utilizando-se um capacitor e um diodo retificador de meia onda, embutidos no próprio dispositivo, neste trabalho, optou-se por alimentá-los com uma fonte externa de 12V, por meio de um segundo condutor e um regulador de tensão de estado sólido, 7805. Por esta razão, neste caso, o sistema *1-wire™* utiliza três condutores. Um para transportar dados, DQ, que é o *1-wire™* propriamente dito, um para alimentar os sensores, V_{DD} , e um comum de referência ou aterramento, GND.

Cada um dos sensores foi instalado em uma placa de circuito impresso alimentada por uma fonte de corrente contínua de 12V, cujo esquema é mostrado na Figura 8.4. O circuito integrado regulador de tensão, 7805, instalado nela serve para garantir que a tensão de alimentação do sensor seja sempre de 5VCC, independentemente da distância em que ele se encontra da fonte.

A fim de evitar que os circuitos de medição de temperatura sofressem qualquer dano durante a carga e a descarga de produto no silo, as placas de circuitos impressos foram acondicionadas em condutores de alumínio, interligados por eletrodutos de PVC, conforme mostrado nas Figuras 8.5 e 8.6.

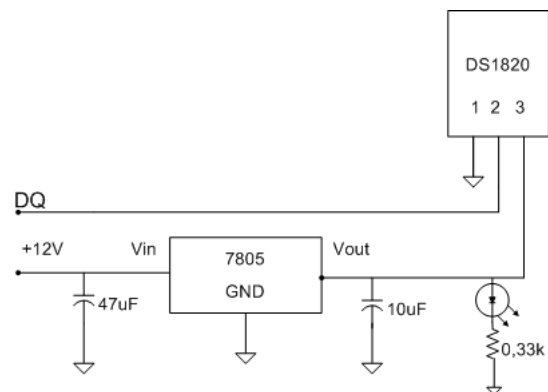


FIGURA 8.4 - Sensor de temperatura DS1820 alimentado por fonte externa.

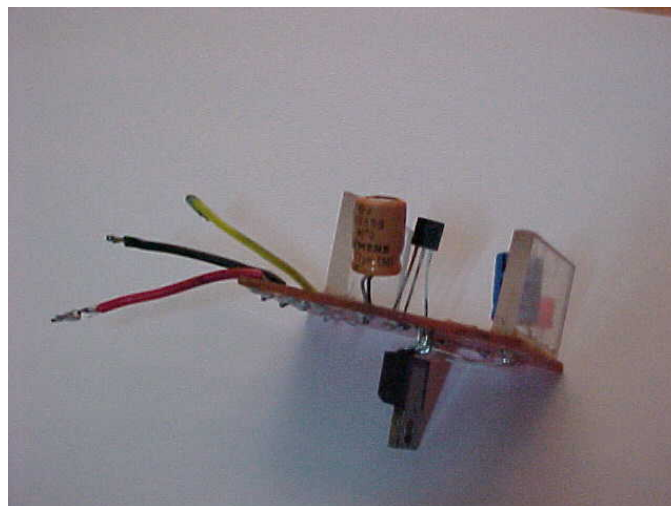


FIGURA 8.5 - Circuito com o sensor de temperatura DS1820 e o regulador de tensão 7805 alimentado por fonte externa.



FIGURA 8.6 - Circuito impresso com o sensor de temperatura DS1820 instalado em condutele.

8.3. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE COMANDO PARA ACIONAMENTO AUTOMÁTICO DE MOTORES ELÉTRICOS

O motor que comanda o ventilador do sistema de aeração é acionado a partir de uma placa de entrada e saída digital (I/O), desenvolvida no Centro de Treinamento Transferência de Tecnologia, CT³. da Fundação Gorceix e instalada no interior do microcomputador. O circuito de comando do motor é mostrado na Figura 8.7.

Inicialmente, o transistor (BC547) encontra-se em corte. Quando o sistema de medição de temperatura detecta, em qualquer ponto da massa de grãos, uma temperatura superior à temperatura máxima permitida pela estratégia de aeração utilizada, a placa I/O, acionada pelo programa de controle do elemento mestre, aplica uma tensão, através do resistor de 1 k Ω , à base do transistor e este passa a conduzir. Ao conduzir, ele permite que a bobina do relé, R, alimentada por uma fonte de corrente contínua de 12 V, seja energizada e feche o contato normalmente aberto, R₁, do relé.

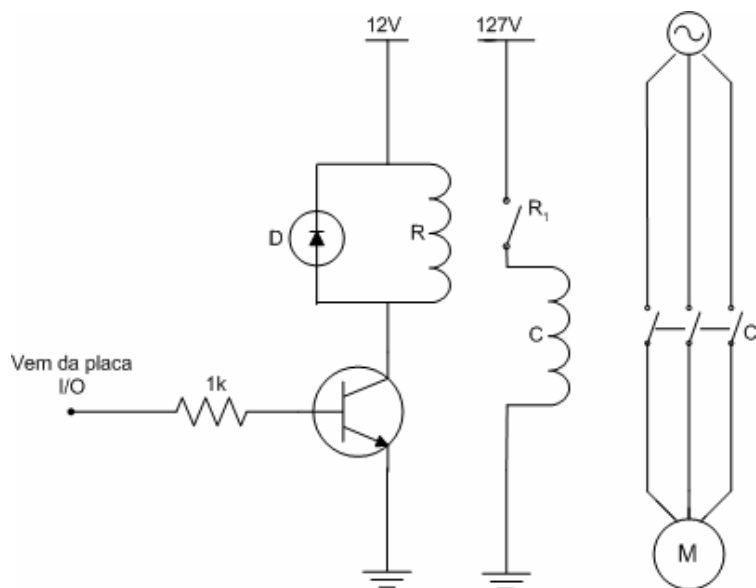


FIGURA 8.7 - Circuito de comando do motor que aciona o ventilador.

Como este contato não tem capacidade para suportar a corrente nominal do motor, ele comanda a bobina do contactor, C, alimentada por uma fonte de corrente alternada de 127V. Esta bobina, ao ser energizada, fecha os contatos normalmente abertos, C₁, do contactor que aplicam uma alimentação trifásica de 220V aos terminais do motor de indução, M, e o ventilador passa a funcionar.

O ventilador funciona até que o ciclo de aeração seja completado. Quando o sistema de medição de temperatura já não detecta, em qualquer ponto da massa de grãos, temperatura superior àquela definida pela estratégia como o limite inferior de temperatura, utilizada para interromper o ciclo de aeração, o programa de controle do sistema, por meio da placa I/O, corta a tensão aplicada à base do transistor e ele volta novamente ao corte, desenergizando o relê e, conseqüentemente, o contactor que comanda o motor. O ciclo se repete sempre que a temperatura da massa de grãos ultrapassar o limite máximo permitido.

Por se tratar de um motor de indução trifásico de apenas 0,5 cv, operando praticamente a vazio, não houve necessidade de se utilizar dispositivos de partida para ligá-lo. Cabe ressaltar, também, que o diodo colocado em paralelo com o relê

serve somente para prevenir contra a força eletromotriz de auto-indução gerada na bobina do relê sempre que o transistor troca de estado.

Optou-se por um sistema de controle liga-desliga pois, como os grãos apresentam elevada inércia térmica, nenhum outro tipo de controle seria mais eficiente.

8.4. DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL

Desenvolveu-se um programa computacional em linguagem C, denominado *gemas.c*, especialmente para este projeto, sendo que, parte dele foi desenvolvida no Departamento de Electrónica e Telecomunicações da Universidade de Aveiro, em Aveiro, Portugal. Este programa realiza a aquisição de dados de temperatura em tempo real, faz os cálculos necessários e, baseado nas condições psicrométricas do ar e da massa de grãos, juntamente com a estratégia de manejo utilizada, decide o momento adequado para acionar o sistema de aeração. A Figura 8.8 mostra o fluxograma deste programa.

Os parâmetros de entrada deste programa são o teor de umidade inicial do grão, a pressão atmosférica local e o intervalo de amostragem. O teor de umidade da massa de grãos entra como constante pois, se o processo de aeração for conduzido corretamente, ele não diminuirá mais do que 0,5 ponto percentual ao longo de todo processo (BROOKER et al.. 1992).

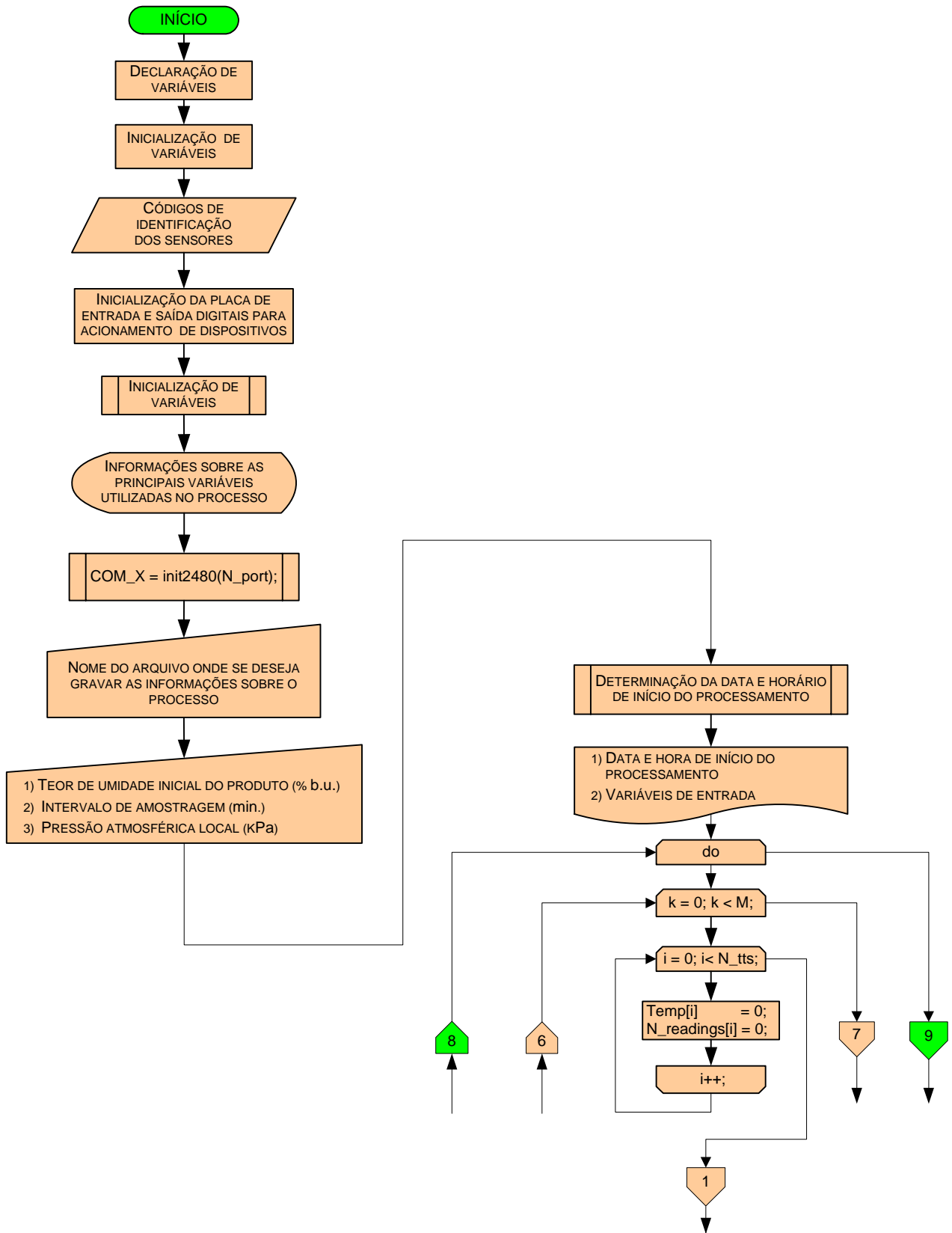
Primeiramente, o programa define o código de identificação de 64 bits (ROM ID) de todos os dispositivos *1-wireTM* utilizados. Neste experimento, todos os códigos começam com o número decimal 16, que identifica a família dos sensores de temperatura DS1820.

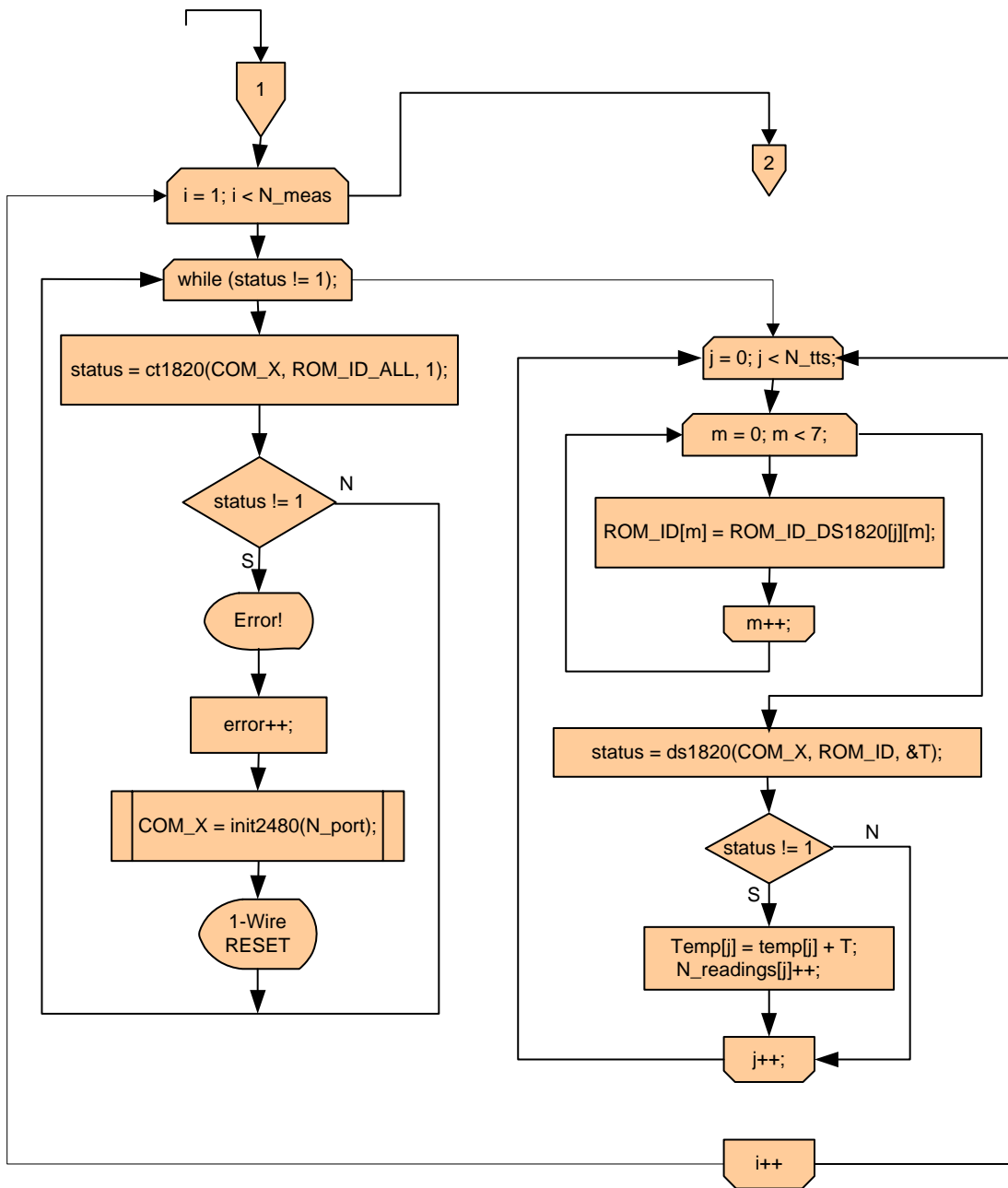
O interfaceamento deste programa principal com os sensores de temperatura ligados ao barramento *1-wireTM* é feito por meio de um conjunto de sub-rotinas, também escritas em linguagem C, e agrupadas em uma biblioteca denominada **1-wire.h**. A seguir, as principais funções agrupadas nesta biblioteca são descritas.

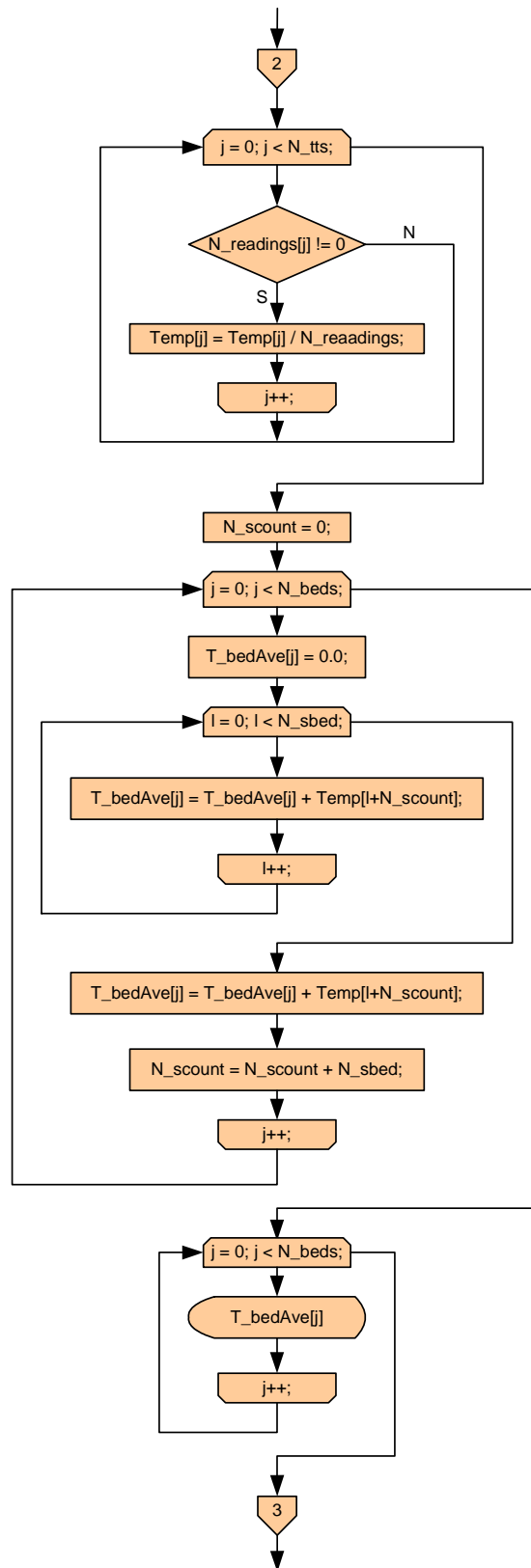
Para iniciar a linha serial à qual se liga o conector DS1411, utiliza-se a sub-rotina ***initrsc.c***. Esta sub-rotina define a linha serial, a velocidade de transmissão e o formato dos dados e devolve o endereço base (*port_base*) que serve de base para o envio e recepção de caracteres. Neste trabalho, utilizou-se uma velocidade de 9600bps, com 8 bits de dados, um bit de interrupção (stop-bit) e sem paridade.

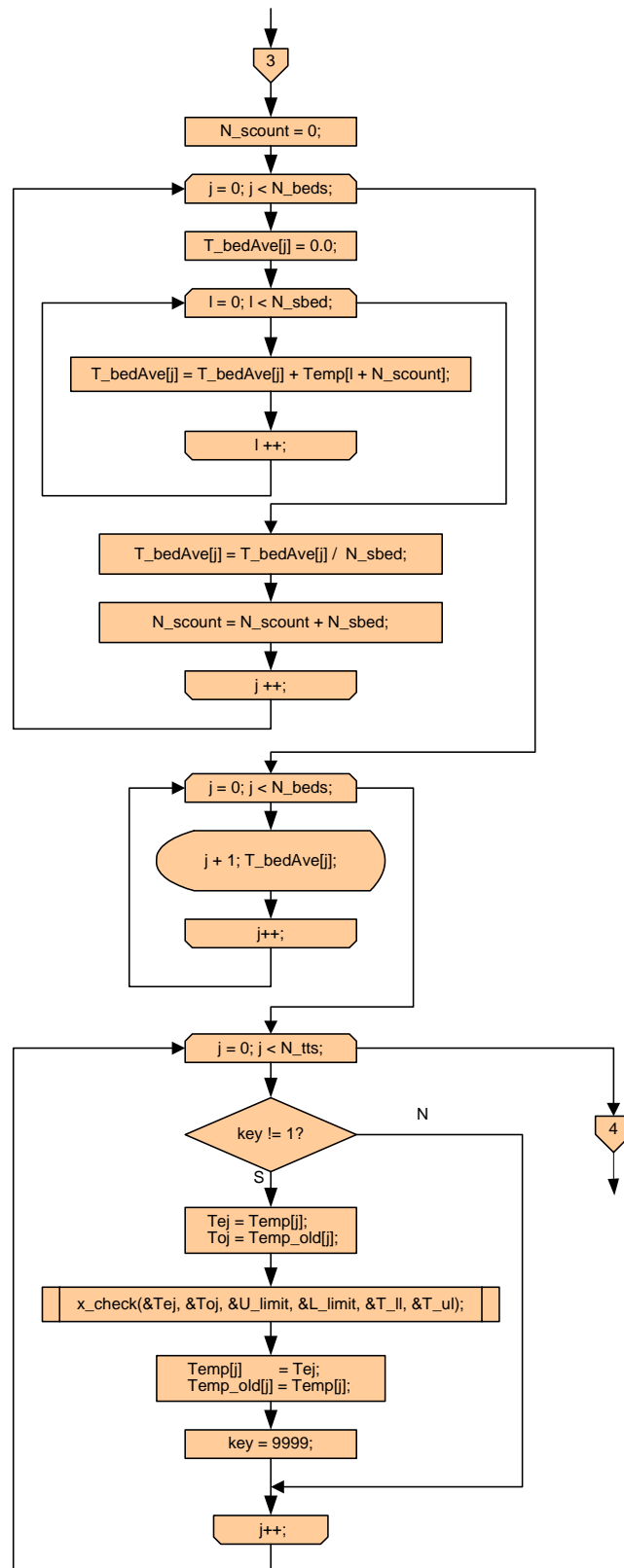
Para inicializar o circuito integrado DS2480 instalado no conector DS1411, responsável pela conexão do sistema *1-wire*TM à porta serial, utiliza-se a sub-rotina ***init2480.c***. Esta sub-rotina tem como parâmetro de entrada o número da porta serial e como parâmetro de saída o endereço físico da porta correspondente. Ela fornece uma tensão positiva para alimentação das linhas de dados (DTR-Data Terminal Ready) e de permissão para transmissão (RTS-Request To Send) e limpa o registro temporário (buffer) de recepção do computador ao término de cada operação.

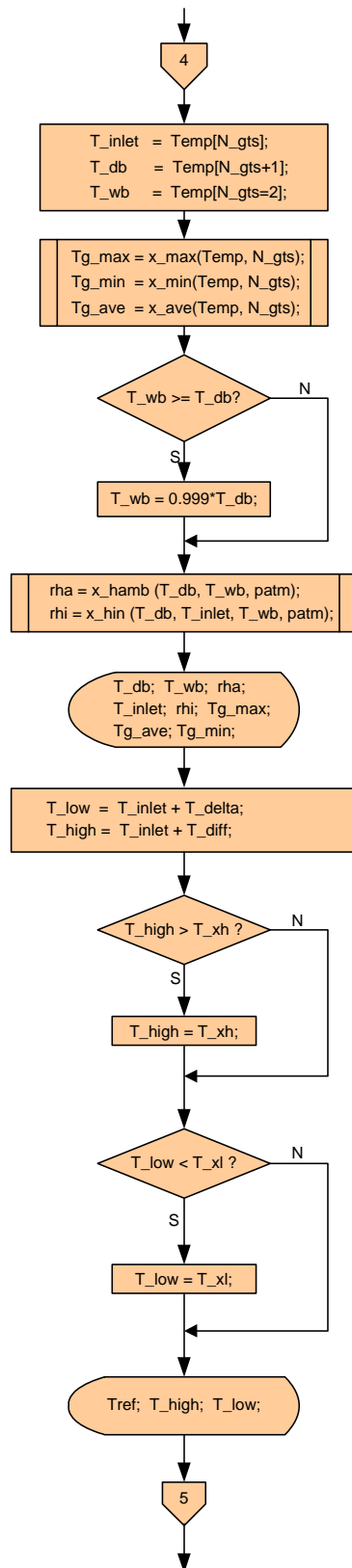
A sub-rotina ***ds2480.c*** permite o acesso ao barramento *1-wire*TM possibilitando a leitura e o envio de dados. É uma sub-rotina que interage diretamente com o sistema de *hardware*. Possui três parâmetros de entrada, a informação a ser enviada ao DS2480 (1 byte), o endereço físico da linha serial onde se encontra conectado o DS2480 e a presença ou ausência de eco (echo). Retorna uma resposta válida, quando a operação foi realizada com sucesso, ou um parâmetro informando que não foi possível enviar a informação ou que o DS2480 não respondeu.











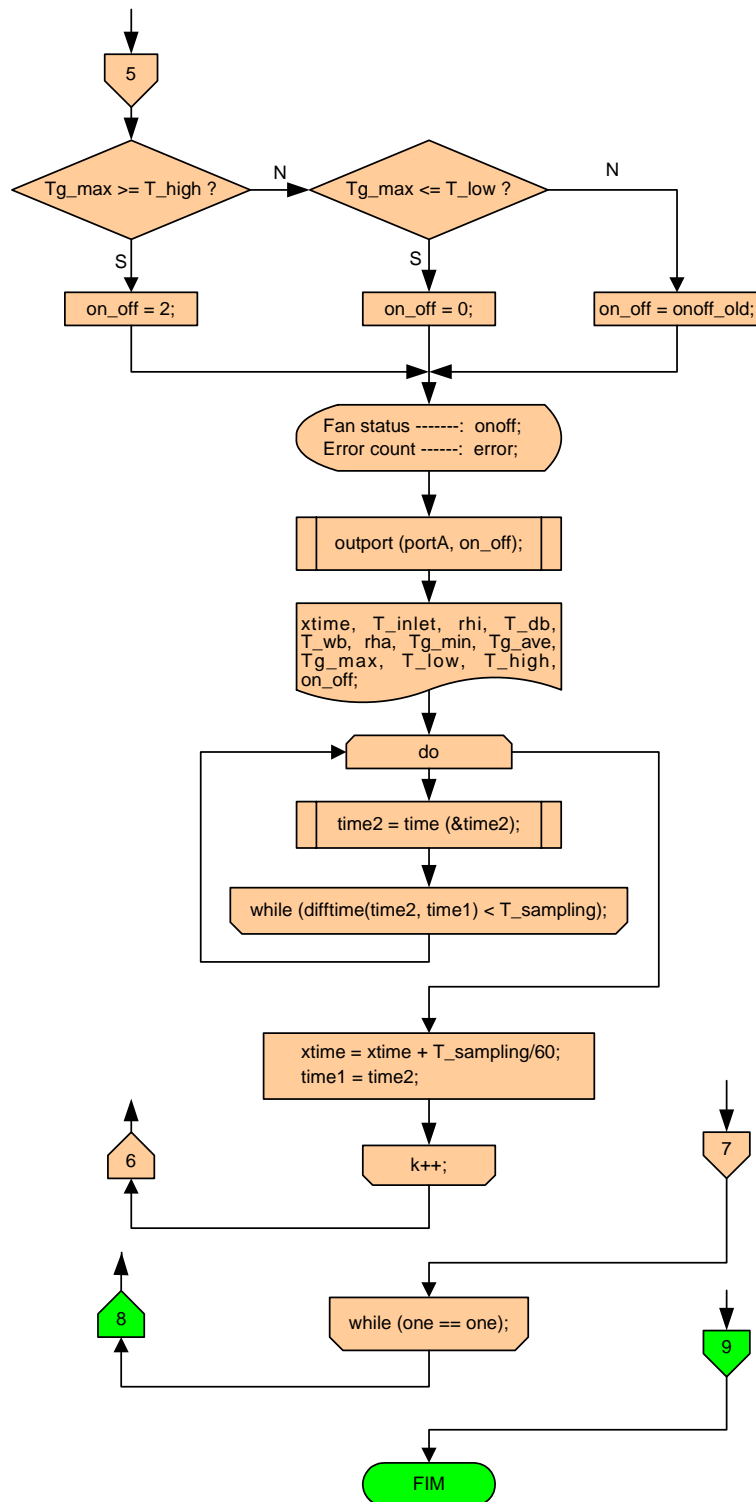


FIGURA 8.8 - Fluxograma do programa computacional.

A operação de conversão de temperatura é realizada pela rotina **ct1820.c**, que acessa um sensor específico ou todos os sensores de temperatura DS1820 conectados ao barramento *1-wireTM*. É uma sub-rotina de alto nível que interage diretamente com os sensores de temperatura por meio da sub-rotina **ds2480.c**. Possui três parâmetros de entrada, o endereço da linha serial onde se encontra ligado o DS2480, o código de identificação (ROM_ID) do dispositivo DS1820 que deve executar a conversão de temperatura e o tipo de alimentação do sensor (parasita ou externa). Para que todos os sensores realizem a conversão de temperatura, o parâmetro de identificação do sensor deve ser substituído pelo parâmetro **ALL**.

Como saída, esta sub-rotina indica se ocorreu algum erro ou se a seqüência de conversão foi realizada corretamente.

A leitura do resultado da conversão de temperatura é executada por meio da sub-rotina **ds1820.c**. Esta sub-rotina envia, por meio da sub-rotina **ds2480.c**, um comando de leitura para um ou para todos os sensores ligados ao barramento *1-wireTM*. Requer dois parâmetros de entrada, o endereço físico da linha serial onde se encontra ligado o DS2480 responsável pela interface com o barramento *1-wireTM* e o código de identificação do dispositivo DS1820 que deve fornecer a temperatura medida.

Os parâmetros de saída são a temperatura medida em graus centígrados e informações a cerca da ocorrência de erros.

Além da biblioteca *1wire.h*, foi criada uma segunda biblioteca, denominada **x_funct.h**, que reúne as funções necessárias para se executarem os cálculos das propriedades psicrométricas do ar no interior e no exterior do silo. As principais funções desta biblioteca são descritas a seguir.

As funções **x_init.c** e **x_start.c** são funções para inicialização de variáveis, tais como o número de camadas em que a massa de grãos foi dividida, o número de sensores por camada, o número de sensores na massa de grãos, número de sensores fora da massa de grãos e outras necessárias para a execução do programa.

As funções ***x_max.c***, ***x_min.c*** e ***x_ave.c*** são funções auxiliares e determinam o valor máximo, o valor mínimo e o valor médio, respectivamente, dos elementos de um vetor. Com elas é possível determinar a temperatura máxima, mínima e média da massa de grãos. A sub-rotina ***x_check.c*** verifica as variáveis para prevenção de erros.

Para se calcular a umidade relativa do ar ambiente utiliza-se a sub-rotina ***x_hamb.c***. Esta sub-rotina tem como parâmetros de entrada as temperaturas de bulbo seco e de bulbo molhado do ar ambiente e a pressão atmosférica do local. Ela retorna o valor da umidade relativa do ambiente ou uma mensagem de erro, caso o valor calculado seja menor que 0 ou maior que 1.

O cálculo da umidade relativa do ar de aeração é obtido por meio da sub-rotina ***x_hin.c***. Seus dados de entrada são as temperaturas de bulbo seco e de bulbo molhado do ar ambiente, a temperatura do ar no interior do plenum e a pressão atmosférica do local. Caso o valor calculado seja menor que 0 ou maior que 1, a sub-rotina retorna uma mensagem de erro.

A sub-rotina ***x_eqrh.c*** determina a umidade relativa de equilíbrio, baseada na equação modificada de Henderson para o milho. Suas variáveis de entrada são a temperatura do ar de entrada e o teor de umidade de equilíbrio em base úmida.

A sub-rotina ***x_gate.c*** calcula a temperatura de equilíbrio entre o ar e a massa de grãos. Tem como parâmetros de entrada a temperatura e a umidade relativa do ar intergranular, a pressão atmosférica local e o teor de umidade da massa de grãos.

SILVA (2000) e CORRÊA (2002) afirmam que a temperatura da massa de grãos nunca pode ser inferior à temperatura do ar no interior do plenum. Em função disto, definiu-se uma estratégia de controle que estabelece que, depois de um longo período de aeração, a temperatura da massa de grãos deve estar na faixa entre 1°C e 4°C acima da temperatura do ar no plenum. Sendo assim, sempre que a temperatura em qualquer ponto da massa de grãos for mais de 4°C superior à temperatura do ar no plenum, o sistema de aeração é ligado e permanece ligado até que ela caia a um valor de 1°C acima da temperatura do ar

no plenum. Desta forma, consegue-se manter a temperatura da massa de grãos oscilando entre 1 e 4°C acima da temperatura do ar no plenum.

O programa grava continuamente na tela do computador a temperatura média de cada camada (T_{bed1} , T_{bed2} , T_{bed3} , T_{bed4}), a temperatura de bulbo seco e de bulbo molhado e a umidade relativa do ar ambiente (T_{db} , T_{wb} , RH_{amb}), a temperatura e a umidade relativa do ar no plenum (T_{inlet} , RH_{inlet}), a temperatura máxima, mínima e média da massa de grãos (Tg_{max} , Tg_{min} , Tg_{med}), os limites superior e inferior de temperatura definidos pela estratégia adotada e a temperatura de referência (T_{upper} , T_{lower} , T_{ref}) e o estado do motor que aciona o ventilador (ligado ou desligado).

8.5. TESTE DO PROGRAMA COMPUTACIONAL E DO SISTEMA DE CONTROLE PROPOSTO

8.5.1 O Sistema de Aquisição de Dados

Para este trabalho, construiu-se um protótipo de silo com capacidade de, aproximadamente, 0,5 m³ e, no lugar dos termopares normalmente empregados para medir a temperatura da massa de grãos, utilizou-se sensores de temperatura eletrônicos DS1820 da série *1-wire™* da *Dallas Semiconductor*, controlados por um computador. A conexão dos sensores ao computador foi feita por meio de um circuito integrado DS2480 instalado em um conector *iButton™* DS1411, também da *Dallas Semiconductor*, como mostrado na Figura 8.9.



FIGURA 8.9 - Conexão da linha de transmissão de dados *1-wire™* com a porta serial do computador por meio do conector DS1411.

8.5.2 O Protótipo do Silo

O silo protótipo foi construído utilizando-se dois tambores de metal, com capacidade de 200 L cada um com, aproximadamente, 0,57 m de diâmetro e 0,83m de altura. Eles foram emendados entre si por meio de solda e, na extremidade inferior, foi fixado um fundo de chapa de metal perfurada, a fim de permitir uma boa distribuição do ar de aeração. A extremidade superior ficou aberta. Na lateral, junto à base, foi feita uma pequena abertura com tampa para a retirada do produto armazenado.

O silo assim constituído tem capacidade de, aproximadamente, 0,50 m³ e foi montado sobre um plenum metálico, conforme mostrado na Figura 8.10.



FIGURA 8.10 - O silo protótipo para testes experimentais.

O plenum, construído com chapas metálicas, tem base quadrada de 1,0m de lado e altura de 0,40 m. Em uma de suas laterais foi colocado um elemento de conexão prismático, com 0,60 m de comprimento, com a finalidade de uniformizar o fluxo de ar e evitar turbulências. Na extremidade deste elemento de conexão foi instalado um ventilador com controle manual de vazão, acionado por um motor elétrico de indução trifásico de 1/2 cv, com 6 pólos. O protótipo foi totalmente calafetado para evitar vazamento de ar.

Em vez dos termopares, normalmente empregados para medir a temperatura da massa de grãos, utilizou-se 15 sensores eletrônicos de temperatura DS1820 da série *1-wire™* da *Dallas Semiconductor*. O interfaceamento dos sensores com o computador foi feito por meio de um circuito integrado DS2480 instalado em um conector *iButton™* DS1411, também da *Dallas Semiconductor*.

Dois destes sensores foram colocados no exterior do silo, instalados em uma base de psicrômetro convencional e utilizados para medir as temperaturas de bulbo seco e de bulbo molhado do ar ambiente. Dentro do plenum foi colocado um sensor, para medir a temperatura do ar insuflado na massa de grãos.

No interior da massa de grãos foram distribuídos 12 sensores, numerados de 1 a 12, divididos em quatro grupos de três, nas alturas de 1,87m, 1,31m, 0,94m e 0,56m, medidos a partir da base do silo. Os três sensores de cada grupo encontram-se em um mesmo plano, defasados entre si de 120° e distantes do centro do silo de 0,095m. Na Figura 8.11, vê-se a distribuição destes sensores.

O silo foi carregado com, aproximadamente, 270 kg de milho híbrido, tipo mole, da variedade AG1051, até a altura de 1,50m.

Antes de ser colocado no interior do silo, o teor de umidade do milho foi medido com um aparelho GEHAKA, nos laboratórios do CENTREINAR. Foram realizadas quatro medidas, empregando-se as técnicas convencionais de medição de teor de umidade, e o resultado obtido foi de 13%. No mesmo laboratório, mediu-se, com uma balança de massa específica aparente com capacidade de um litro, a massa específica do milho utilizado. Foram realizadas três medições, obtendo-se um valor médio de $707,0\text{kg/m}^3$.

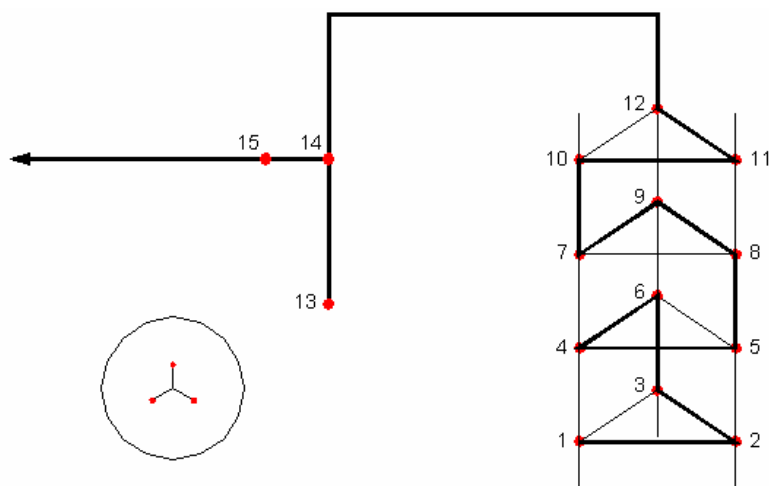


FIGURA 8.11 - Distribuição dos sensores no interior do silo.

8.5.3 Vazão de Ar de Aeração

Segundo SILVA (2000), o fluxo de ar recomendado para a aeração de grãos secos armazenados em unidades verticais localizadas em região de clima quente varia entre 0,03 e 0,10m³/min por tonelada de grãos. Adotou-se, então, um valor médio de 0,065 m³/min.t. Desta forma, a vazão e a velocidade do ar necessário para a aeração foram, respectivamente, 0,018 m³/min e 3,98 m/min.

Para se obter a vazão calculada, fez-se uma redução de área na saída do silo, com um tubo de PVC de 25mm e mediu-se a velocidade do ar de saída com um anemômetro de fio quente, ajustando-se a entrada de ar no diafragma instalado na entrada do ventilador, até obter-se a vazão desejada.

8.5.4 Umidade Relativa do Ar Ambiente

Para se determinar a umidade relativa do ar ambiente, construiu-se um psicrômetro utilizando dois sensores de temperatura DS1820. Para cada um deles foi construído um circuito de alimentação, idêntico ao descrito anteriormente. Para se medir a temperatura de bulbo molhado do ar ambiente, T_{bm} , um dos sensores foi envolvido com um tecido de algodão com a extremidade imersa em água destilada. O outro sensor foi utilizado para medir a temperatura de bulbo seco do ar ambiente, T_{bs} .

Uma sub-rotina em linguagem C++ foi desenvolvida para determinar a umidade relativa do ar a partir destas duas propriedades.

Com os valores da temperatura de bulbo seco e de bulbo molhado do ar ambiente calcula-se também a umidade absoluta.

Para se determinar a umidade relativa do ar de aeração, colocou-se um sensor de temperatura no interior do plenum para medir a temperatura de bulbo seco do ar na entrada do silo. De posse desta temperatura e da razão de mistura do ar, determina-se, por meio das equações psicrométricas descritas no capítulo sobre psicrometria, a umidade relativa no plenum, pelo processo de aquecimento do ar.

9. RESULTADOS E DISCUSSÃO

9.1. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS DE TEMPERATURA

O sistema *1-wire*TM da *Dallas Semiconductor*, utilizado para realizar a aquisição de dados de temperatura em tempo real e definir a lógica de controle empregada, foi desenvolvido para facilitar a comunicação entre um computador, ou um micro-controlador, e vários componentes de diferentes tipos ligados a ele por meio de um único par de condutores.

Este sistema opera como uma rede de comunicação de dados de baixo custo e alta confiabilidade, com um mestre e múltiplos escravos, saída em dreno aberto e um resistor de emparelhamento ou polarização (*pull up resistor*) alimentado por uma fonte de corrente contínua de 5 V. Ele dispensa o uso de conversores analógico-digitais e sua instalação e utilização são bastante simples.

9.2. COMANDO DO MOTOR DO VENTILADOR

O motor que aciona o ventilador do sistema de aeração é ligado por meio de um contactor comandado a partir de uma placa de entrada e saída, instalada no computador e controlada pelo programa computacional que gerencia o sistema de aquisição de dados. Apesar de ser um sistema de acionamento convencional, em que um transistor comanda o relé que controla o contactor que aciona o motor, ele funciona perfeitamente bem neste tipo de operação.

Por se tratar de um motor de pequena potência, não houve necessidade de se utilizar dispositivos próprios para a sua partida, de modo que o sistema de potência pôde funcionar ligado diretamente à rede e protegido apenas pelo sistema de proteção desta, conforme as recomendações da norma ND-5.1.

O sistema de controle liga-desliga utilizado, embora seja o método de controle mais simples existente, é o mais recomendado para controle de aeração,

pois, como os grãos apresentam baixa condutividade térmica e a vazão do ar de aeração é muito baixa, a variação de temperatura e, conseqüentemente, o processo de aeração ocorre de forma muito lenta, não havendo necessidade de acelerar o processo de resfriamento nem de se empregar técnicas de controle mais sofisticadas.

9.3. TESTES EXPERIMENTAIS DE AERAÇÃO

Para testar o sistema de controle, foram realizados diversos ensaios experimentais, e testadas diversas estratégias de aeração. Um dos testes realizados iniciou-se no dia 28 de dezembro de 2001, às 9h e 13min e rodou durante, aproximadamente, 342 horas, quando foi interrompido proposadamente para acesso aos dados coletados até então.

A estratégia empregada neste ensaio estabelecia que um limite inferior de temperatura de 1°C acima da temperatura do ar no plenum e o limite superior de 3°C acima deste limite inferior de temperatura, ou seja, 4°C acima da temperatura do ar no interior do plenum.

De acordo com esta estratégia, o motor permaneceria ligado até que a temperatura da massa de grãos atingisse o limite inferior de temperatura, permanecendo desligado, até que a temperatura da massa de grãos ultrapassasse o limite superior de temperatura quando, então, ele seria novamente ligado. Neste teste, não foram considerados os efeitos da umidade relativa sobre a massa de grãos, embora estes efeitos possam ser facilmente implementados a qualquer momento.

Este teste iniciou-se depois de o sistema de aeração ter permanecido desligado por vários dias. Por esta razão, no instante inicial, a massa de grãos armazenados encontrava-se a uma temperatura média de 26,3°C, com temperatura máxima de 30,7°C e mínima de 25,8°C. A temperatura ambiente de bulbo seco era de 18,3°C e a de bulbo molhado, 15,9°C. Havia, portanto, inicialmente, uma diferença de 12,4°C entre a temperatura máxima da massa de

grãos e a temperatura ambiente. Nestas condições, a umidade relativa do ar era de 78,0%. No interior do plenum, a temperatura e a umidade relativa do ar no instante inicial eram, respectivamente, 21,8°C e 63,0 %.

De acordo com a bibliografia consultada (SHLOMO e NOYES, 2001; Silva, 2000), a vazão do ar de aeração foi fixada em 0,065 m³/min.t.

Os resultados gerais obtidos neste ensaio são apresentados nas Figuras 9.1, 9.6 e 9.11.

A Figura 9.1 mostra a evolução das temperaturas máxima pontual e média da massa de grãos e o limite inferior e superior de temperatura ao longo de todo o ensaio, bem como o estado do motor. Na Figura 9.6, tem-se as variações da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente e do ar no plenum durante o ensaio, e a Figura 9.11 apresenta a progressão da frente de resfriamento no interior da massa de grãos.

Analisando-se a Figura 9.1, verifica-se que, desde o instante inicial, a temperatura máxima e média da massa de grãos varia, procurando se adequar à faixa definida pelos limites inferior e superior de temperatura que, por sua vez, dependem das condições ambientes mostradas na Figura 9.6. Nas Figuras 9.2, 9.3, 9.4 e 9.5, tem-se uma visão mais detalhada dos dados.

Considerando-se que a vazão do ar de aeração é muito pequena e que grãos secos são bons isolantes térmicos, a demora para a temperatura máxima da massa de grãos atingir a faixa desejada é plenamente justificável. Somente depois de 7 h e 40 min de ensaio, a diferença entre a temperatura máxima da massa de grãos e o limite superior de temperatura cai abaixo de 1°C. A partir deste momento, para que a temperatura máxima da massa de grãos entre na faixa pré-estabelecida pela estratégia, leva-se ainda 69h e 10min. Somente depois de 148 horas e 20 minutos de aeração, a temperatura da massa de grãos atinge o limite inferior de temperatura estabelecido pela estratégia, desenergizando o sistema de aeração.

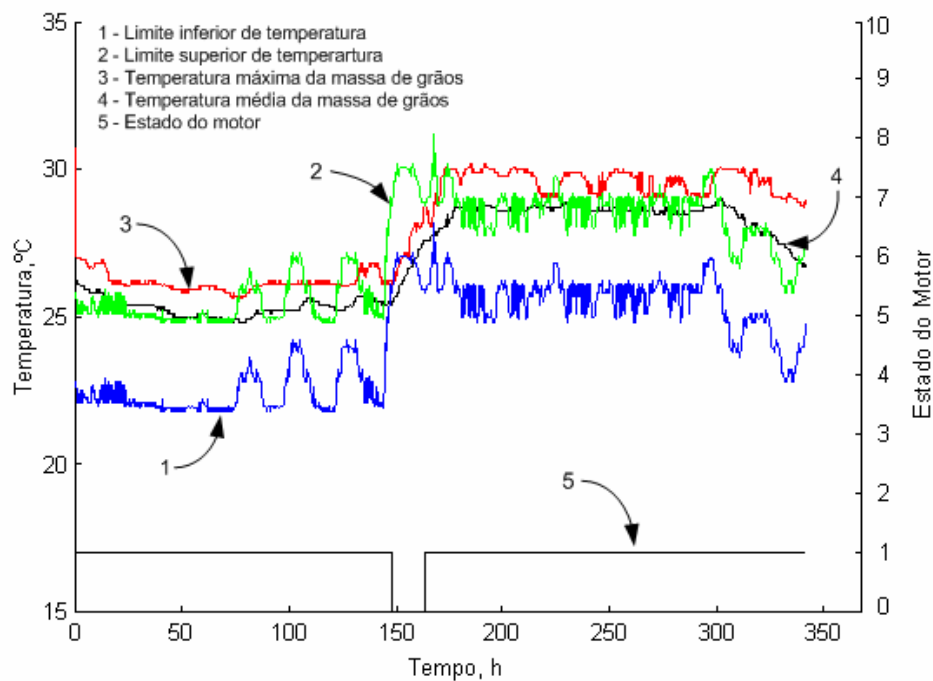


FIGURA 9.1 - Temperatura máxima e média da massa de grãos durante 342 horas estado do motor. Data do teste: 28/12/2001; horário de início: 14h; estado do motor: milho; teor de umidade inicial 13%b.u; Fluxo de ar: 0,065

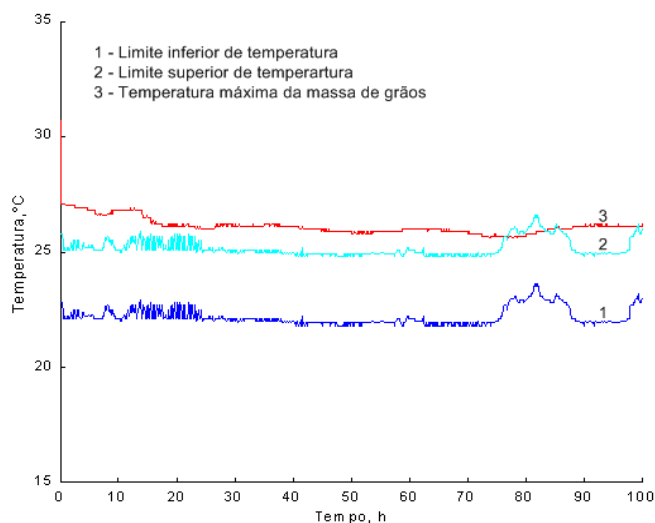


FIGURA 9.2 - Variação da temperatura máxima da massa de grãos durante as primeiras 100 horas de aeração.

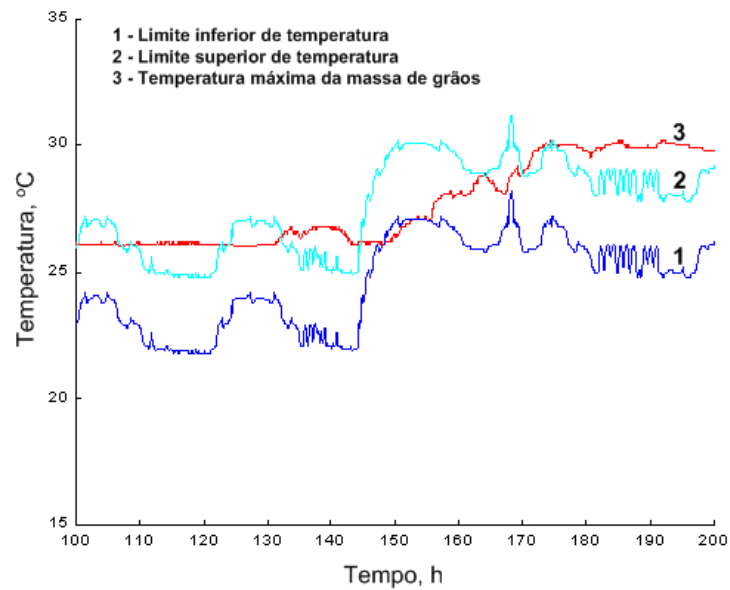


FIGURA 9.3 - Variação da temperatura máxima da massa de grãos entre a 100^a e a 200^a hora de aeração.

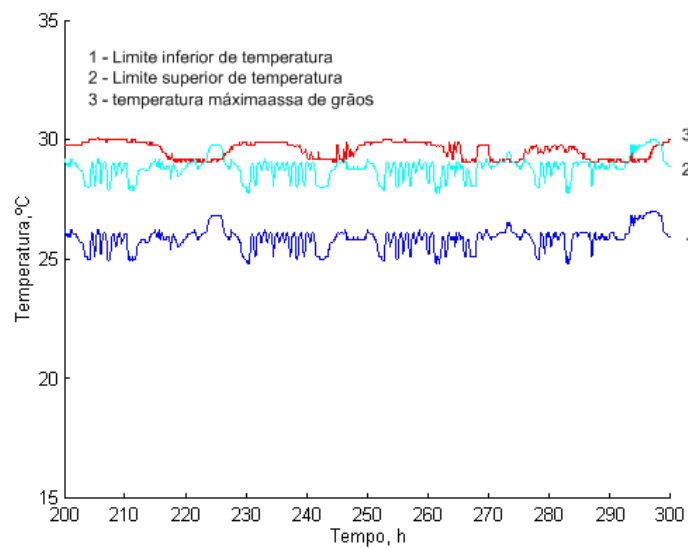


FIGURA 9.4 - Variação da temperatura máxima da massa de grãos entre a 200^a e a 300^a hora de aeração.

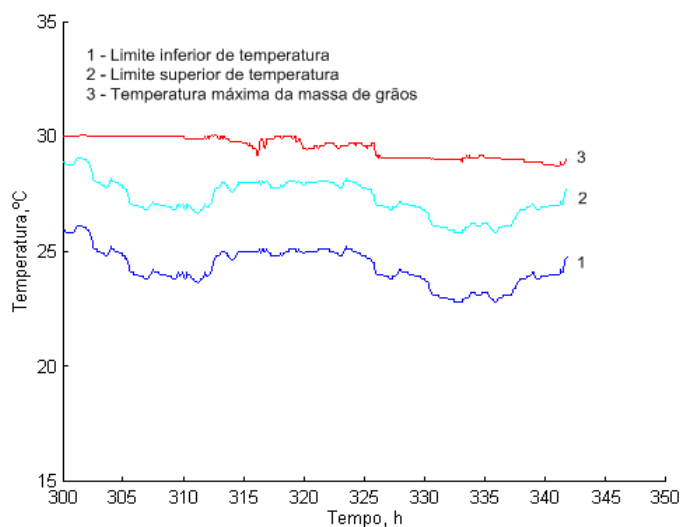


FIGURA 9.5 - Variação da temperatura máxima da massa de grãos entre a 300^a e a 350^a hora de aeração.

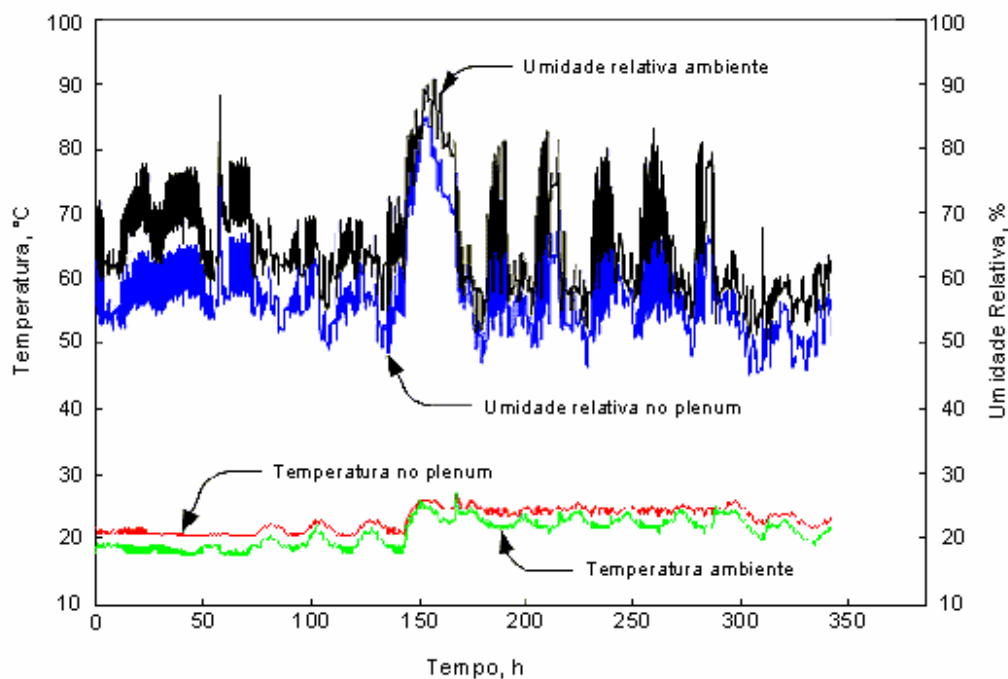


FIGURA 9.6 - Variação da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente e da temperatura de entrada do ar durante 342h de aeração. Data do teste: 28/12/2001; horário de início: 9h:13min; produto: milho; teor de umidade inicial 13% w.b; Fluxo de ar: 0,065 m³/min.t.

Quando o sistema de aeração é desenergizado, a temperatura no interior da massa de grãos começa a aumentar, devido à atividade biológica dos grãos e microorganismos associados a ele, e, depois de permanecer 9h e 50min em repouso, volta a funcionar, pois, neste instante, a temperatura da massa de grãos ultrapassa o limite superior de temperatura definido pela estratégia de controle. A Figura 9.7 mostra estes fatos de forma mais detalhada.

Na Figura 9.6, observa-se que as condições ambientais, principalmente a temperatura, variam pouco, pois este experimento foi conduzido em uma sala fechada onde havia um aparelho de ar condicionado funcionando continuamente. Mesmo assim, nota-se que houve uma elevação de temperatura, relativamente mais acentuada, a partir da 167^a hora de operação. Pode-se notar também, ao longo de todo o processo, o aquecimento da massa de ar ao ser succionado pelo ventilador, devido ao atrito das paletas e aos efeitos da compressão que o ar sofre no plenum (CORRÊA, 2002).

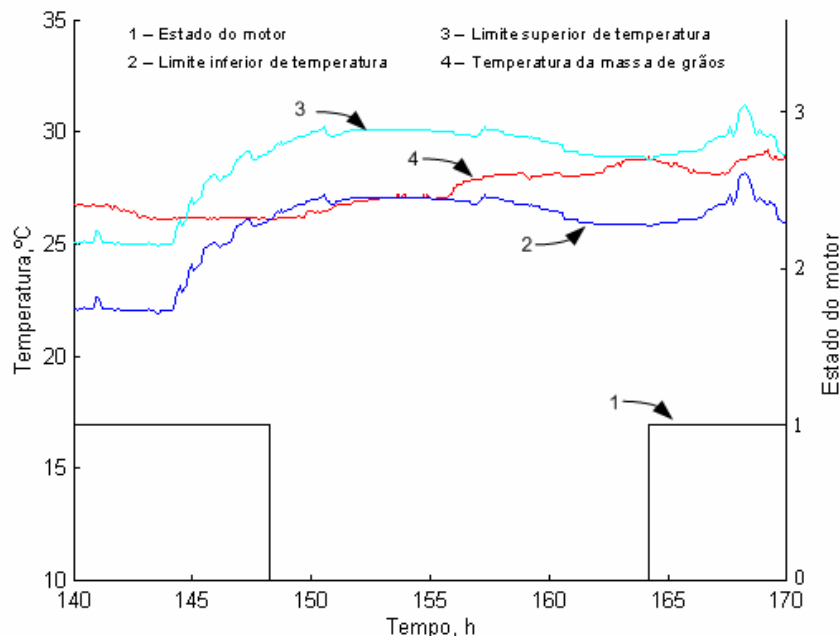


FIGURA 9.7 - Variação da temperatura máxima da massa de grãos e estado do motor entre a 140^a e a 170^a hora de aeração.

Com relação à umidade relativa do ar ambiente, constata-se, ao longo do processo, uma variação mais acentuada, em virtude do teste ter sido realizado em um período bastante chuvoso. Entretanto, conforme dito anteriormente, o efeito da umidade relativa do ar ambiente sobre a massa de grãos não foi considerado, diretamente, neste ensaio. Verifica-se, porém, que a umidade relativa do ar no interior do plenum, poucas vezes atingiu valores superiores a 75% que, de acordo com os especialistas, é a umidade relativa máxima adequada à aeração em regiões tropicais.

Por outro lado, pode-se verificar que, na maior parte do tempo, a umidade relativa do ar no interior do plenum, foi inferior a 65% que, de acordo com os mesmos especialistas, é a umidade relativa mínima adequada à aeração em regiões tropicais.

Nas Figuras 9.8, 9.9, 9.10 e 9.11, pode-se verificar a evolução das condições do ar ambiente e no interior do plenum nas diversas etapas do ensaio.

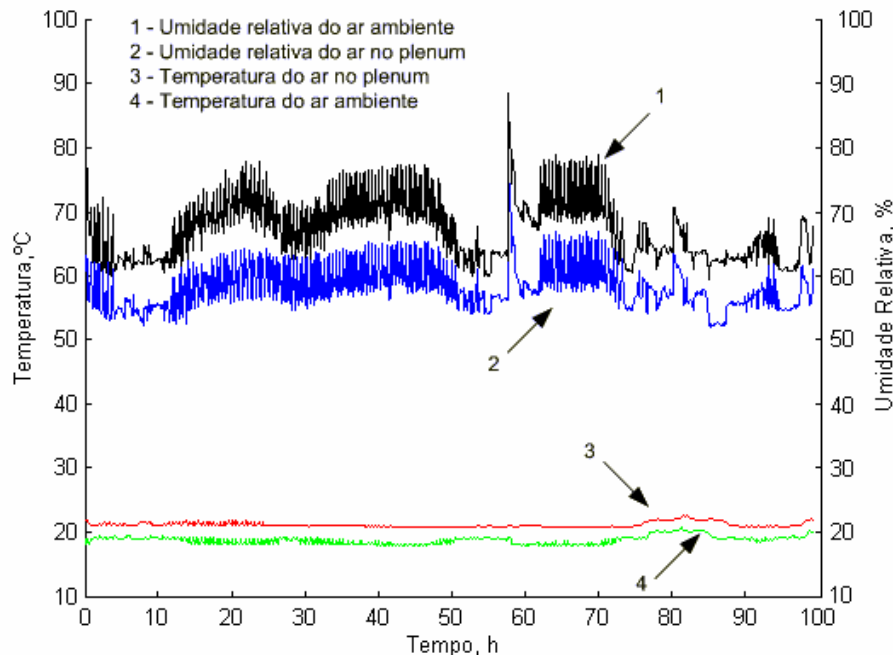


FIGURA 9.8 - Variação da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente e da temperatura de entrada do ar durante as primeiras 100 horas de aeração.

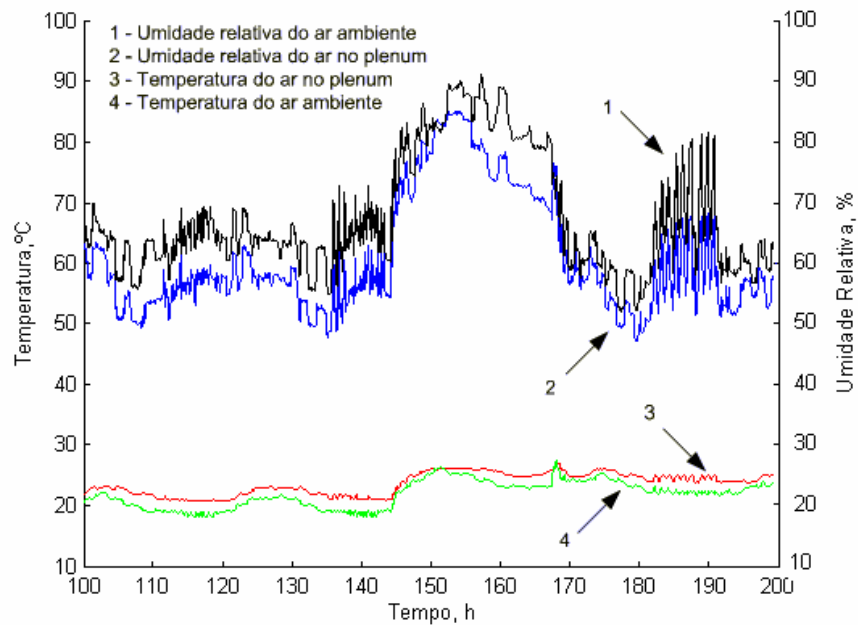


FIGURA 9.9 - Variação da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente e da temperatura de entrada do ar entre a 100ª e a 200ª hora de aeração.

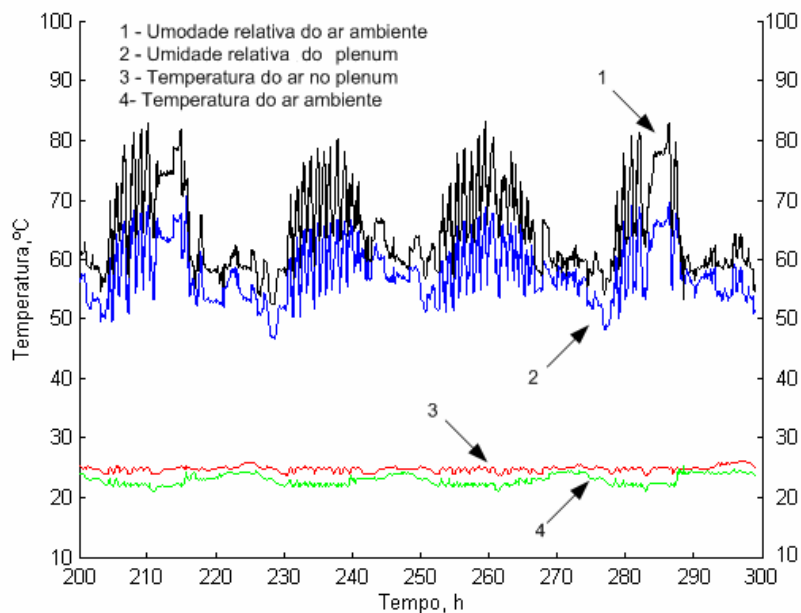


FIGURA 9.10 - Variação da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente e da temperatura de entrada do ar entre a 200ª e a 300ª hora de aeração.

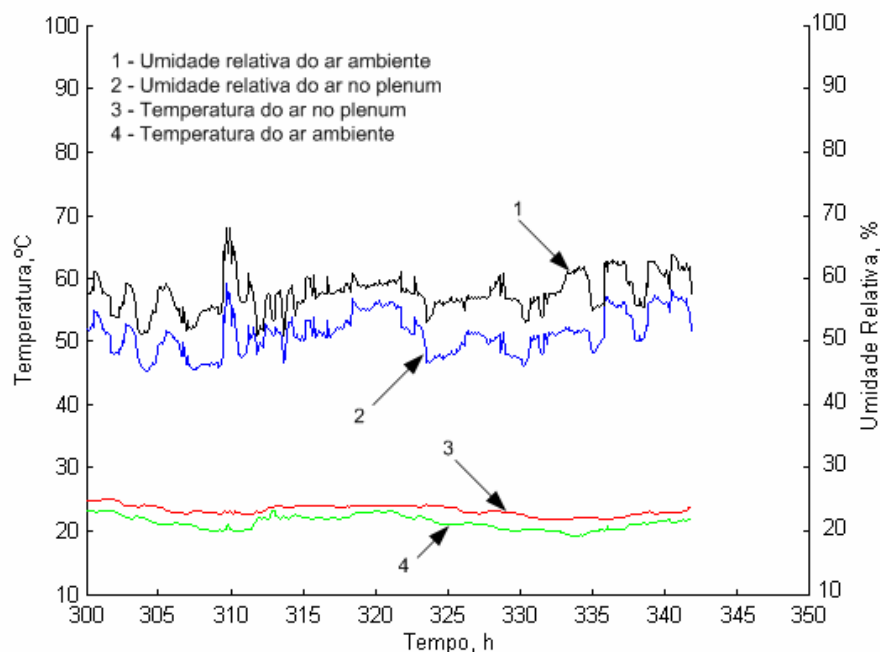


FIGURA 9.11 - Variação da temperatura e da umidade relativa do ar ambiente e da temperatura de entrada do ar entre a 300ª e a 350ª hora de aeração.

A Figura 9.12 mostra a evolução da frente de resfriamento no interior do silo. As figuras 9.13, 9.14, 9.15 e 9.16 mostram, de forma mais detalhada, estas tendências ao longo do ensaio.

A coluna de grãos armazenada no silo foi dividida em quatro camadas e mediu-se a temperatura média em cada uma delas. Pela Figura 9.12, verifica-se que, inicialmente, as camadas intermediárias encontravam-se mais quentes que as camadas externas, pois a camada superior encontrava-se em contato direto com o ar ambiente e a inferior já estava sendo resfriada desde a aeração anterior.

Como a primeira camada está mais próxima da entrada de ar, ela resfria-se mais rapidamente que as outras, deslocando a frente de calor para as camadas superiores, que inicialmente tendem a se aquecer. Pode-se observar que, nas primeiras horas de aeração, a temperatura da primeira camada diminui sensivelmente enquanto as temperaturas da segunda e da terceira camadas

diminuem menos e a temperatura da camada superior praticamente não varia, conforme se observa na Figura 9.13.

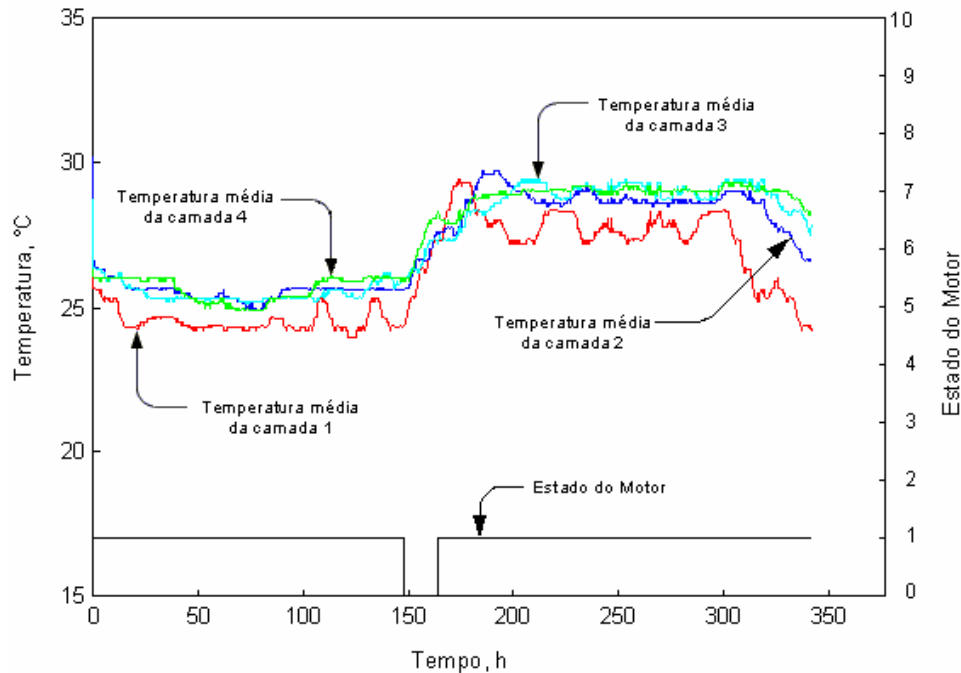


FIGURA 9.12 - Progressão da frente de resfriamento no interior da massa de grãos durante as 342h de aeração. Data do teste: 28/12/2001; horário de início: 9 h e 13 min; produto: milho; teor de umidade inicial 13% w.b; Fluxo de ar: 0,065 m³/min.t.

Como o programa computacional que gerencia o sistema de controle não faz qualquer restrição à temperatura de entrada do ar de aeração, o sistema de aeração funciona continuamente, mesmo que o ar insuflado esteja contribuindo para aumentar a temperatura da massa de grãos. Por esta razão, as temperaturas médias das quatro camadas, inicialmente, ora crescem ora decrescem (Figura 9.14), mas, com o decorrer do tempo, começa-se a desenhar uma tendência da temperatura das camadas superiores serem maiores do que a das camadas inferiores. Esta característica se acentua na parte final do processo, notadamente nas últimas 50 horas (Figura 9.16).

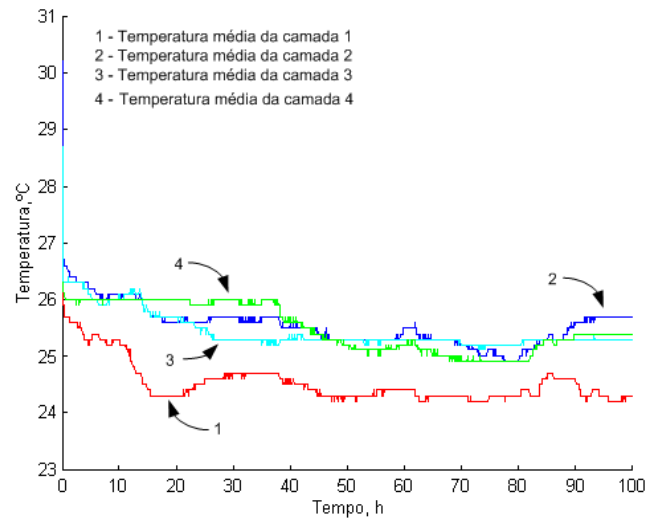


FIGURA 9.13 - Progressão da frente de resfriamento no interior da massa de grãos durante as primeiras 100 horas de aeração.

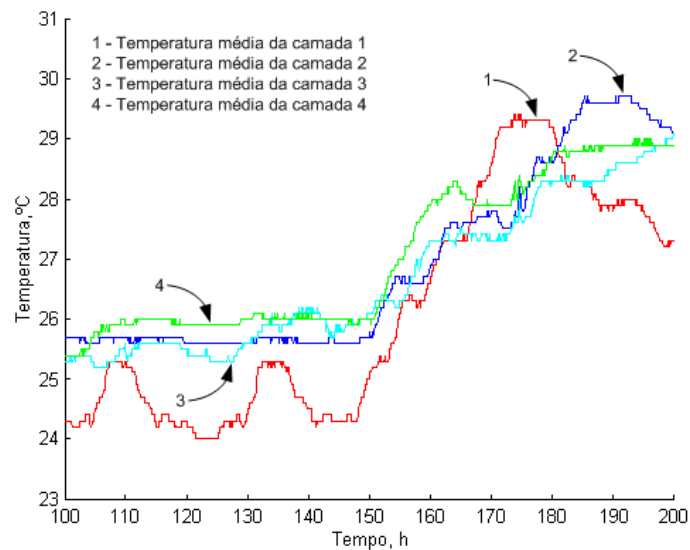


FIGURA 9.14 - Progressão da frente de resfriamento no interior da massa de grãos entre a 100ª e a 200ª horas de aeração.

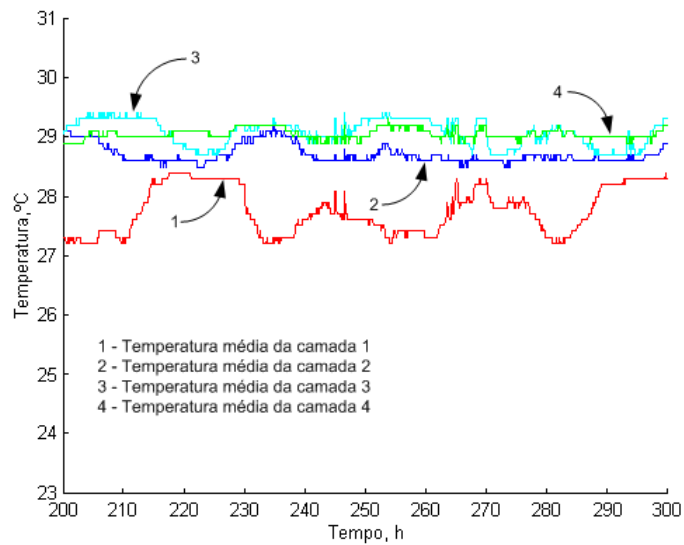


FIGURA 9.15 - Progressão da frente de resfriamento no interior da massa de grãos entre a 200^a e a 300^a horas de aeração.

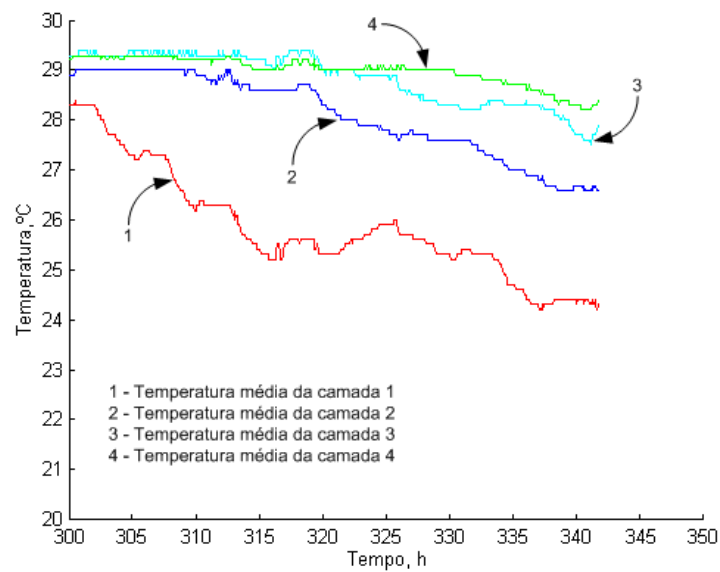


FIGURA 9.16 - Progressão da frente de resfriamento no interior da massa de grãos entre a 300^a e a 350^a horas de aeração.

Comparando se as Figuras 9.2, 9.8 e 9.13, que mostram, respectivamente, a variação de temperatura da massa de grãos, as condições do ar ambiente e do ar de aeração e a evolução da frente de resfriamento durante as primeiras 100 horas de aeração, pode-se verificar que, como a temperatura do ar ambiente e, conseqüentemente, a temperatura do ar de aeração varia muito pouco neste período, a tendência da temperatura da massa de grãos é diminuir e se aproximar da faixa de temperatura definida como limites pela estratégia de controle. Como a vazão de aeração é muito baixa e a inércia térmica do grão muito elevada, esta diminuição de temperatura se dá de forma lenta.

As Figuras 9.3, 9.9 e 9.14, mostram, respectivamente, a variação de temperatura da massa de grãos, as condições do ar ambiente e do ar de aeração e a evolução da frente de resfriamento entre a 100^a e a 200^a horas de aeração. Neste período, é de se destacar a faixa entre a 140^a e a 170^a horas, mostrada em detalhe na Figura 9.14.

Verifica-se que, a partir da 144^a hora e 15 minutos, a temperatura ambiente, que vinha se mantendo em torno de 20°C, começa a se elevar, elevando a temperatura do ar de aeração e os limites de temperatura definidos pela estratégia de controle. Esta elevação de temperatura do ar de aeração faz com que a temperatura do produto armazenado se eleve.

Como o sistema não está programado para interromper a injeção de ar quando a temperatura do ar de aeração estiver provocando uma elevação na temperatura da massa de grãos, o sistema continua operando normalmente.

Entre a 200^a e 300^a horas, a temperatura ambiente e, conseqüentemente, a temperatura de aeração quase não varia, conforme pode ser visto na Figura 9.10.

Depois de 148 h e 20 min de aeração, verifica-se que a temperatura máxima da massa de grãos atinge o limite inferior de temperatura. Neste instante, o programa computacional que gerencia o sistema de controle envia um comando que desenergiza o motor que aciona o sistema de aeração.

Uma vez desligado o sistema de aeração, a temperatura no interior do silo começa, lentamente, a se elevar, devido à atividade biológica dos grãos e aos

microorganismos associados a eles. Depois de permanecer 9h e 50min em repouso, a temperatura da massa de grãos ultrapassa o limite superior de temperatura definido pela estratégia de controle e o programa computacional que gerencia o sistema de controle aciona novamente o motor do ventilador.

A estratégia de aeração adotada aqui se baseou apenas na diferença de temperatura do ar e da massa de grãos e assumiu um teor de umidade do grão constante e uniforme (MAIER & MONTROSS, 1997).

Verificou-se que a temperatura média da massa de grãos ficou praticamente dentro do limite de temperatura definida pela estratégia de controle.

10. RESUMO E CONCLUSÕES

Neste trabalho procurou-se desenvolver um sistema de controle inteligente, com base na aquisição de dados em tempo real, para aeração de grãos armazenados, utilizando-se a tecnologia *1-wireTM* da *Dallas Semiconductor*, bem como comprovar seu funcionamento. Não houve preocupação em se utilizar estratégias de aeração sofisticadas.

O sistema *1-wireTM* da *Dallas Semiconductor*, utilizado para realizar a aquisição de dados de temperatura em tempo real e definir a lógica de controle empregada, foi desenvolvido para facilitar a comunicação entre um computador, ou um micro-controlador, e vários componentes de diferentes tipos ligados a ele por meio de um único par de condutores.

Este sistema opera como uma rede de comunicação de dados de baixo custo e alta confiabilidade, com um mestre e múltiplos escravos, saída em dreno aberto e um resistor de polarização (*pull up resistor*) alimentado por uma fonte de corrente contínua de 5V. Ele dispensa o uso de conversores analógico-digitais e sua instalação e utilização são bastante simples.

O motor que aciona o ventilador do sistema de aeração é ligado por meio de um contactor comandado a partir de uma placa de entrada e saída, instalada no computador e controlada pelo programa computacional que gerencia o sistema de aquisição de dados. Apesar de ser um sistema de acionamento convencional, em que um transistor comanda o relê que controla o contactor que aciona o motor, ele funciona perfeitamente bem neste tipo de operação.

Por se tratar de um motor de pequena potência, não houve necessidade de se utilizar dispositivos próprios para a sua partida, de modo que o sistema de potência pôde funcionar ligado diretamente à rede e protegido apenas pelo sistema de proteção desta, conforme as recomendações da norma ND-5.1.

O sistema de controle liga-desliga utilizado, embora seja o método de controle mais simples existente, é o mais recomendado para controle de aeração,

pois, como os grãos apresentam baixa condutividade térmica e a vazão do ar de aeração é muito baixa, a variação de temperatura e, conseqüentemente, o processo de aeração ocorre de forma muito lenta, não há necessidade de acelerar o processo de resfriamento nem de se empregar técnicas de controle mais sofisticadas.

Para testar o sistema de controle, foram realizados diversos ensaios experimentais, e testadas diversas estratégias de aeração. Analisou-se neste trabalho os resultados de um dos testes que se iniciou no dia 28 de dezembro de 2001, às 9h e 13min e rodou durante, aproximadamente, 342 horas, quando foi interrompido propositalmente para acesso aos dados coletados até então.

A estratégia empregada neste ensaio estabelecia que um limite inferior de temperatura de 1°C acima da temperatura do ar no plenum e o limite superior de 3°C acima deste limite inferior de temperatura, ou seja, 4°C acima da temperatura do ar no interior do plenum.

De acordo com esta estratégia, o motor permaneceria ligado até que a temperatura da massa de grãos atingisse o limite inferior de temperatura, permanecendo desligado até que a temperatura da massa de grãos ultrapassasse o limite superior de temperatura quando, então, ele seria novamente ligado. Neste teste, não foram considerados os efeitos da umidade relativa sobre a massa de grãos, embora estes efeitos possam ser facilmente implementados a qualquer momento.

O fluxo de ar utilizado na aeração foi fixado em 0,065 m³/min.t, e o intervalo de amostragem foi de 5 minutos.

De acordo com as observações e resultados obtidos neste trabalho chegou-se às seguintes conclusões:

1. Os resultados obtidos nos ensaios realizados no silo protótipo puderam confirmar a eficiência da tecnologia *1-wire*TM e dos programas computacionais desenvolvidos para gerenciar o sistema de controle.

2. O sistema de controle desenvolvido mostrou-se ser capaz de responder com precisão e de forma imediata às modificações ambientais ou a qualquer aumento de temperatura pontual na massa de grãos, já que toma decisões com base em dados reais e atua instantaneamente, de acordo com a estratégia adotada.
3. O programa computacional desenvolvido mostrou-se suficientemente versátil para responder a qualquer estratégia de aeração proposta, independentemente do número de sensores necessários. Basta, para isto, acrescentar ao programa as restrições definidas por especialistas em aeração.
4. O sistema de controle em tempo real desenvolvido pode ser facilmente adaptado para desenvolver sistemas de controle de aeração integrados (embedded):
5. A tecnologia *1-wireTM* poderá vir a ser empregada em sistemas de aeração convencionais, baseados em termopares ou mesmo com qualquer outro tipo de sensor, utilizando-se circuitos integrados da *Dallas Semiconductor* do tipo DS2401, DS2423, DS2438 ou DS2450, pois estes circuitos integrados tornam endereçáveis quaisquer dispositivos ligados a eles, por meio de um código de identificação de 64 bits.
6. A tecnologia *1-wireTM* mostrou-se tão eficiente e versátil que, em princípio, pode ser empregada em qualquer sistema de controle de processos agrícolas, tais como, avicultura, hidroponia, agricultura de precisão, e outros.
7. Uma vez que a eficiência do sistema de controle desenvolvido ficou comprovada, trabalhos posteriores deverão ser desenvolvidos considerando-se os efeitos da umidade relativa sobre a massa de grãos.

8. Pode-se, por exemplo, testar a eficiência dos sensores de umidade relativa, como os denominados HIH3610 da *Honeywell* ligados a circuitos integrados DS2438 da *Dallas Semiconductor*, em substituição aos valores obtidos por meio dos cálculos psicrométricos, como se fez neste trabalho.
9. Com base nas condições reais do ambiente e da massa de grãos, fornecidas pelo sistema de aquisição de dados, as equações de equilíbrio higroscópico e psicrométricas poderão também ser usadas para definir uma estratégia de monitoramento e controle de sistemas de aeração de grãos.

11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, L. G. **Desempenho de Ventilador em Sistemas de Secagem e Aeração de Grãos de Milho**. Unesp, Botucatu, SP, 1998, 70 p (tese de doutorado).
- ASTRÖN, K. J.; WITTENMARK, B. **Computer Controlled Systems - Theory and Design**. Prentice Hall Inc., Upper Saddle, NJ, USA, 3rd ed., 1997, 577 p.
- ASTRÖN, K. J.; HÄGGLUNG, T. **Automatic Tuning of PID Controllers**. Instrument Society of America, USA, 1988, 141p.
- AUTREY, D. **Transmitting Data and Power over a One Wire Bus**. Sensor Magazine, February 1997. <http://www.sensormag.com/articleso297/onewire/main.shtm>.
- BACHIONI, J. **Dallas 1-Wire – part 1: One on One**. Circuit Cellar: The computer Application Journal. <http://www.edm.com/embapps/emba050.htm>.
- BENTO, C. R. **Sistemas de Controle – Teoria e Projetos**. Editora Érica, São Paulo, 1989, 191 p.
- BOLTON, W. **ENGENHARIA DE CONTROLE**. Makron Books do Brasil; São Paulo, 1995, 497 p.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and Storage of Grains and Oilseeds**. Van Nostrand Reinhold, New York, 1992, 450 p.
- CHANG, C. S.; STEELE, J. L. **Development and Evaluation of Aeration Control Strategies for Maintenance Stored Grain Quality**. In: **Applied Engineering in Agriculture**. American Society of Agricultural Engineers, 1995, p. 577-582.
- CLOUD, H. A.; MOREY, R. V. **Management of Stored Grain with Aeration**. <http://www.extension.umn.edu/distribution/cropsystems/DC1327.html>, 1991.
- CORRÊA, P.C. **Comunicação Pessoal**, 2002.
- CUNHA, O. P. **Curso Operacional de Preparação para a Safra/99 e Pós-Colheita/2000**. Dryeration, RS, 2000.
- D'AZZO, J. J.; HOUPIS, C. H. **Linear Control System Analysis and design**. McGraw-Hill, Singapore, 4th ed., 1995, 763 p.
- DALASEMI – Dallas Semiconductor. <http://www.dalsemi.com/>.

- DORF, R. C.; BISHOP, R. M. **Modern Control Systems**. Addison Wesley Longman Inc., Menlo Park, USA, 8th ed., 1998, 855p.
- ELDER, W. B. **The Control and Monitoring of Grain Aeration Systems**. In: Transactions of the ASAE, vol. 14, n^o 2, 1971, p. 290-293.
- ELETRÔNICA. **Conheça o barramento I²C**. Eletrônica – tecnologia - informática Automação. Vol. 36, n^o 338, p. 26-31, Março, 2001.
- FERREIRA, W. A.; GONÇALVES, V. A.; BIAGGIONI, M. A. M. **Estudo de Alguns Sistemas de Controle de Aeração para Grãos de Milho em Botucatu – SP**. In: **Anais do XXII CONBEA**, vol. 2. Ilhéus, Bahia, 1993, p1389 -1399.
- FOCKINK, Grupo. **Air Master – Controlador Termo-aerador para Cereais**. Grupo Fockink - Indústrias Elétricas Ltda. Panambi, RS, 1994.
- FOSTER, G. H.; TUIITE, J. **Storage of Cereal Grains and their Products**. SAUER, D. B. (editor). American Association of Cereal Chemists, Saint Paul, USA, 1983, p. 219-247.
- FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; EMAMI-NAEINI, A. **Feedback Control of Dynamic Systems**. Addison-Wesley Publishing Company, USA, 1991, 672p.
- FUSAE, T. **Managing Aeration**. <http://www.arpl.com.au/index.htm>, 1999.
- HARA, T.; CORRÊA, P. C. **Silos de Alvenaria para Armazenagem de Milho a Granel na Fazenda, com Capacidade para 100 e 200 toneladas, com Aeração**. Informe Técnico n^o 7. Imprensa Universitária da UFV, Viçosa, 1981, 12p.
- HÄGGLUNG, T. **Process Control in Practice**. Studentlitteratur, Sweden, 1991, 111 p.
- HUMPHRIES, J. T.; LESLIE, P. S. **Industrial Electronics**. Delmar Publisher Inc., Albany, USA, 1999, 718p.
- Ibutton. <http://www.ibutton.com/>
- KUO, B. C. **Automatic Control Systems**. Prentice-Hall Inc., New Jersey, USA, 7th ed., 1995, 659p.
- LACERDA FILHO, A. F.; AFONSO, A.D.L. **Algumas Considerações sobre Aeração de Grãos**. Departamento de Engenharia Agrícola, UFV, Viçosa, MG, 1992.
- LASSERAN, J. C. **Aeração de Grãos**. Série Centreinar, n^o 2. Artes Gráficas Formato S.A., Belo Horizonte, MG, 1981. 131p.

- LAW, L. **Two-Wire Loop-Powered Digital Sensing**. Sensors, September, 2001.
<http://www.sensormag.co.artcles/1100/65/main.shtml>.
- MAIER, D.; MONTROSS, M. **Aeration Technology for Moisture Management**. In: **Proceedings of the University of Illinois Grain Quality Conference – Managing Moisture in Grains and Oilseeds**. March 26-27. 1997.
- MOTA, A. M. M. **Teoria de Sistemas**. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 1998, 316 p.
- MOTA, A. M. M. **Sistema de aquisição e Controle baseado no barramento 1-wire**. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2001.
- NISE, N. S. **Control Systems Engineering**. Addison Wesley Longman Inc., Singapore, 2nd ed., 1998, 853p.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Prentice Hall do Brasil, São Paulo, 1982, 929p.
- OLIVEIRA, T. F. P. **Controle adaptativo - Implementação em Simulink**. Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 1997.
- PEREIRA, J. A. M. **Aeração de Grãos – Fundamentos e Manejo**. In: **Curso de Secagem e Aeração de Grãos**. CENTREINAR, Viçosa, MG, 1998.
- PUZZI, D. **Abastecimento e Armazenagem de Grãos**. Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, Campinas, SP, 1986, 603p.
- RIGBY, H. W.; DALBY, T. **Computer Interfacing – A Practical Approach to Data Acquisition and Control**. Prentice Hall, New Jersey, USA, 1995, 232p.
- ROSSI, S. J. **Psicrometria**. FUNAPE, João Pessoa, PB, 1987,60p.
- S. FILHO, O. F. **Armazenagem e Conservação de Cereais. Manual de Aplicação**. Aeroter, Londrina, PR, 1996.
- SCHWARZENBACH, J.; GILL, K. F. **System Modeling and Control**. Edward Arnold, London, 1984, 322 p.
- SILVA, J. S. et al. **Aeração de Grãos Armazenados**. In: **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. SILVA, J. S. (editor). Editora Aprenda Fácil, Viçosa, MG, 2000.
- SILVEIRA, P. R.; SANTOS, W. E. **Automação e Controle Discreto**. Editora Érica, São Paulo, 1998, 229 p.

- SINÍCIO, R.; MUIR, W. E. **Aeration Strategies for Preventing Spoilage of Weat Stored in Tropical and Subtropical Climates.** Applied Engineering in Agriculture, vol. 14(5), American Society of Agricultural Engineers, USA, 1998, p517-527.
- SHLOMO, N.; NOYES, R. **The Mechanics and Physics of Modern Grain Aeration. Management.** CRC Press, USA, 2001, 647p.
- STROBEL, B. R.; STOWELL, R. R. **Using a Psychometric Chart to Describe Air Properties.** AEX-120-99. <http://ohioline.oso.edu/aex-fact/0120.html>, 1999.
- WARWICK, K.; REES, D. **Industrial Digital Control Systems.** Peter Peregrinus Ltd., London, 1986, 439 p.
- WEBER, A. E. **Armazenamento Agrícola.** Kepler Weber Industrial, Porto Alegre, 1995,400p.
- ZOLNIER, S. **Psicrometria I - Caderno Didático 13.** Imprensa Universitária, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa MG.