

CRISTIANO LÚCIO CARDOSO RODRIGUES

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMÁTICO PARA UM
SECADOR DE PRODUTOS AGRÍCOLAS**

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
2010

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

R696d
2010

Rodrigues, Cristiano Lúcio Cardoso, 1972-
Desenvolvimento de um sistema automático para um secador
de produtos agrícolas / Cristiano Lúcio Cardoso Rodrigues.
– Viçosa, MG, 2010.
xxi, 162f. : il. ; 29cm.

Orientador: José Helvecio Martins.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 154-162.

1. Equipamento de secagem. 2. Produtos agrícolas - Secagem.
3. Máquinas agrícolas. I. Universidade Federal de Viçosa.
II. Título.

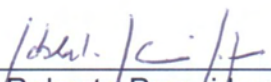
CDD 22. ed. 631.3

CRISTIANO LÚCIO CARDOSO RODRIGUES

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA AUTOMÁTICO PARA UM
SECADOR DE PRODUTOS AGRÍCOLAS**

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 dezembro de 2010.



Prof. Roberto Precci Lopes



Prof. Paulo Marcos de Barros Monteiro
(Coorientador)



Prof. Sávio Augusto Lopes da Silva



Prof. Joseph Kalil Khoury Júnior



Prof. Dr. José Helvecio Martins
(Orientador)

“De tudo ficam três coisas:
A certeza de que estamos sempre começando
A certeza de que é preciso continuar
E a certeza de que podemos ser
interrompidos antes de terminarmos.
Devemos fazer da interrupção
um caminho novo,
Da queda uma dança
Do medo uma escada
Do sonho uma ponte
Da procura um encontro.”

Fernando Sabino

*À minha mãe Maria do Carmo Cardoso Rodrigues,
sempre presente em todos os
momentos de minha vida.*

*Ao meu pai José Natividade Rodrigues,
pois sei que sempre torceu por mim,
ainda que não estivesse mais
presente entre nós.*

... DEDICO.

*Aos meus queridos irmãos Geraldo,
Daliana, Rogério, Paulo, Silvana,
Adriana, Luciana e Alexandre,
exemplos de pessoas corretas
e admiradas.*

... HOMENAGEIO.

*À minha amada Juliana Paes, pelo
companheirismo, amizade, cumplicidade,
compreensão, carinho e muito amor.*

OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, saúde, sabedoria e presença constante em minha vida.

Aos meus pais Maria do Carmo Cardoso Rodrigues e José Natividade Rodrigues (*in memoriam*) e a todos os meus irmãos, sempre presentes e amigos.

À minha amada namorada Juliana Lobo Paes, agradeço pelo carinho e compreensão de sempre, e pelo apoio incondicional em minhas decisões.

Aos queridos colegas da Coordenadoria de Automação Industrial (CODAAUT) do IFMG - Ouro Preto, em especial aos grandes amigos José Eduardo Carvalho Monte, Paulo Raimundo Pinto, Ronaldo Silva Trindade e Sílvia Grasiella Almeida, pelos momentos de intensos debates e crescimento.

Ao Prof. José Helvecio Martins, por ter aceitado orientar esse trabalho, repassando-me, sem restrições e com muita dedicação, o seu conhecimento. Obrigado por seu apoio e compreensão, suas idéias e seu incentivo constante. Acima de tudo, pela grande amizade.

Aos meus conselheiros, professores Paulo Marcos de Barros Monteiro e Evandro de Castro Melo, pelo constante estímulo, acompanhamento e sugestões.

Aos professores Sérgio Zolnier, Márcio Arêdes Martins e Adílio Flauzino de Lacerda Filho, pelas sugestões propostas ao longo do trabalho.

Aos grandes amigos que fiz na empresa Consciente, na cidade de Belo Horizonte, onde fui recebido de braços abertos. Ao Prof. Mauri Fortes, pelo grande ensinamento e o fino trato das palavras. Ao grande amigo Antônio Carlos, pela disposição e ajuda nos momentos em que tudo parecia dar errado. Nunca vou esquecer-me do “bacalhau com leite”.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), em especial ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela grande oportunidade oferecida.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de capacitação.

Aos grandes amigos Ronicelly Rocha e André Duarte Goneli, companheiros de moradia, pelos momentos de descontração, pela amizade e pelos ensinamentos recebidos.

Ao casal Daniela de Carvalho Lopes e Antônio José Steidle Neto, pela amizade, dedicação e disponibilidade.

Aos colegas de pós-graduação José Américo Trivelato Messias, Rafael Pinheiro Amantéa, Keller Sullivan Oliveira Rocha, José Vitor Nicácio, Allan Kardek Rêgo Segundo e Gisele Tessari Santos, pelas incontáveis discussões e valiosas ajudas na busca dos objetivos.

Aos demais colegas da UFV, Mário Cupertino, Wagner Peixe, Douglas, Josiane, Danilo, Geice, Gabriel, Fernando Botelho, Marcus Volk, Tales, Marta, Svetlana, Hamilton, André, Ernandes, com quem tive o prazer de conviver e passar ótimos momentos.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola pela amizade e auxílio no desenvolvimento do trabalho, em especial a Carlos Pintinho, Galinari, Joel, Edna, Marcos, Everaldo, José Eustáquio, Edson e Catitu.

Aos membros da banca, pela disponibilidade e contribuição científica ao avaliarem este trabalho.

E a todos, que de alguma forma, contribuíram para a concretização deste trabalho.

BIOGRAFIA

Cristiano Lúcio Cardoso Rodrigues, filho de Maria do Carmo Cardoso Rodrigues e José Natividade Rodrigues, nasceu em Conselheiro Lafaiete, estado de Minas Gerais, em 30 de julho de 1972.

Em março de 1987, iniciou o Curso Técnico de Informática Industrial na Escola Técnica Federal de Ouro Preto, graduando-se em dezembro de 1989.

Em março de 1990, iniciou o Curso de Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), em Belo Horizonte, Estado de Minas Gerais, graduando-se em dezembro de 1994.

Em março de 1995, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica na UFMG, na área de Eletrônica de Potência, do Departamento de Engenharia Elétrica, defendendo sua dissertação em fevereiro de 1998.

Em março de 1997, iniciou a carreira de Docência no Curso de Informática Industrial da Escola Técnica Federal de Ouro Preto, como professor contratado, sendo efetivado como professor concursado em dezembro de 1998, ministrando aulas de Eletrônica Digital, Eletrônica Analógica, Eletrônica Industrial, Eletrotécnica, Termodinâmica, Teleprocessamento, Projetos de Automação, Periféricos de Computadores, até então, no Curso de Automação Industrial, do atual Instituto Federal de Minas Gerais – Campus de Ouro Preto.

Em outubro de 2006, iniciou o Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola na UFV, na área de Energia, do Departamento de Engenharia Agrícola, defendendo sua tese em dezembro de 2010.

SUMÁRIO

ABREVIATURAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS.....	xvi
RESUMO	xviii
ABSTRACT	xviii
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	4
2.1. OBJETIVO GERAL.....	4
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
3. REVISÃO DE LITERATURA	5
3.1. FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE SECAGEM	5
3.1.1. Modelos de secagem	6
3.1.2. Modelagem de secagem em camada fina.....	7
3.1.3. Modelagem de secagem em camada espessa	16
3.2. EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO.....	18
3.3. RECIRCULAÇÃO DO AR DE EXAUSTÃO	20
3.4. TEORIA DE CONTROLE DE PROCESSOS.....	23
3.4.1. Controlador liga-desliga.....	27
3.4.2. Controlador proporcional	27
3.4.3. Controlador proporcional e integral	28
3.4.4. Controlador proporcional e derivativo.....	30
3.4.5. Controlador proporcional integral e derivativo	31
3.4.6. Controladores adaptativos.....	32
3.4.7. Estratégias de controle em um sistema de secagem	33
3.5. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	35
3.5.1. Considerações gerais.....	35
3.5.2. O sistema 1-Wire™	38
3.6. CARACTERÍSTICAS DE SENSORES EM SISTEMAS AUTOMÁTICOS	45
4. METODOLOGIA.....	48
4.1. PROTÓTIPO DO SISTEMA DE SECAGEM.....	49
4.2. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	55
4.2.1. Medição da temperatura e da umidade relativa do ar	55

4.2.2.	Medição do fluxo de ar de secagem.....	59
4.2.3.	Monitoramento do fluxo de ar nas bandejas.....	66
4.2.4.	Calibração do sensor de pressão.....	69
4.2.5.	Sistema de medição do teor de água do produto.....	72
4.2.6.	Medição do consumo de energia elétrica.....	77
4.2.7.	Rede de aquisição e gerenciamento de dados.....	78
4.2.8.	Programa computacional.....	80
4.3.	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE AUTOMÁTICO	83
4.3.1.	Controle do fluxo de ar	83
4.3.2.	Interferência eletromagnética	90
4.3.3.	Controle de temperatura do ar de secagem	92
4.3.4.	Controle da mistura de fluxo de ar.....	95
4.4.	TESTES DE VALIDAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO.....	101
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	103
5.1.	PROTÓTIPO DO SISTEMA DE SECAGEM.....	103
5.2.	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	106
5.2.1.	Temperatura e umidade relativa do ar.....	106
5.2.2.	Fluxo de ar de secagem	108
5.2.3.	Teor de água do produto	111
5.2.4.	Consumo de energia elétrica.....	121
5.2.5.	Rede de aquisição e gerenciamento de dados.....	122
5.2.6.	Programa computacional.....	125
5.3.	SISTEMA DE CONTROLE AUTOMÁTICO	128
5.3.1.	Controle do fluxo de ar	128
5.3.2.	Interferência eletromagnética	131
5.3.3.	Controle da temperatura do ar de secagem	133
5.3.4.	Mistura dos fluxos de ar	140
5.4.	TESTES DE VALIDAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO.....	143
6.	CONCLUSÕES	151
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	153
8.	REFERÊNCIAS.....	154

ABREVIATURAS

1-Wire™	- Tecnologia desenvolvida pela Dallas (Maxim) que utiliza um único condutor para transmissão de dados
bit	- Dígito binário (0 ou 1)
CAD	- Conversor analógico-digital
CC	- Corrente contínua
CDA	- Conversor digital-analógico
CI	- Circuito Integrado
CLP	- Controlador lógico-programável
CMOS	- Família de circuitos integrados (Complementary Metal Oxide Silicon)
CRC	- Teste de redundância cíclica (Cyclic Redundancy Check)
DDE	- Dispositivo digital endereçável
DS18S20	- Sensor de temperatura da tecnologia 1–Wire™
DS2406	- Chave Digital Endereçável da tecnologia 1–Wire™
DS2438	- Monitor de Bateria Inteligente – CAD da tecnologia 1–Wire™
DS2760	- Monitor de Bateria de alta precisão - CAD da tecnologia 1–Wire™
DS2890	- Potenciômetro Digital da tecnologia 1–Wire™
DS9490R	- Adaptador 1-Wire™ / USB
GND	- Terminal de referência ou Terra (Ground)
HIH-4000	- Sensor de umidade relativa fabricado pela empresa Honeywell
ID	- Endereço de identificação única dos dispositivos digitais endereçáveis
L/D	- Controlador Liga-Desliga
MLP	- Modulação por largura de pulso

NA	- Normalmente aberto
NF	- Normalmente fechado
P	- Controlador Proporcional
PD	- Controlador Proporcional-Derivativo
PI	- Controlador Proporcional-Integral
PIC	- Controlador de Interface Periférica (Peripheral Interface Controller).
PID	- Controlador Proporcional-Integral-Derivativo
RH	- Terminal superior do potenciômetro digital DS2890
RL	- Terminal inferior do potenciômetro digital DS2890
RRMC	- Razão de rejeição em modo comum do amplificador de instrumentação
RS232	- Padrão serial utilizado nas portas seriais dos computadores
RS485	- Padrão serial utilizado em redes de equipamentos
TRIAC	- Triodo para corrente alternada
TTL	- Família de circuitos integrados (Transistor-Transistor Logic)
USB	- Barramento serial universal
VC	- Variável controlada de um sistema de controle
VM	- Variável manipulada de um sistema de controle
WIPER	- Terminal central do potenciômetro digital DS2890

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Variações decorrentes do processo de secagem em camada delgada durante um intervalo de tempo Δt	18
Figura 3.2 - Sistema de controle em malha aberta.	24
Figura 3.3 - Sistema de controle em malha fechada.....	25
Figura 3.4 - Sistema de controle digital em malha fechada.	26
Figura 3.5 - Sinal de erro integral.....	29
Figura 3.6 - Principais elementos funcionais de um sistema de aquisição de dados.	35
Figura 3.7 – Ilustração de um sistema 1-Wire™.....	39
Figura 3.8 - Adaptador DS9097U - RS232 (Serial)/1-wire™ (RJ11)	43
Figura 3.9 - Adaptador DS9490R – USB/1-Wire™ (RJ11).....	43
Figura 3.10 – Exemplo de conexão dos DDE's ao computador.....	44
Figura 4.1 – Desenho do protótipo do secador: (a) vista geral e (b) perspectiva com algum detalhe.....	49
Figura 4.2 – Bandejas e localização dos sensores: (a) selo de óleo; (b) bandeja de secagem em detalhe; (c) detalhes do selo de óleo, bandeja e localização de sensores.	50
Figura 4.3 - Vista superior do secador de bandejas ilustrando as quatro resistências utilizadas para aquecimento do ar.....	51
Figura 4.4 - Circuito principal ou de potência para sistema de aquecimento e de ventilação.....	53
Figura 4.5 - Circuito de comando e sinalização para sistema de aquecimento e de ventilação do secador.	54
Figura 4.6 – Localização dos sensores de umidade relativa e de temperatura.....	56
Figura 4.7 - Circuito para medição de umidade relativa usando o sensor de umidade HIH-4000 e o CAD DS2438.....	58
Figura 4.8 - Aspectos construtivos do duto onde foi inserido o tubo de Pitot....	60
Figura 4.9 - Esquema de medições de pressão utilizando o tubo de Pitot.	61
Figura 4.10 - Posicionamento do tubo de Pitot em relação ao raio, R, do duto para obtenção do perfil de velocidade e determinação da velocidade média.	63
Figura 4.11 - Sensor de pressão MPX7002DP . Fonte: Freescale (2008).....	67

Figura 4.12 - Tensão de saída em função da pressão diferencial. Fonte: Freescale (2008).	69
Figura 4.13 - Manômetro inclinado utilizando óleo como fluido manométrico, modelo Dwyer, utilizado como referência.	70
Figura 4.14 - Circuito para medição de pressão usando o sensor MPX7002DP e o Conversor A/D DS2438.	71
Figura 4.15 - Circuito implementado para medição do teor de água utilizando células de carga.	75
Figura 4.16 - Circuito para medição da quantidade de energia consumida.	78
Figura 4.17 - Adaptador DS9490R – USB/1-Wire™ (RJ11).	79
Figura 4.18 - Fluxograma de controle do processo de secagem.	82
Figura 4.19 - Regulagem da vazão do sistema de dutos com emprego do registro. Fonte: Macintyre (1998).	84
Figura 4.20 - Variação da vazão Q de um sistema pela variação do número de rotações por minuto do ventilador. Fonte: Macintyre (1998).	84
Figura 4.21 – Diagrama de blocos para controle do fluxo de ar de secagem	86
Figura 4.22 - Ligações das entradas analógicas e digitais do inversor de frequência para controle do fluxo de ar.	86
Figura 4.23 - Filtro supressor de ruído (RFI) utilizado.	91
Figura 4.24 - Conversor de potência trifásico para sistema de aquecimento do ar usando-se resistências elétricas.	92
Figura 4.25 - Controle de potência por meio de um sinal de 0 a 5V.	93
Figura 4.26 – Diagrama de blocos do controle de temperatura do ar de secagem.	93
Figura 4.27 - Detalhes dos componentes do micro servo-motor.	97
Figura 4.28 - Exemplo de posicionamento do servo-motor em função da largura do sinal na entrada de controle.	97
Figura 4.29 - Detalhes e pinagem do PIC16F873.	98
Figura 4.30 - Circuito de acionamento dos servos-motores para controle das válvulas.	100
Figura 5.1 – Protótipo completo do secador proposto.	103
Figura 5.2 – (a) Vista externa do painel de comando; (b) Detalhes externo do painel de comando; (c) Painel pronto mostrando os dispositivos utilizados em sua montagem.	105

Figura 5.3 - Placa de aquisição de dados de temperatura e umidade relativa do ar usando o sensor de umidade HIH 4000 e o conversor A/D DS2438.	106
Figura 5.4 - Tela do programa computacional, contendo informações sobre a coleta de dados e gráficos de temperatura e umidade relativa do ar de secagem.....	107
Figura 5.5 - Curva de calibração do sensor MPX7002DP na faixa de medição -2kPa a +2kPa.	108
Figura 5.6 - Tensão na saída do sensor de pressão MPX7002DP em função da pressão dinâmica.	109
Figura 5.7 - Circuito para medição de pressão usando o sensor MPX7002DP e o CAD DS2438.....	110
Figura 5.8 - Curva de calibração final.	111
Figura 5.9 - Disposição das células de carga utilizadas.	112
Figura 5.10 - Curva de calibração observada e a estimada.....	114
Figura 5.11 - Variação da tensão na saída das células de carga em função do fluxo de ar e da temperatura de secagem.....	115
Figura 5.12 - Tela do programa computacional mostrando os testes de calibração das células de carga com massas de produto variáveis de 500 a 2.000 g e velocidade do fluxo de secagem de $0,30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	116
Figura 5.13 – Variação da massa de produto em função da tensão na saída da célula de carga, para uma velocidade do fluxo de ar de secagem de $0,30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, aquecido à temperatura de 50°C	118
Figura 5.14 – Variação da massa de produto em função da tensão na saída da célula de carga, para uma velocidade do fluxo de ar de secagem de $0,30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, aquecido à temperatura de 80°C	119
Figura 5.15 – Um dos medidores utilizados no sistema de medição de consumo de energia elétrica.....	121
Figura 5.16 – Interface do programa computacional utilizado para medição de consumo de energia elétrica.	122
Figura 5.17 – Rede de dispositivos utilizados para aquisição de dados e controle do processo.....	123
Figura 5.18 – Circuitos eletrônicos desenvolvidos para aquisição de dados e controle do processo.....	124

Figura 5.19 - Tela principal do programa desenvolvido para controle e aquisição de dados.	125
Figura 5.20 – Tela de <i>Configurações Iniciais</i> (abertura) para entrada de dados.	126
Figura 5.21 - Tela de <i>Relatórios</i> do programa computacional.	126
Figura 5.22 - Exportação das informações do programa de aquisição de dados para o Excel.	127
Figura 5.23 - Visualização de gráficos de tendências das grandezas monitoradas.	128
Figura 5.24 - Relação entre a tensão de controle (V_F) e a tensão na saída do circuito de medição do fluxo de ar para secagem ($V_{SP_{din}}$).	129
Figura 5.25 - Variação da velocidade do ar de secagem em função do tempo, para o valor ajustado de $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	130
Figura 5.26 - Interferência eletromagnética na comunicação da rede 1-Wire™	132
Figura 5.27 - Redução da interferência eletromagnética na rede de comunicação 1-Wire™	133
Figura 5.28 – Variação da tensão de controle (V_T) em função da posição do potenciômetro de controle de temperatura (D_T).	134
Figura 5.29 - Controle manual de temperatura para tensão de controle de 2 V e velocidade do ar de $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	135
Figura 5.30 - Relação entre a potência dissipada pelo sistema (P) e a tensão de controle da temperatura (V_T).	137
Figura 5.31 - Controle liga-desliga com limite inferior 0 e superior 255.	138
Figura 5.32 - Controle liga-desliga com limites inferior e superior ajustáveis: posição inferior 80 e superior 130.	139
Figura 5.33 - Controle PID de temperatura com ganhos ajustáveis.	140
Figura 5.34 - Placa de acionamento dos servos-motores de controle das válvulas do secador.	140
Figura 5.35 - Controle de posicionamento dos servo-motores utilizando modulação por largura de pulso – MLP (PWM).	141
Figura 5.36 – Ajuste das larguras de pulso por meio de potenciômetros.	142
Figura 5.37 – Posicionamento da válvula de entrada de ar para um ângulo de abertura igual a 0°C	143

Figura 5.38 – Variação da massa e do teor de água do produto ao longo do processo de secagem para uma temperatura igual a 80°C.	144
Figura 5.39 - Resultados observados da razão do teor de água e os valores estimados pelo modelo de Page, para temperatura de 80°C e fluxo de ar de $0,35\text{m}^3\text{ s}^{-1}\text{m}^2$	146
Figura 5.40 - Resultados observados de da razão do teor de água e os valores estimados pelo modelo de Page, para temperatura de 70°C e fluxo de ar de $0,35\text{m}^3\text{ s}^{-1}\text{m}^2$	148
Figura 5.41 – Curvas de secagem estimadas pelo modelo de Page, para temperaturas de 70°C e 80°C, e fluxo de ar de $0,35\text{m}^3\text{ s}^{-1}\text{m}^2$	148
Figura 5.42 – Variação da temperatura de exaustão para o teste de secagem a 70°C e fluxo de ar de $0,35\text{m}^3\text{ s}^{-1}\text{m}^2$	149
Figura 5.43– Variação da umidade relativa do ar de exaustão para o teste de secagem a 70°C e fluxo de ar de $0,35\text{m}^3\text{ s}^{-1}\text{m}^2$	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Constantes a, b e c da equação de Henderson modificada para vários produtos agrícolas	20
Tabela 3.2 - Conteúdo do código serial do protocolo 1-Wire™ e exemplo de código.....	40
Tabela 3.3 - Famílias de dispositivos 1-Wire™ utilizados neste trabalho	41
 Tabela 4.1 - Equações de calibração da umidade relativa (φ) em função da tensão de saída (V_{φ}) dos sensores HIH - 4000 utilizados neste trabalho	57
Tabela 4.2 - Características de operação do sensor diferencial de pressão, modelo MPX7002DP . Fonte: Freescale (2008).....	68
Tabela 4.3 – Parametrização realizada no Inversor de Frequência modelo CFW08-Plus.....	89
Tabela 4.4 – Parâmetros do Regulador PID	90
 Tabela 5.1 - Valores médios da tensão medida na saída das células de carga, V_s , em mV, em função da massa de produto colocada na bandeja, na ausência de fluxo de ar	113
Tabela 5.2 - Valores médios da tensão na saída das células de carga, V_s , em mV, com ar aquecido para diferentes fluxos de ar e diferentes temperaturas	117
Tabela 5.3 - Valores médios da tensão de saída, V_s , em mV, das células de carga com fluxo de ar com velocidade de $0,30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, aquecido a 50°C , em função da massa colocada na bandeja.....	118
Tabela 5.4 - Equações de calibração das células de carga para fluxos de ar de secagem de $0,30$; $0,35$ e $0,45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	120
Tabela 5.5 - Temperatura do ar de secagem em função da tensão de controle, fluxo de ar com velocidade de $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, temperatura ambiente de $22,22^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa de $75,4\%$	135
Tabela 5.6 - Relação entre a tensão de controle de temperatura e a potência de aquecimento.....	136

Tabela 5.7 - Valores de tensão das células de carga correspondentes às massas inicial e final para a temperatura de secagem de 70°C.....	145
Tabela 5.8 - Valores de tensão das células de carga correspondentes às massas inicial e final para a temperatura de secagem de 70°C.....	147

RESUMO

RODRIGUES, Cristiano Lúcio Cardoso, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2010. **Desenvolvimento de um sistema automático para um secador de produtos agrícolas.** Orientador: José Helvecio Martins. Coorientadores: Paulo Marcos de Barros Monteiro e Evandro de Castro Melo.

Desenvolveu-se um protótipo de secador de produtos agrícolas e um sistema de controle automático para monitoramento e controle da operação do protótipo. O protótipo de secador em camadas fixas, com sistema de recirculação do fluxo ar de secagem, foi constituído por três bandejas, com opção para testes em camada fina e em camada espessa. O sistema de aquecimento do ar de secagem foi constituído por quatro resistências elétricas com potência nominal de 3.200 W. A entrada de ar no secador foi realizada por meio de um ventilador centrífugo acoplado a um motor de indução trifásico, comandado por um inversor de frequência. Implementou-se um painel de comando onde foram instalados os dispositivos que constituíram os circuitos principal e de comando dos sistemas de aquecimento e de ventilação. Com a finalidade de monitoramento e controle, foram distribuídos em posições específicas no interior do secador, sensores de temperatura, de umidade relativa e de pressão, além de dispositivos atuadores para controle da temperatura e do fluxo do ar, implementados com tecnologia 1-Wire™. Para medição do fluxo de ar, utilizou-se um tubo de Pitot acoplado a um sensor de pressão diferencial. Por meio da pressão dinâmica obtida no sensor, pôde-se determinar a velocidade média do ar no duto e, conseqüentemente, a vazão do ar de secagem, pelo conhecimento da seção transversal do duto por onde o ar circula. O teor de água do produto, durante o processo de secagem, foi determinado por meio da lei de conservação de massa. A massa de produto a cada instante foi obtida por um sistema de pesagem automática com base em células de carga. O potenciômetro digital DS2890 da tecnologia 1-Wire™ foi utilizado para controlar o funcionamento do sistema de ventilação e do sistema de aquecimento do secador. O controle do fluxo de ar de secagem foi realizado utilizando-se um inversor de frequência. A variação da temperatura do ar de secagem foi realizada utilizando-se um conversor de potência microcontrolado tiristorizado. A rede de dispositivos foi gerenciada por um programa

computacional, responsável por ligar o sistema e comandar os sistemas de ventilação e aquecimento. Além disto, o programa computacional registrava todas as medições e os comandos realizados, gerava gráficos e relatórios e desligava o sistema quando as condições finais desejadas eram atendidas. Para validar o sistema, foram realizados testes de secagem de milho, para obtenção das curvas de secagem. Os resultados obtidos, com a utilização do sistema automático, foram: coleta de dados em tempo real; controle da temperatura e do fluxo do ar de secagem; geração de gráficos e relatórios em forma de arquivo texto, e obtenção das curvas de secagem. O sistema de controle automático, desenvolvido para aquisição de dados em tempo real, mostrou-se confiável, versátil e de fácil instalação e manutenção.

ABSTRACT

RODRIGUES, Cristiano Lúcio Cardoso, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December, 2010. **Development of an automatic system for a dryer of agricultural products.** Adviser: José Helvecio Martins. Co-Advisers: Paulo Marcos de Barros Monteiro and Evandro de Castro Melo.

A prototype of a dryer for agricultural product was developed, and an automatic control system for monitoring and controlling the operation of the prototype was implemented. The fixed bed dryer prototype was developed with recirculation system of the drying airflow, and has three trays with possibility for thin and thick layer drying tests. The heating system of the drying air was composed by four electric resistances with a total power of 3200 W. The input of air in the dryer was done by a centrifugal fan coupled to a three-phase induction motor, controlled by a frequency inverter. A control panel was implemented where the devices, which constituted the main and the control circuits of the heating and ventilation systems were installed. For monitoring and control purposes, temperature, relative humidity, and pressure sensors were installed at specific positions inside the dryer, in addition to actuator devices to control temperature and airflow, implemented with 1-Wire™ technology. To measure airflow it was used a Pitot tube coupled to a differential pressure sensor. Through the dynamic pressure from the sensor, it was possible to determine the average velocity of the air in the duct and, consequently, the drying airflow, by knowing the cross section area of the duct where air circulates. The moisture content of the product during the drying process was determined by the law of mass conservation. The mass of product at each time was obtained by an automatic weighing system based on load cells. The DS2890 digital potentiometer from the 1-Wire™ technology was used to control the operation of the ventilation system, and the heating system of the dryer. The control of the drying airflow was performed using a frequency inverter. The variation of the drying air temperature was performed using a micro-controlled power converter. The devices network was managed by a computer program, responsible to activate the system, and control the ventilation and heating systems. Moreover, the computer program recorded all the measurements and the performed commands, generated graphs and

reports and shut down the system when the desired final conditions were met. To validate the system, drying tests were performed with corn, to obtain the drying curves. The results, obtained using the automated system, were: real time data acquisition; control of the temperature and the drying airflow; generating of graphs and reports in the form of text file; and the drying curves. The automatic control system, developed for real time data acquisition, was reliable, versatile and of easy installation and maintenance.

1. INTRODUÇÃO

Uma das primeiras ações pós-colheita, visando à manutenção da qualidade dos produtos agrícolas, é o processo de secagem. A secagem de produtos agrícolas consiste na remoção da água contida nesses produtos, até que atinjam um teor de água que possibilite uma armazenagem durante longo tempo, sem que ocorra deterioração do produto (LACERDA FILHO e MELO, 2001).

Os processos mais utilizados para a secagem de produtos agrícolas têm como base o deslocamento de um fluxo de ar, geralmente aquecido através da massa de produto (BROKER et al., 1992).

Durante o processo de secagem é imprescindível o conhecimento das variáveis inerentes ao produto (tipo de produto, teor de água e temperatura do produto, teor de impurezas na massa de produto) e ao tipo de secador e parâmetros de secagem (temperatura e umidade relativa do ar, fluxo de ar). Por meio do conhecimento dessas variáveis, torna-se possível determinar a capacidade do sistema de secagem a ser utilizado (BROKER et al., 1992).

Como a secagem é o tratamento pós-colheita que mais consome energia, representando maior custo, a busca de processos eficientes com menor consumo de energia tem norteado diversos trabalhos e projetos (IGUAZ et al., 2002; TIPPAYANWONG et al., 2008; NAGLE, 2010).

Sistemas de secagem mais eficientes podem melhorar as condições de operação por meio de controles inteligentes de temperatura e do fluxo de ar utilizado na secagem (SRZEDNICKI et al. 2006; TIPPAYANWONG et al., 2008; SHABDE e HOO, 2008; VEGA-GÁLVEZ, 2010).

Na medida em que se aumenta o conhecimento sobre os princípios físicos envolvidos na secagem dos produtos agrícolas, torna-se mais fácil propor soluções ou encontrar formas de aprimorar o processo de secagem.

Embora alguns modelos matemáticos de secagem tenham sido estabelecidos, as suas estruturas são, na maioria das vezes, muito complexas

para serem usadas na modelagem do controle e, portanto, o controle efetivo é muito difícil de ser realizado (COURTOIS et al., 1995).

Por outro lado, muitos autores têm trabalhado com controle automático de secadores utilizando estratégias com significativas diferenças, dependendo do tipo de secador, características do produto e objetivos específicos de secagem (COURTOIS et al., 1995; TRELEA et al., 1997; LIU e BAKKER-ARKEMA, 2001b; DIDRIKSEN, 2002; BUTTS et al., 2002; ARJONA et al., 2005; ABDEL-JABBAR et al., 2005; SRZEDNICKI et al., 2006; ORTEGA et al., 2007; ZANOELO et al., 2008).

O controle do processo de secagem adota a metodologia da medição e do ajuste de valores de temperatura, umidade relativa e fluxo do ar de secagem, conforme o produto a ser processado, aumentando a eficiência termodinâmica do processo, preservando, ao máximo, a qualidade do produto.

As medições das grandezas são viabilizadas pelos sensores posicionados ao longo do processo e os controladores são ajustados para manter as condições de temperatura e umidade relativa adequadas para um determinado teor de água do produto.

O tempo de permanência do produto dentro do secador é definido pelo teor de água final desejado, em função do teor de água inicial, da temperatura e do fluxo de ar de secagem.

Dentre as características dos processos agrícolas, a determinação do teor de água do produto e da sua curva de secagem em camada fina, é uma das mais importantes, servindo de base para o processo de secagem em camada espessa.

A maior limitação dos controles automáticos é a determinação exata do teor de água do produto (FARKAS et al., 2000; SAVARESI et al., 2001; MONTE et al., 2008). Portanto, há necessidade do desenvolvimento de sistemas economicamente viáveis para a determinação do teor de água, capazes de fornecer resultados satisfatórios.

O método tradicional de pesagem, com retiradas das amostras do secador periodicamente, apesar de ser preciso, torna-se inviável, quando se pretende aperfeiçoar o processo, tanto em termos de eficiência como na exatidão dos resultados obtidos, haja vista que o tempo gasto no processo de retirada, pesagem e reposição das amostras no secador é difícil de ser

contabilizado. Além disso, as amostras sofrem um processo de resfriamento durante este processo, alterando o curso da curva de secagem.

A determinação precisa do instante em que o produto alcança o teor de água final desejado possibilita evitar gastos desnecessários com energia.

O desenvolvimento de sistemas computacionais tem facilitado o estudo dos princípios físicos envolvidos nos processos agrícolas. A interação de processos agrícolas com sistemas de controle computadorizados proporciona coleta de dados com precisão, facilita a análise e a tomada de decisões com maior agilidade, por meio de sistemas automatizados. A combinação de todos estes fatores, dentre outros, contribui, efetivamente, para o aumento da eficiência dos processos agrícolas.

Em sistemas de secagem de produtos agrícolas, a automação e controle do processo aparecem como uma opção concreta para aumentar a eficiência desses sistemas.

Sistemas de aquisição de dados e controle de processos agrícolas, tais como sistema de aeração de grãos (MONTEIRO et al., 2002; LOPES et al., 2008), sistema de monitoramento climático (PINTO, 2005; MARTINS et al., 2006), sistema de secagem em camada fina (MONTE et al., 2008) e sistema de controle de câmara climática (ALENCAR, 2006) têm sido desenvolvidos com base na tecnologia 1-wireTM, utilizando-se dispositivos digitais endereçáveis (DDE).

Uma vantagem de se trabalhar com os dispositivos digitais endereçáveis é que a interface entre todos eles é feita por meio de um dispositivo mestre (computador ou microcontrolador) da mesma maneira, independentemente da propriedade que está sendo medida, e toda a comunicação é feita por meio de uma rede que usa um protocolo de comunicação bidirecional (AWTREY, 1997).

A redução do número de cabos usados, comuns entre outras tecnologias, para comunicação do fluxo de informações entre o computador e os dispositivos conectados a ele, garantem maior confiabilidade durante a comunicação de dados e boa redução de consumo (MONTEIRO, 2002; PINTO, 2005; LOPES et al., 2008; MONTE et al., 2008).

Por estas razões, neste trabalho, serão utilizados, para implementação do sistema de aquisição de dados e da estratégia de controle, os dispositivos digitais endereçáveis (DDE) da série 1-WireTM.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Desenvolvimento de um sistema de controle automático para aplicação em secador de produtos agrícolas com reaproveitamento do ar de secagem.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolvimento de um protótipo de secador de produtos agrícolas com reaproveitamento do ar de secagem.
- Desenvolvimento e implementação de um sistema de aquisição de dados em tempo real para o protótipo de secador proposto, com base em dispositivos digitais endereçáveis.
- Desenvolvimento e implementação de um sistema de controle automático para o protótipo de secador proposto, com base em dispositivos digitais endereçáveis.
- Testes de validação do sistema proposto.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. FUNDAMENTOS DO PROCESSO DE SECAGEM

Uma das primeiras operações pós-colheita, visando à manutenção da qualidade dos produtos agrícolas, é o processo de secagem. A secagem consiste na remoção parcial da água contida nesses produtos, até que atinjam um teor de água que possibilite uma armazenagem durante longo tempo, sem que sofram um processo de deterioração (LACERDA FILHO e MELO, 2001). Quando a secagem for realizada de forma inadequada, poderá reduzir a qualidade comercial do produto antes mesmo da armazenagem ou acelerar o processo de deterioração.

A conservação da qualidade dos produtos pela secagem baseia-se no fato de que tanto os microrganismos como as enzimas e todo mecanismo metabólico necessitam de água para suas atividades. Com a redução da quantidade de água disponível, até níveis seguros para armazenagem, conseqüentemente, serão reduzidas a atividade de água e a velocidade das reações químicas no produto, bem como o desenvolvimento de microrganismos.

Os processos mais utilizados para a secagem de produtos agrícolas têm como base o deslocamento de um fluxo de ar aquecido através da massa de produto (BROOKER et al., 1992).

Dois mecanismos fundamentais ocorrem quando o produto é colocado em contato com o ar quente. Estes mecanismos são: (1) a transferência de calor do ar para o produto, devido ao gradiente de temperatura existente entre eles, e (2) a transferência de massa (umidade) do produto para o ar, devido ao gradiente de pressão parcial de vapor de água existente entre o ar de secagem e a superfície do produto (BIAGI et al., 2002).

Ressalta-se que, para que um produto seja submetido ao fenômeno de secagem, é necessário que a pressão parcial de vapor d'água em sua

superfície seja maior do que a pressão parcial do vapor d'água no ar de secagem.

As condições externas e os mecanismos internos do movimento de água de um produto agrícola são muito importantes. O movimento de água do interior do produto até sua superfície é analisado por meio dos mecanismos de transferência de massa, que descrevem a velocidade de secagem desse produto. Durante a secagem, para que haja evaporação de água da superfície do produto para o ambiente em suas vizinhanças, a água deve ser transportada do interior até a superfície do produto. Alguns pesquisadores afirmam que, possivelmente, o transporte de água ocorre por difusão de líquido ou difusão de vapor ou, ainda, pela combinação destes mecanismos, predominando um ou outro durante a secagem (ALVARENGA et al., 1980). Entretanto, as teorias mais modernas aceitam que, em determinada fase da secagem, o movimento de água seja, basicamente, determinado pela difusão de líquido (FORTES e OKOS, 1980).

O processo de secagem em escala real ocorre em uma quantidade de produto muito grande, formando uma massa porosa constituída pelas partículas individuais. Além da porosidade dessa massa de produtos, há de ser considerada a porosidade da própria partícula. Portanto, nenhum processo em escala real, principalmente em se tratando de grãos e cereais, é realizado em uma partícula individualmente ou em uma camada fina do produto.

O conceito de camada fina (ou camada delgada) foi idealizado para que fosse possível desenvolver modelos matemáticos que descrevessem o processo de secagem como um todo, denominado de *secagem em camada espessa*. Então, os modelos matemáticos são desenvolvidos considerando-se toda a massa porosa como uma série de camadas finas superpostas, com espessura tal que as variações das propriedades físicas, tanto do produto como do ar, em uma camada não sofra mudanças significativas ao passar por esta camada até chegar à interface da camada subsequente.

3.1.1. Modelos de secagem

A análise do processo de secagem é dividida, basicamente, em duas partes: (i) secagem em camada fina e (ii) secagem em camada espessa.

Toda teoria de secagem é desenvolvida considerando uma partícula individualmente e, mais apropriadamente para os processos em escala real, uma camada fina de produto. A confiabilidade e o sucesso da modelagem final de todo o processo em camada espessa depende, fundamentalmente, da modelagem de uma camada fina do produto que, por sua vez, depende fundamentalmente das propriedades físicas do produto.

A associação e a interatividade de todas essas propriedades tornam a modelagem do processo de secagem de produtos agrícolas um problema complexo.

Existem diferentes tipos de modelos do processo de secagem. Todos eles têm a variável temporal, sendo conhecidos como modelos de camada fina (ou delgada) e modelos de camada espessa.

Nos modelos de camada fina, toda a massa de produto a ser seco é exposta a condições uniformes do produto (temperatura e teor de água) e do ar (temperatura e umidade relativa) em todo o volume considerado, em cada incremento de tempo.

Os modelos de camada espessa são de uma, duas ou três dimensões e os parâmetros referentes ao produto e ao ar de secagem variam conforme a posição considerada. A solução desses modelos é obtida, quase sempre, por meio de métodos numéricos.

3.1.2. Modelagem de secagem em camada fina

Em se tratando de secagem em camada fina, diversos produtos agrícolas apresentam uma taxa de secagem constante durante o período inicial do processo, seguida por um período de secagem com taxa decrescente.

Durante o período de secagem com taxa constante, a determinação da taxa de secagem de um produto biológico é menos complexa do que com taxa decrescente. Isto ocorre devido ao fato de que, no período com taxa decrescente, devem ser levados em consideração os mecanismos de transferência no interior do produto (transferência de calor por condução e transferência de massa por difusão), além dos mecanismos de transferências

externas (transferência de calor e massa por convecção) (BROOKER et al., 1992).

a. Modelo de secagem no período com taxa constante

No período de taxa de secagem constante, a temperatura do produto se mantém igual à do ar de secagem saturado e as transferências de calor e de massa se compensam. Isto significa que a quantidade de água evaporada do grão e transportada em forma de vapor pelo ar contém a mesma quantidade de calor transferida do ar para o produto, para potencializar o processo de evaporação. O mecanismo interno de fluxo de água não afeta a velocidade de secagem porque a taxa de deslocamento interna de água para a superfície do produto é igual ou maior do que a máxima taxa de remoção de vapor d'água pelo ar, sendo evaporada apenas a água livre (LASSERAN, 1978).

Grãos e sementes, em geral, apresentam o período de secagem à taxa constante muito curto, ou inexistente, porque, nas condições operacionais de secagem, as resistências às transferências de água encontram-se essencialmente no seu interior, tornando a taxa de evaporação superficial acentuadamente superior à taxa de reposição de água do interior para a superfície do produto (KREYGER, 1973). Entretanto, muitos outros produtos agrícolas, tais como batatas e beterrabas, apresentam um comportamento de secagem com taxa constante, quando são desidratados sob condições ambientais constantes, porque possui um teor de água inicial muito elevado (acima de 60 % b.u.).

A taxa de secagem constante de produtos agrícolas pode ser estimada pela equação a seguir (BROOKER et al., 1992).

$$\frac{dM}{dt} = \frac{h_m A}{R_v T_{abs}} (P_{vsm} - P_v) = \frac{h_c A}{h_{fg}} (T_{bs} - T_{bm}) \quad (3.1)$$

em que:

$\frac{dM}{dt}$ - Taxa de secagem, kg s⁻¹.

A - Área da superfície exposta do produto, m².

M - Teor de água do produto, decimal, b.s.

R_v - Constante dos gases para o vapor d'água, J kg⁻¹K⁻¹

- h_m - Coeficiente de transferência de massa, $m\ s^{-1}$.
- P_v - Pressão parcial de vapor, Pa.
- P_{vsm} - Pressão de saturação do vapor à temperatura de bulbo molhado, Pa.
- h_c - Coeficiente de transferência de calor por convecção, $W\ m^{-2}\ K^{-1}$.
- h_{fg} - Calor latente de vaporização da água, $J\ kg^{-1}$.
- T_{abs} - Temperatura absoluta, K.
- T_{bs} - Temperatura de bulbo seco do ar, K.
- T_{bm} - Temperatura de bulbo molhado do ar, K.

A maioria dos produtos agrícolas possui formas irregulares, o que torna difícil obter valores exatos para os coeficientes de transferência de calor por convecção e de transferência de massa, bem como, para a área superficial do produto (BROOKER et al., 1992). Portanto, a aplicação da Equação (3.1) é muito limitada.

Em se tratando de grãos e cereais, o processo de secagem ocorre, praticamente, com taxa decrescente, haja vista que a maioria desses produtos é colhida com teor de água não superior a, aproximadamente, 26 % b.u.

O teor de água no qual a taxa de secagem de um produto passa de constante para decrescente é chamado de teor de água crítico, e seu valor depende das características do produto, tais como tamanho e forma, e das condições de secagem (MARTINS e CAVALCANTI MATA, 1984; OLIVEIRA, 2006).

b. Modelo de secagem no período com taxa decrescente

No período de secagem com taxa decrescente, a taxa de transporte interno de água para a sua superfície é menor do que a taxa de evaporação dessa água. Desta forma, a transferência de calor do ar para o produto não é compensada pela transferência do vapor de água para o ar e, conseqüentemente, a temperatura do produto aumenta, tendendo a igualar-se à temperatura do ar de secagem (BROOKER et al., 1992).

Os produtos agrícolas, geralmente, são submetidos à secagem com teores de água abaixo ou próximo do teor de água crítico. Por isso, as teorias e modelos matemáticos foram desenvolvidos para melhor prever o comportamento da secagem de grãos e cereais no período com taxa de secagem decrescente.

Os modelos de secagem em camada fina podem ser classificados em teóricos, semi-empíricos (ou semi-teóricos) e empíricos. No entanto, a maioria dos modelos que descrevem satisfatoriamente a taxa de secagem, no período com taxa decrescente, é de natureza empírica ou semi-empírica.

Os modelos semi-empíricos e empíricos consistem de equações matemáticas para análise de secagem. Nestes modelos, estão presentes um ou mais parâmetros adimensionais que dependem do produto e das condições externas, tais como temperatura e umidade relativa do ar de secagem. Embora sejam muito utilizados para prever o comportamento da secagem de produtos agrícolas, não fornecem indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de massa no interior do produto.

b.1. Modelos teóricos

Os modelos teóricos consideram as condições externas (temperatura e fluxo ar de secagem, teor de água inicial, umidade relativa do ar, dentre outras), bem como os mecanismos de transporte de água no interior do produto.

Os mecanismos físicos propostos na literatura para descrever a transferência de água em meios capilares porosos, tais como produtos agrícolas são (BROOKER et al., 1992):

- Movimento de líquido devido a forças superficiais (difusão capilar).
- Movimento de líquido devido ao gradiente de concentração (difusão líquida).
- Movimento de líquido devido à difusão de umidade nas superfícies dos poros (difusão na superfície).
- Movimento de vapor devido ao gradiente de pressão parcial de vapor (difusão de vapor).

- Movimento de líquido e vapor devido à diferença de pressão total (fluxo hidrodinâmico).
- Movimento de vapor devido a diferenças de temperatura (difusão térmica).

Diversas teorias foram propostas para explicar o fenômeno de secagem em produtos higroscópicos. Dentre elas, são citadas (ALVARENGA et al., 1980; CAVALCANTI MATA et al., 2006):

- A teoria da difusão líquida.
- Teoria de Vaporização-Condensação.
- Teoria Capilar.
- Teoria de Luikov.
- Teoria de Fortes e Okos.
- Teoria de Philip e De Vries.
- Teoria de Krischer.
- Teoria de Berger e Pei.

Embora várias teorias e modelos matemáticos tenham sido propostos para prever o comportamento da secagem de produtos agrícolas, na maioria das vezes, as relações semi-empíricas e empíricas têm-se mostrado como melhores opções para prever o processo de secagem, apesar de sua validade estar restrita às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos (ROSSI e ROA, 1980; BROOKER et al., 1992).

Os modelos teóricos, quando aplicados para descrever o movimento de água nos produtos agrícolas, requerem vários parâmetros físicos, difíceis de serem determinados para a maioria desses produtos. Por isso, os modelos empíricos para descrever o processo de secagem em camada fina ainda são os mais utilizados atualmente, até que seja possível determinar os parâmetros físicos necessários à utilização de modelos teóricos.

b.2. Modelos semi-empíricos (ou semi-teóricos)

Os modelos semi-empíricos oferecem um compromisso entre a teoria e a aplicação sem, no entanto, refletirem toda a complexidade do fenômeno físico (FORTES e OKOS, 1981; AKPINAR, 2006).

Os modelos semi-empíricos baseiam-se, geralmente, na lei de resfriamento de Newton aplicada à transferência de massa. Além disso, assume-se que, durante a secagem, as condições sejam isotérmicas e que a transferência de água se restrinja à superfície do produto.

Serão apresentados, a seguir, alguns modelos mais utilizados encontrados na literatura.

No modelo proposto por Lewis (BROOKER et al., 1992) assume-se que, no período de secagem com taxa decrescente de produtos higroscópicos porosos, a perda de água seja proporcional à diferença entre o teor de água do produto e o seu teor de água de equilíbrio:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -k(M - M_e) \quad (3.2)$$

em que:

M - Teor de água do produto, decimal, b.s.

t - Tempo, s.

M_e - Teor de água de equilíbrio, decimal, b.s.

k - Parâmetro de secagem, s^{-1} .

Integrando a Equação 3.2 no tempo, para teores de água decrescentes e utilizando as condições, inicial e final, dadas pelas Equações 3.3 e 3.4, respectivamente, obtém-se a Equação 3.5, que descreve a variação do teor de água do produto em função do tempo, durante o processo de secagem.

$$M(0) = M_0 \quad (3.3)$$

$$M(t) = M \quad (3.4)$$

$$M_r = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-kt) \quad (3.5)$$

em que:

M_r - Razão do teor de água do produto, adimensional.

M_0 - Teor de água inicial do produto, decimal, b.s.

Com base na equação de Lewis, Page, em 1949, propôs um modelo para descrever a secagem de grãos em camada fina (KASHANINEJAD et al., 2007), expresso pela Equação 3.6.

$$M_r = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp(-k t^n) \quad (3.6)$$

em que:

n - Parâmetro de secagem, adimensional.

O parâmetro k , em geral, representa o efeito das condições externas de secagem, enquanto n reflete a extensão da resistência interna do produto à secagem, para determinadas condições externas (JAYAS et al., 1988).

O modelo proposto por Page tem sido usado extensivamente para caracterizar a secagem em camada delgada de grãos e sementes (AFONSO JÚNIOR et al., 2004). Este modelo tem fornecido bons resultados para a maioria dos grãos e cereais.

Para alguns tipos de produto, pequenas modificações no modelo o tornam adequado para descrever a taxa de secagem. Por exemplo, Arteaga (1986) modificou a equação de Page para melhor descrever a secagem em camada fina de frutos de café cereja, na faixa de temperatura entre 40 e 80 °C. O modelo proposto por ele é expresso pela Equação 3.7.

$$M_r = \exp(-k t^n), \quad n = a \exp\left(\frac{\beta}{T_{abs}}\right) \quad (3.7)$$

em que:

a - Parâmetro de secagem, adimensional.

β - Parâmetro de secagem, K .

T_{abs} - Temperatura absoluta, K .

Hii et al. (2009) propuseram um modelo semi-teórico com base no modelo de Page, considerando dois termos exponenciais e um parâmetro extra para cada termo, para a modelagem da secagem em camada fina de amêndoas de cacau para as temperaturas de secagem de 60, 70 e 80°C, expresso pela Equação 3.8.

$$M_r = a \left[\exp(-k_1 t^n) \right] + b \left[\exp(-k_2 t^n) \right] \quad (3.8)$$

em que:

a, b - Parâmetros de secagem, adimensional.

k_1, k_2 - Constantes de secagem, s^{-1} .

Os modelos semi-teóricos oferecem, freqüentemente, facilidade de uso, sendo válidos somente para as faixas de temperatura, umidade relativa, velocidade do ar e teor de água para os quais eles foram obtidos.

Analizando-se o modelo de Page, pode-se inferir que ele possa ser considerado, de certa forma, bastante genérico, pois os parâmetros k e n dependem, principalmente, da temperatura do ar de secagem, do tipo de produto e do teor de água do produto. Portanto, determinando-se apropriadamente esses parâmetros para cada tipo de produto, pode-se obter uma equação que descreva satisfatoriamente o processo de secagem em uma camada fina desse produto, dentro da faixa de interesse (MARTINS, 2010).

b.3. Modelos empíricos

Os modelos empíricos são resultados do ajuste de um modelo matemático a dados obtidos experimentalmente, utilizando análise estatística. Nestes modelos, uma relação direta entre o teor de água e o tempo é obtida e os fundamentos do processo de secagem são desconsiderados (Hii et al., 2009).

Os modelos empíricos não levam em consideração os fundamentos termodinâmicos do processo de secagem. No entanto, assim como os modelos semi-teóricos, os modelos empíricos são aqueles utilizados com maior sucesso nos modelos de simulação de secagem de grãos e cereais em camadas espessas. Evidentemente, a validade destes modelos é restrita às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos (ROSSI e ROA, 1980).

Thompson (1968) propôs uma equação de secagem em camada fina totalmente empírica, para compor o modelo de simulação de secagem de milho em camada espessa que estava desenvolvendo. A equação de Thompson é expressa pela Equação 3.9.

$$t = a \ln(M_r) + b [\ln(M_r)]^2 \quad (3.9)$$

em que:

t - Tempo de secagem, h.

a, b - Parâmetros que dependem do produto e da temperatura do produto, adimensionais.

Os parâmetros da equação de Thompson podem ser descritos em função da temperatura do produto, para um determinado teor de água inicial específico. No trabalho original de Thompson (1968) ele obteve as seguintes equações para grãos de milho na faixa de temperatura de 60 a 149°C (MARTINS, 1988):

$$a = -1,706 + 0,0088 \theta \quad (3.10)$$

$$b = 148,7 \exp(-0,059 \theta) \quad (3.11)$$

em que:

θ - Temperatura do produto, °C.

Resolvendo a Equação 3.9, para explicitar a razão do teor de água do produto, obtém-se:

$$M_r = \exp\left(\frac{-a - \sqrt{a^2 + 4bt}}{2b}\right) \quad (3.12)$$

Embora a equação de Thompson tenha sido desenvolvida para milho, ela pode ser utilizada para outros produtos, ajustando-se modelos matemáticos a dados experimentais de secagem em camada fina obtidos sob diversas condições de secagem, dentro de uma faixa de interesse (MARTINS, 2010).

Outros modelos empíricos podem ser encontrados na literatura, cada um deles com suas particularidades. Por exemplo, Wang e Singh (1978) apresentaram a seguinte equação para arroz que, segundo eles, fornece melhores resultados do que a equação de Thompson:

$$M_r = 1 + at + b t^2 \quad (3.13)$$

em que:

a, b - Parâmetros da equação, adimensionais.

Uma variedade de modelos semi-teóricos e empíricos de secagem em camada fina podem ser encontrados na literatura (VERMA ET AL., 1985; MIDILLI et al., 2002; LAHSASNI et al., 2004; ERTEKIN e YALDIZ, 2004; KASHANINEJAD et al., 2007; PARDESHI ET AL., 2009; VEGA-GÁLVEZ, 2010).

3.1.3. Modelagem de secagem em camada espessa

O estudo de sistemas de secagem, seu dimensionamento, otimização e a determinação da viabilidade de sua aplicação comercial, podem ser feitos por meio de simulação matemática.

A simulação do processo de secagem é fundamentada na divisão da massa de produtos em sucessivas camadas delgadas do produto. Assume-se que cada camada é secada independentemente da outra e utiliza-se um modelo matemático que descreva satisfatoriamente o processo de secagem do produto durante o período de secagem (MARTINS, 1988; BERBERT et al., 1995).

A avaliação dos modelos de secagem, por meio da simulação, pode ser realizada de maneira mais rápida e eficiente, fornecendo resultados que possibilitem estimar as características reais do processo.

Por meio da simulação, evitam-se gastos exagerados na execução de um determinado experimento, é necessário menos tempo, e diferentes possibilidades podem ser analisadas para um mesmo processo (LAW e KELTON, 1991).

Na literatura são relatados vários modelos matemáticos para descrever a secagem em camada espessa, que foram propostos por diferentes autores para diversos produtos. Dentre eles, destacam-se: Modelo de Thompson, Modelo de Hukill, Modelo de Morey e o modelo da Universidade Estadual de Michigan (BROOKER et al., 1992; QUEIROZ et al., 2005).

Em todos os modelos considerados, o ar de secagem, ao passar pela camada de produto se modifica: sua temperatura diminui ao ceder calor sensível para o produto, enquanto seu teor de água aumenta ao receber a água evaporada do produto. Conseqüentemente, seu potencial de secagem diminui.

Na maioria dos modelos de secagem, é utilizada uma equação empírica para a secagem em camada fina. Como as curvas de secagem em camada fina dos produtos agrícolas variam com a espécie, variedade, condições ambientais, métodos de preparo pós-colheita, dentre outros aspectos, estas curvas devem ser investigadas com o objetivo de obter informações que possam descrever o comportamento do produto para cada caso em particular.

Os modelos de Thompson, Morey e Hukill são capazes de fornecer resultados precisos com baixo custo computacional, sem necessidade de técnicas numéricas avançadas (diferenças finitas, volumes finitos e elementos finitos). Além disto, estes modelos podem ser acoplados a sistemas de controle de secagem com resultados satisfatórios em tempo real.

A modelagem do processo de secagem em camada espessa segue, basicamente, o mesmo princípio, independentemente do modelo matemático utilizado. A camada espessa é, hipoteticamente, subdividida em várias camadas finas sobrepostas. A cada intervalo de tempo, as variações ocorridas nas propriedades do ar de secagem e do produto são calculadas para cada camada. Os valores obtidos para cada camada precedente servem como entrada para as camadas subseqüentes. Este processo está ilustrado na Figura 3.1.

Como o objetivo principal deste trabalho é o desenvolvimento de um secador de produtos agrícolas com de sistema de monitoramento e controle automático em tempo real, a modelagem matemática do processo de secagem não será apresentada.

Informações adicionais podem ser encontradas na literatura (HUKILL, 1974; MOREY et al., 1978; MARTINS e CAVALCANTI MATA, 1984; FRANÇA et al., 1994; SUN et al., 1995; CAVALCANTI MATA et al., 1999; SOUZA et al., 2002; VALENTE et al., 2003; LEITE et al., 2005; LOPES et al., 2005; QUEIROZ et al., 2005; ZARE et al., 2006; AREGBA e NADEAU, 2007; DALPASQUALE et al. 2008; ZARE e CHEN, 2009; NAGHAVI et al., 2010).

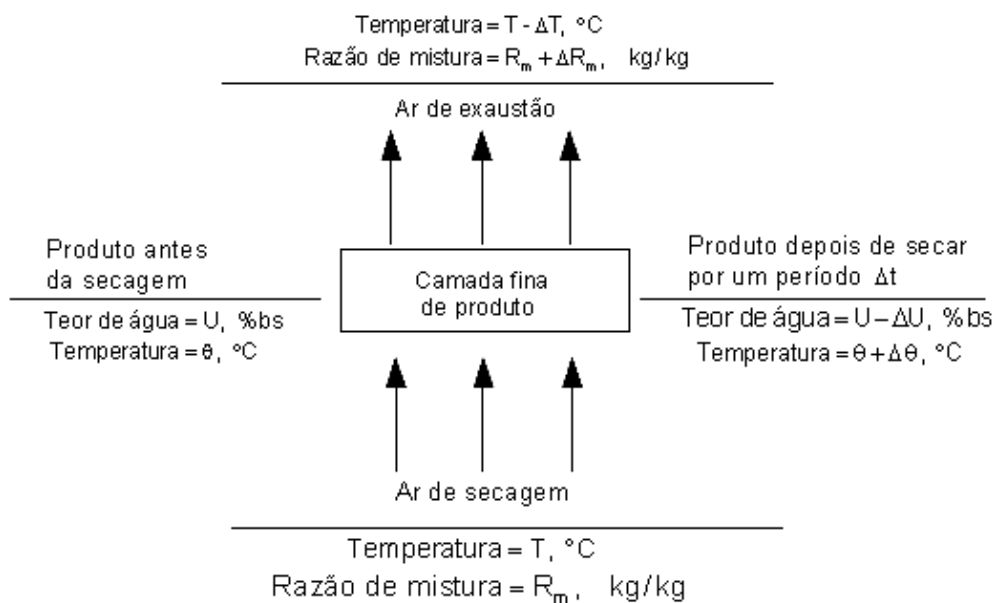


Figura 3.1 – Variações decorrentes do processo de secagem em camada delgada durante um intervalo de tempo Δt .

3.2. EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO

A disponibilidade de água em materiais higroscópicos, tais como frutos e grãos, é indicada pela atividade de água ou pelo teor de água do produto em equilíbrio com a umidade relativa do ar no ambiente intergranular da massa porosa formada pelo produto. A atividade de água no grão e a umidade relativa do ar em suas vizinhanças, quando atingido o equilíbrio, são numericamente iguais (HALL, 1980; BROOKER et al., 1992).

Todos os produtos agrícolas têm capacidade de ceder água para o ambiente ou de absorvê-la, convergindo, constantemente, para uma relação de equilíbrio entre o seu teor de água e o ar do ambiente em suas vizinhanças. O teor de água de equilíbrio é o teor de água que o produto atinge quando este é

deixado por um tempo suficientemente longo sob determinada condição fixa de temperatura e umidade relativa do ar que o envolve.

O conceito de teor de água de equilíbrio é importante no estudo da secagem de produtos agrícolas porque ele determina o teor mínimo de água até o qual o produto pode ser secado, quando submetido a condições de secagem conhecidas (BROOKER et al., 1992).

O teor de água de equilíbrio, também chamado de equilíbrio higroscópico, é o teor de água no qual a pressão de vapor de água na superfície do produto é igual à pressão de vapor de água do ar que o envolve (ROSSI e ROA, 1980). Ele é dependente da umidade relativa do ar e da temperatura do ambiente, bem como da espécie, variedade e estágio de maturação do produto (QUEIROZ e PEREIRA, 2009).

Para uma dada temperatura, a relação entre o teor de água de um determinado produto e a umidade relativa de equilíbrio do ar nas vizinhanças do produto pode ser expressa por equações matemáticas ou curvas denominadas de isotermas de sorção ou curvas de equilíbrio higroscópico (BROOKER et al., 1992).

O comportamento higroscópico de diversos produtos agrícolas tem sido estudado por vários autores que descrevem métodos diferenciados para expressar o teor de água de equilíbrio em função da temperatura e umidade relativa do ar (isotermas de sorção). Entretanto, para o estabelecimento de isotermas que representem essa relação de equilíbrio, são utilizados modelos matemáticos empíricos, uma vez que nenhum modelo teórico desenvolvido tem sido capaz de prever com precisão o teor de água de equilíbrio para uma ampla faixa de temperatura e umidade relativa do ar (QUEIROZ e PEREIRA, 2009).

Uma das equações mais utilizadas para estimar o teor de água de equilíbrio de grãos é a equação de Henderson modificada, ou equação de Henderson - Thompson, expressa pela equação a seguir (MARTINS, 1988).

$$M_e = \left\{ \frac{\ln(1-\phi)}{-a(T+b)} \right\}^{\frac{1}{c}} \quad (3.14)$$

em que:

- M_e - Teor de água de equilíbrio, decimal, b.s.
 T - Temperatura do ambiente nas vizinhanças do produto, °C.
 ϕ - Umidade relativa de equilíbrio, decimal.
 a, b, c - Parâmetros que dependem da natureza do produto.

Os valores de a , b e c , para diferentes produtos agrícolas, são dados na Tabela 3.1.

Diversas equações podem ser encontradas na literatura para estimar o teor de água de equilíbrio durante a secagem de produtos agrícolas (ARSLAN e TOGRUL, 2006; VEGA-GALVEZ et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2010).

A equação de Henderson modificada, juntamente com as equações de Chung–Pfoest modificada, Halsey modificada, Oswin modificada e de Guggenheim–Anderson–de Bouer, também denominada de equação de GAB, foram adotadas como equações padrão pela Sociedade Americana de Engenheiros Agrícolas (American Society of Agricultural Engineers - ASAE), para descrição das isothermas de sorção de produtos agrícolas (ASAE, 2001; ARSLAN e TOGRUL, 2006).

Tabela 3.1. Constantes a , b e c da equação de Henderson modificada para vários produtos agrícolas

Produto	a	B	c	Referência
Cevada	$2,2919 \times 10^{-5}$	195,267	2,0123	ASAE (2001)
Milho	$8,6541 \times 10^{-5}$	49,810	1,8634	ASAE (2001)
Arroz	$1,9187 \times 10^{-5}$	51,161	2,4451	ASAE (2001)
Feijão	$2,0899 \times 10^{-5}$	254,230	1,8812	ASAE (2001)
Trigo Duro	$2,3007 \times 10^{-5}$	55,815	2,2857	ASAE (2001)
Soja	$30,5327 \times 10^{-5}$	134,136	1,2164	ASAE (2001)
Café	$15,9097 \times 10^{-5}$	40,535	1,8501	Corrêa et al. (2010)

3.3. RECIRCULAÇÃO DO AR DE EXAUSTÃO

Dentre as operações unitárias relativas ao pré-processamento dos produtos agrícolas, a secagem é a que consome mais energia e representa maior custo (LACERDA FILHO e MELO, 2001). Essa é a principal razão da constante busca para reduzir o consumo de energia e, ao mesmo tempo, obter

maior eficiência nos secadores de produtos agrícolas e no processo de secagem propriamente dito.

Um dos principais parâmetros para medir a eficiência energética de secagem é o consumo de energia por unidade de massa de água removida do produto. Entretanto, a eficiência do sistema de secagem pode ser medida em função do tempo necessário para que a secagem seja realizada, ou em relação à qualidade final do produto depois de seco. Um bom sistema de pré-processamento deve atender a essas necessidades conjuntamente.

A eficiência energética de secagem pode ser determinada utilizando-se a primeira lei da termodinâmica por meio da equação de balanço de energia (GINER e CALVELO, 1987).

$$\eta_{es} = \frac{E_{ev}}{E_{aq}} \quad (3.15)$$

em que:

- η_{es} - Eficiência energética de secagem, decimal.
- E_{ev} - Entalpia utilizada para evaporar a água do produto, kJ.
- E_{aq} - Entalpia utilizada para aquecer o ar de secagem, kJ.

Para melhorar a eficiência de sistemas de secagem de produtos agrícolas, as condições de operação podem ser otimizadas, seja pelo controle da temperatura do ar de secagem, seja pelo controle da velocidade do ar de secagem, seja pelo reaproveitamento do ar de exaustão (YOUNG, 1984; TIPPAYANWONG et al., 2008).

Embora a redução das taxas de fluxo de ar aumente a eficiência energética do sistema de secagem, pode causar problemas na qualidade do produto (YOUNG, 1984).

Uma das opções que tem sido bastante estudada, visando à redução do consumo de energia no processo de secagem, é o reaproveitamento do ar de exaustão. O ar aquecido utilizado na secagem, geralmente, se torna úmido na saída do secador e é exaurido para o meio ambiente. O ar de exaustão, apesar de estar mais úmido, ainda tem conteúdo de energia (potencial de secagem) significativo e pode ser reutilizado para diminuir a quantidade de energia gasta

na secagem, por meio da recirculação completa ou parcial no secador (SARSAVADIA, 2007). Portanto, o processo de reaproveitamento do ar de exaustão pode proporcionar, por meio do controle da mistura com o ar que entra no secador, maior eficiência para o sistema, além de aumentar as possibilidades e estratégias de controle.

Diversos pesquisadores têm estudado o efeito da recirculação de ar no consumo de energia e eficiência térmica de diferentes secadores e produtos.

Young (1984) obteve 36% de economia de energia por meio da recirculação parcial do ar na secagem de amendoim. Este autor concluiu que, em média, nos anos em que os testes foram realizados, os secadores com recirculação consumiram 26% menos energia e o tempo de secagem foi 15,1% menor, quando comparado aos secadores convencionais, onde não houve reaproveitamento do ar de exaustão. Além disso, os valores de mercado dos amendoins secos foram 1,3% maiores.

Giner e De Michelis (1988) obtiveram um aumento na eficiência térmica de secadores de milho por meio da recirculação de frações do ar de exaustão entre 70% e 86%.

Chung et al. (1991) obtiveram um acréscimo na economia de energia de 12,9% a 57,3% com o aumento da recirculação de ar de exaustão de 10% para 80%, em um sistema de secagem de arroz.

Resultados de simulação da influência da recirculação de ar na eficiência de um secador rotativo contínuo, para produtos vegetais, indicaram um aumento de 21,0 a 38,5% de economia de energia e aumento da eficiência térmica de 28 a 63%, para as taxas de ar estudadas (IGUAZ et al., 2002).

Sarsavadia (2007) desenvolveu um sistema de secagem utilizando energia solar e recirculação de ar para avaliação das demandas de energia no processo de secagem. Para a secagem de fatias de cebola com teor de água inicial de, aproximadamente, 86% (b.u.) até teor de água final de cerca de 7% (b.u.), o total de energia necessária por unidade de massa de água variou entre 23,548 e 62,117 MJ·kg⁻¹ de água, sem usar recirculação do ar. Utilizando recirculação parcial do ar de exaustão, o consumo total de energia variou entre 12,040 e 38,777 MJ·kg⁻¹ de água. Isto representa uma economia de energia total de até 70,7%, com a recirculação do ar quente.

Uma determinada economia de energia não traduz na mesma redução do custo total de secagem. Ainda que se proponha reaproveitar o ar de exaustão, a economia de energia depende das condições em que os sistemas com e sem reaproveitamento do ar operam.

A quantidade ou porcentagem do ar reaproveitado irá depender das condições psicrométricas do ar de secagem, principalmente dos valores de temperatura e umidade relativa. Assim, um compromisso entre economia de energia, eficiência de secagem, tempo de secagem e qualidade do produto deve ser considerado.

3.4. TEORIA DE CONTROLE DE PROCESSOS

Um sistema é definido como uma combinação de componentes que atuam conjuntamente e realizam um determinado objetivo. Em algumas situações é difícil identificá-lo, por exemplo, quando não se consegue visualizar o meio ambiente em que está inserido. Os componentes, entidades, partes ou elementos podem também ser vistos como subsistemas e a integração entre estes pode ocorrer por meio de fluxo de informações, de matéria e de energia.

Um sistema pode ser considerado como “*uma caixa preta*” contendo uma ou mais entradas, uma ou mais saídas e as relações entre estas entradas e saídas (BOLTON, 1995).

No caso de um sistema de controle, a sua saída é controlada para assumir um valor particular ou seguir uma determinada entrada (BOLTON, 1995). O termo *controle* é usado para caracterizar as interações específicas entre homem e máquina. Quando 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. Atualmente, os sistemas de controle manuais, que exigem a presença de um operador para acioná-los, vêm sendo cada vez mais, substituídos por controles automáticos.

Um sistema de controle apresenta variáveis manipuláveis, de controle e, ainda, perturbações ou distúrbios. As variáveis manipuláveis (VM) são as que variam para controlar o processo. As variáveis de controle (VC) ou variáveis controladas (saídas do sistema) são as que se deseja manter constante, e as

variáveis que afetam as saídas de controle e que não podem ser manipuladas são denominadas perturbações ou distúrbios.

A função do sistema de controle é regular o valor das variáveis controladas, também chamadas de variáveis do processo, quando perturbações as modificam, por meio de um dispositivo controlador (DORF e BISHOP, 2001).

As duas formas básicas de sistemas de controle são os sistemas em malha aberta e em malha fechada. Nos sistemas em malha aberta, a variável de saída não influencia no processo de controle, ou seja, não é comparada com os dados de entrada e as condições de controle são pré-fixadas. Em outras palavras, um sistema de controle em malha aberta utiliza um dispositivo de atuação para controlar diretamente o processo sem usar retroação (Figura 3.2). Esse tipo de sistema é mais simples e apresenta baixo custo, mas os resultados são pouco precisos, uma vez que, na presença de distúrbios internos ou externos ao sistema, não há correção para os erros (OGATA, 2003).

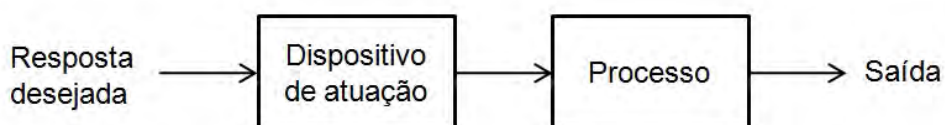


Figura 3.2 - Sistema de controle em malha aberta.

Os sistemas em malha fechada caracterizam-se por possuírem realimentação. Portanto, o sinal de saída tem efeito direto sobre a ação de controle, ou seja, realimenta o sistema (Figura 3.3). Nesses tipos de sistema, a diferença entre o sinal de entrada desejado e o sinal realimentado (sinal de erro) é constantemente monitorada e aplicada ao controlador. A função do controlador é, portanto, reduzir o erro e ajustar, por meio do atuador, o sinal de saída para o valor desejado (DORF e BISHOP, 2001; MONTEIRO, 2002).

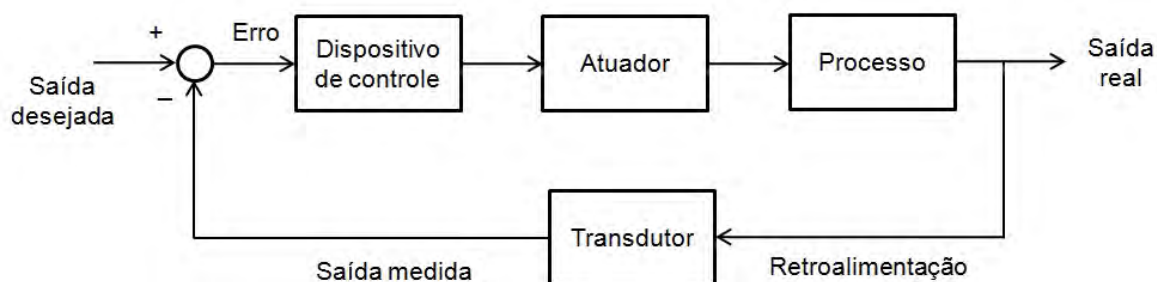


Figura 3.3 - Sistema de controle em malha fechada.

A vantagem dos sistemas em malha fechada é a precisão nos resultados, uma vez que a realimentação torna a resposta do sistema relativamente insensível a perturbações externas e variações internas de parâmetros do sistema (OGATA, 2003). As desvantagens são o maior custo e a complexidade deste tipo de sistema de controle.

Atualmente, a maioria dos sistemas de controle implementados utilizam-se de controladores digitais. Nesses sistemas, o controle é realizado digitalmente por meio de um microcomputador ou dispositivos de controle microcontrolados, tais como os controladores lógico-programáveis (CLP).

Nos sistemas de controle digital (Figura 3.4), o sinal de saída medido pelo transdutor, é realimentado e passa, primeiramente, por um conversor analógico-digital (CAD), que converte o sinal analógico em sinal digital. O controlador digital possui um temporizador que envia pulsos em intervalos regulares de tempo. Cada vez que o CAD recebe um pulso, ele envia um sinal digital correspondente ao sinal medido para o controlador, que implementa a estratégia de controle determinada no programa computacional armazenado. O sinal de saída do controlador é convertido em sinal analógico, por meio de um conversor digital-analógico (CDA), de forma que possa atuar no elemento de correção e, então, provocar a modificação desejada na variável do processo (MONTEIRO, 2002).

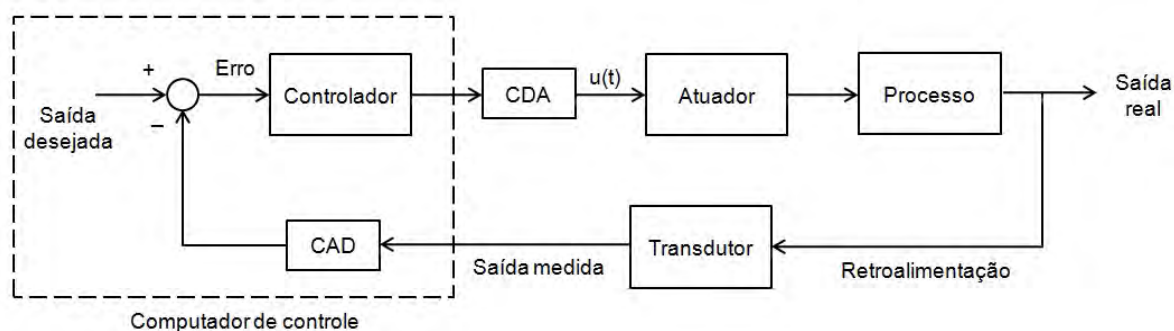


Figura 3.4 - Sistema de controle digital em malha fechada.

Um sistema em malha fechada, seja ele computadorizado ou não, deve apresentar algumas características comuns, a se destacar:

- O sistema deve realizar a medida da variável controlada, por meio de um sensor ou transdutor. Estes dispositivos transformam a grandeza física controlada em uma grandeza elétrica correspondente.
- O sistema tem que comparar o valor medido pelo sensor com o valor de referência necessário para o processo. Quaisquer diferenças entre esses valores serão detectadas pelo sistema como sendo uma condição de erro. O controlador deve realizar o monitoramento desse erro para considerá-lo como aceitável ou não.
- Para o caso de o erro não ser aceitável, o elemento de controle deve atuar para corrigi-lo e trazer a variável controlada de volta para o ponto de ajuste.

Existem várias ações de controle que podem ser adotadas, de acordo com o tipo de aplicação. Nos sistemas em malha fechada, os tipos de controle mais comuns podem ser liga-desliga (L/D), proporcional (P), proporcional e integral (PI), proporcional e derivativo (PD), ou proporcional, integral e derivativo (PID) (BOLTON, 1995). A seguir é dada uma breve descrição sobre cada um desses tipos de controle, bem como de suas aplicações.

3.4.1. Controlador liga-desliga

O controlador liga-desliga é o tipo de controle mais simples e mais popular na indústria, possuindo também diversas aplicações domésticas. É um sistema de extrema velocidade devido ao fato de seu sinal de controle assumir dois valores somente, isto é, um valor máximo ou mínimo. Essa dualidade de valores estabelece também a dualidade de "respostas": atuador ligado (L) ou desligado (D). A variável controlada é medida e comparada com seu valor de referência. Dependendo do sinal de erro ser positivo ou negativo, o sinal de controle assume o nível alto ou baixo e, simplesmente, *liga* ou *desliga* o sistema.

Como exemplo de aplicação desse tipo de controle, tem-se sistema de aquecimento do ar em um secador de produtos agrícolas. Se a temperatura do ar de secagem for superior à temperatura desejada (referência), o sistema de aquecimento é completamente desligado. Quando a temperatura do ar atingir um valor abaixo da temperatura de referência, o sistema de aquecimento é ligado com a potência máxima.

A grande desvantagem deste tipo de sistema de controle é que, ao atingir o valor de referência (valor desejado), ele fica oscilando em torno deste ponto, promovendo muitos acionamentos para manter as condições desejadas. Uma possibilidade de melhoria no sistema é obtida quando se introduz uma faixa de operação (histerese) para a saída do sistema, na qual as referências para as ações *ligar* e *desligar* são mantidas constantes, porém com valores diferentes.

Uma das maneiras de corrigir as oscilações do controlador liga-desliga é reduzir o ganho do sistema quando os sinais de erro forem pequenos, fazendo-se com que o ganho seja proporcional ao sinal de erro.

3.4.2. Controlador proporcional

O controlador que faz com o ganho seja proporcional ao sinal de erro é chamado de controlador proporcional (P). Nesse controlador, a intensidade do sinal de saída será função da quantidade de correção necessária, definido pela Equação 3.16.

$$u(t) = u_0 + K_p e(t) \quad (3.16)$$

em que:

- $u(t)$ - Sinal de saída do controlador.
- u_0 - Sinal de saída inicial do controlador, cuja finalidade é a de manter a variável controlada no valor desejado.
- K_p - Ganho proporcional do sistema (relação entre a variação do sinal de saída e a variação do sinal de entrada).
- $e(t)$ - Sinal de erro do sistema (diferença entre o valor desejado e o valor da variável controlada).

O controlador proporcional é essencialmente um amplificador com ganho ajustável (BOLTON, 1995). Um grande erro em algum instante de tempo acarreta um valor alto na saída do controlador. Como a saída é proporcional à entrada, se a entrada do controlador for um erro em degrau, então a saída é também um degrau com a mesma forma da entrada.

Em geral, a ação de controle proporcional provê uma resposta rápida quando comparado com outros controladores, porém, um erro estacionário sempre ocorre neste sistema, ou seja, há uma diferença entre o sinal de saída desejado e o sinal de saída real depois de certo tempo que a entrada de comando é aplicada ao sistema de controle (OGATA, 2003).

Em sistemas em que são aceitáveis erros dentro de uma determinada faixa, como circuitos intermediários de sistemas de controle em cascata, o controlador proporcional é indicado. Um exemplo de aplicação desse tipo de estratégia é um sistema de controle de velocidade de motores.

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.

3.4.3. Controlador proporcional e integral

A ação de controle integral 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 (PI) é dado por:

$$u(t) = K_p \left[\frac{1}{\tau_i} \int e(t) dt + e(t) \right] \quad (3.17)$$

em que:

τ_i - Constante de tempo de integração do controlador, s.

A componente integral do sinal de controle é proporcional à área sob a curva do sinal de erro em função do tempo (Figura 3.5). Analisando-se esta curva, verifica-se que o elemento integral do sistema de controle tem a capacidade de eliminar o erro remanescente, o que caracteriza uma vantagem.

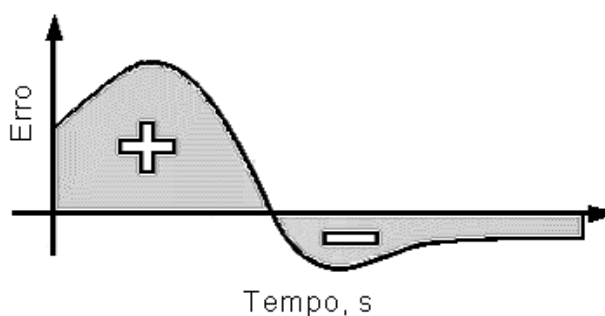


Figura 3.5 - Sinal de erro integral.

O controlador proporcional-integral possui resposta mais lenta quando comparado com o controlador proporcional. Assim, o controlador PI opera muito bem quando não são necessárias ações rápidas de controle e em sistemas com longos tempos mortos (atrasos antes do efeito da ação de controle sobre a variável do processo).

Embora remova o desajuste ou erro em regime estacionário, a ação de controle integral pode resultar em uma resposta oscilatória com amplitude lentamente decrescente ou crescente, ambas indesejáveis (OGATA, 2003).

Muitas vezes, quando as exigências não são muito severas, o controlador proporcional - integral é suficiente para fazer a maioria dos

controles de processos. É considerado um controlador extremamente robusto porque resolve o problema do erro estacionário remanescente e os problemas de oscilação encontrados nos controladores liga-desliga (ASTRÖM e HÄGGLUND, 1995). Esta é a razão de ele ser tão comum na indústria, utilizado na maioria das plantas industriais (CHEN e MUJUMDAR, 2008).

Para alguns sistemas de controle que operam com sinais de erro que variam de forma extremamente rápida, 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 (MONTEIRO, 2002). A fim de corrigir variações bruscas no sistema, introduz-se nele um elemento derivativo.

3.4.4. Controlador proporcional e derivativo

Para corrigir variações bruscas no sistema, introduz-se nele um elemento derivativo, capaz de prever o que poderá ocorrer com o sinal de erro e atuar de forma preventiva, aumentando a estabilidade do sistema (OGATA, 2003). Entretanto, o controle derivativo é insensível a sinais de erro constantes ou de variação lenta e, conseqüentemente, não é utilizado sozinho, mas combinado com outras formas de controle.

Em um controlador proporcional-derivativo (PD), a ação de controle derivativa antecipa o erro e inicia uma ação corretiva, tendendo a aumentar a estabilidade do controle proporcional (OGATA, 2003). Isso ocorre porque, embora a ação de controle derivativa não afete diretamente o erro em regime estacionário, ela introduz amortecimento no sistema e, portanto, permite o uso de um valor maior de ganho, resultando em melhoria na precisão em regime estacionário.

Uma desvantagem do controlador proporcional e derivativo é a sua alta sensibilidade aos ruídos, devido ao elevado ganho que apresenta quando opera em altas frequências (MONTEIRO, 2002). Devido a esta característica, a ação de controle derivativa não deve ser utilizada em sistema onde haja a presença de ruídos no sinal de saída. Nessas situações, um controlador PI deverá ser utilizado (CHEN e MUJUMDAR, 2008).

3.4.5. Controlador proporcional integral e derivativo

A combinação das ações proporcional, integral e derivativa para gerar um só sinal de controle, dá origem ao controlador proporcional-integral-derivativo ou simplesmente PID, como é mais comumente chamado. O sinal de controle gerado pelo controlador PID é dado genericamente de acordo com a Equação 3.18 (ASTRÖN e HÄGGLUND, 1995):

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int e(t) dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3.18)$$

em que:

τ_d - Constante de tempo de derivação do controlador, s.

O objetivo é aproveitar as características de cada uma destas ações para obter uma melhora tanto no comportamento transitório como no regime permanente do sistema controlado.

Assim, a ação 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 a parcela derivativa produz um sinal proporcional à taxa de variação do erro aumentando a velocidade de atuação (MONTEIRO, 2002). O controle PID é indicado para processos com pequenos tempos mortos e sinais de erro tanto em regime estacionário quanto transiente.

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_p , a constante de tempo de integração, τ_i e a constante de tempo de derivação, τ_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 (sintonia) dos parâmetros do sistema de controle PID como, por exemplo, o método de Ziegler–Nichols ou o de Cohen–Coon, além do método de tentativa e erro (MONTEIRO, 2002; ASTRÖN e HÄGGLUND, 1995).

Porém, de uma maneira geral, pode-se dizer que:

- Aumentando-se o ganho proporcional, a velocidade de atuação do sistema de controle aumenta, mas a sua estabilidade diminui.
- Aumentando-se a constante de tempo de integração, a velocidade de atuação do sistema de controle diminui, mas aumenta-se a sua estabilidade.
- Aumentando-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 τ_i muito elevada, τ_d nula, e ajusta-se K_p até conseguir-se um controle aceitável. Em seguida, reduz-se τ_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_p .

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 (ASTRÖN e HÄGGLUND, 1995).

3.4.6. Controladores adaptativos

Alguns processos industriais são, normalmente, bastante complexos, não lineares e com dinâmicas que variam ao longo do tempo. Como os controladores PID possuem parâmetros fixos, estes podem ser sensíveis a distúrbios externos e variações paramétricas do sistema controlado, uma vez que os mesmos são projetados para um ponto de operação ou uma pequena faixa em torno do ponto de operação;

A robustez pode ser melhorada através da utilização de controladores adaptativos. Os controladores adaptativos podem ser visualizados como uma evolução dos controladores PID convencionais. Nesses controladores, as variações na dinâmica do processo ou em torno do ponto de operação são monitoradas e os parâmetros de controle são devidamente ajustados para que o sistema tenha um desempenho o mais próximo possível do proposto, de acordo com as condições de operação e funcionamento para as quais o sistema se apresenta.

3.4.7. Estratégias de controle em um sistema de secagem

As exigências fundamentais de um sistema de controle para secagem de produtos agrícolas são (LIU e BAKKER-ARKEMA, 2001b):

- Estabilidade - o sistema não deve oscilar abruptamente, isto é, as oscilações deverão ser limitadas.
- Precisão – os valores das variáveis controladas devem estar próximos aos seus valores desejados.
- Robustez - o sistema de controle deve ser capaz de operar adequadamente dentro de uma ampla faixa de condições.
- Tempo de resposta – uma súbita mudança nos valores das variáveis de entrada ou saída devem ser rapidamente compensadas pelo controlador.

Muitos autores têm trabalhado com controle automático de secadores utilizando estratégias com significativas diferenças, dependendo do tipo de secador, características do produto e objetivos específicos de secagem (LIU e BAKKER-ARKEMA, 2001a; LIU e BAKKER-ARKEMA, 2001b; LIU e BAKKER-ARKEMA, 2001c; BUTTS et al., 2002; DIDRIKSEN, 2002; ABDEL-JABBAR et al., 2005; ARJONA et al., 2005; SRZEDNICKI et al., 2006; ORTEGA et al., 2007; ZANOELO et al., 2008;).

Normalmente, as metas para o controle de um secador são (ARJONA et al., 2005; CHEN e MUJUNDAR, 2008):

- Manter o teor de água final do produto entre limites especificados.
- Maximizar a capacidade de secagem.
- Minimizar o consumo de energia.
- Minimizar os efeitos de perturbações.
- Manter a temperatura do produto abaixo de um limite para evitar sua degradação térmica.

As estratégias de controle podem variar desde um controle PID elementar (WHITFIELD, 1986; ARJONA et al., 2005; ZANOELO et al., 2008), controles preditivos baseados em modelos de secagem (DIDRIKSEN, 2002; LIU e BAKKER-ARKEMA, 2001b), controle preditivo usando redes neurais (LIU et al., 2007), sistemas de controle adaptativos (PÉREZ-CORREA et al., 1998), sistemas de controle nebulosos (ZHANG e LITCHFIELD, 1993), dentre outros (ABDEL-JABBAR et al., 2005; SAVARESI et al., 2001).

Diante do exposto, observa-se que existem várias estratégias possíveis de serem implementadas com o intuito de controlar as variáveis de um sistema de secagem de produtos agrícolas. Dentre essas variáveis, destacam-se: teor de água final do produto, percentagem de reaproveitamento do ar, fluxo e temperatura do ar de secagem.

As estratégias de controle podem ser implementadas por meio de um programa computacional desenvolvido em linguagem de Programação Visual, tal como Delphi, C++ ou Java. A grande vantagem da utilização de um microcomputador é que várias malhas podem ser controladas pelo mesmo programa ao mesmo tempo. Além disso, qualquer modificação nos ajustes do sistema de controle é feita atuando-se no programa computacional e não na sua estrutura física (MONTEIRO, 2002).

No presente trabalho, o desenvolvimento e implementação do sistema de controle automático, para monitorar e controlar a operação de um secador de produtos agrícolas com reaproveitamento do ar de exaustão, será baseado em um sistema de aquisição de dados em tempo real, que utiliza dispositivos digitais endereçáveis.

3.5. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

3.5.1. Considerações gerais

A aquisição de dados, por meio de computadores pessoais ou industriais, consiste em obter informações de algum processo físico por meio da medição de suas grandezas, que serão digitalizadas de forma a permitir a aplicação de algum tipo de processamento matemático que irá torná-lo compatível, para fim de comparação, com grandezas padronizadas. Depois desta etapa, os dados serão analisados e armazenados.

A aquisição de dados, utilizando-se de computadores pessoais ou industriais, é o processo pelo qual um fenômeno (físico ou químico) real é medido, transformado em um sinal elétrico proporcional e finalmente convertido em um formato digital para posterior visualização, armazenamento, processamento e análise (BRAGA, 2008).

Qualquer sistema de aquisição irá apresentar alguns blocos, ou elementos funcionais básicos. Na Figura 3.6, apresentam-se os principais elementos funcionais de um sistema de aquisição de dados: sensores, circuitos de condicionamento de sinal, conversão analógico-digital e equipamentos de processamento, compostos por computadores e software de aquisição. Cada elemento funcional vai afetar a exatidão do sistema total de medição e a correta obtenção dos dados do processo físico que se pretende monitorar e, ou, controlar.

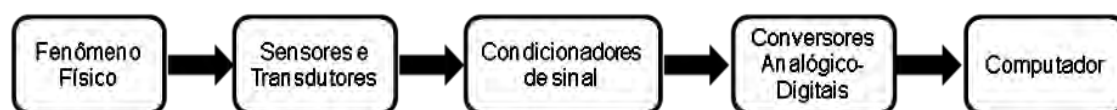


Figura 3.6 - Principais elementos funcionais de um sistema de aquisição de dados.

A seguir, são abordadas, de forma resumida as principais funções de cada um destes elementos.

Os sensores e transdutores fornecem a ligação direta entre o mundo real e o sistema de aquisição de dados, convertendo sinais de grandezas físicas em sinais elétricos (tensões ou correntes) apropriados para os condicionadores de sinais e, ou, os equipamentos de aquisição de dados. A escolha dos sensores

é parte fundamental da definição de um sistema de aquisição de dados porque será diretamente responsável pela sua eficiência e precisão (BRAGA, 2008).

Atualmente, existem sensores disponíveis para a medição de quase todas as grandezas físicas existentes. Por exemplo, para a medição de temperatura existem os termopares, as termorresistências, os termistores e os sensores eletrônicos (junção de semicondutores), que convertem a temperatura do meio com o qual estão em contato num sinal analógico proporcional. Para a medição de forças e tensões, existem as células de carga (extensômetros); para a medição de pressão, existem diversos tipos de transdutores de pressão.

Os sensores nem sempre têm as características elétricas necessárias para ser utilizado diretamente em um sistema de aquisição de dados e de controle. Normalmente, o sinal de saída do sensor deve ser condicionado antes da sua leitura no sistema de aquisição de dados. Isto, geralmente, é realizado por meio de um circuito condicionador que produz um sinal adequado que possa ser lido pelos conversores analógico-digitais (CAD) do sistema de aquisição de dados.

Existem vários tipos de condicionamentos que podem ser utilizados: alteração de nível de sinal (amplificação e atenuação), linearização, conversão de grandezas, filtragem, casamento de impedância e isolamento (BRAGA, 2008).

Muitas vezes os termos sensor e transdutor são usados indistintamente. O transdutor é o instrumento completo que engloba o sensor e todos os circuitos de interface capazes de serem utilizados numa determinada aplicação. Os transdutores transformam uma grandeza física (temperatura, pressão, etc.) em um sinal de tensão ou corrente que pode ser facilmente interpretado pelos conversores analógico-digitais dos sistemas de aquisição de dados (THOMAZINI e ALBUQUERQUE, 2005).

O conversor analógico-digital (CAD) é o elemento responsável por traduzir o sinal elétrico da saída do circuito condicionador em uma representação numérica, formada por dígitos binários (*bits*), compatível com o processamento digital posterior.

Para a escolha do conversor, algumas condições devem ser observadas: o conversor deve suportar o nível máximo do sinal a ser

digitalizado e a taxa de variação do sinal deve ser compatível com a taxa de amostragem do conversor (BRAGA, 2008). Outra característica importante refere-se ao número de dígitos binários do CAD. Quanto maior o número de dígitos binários empregado na conversão analógico-digital, maior será a precisão da leitura efetuada pelo sistema de aquisição de dados.

Em sistemas industriais de grande porte, a aquisição de dados, o monitoramento e controle de processos, geralmente, são efetuados utilizando-se controladores lógicos programáveis (CLP's). Atualmente, com a evolução crescente dos computadores, os sistemas automáticos de aquisição de dados baseados em computadores tornaram-se uma opção popular e concreta para o desenvolvimento deste tipo de sistemas. Não obstante, os sistemas de aquisição baseados em computadores permitem definir o tipo de sinais de aquisição, a velocidade de aquisição, visualização, armazenamento, processamento dos dados e o controle de processos.

Por meio do recurso de diversos programas computacionais é possível criar ambientes de trabalho bastante atrativos em diversos tipos de aplicações, tais como: aplicações laboratoriais de aquisição de dados e controle de processos, controle de processos industriais, monitoramento de condições ambientais, medições em geral, dentre outros. Assim, é possível construir sistemas de aquisição de dados adaptados especificamente às necessidades do processo em estudo, permitindo obter um sistema personalizado e economicamente vantajoso.

Os programas computacionais para aquisição de dados podem ser facilmente desenvolvidos especificamente para a aplicação desejada utilizando linguagens de programação genéricas, como C, C++, Delphi, Visual Basic, dentre outras, ou por meio de linguagens voltadas para esse tipo de utilização, como LabVIEW (desenvolvido pela *National Instruments*) ou VEE (desenvolvido pela *Agilent Technologies*).

Também existem programas comerciais prontos, disponíveis no mercado, para tarefas de aquisição e análise de dados, que são compatíveis com um grande número de dispositivos físicos (*hardwares*) fornecidos por diversas companhias. Dentre eles citam-se o Elipse e o Ifix.

Em muitas aplicações existentes, a aquisição de dados não se restringe apenas à obtenção e registro de dados, mas também compreende ações de

controle sobre os sistemas em estudo. As ações de controle usuais estão descritas no item 3.4. O controle corresponde ao processo em que os sinais digitais provenientes dos computadores são convertidos em sinais apropriados para atuar em diversos equipamentos de controle, por meio de elementos atuadores. Seguem-se exemplos de alguns atuadores:

- Válvulas (pneumáticas, hidráulicas, solenóides);
- Relés (estáticos, eletromecânicos);
- Cilindros (pneumáticos, hidráulicos);
- Motores (de passo, de indução, de corrente contínua, servo-motores, dentre outros);
- Solenóides;
- Aquecedores Elétricos.

Existem várias opções de sistemas de controle e aquisição de dados disponíveis no mercado. Todavia, os recursos da eletrônica e da engenharia de computação disponíveis atualmente possibilitam o desenvolvimento de sistemas específicos de monitoramento e aquisição de dados técnica e economicamente viáveis.

Neste trabalho, foi utilizada, em parte, uma rede de aquisição de dados com base na tecnologia 1-WireTM (AWTREY, 1997; MARTINS et al., 2006; LOPES et al., 2008) que proporciona este tipo de desenvolvimento, discutida a seguir.

3.5.2. O sistema 1-WireTM

O sistema 1-WireTM, 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, tais como sensores de temperatura, dispositivos de entradas e saídas digitais, conversores analógico-digitais, contadores, potenciômetros digitais, interfaces, memórias, dentre outros (MONTEIRO et al., 2002).

Basicamente, o sistema 1-WireTM consiste de três elementos principais: o dispositivo mestre e seu programa de controle, os cabos e conectores associados (meio físico de comunicação) e os dispositivos remotos da série 1-WireTM (Figura 3.7). Nestes dispositivos, toda a comunicação é feita por meio de uma rede que usa um protocolo de comunicação bidirecional (AWTREY, 1997).

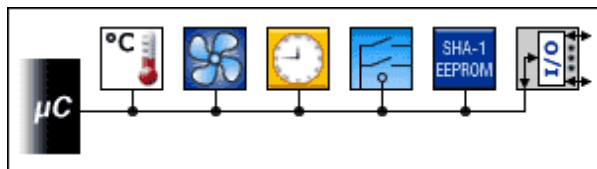


Figura 3.7 – Ilustração de um sistema 1-WireTM.

Normalmente, a transmissão de dados ocorre por meio de um condutor e, além deste, existe um condutor específico para fornecimento de energia (alimentação) aos dispositivos remotos e outro para o aterramento da rede. Por definição, o sistema 1-WireTM possui apenas um condutor no qual são conectados todos os dispositivos da série 1-WireTM, já que, por convenção, o condutor de referência ou aterramento não é considerado.

O fornecimento de energia para o sistema 1-WireTM pode ser realizado por duas maneiras: *alimentação parasita*, na qual os dispositivos são alimentados a partir da própria linha de dados, sendo necessário somente dois condutores; ou *alimentação externa*, em que são necessários três condutores, além de uma fonte de alimentação regulada de $5 V_{CC}$. Quando muitos dispositivos escravos e, ou, extensos comprimentos de fios condutores são empregados, recomenda-se a utilização da alimentação externa, de forma a evitar problemas de interrupção na transmissão de dados (STEIDLE NETO, 2005).

Uma condição prévia para o funcionamento de qualquer rede de transmissão de dados que empregue diversos dispositivos semelhantes é a existência de endereços ou códigos de identificação. Todo dispositivo 1-WireTM possui um endereço de identificação único (ID) de 64 dígitos binários (64 *bits* ou 8 *bytes*) seqüenciais, definidos pelo própria fabricante, que o diferencia na rede em que está conectado e exclui a possibilidade de conflitos durante a transmissão de dados em redes com diversos dispositivos, tornando cada dispositivo desta rede um dispositivo digital endereçável (DDE).

Assim, um mesmo tipo de dispositivo poderá ser utilizado para aplicações diferentes. Considere como exemplo, um secador de produtos agrícolas constituído por um sistema de ventilação e um sistema de aquecimento. Uma chave digital poderá acionar o sistema de ventilação e outra chave idêntica poderá acionar o sistema de aquecimento, no local de funcionamento. Ou um conversor analógico-digital (CAD) poderá ser utilizado para medição da umidade relativa do ar, enquanto um segundo pode ser responsável pelo monitoramento do fluxo de ar de secagem.

O endereço de identificação único (ID) ou número serial de cada DDE é a chave para o barramento mestre interpretar qual dos vários DDE's está sendo acessado. Na Tabela 3.2, tem-se um exemplo de código gravado nos componentes 1-Wire™.

Tabela 3.2 - Conteúdo do código serial do protocolo 1-Wire™ e exemplo de código

Redundância cíclica	Endereço do dispositivo	Família do dispositivo
8 bits – CRC	48 bits – NÚMERO SERIAL	8 bits – FAMÍLIA
5F _H	0000005B61F4 _H	26 _H

Neste endereço, os oito dígitos binários (*bits*) mais significativos constituem o teste de redundância cíclica (*Cyclic Redundancy Check- CRC*). Esta sequência de dígitos binários é utilizada para verificar a integridade dos dados recebidos. Os oito dígitos binários menos significativos representam o número identificador da família à qual pertence o dispositivo. O fabricante fez uma divisão dos dispositivos em várias famílias, segundo a função de cada um. A Tabela 3.3 contém os códigos de família dos dispositivos 1-Wire™ utilizados neste trabalho.

Tabela 3.3 - Famílias de dispositivos 1-Wire™ utilizados neste trabalho

Dispositivo	Descrição	Família
DS18S20	Sensor de temperatura	10 _H
DS2438	Monitor de Bateria Inteligente - CAD	26 _H
DS2890	Potenciômetro Digital	2C _H
DS2406	Chave Digital Endereçável	12 _H
DS2760	Monitor de Bateria de alta precisão - CAD	30 _H
DS9490R	Adaptador 1-Wire™ / USB	81 _H

Finalmente, os 48 dígitos binários restantes constituem o número seqüencial particular de cada dispositivo. São estes que permitem a identificação individual do dispositivo.

O ID permite também que múltiplos DDE's sejam colocados no mesmo cabo, reduzindo-se os custos de instalação e de manutenção. Estes dispositivos podem ser ligados ao mestre em diversos tipos de topologias, para comunicação e instrumentação. Esta arquitetura confere ao sistema de aquisição de dados, versatilidade, simplicidade e um controle rígido, porque nenhum dispositivo 1-Wire™ conectado à rede pode estabelecer comunicação se não houver uma requisição do mestre e nenhuma comunicação é permitida entre os escravos (AWTREY, 2008a).

O protocolo de comunicação do sistema 1-Wire™ utiliza níveis lógicos convencionais CMOS/TTL (*Complementary Metal Oxide Silicon/Transistor Transistor Logic*), no qual o nível lógico zero é representado por uma tensão máxima de 0,8 V e o nível lógico um por uma tensão mínima de 2,2 V (AWTREY, 1997; MONTEIRO et al., 2002). Tanto o mestre quanto os escravos são configurados como transceptores (transmissores - receptores) permitindo que os dados fluam de maneira seqüencial em ambas as direções, porém em apenas uma direção a cada vez (*half-duplex*).

O procedimento de leitura/escrita entre o escravo e o mestre é realizado por meio de uma seqüência de comandos. Estes comandos não são iguais para todos os componentes. No entanto, há três passos em comum a todos eles:

- **Comando de inicialização:** consiste na transmissão de um pulso de reinicialização pelo mestre, seguido de um pulso de presença enviado pelo escravo.
- **Comando de leitura da ROM (Read Only Memory – memória de leitura apenas do escravo):** estes comandos iniciam depois de o mestre haver recebido o pulso de presença dos escravos. Basicamente, este bloco de comandos serve para verificar quantos e quais componentes estão presentes no barramento, além de verificar a existência de algum componente em situação anormal (neste caso o mestre recebe um pulso, conhecido como pulso de alarme, específico para indicar anormalidades no escravo). Assim, por exemplo, dados enviados pelo sensor de temperatura DS18S20 são diferentes dos enviados pelo conversor analógico digital (CAD) DS2438, por pertencerem a famílias diferentes.
- **Comandos das funções de memória específicos de cada componente:** este bloco de comandos depende do componente 1-Wire™ instalado na rede. Por meio destes comandos, é iniciado o processo de comunicação entre o mestre e o escravo. Esta etapa inicia quando o escravo foi totalmente identificado pelo mestre, tanto no tocante à presença, como no tocante ao tipo de componente. Nesta etapa, apenas um escravo está ativo - aquele selecionado pelo mestre, por meio do programa, para a comunicação. As diferenças de dados enviados pelos componentes relacionam-se às funções de cada um. Por exemplo, o sensor de temperatura DS18S20 envia dados referentes à temperatura em 13 dígitos binários, enquanto que o CAD DS2438 envia dados referentes à grandeza analógica monitorada (pressão, umidade relativa, dentre outras) em 10 dígitos binários, o que torna os sinais diferentes.

No sistema proposto, um microcomputador será o responsável por toda a comunicação e operação dos dispositivos. Nele deverá estar instalado o programa de controle e gerenciamento da rede. O programa de controle deverá ser responsável por coletar os dados de cada sensor e tomar as decisões de controle para atuar nos equipamentos por intermédio de seus respectivos atuadores.

O número serial dos dispositivos utilizados é incorporado ao programa computacional de controle para que seja possível identificá-los na rede 1-Wire™. Isto significa que, se, eventualmente, algum componente da rede for trocado, será necessário incorporar o número serial do novo componente ao programa computacional, antes de poder utilizá-lo.

Por meio de um adaptador conectado à porta serial (Figura 3.8) ou ao barramento serial universal, USB, (Figura 3.9) do computador, cada dispositivo utilizado será reconhecido pelo protocolo 1-Wire™ que permitirá o controle operacional de cada um desses dispositivos.



Figura 3.8 - Adaptador DS9097U - RS232 (Serial)/1-wire™ (RJ11)



Figura 3.9 - Adaptador DS9490R – USB/1-Wire™ (RJ11).

Um exemplo de conexão dos dispositivos digitais endereçáveis (DDE's) a uma rede 1-Wire™ é ilustrado na Figura 3.10.

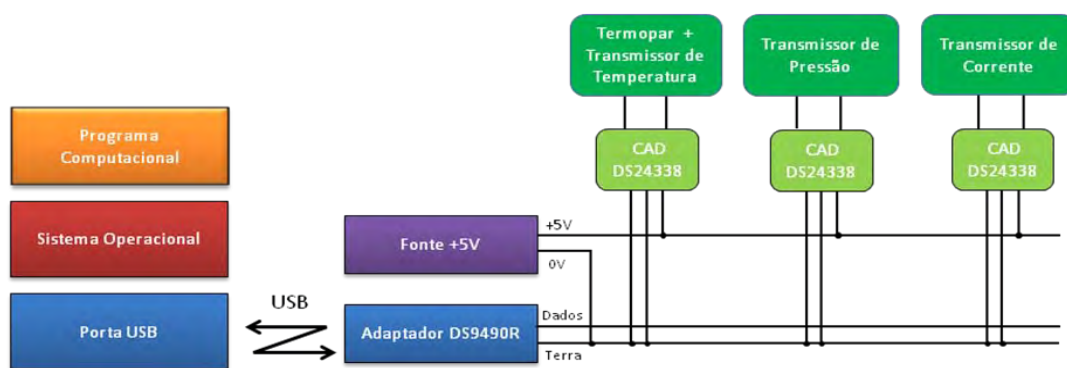


Figura 3.10 – Exemplo de conexão dos DDE's ao computador.

A redução do número de cabos usados, comuns entre outras tecnologias, para comunicação do fluxo de informações entre o computador e os dispositivos conectados a ele, garantem ao sistema 1-Wire™ maior confiabilidade durante a comunicação de dados e boa redução de consumo de energia (MONTEIRO et al, 2002; PINTO, 2005; LOPES et al., 2008; MONTE et al., 2008).

As principais vantagens dessa rede de transmissão de dados são: a sua versatilidade, o seu baixo custo operacional e a ampla documentação disponível.

A principal desvantagem para desenvolvimento de um sistema baseado nos componentes da tecnologia 1-Wire™ está na dificuldade de aquisição deles, uma vez que essa tecnologia ainda não é muito difundida no Brasil e existem poucos revendedores dos dispositivos no país, tornando necessária, na maioria das vezes, a sua importação (LOPES et al., 2007).

O sistema proposto com tecnologia 1-Wire™ utilizando-se dispositivos digitais endereçáveis (DDE) tem se mostrado satisfatório e confiável e, assim, diversos setores têm utilizado essa tecnologia por ser extremamente compacta, confiável, versátil e de baixo custo. No âmbito agrícola, sistemas de aquisição de dados e controle de processos agrícolas, tais como sistema de aeração de grãos (LOPES et al., 2008; MONTEIRO et al., 2002), sistema de monitoramento climático (PINTO, 2005; MARTINS et al., 2006), sistema de secagem em camada fina (MONTE et al., 2008) e sistema de controle de câmara climática (ALENCAR, 2006) têm sido desenvolvidos com base nesta tecnologia.

Steidle Neto (2003) estudou a avaliação do sistema 1-WireTM para aquisição de dados de temperatura em instalações agrícolas. Em seu trabalho, o sistema 1-WireTM para aquisição de dados de temperatura mostrou ser um sistema de monitoramento automático confiável, versátil, de alta exatidão e de baixo custo, comparado aos demais sistemas de aquisição de dados presentes no mercado.

Segundo Monte et al. (2008), a produção dos dispositivos para medição (temperatura, umidade relativa e fluxo de ar) e para comando dos equipamentos é simples. De tamanhos relativamente reduzidos, podem ser colocados dentro de pequenas caixas e fixados bem próximos aos pontos de medição e, ou, de atuação.

3.6. CARACTERÍSTICAS DE SENSORES EM SISTEMAS AUTOMÁTICOS

Há uma série de características relacionadas aos sensores que devem ser levadas em consideração na seleção do instrumento mais indicado para uma dada aplicação (THOMAZINI e ALBUQUERQUE, 2005; IBRAHIM, 2006), as quais são apresentadas a seguir.

Tipo de saída - As saídas podem ser classificadas em digital ou analógica. Em um sensor digital a saída só pode assumir valores “0” ou “1” lógicos (também denominada saída liga-desliga). Indicam se a grandeza física atingiu um valor predefinido, sendo largamente empregados em controle de seqüência de eventos com o uso de controladores lógicos programáveis (CLP's). Um sensor analógico possui saída contínua, sendo que a saída é quase uma réplica da grandeza física de entrada.

Linearidade - Esse conceito se aplica aos sensores analógicos. É o grau de proporcionalidade entre o sinal gerado e a grandeza física. Quanto maior, mais fiel é a resposta do sensor ao estímulo. Os sensores mais usados são os mais lineares, conferindo mais precisão ao sistema de controle. Os não lineares são usados em faixas limitadas, em que os desvios são aceitáveis, ou com adaptadores especiais, que corrigem o sinal.

Faixa de atuação ou alcance - É o intervalo de valores da grandeza em que pode ser usado o sensor, sem destruição ou imprecisão.

Sensibilidade (ganho) - É a razão entre o sinal de saída e de entrada para um dado sensor ou transdutor. No caso de sensores analógicos, a sensibilidade está ligada à relação entre uma variação na grandeza em questão e a variação na medida fornecida pelo instrumento, ou seja, um sensor muito sensível é aquele que fornece uma variação na saída para uma pequena variação da grandeza medida.

Exatidão - Consiste no erro da medida realizada por um transdutor em relação a um medidor padrão. Segundo o Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (INMETRO, 2008), exatidão é a aptidão de um instrumento de medição para dar respostas próximas a um valor verdadeiro. A exatidão é um conceito qualitativo e não deve ser utilizado como precisão.

Precisão - É a característica relativa ao grau de repetibilidade do valor medido por um transdutor. Apesar de as definições serem atualmente padronizadas, existem autores e, principalmente, fabricantes que se referem a essa característica como sendo o erro relativo máximo que o dispositivo pode apresentar. Todo sensor possui um erro de leitura que pode ser maior ou menor conforme o tipo de grandeza medida, as condições de operação do sensor, estado de conservação e, é claro, a sua qualidade. Um exemplo de grandeza difícil de ser medida com precisão é a umidade relativa, e por isso a maioria dos sensores comerciais apresenta um erro de leitura entre 2% e 10%.

Estabilidade - Está relacionada com a flutuação do sinal na saída do sensor. Se a flutuação for muito alta, ou seja, se o sensor possuir uma baixa estabilidade, a atuação do controlador que utiliza esse sinal pode ser prejudicada. a estabilidade consiste na aptidão de um instrumento de medição em conservar constantes suas características metrológicas ao longo do tempo (INMETRO, 2008).

Velocidade de resposta ou tempo de resposta - Trata-se da velocidade com que a medida fornecida pelo sensor alcança o valor real do processo. Está relacionada com a constante de tempo do instrumento. O tempo de resposta é o intervalo de tempo entre o instante em que um estímulo é submetido a uma variação brusca e o instante em que a resposta atinge e permanece dentro de limites especificados em torno do seu valor final estável (INMETRO, 2008). Em sistemas realimentados, o ideal é que o sensor utilizado tenha uma resposta

instantânea, pois uma resposta lenta pode prejudicar muito a eficiência do sistema de controle e até impedir que o sistema funcione satisfatoriamente.

Outras características - Além das descritas anteriormente, devem-se levar em consideração na especificação dos sensores as seguintes características: facilidade de manutenção, custo, calibração, dimensões, faixa de trabalho (condições de operação), encapsulamento, histerese, vida útil e consumo de energia.

4. METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Instrumentação Eletrônica do Curso de Automação Industrial do Instituto Federal de Minas Gerais (IFMG), Campus de Ouro Preto e no setor de Energia na Agricultura do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Alguns testes foram realizados na Empresa Conscientec, na cidade de Belo Horizonte - MG.

O trabalho foi desenvolvido seguindo quatro etapas, descritas a seguir.

1. Desenvolvimento de um protótipo de secador de produtos agrícolas com reaproveitamento do ar de secagem.
2. Desenvolvimento e implementação de um sistema de aquisição de dados em tempo real.
3. Desenvolvimento e implementação de um sistema de controle automático para o protótipo de secador proposto.
4. Testes de validação do sistema proposto.

4.1. PROTÓTIPO DO SISTEMA DE SECAGEM

Foi projetado e construído um protótipo de secador em camadas fixas, com sistema de recirculação do fluxo de ar de secagem, constituído por três bandejas, com opção para testes em camada fina e em camada espessa, conforme ilustrado pelo desenho mostrado na Figura 4.1.

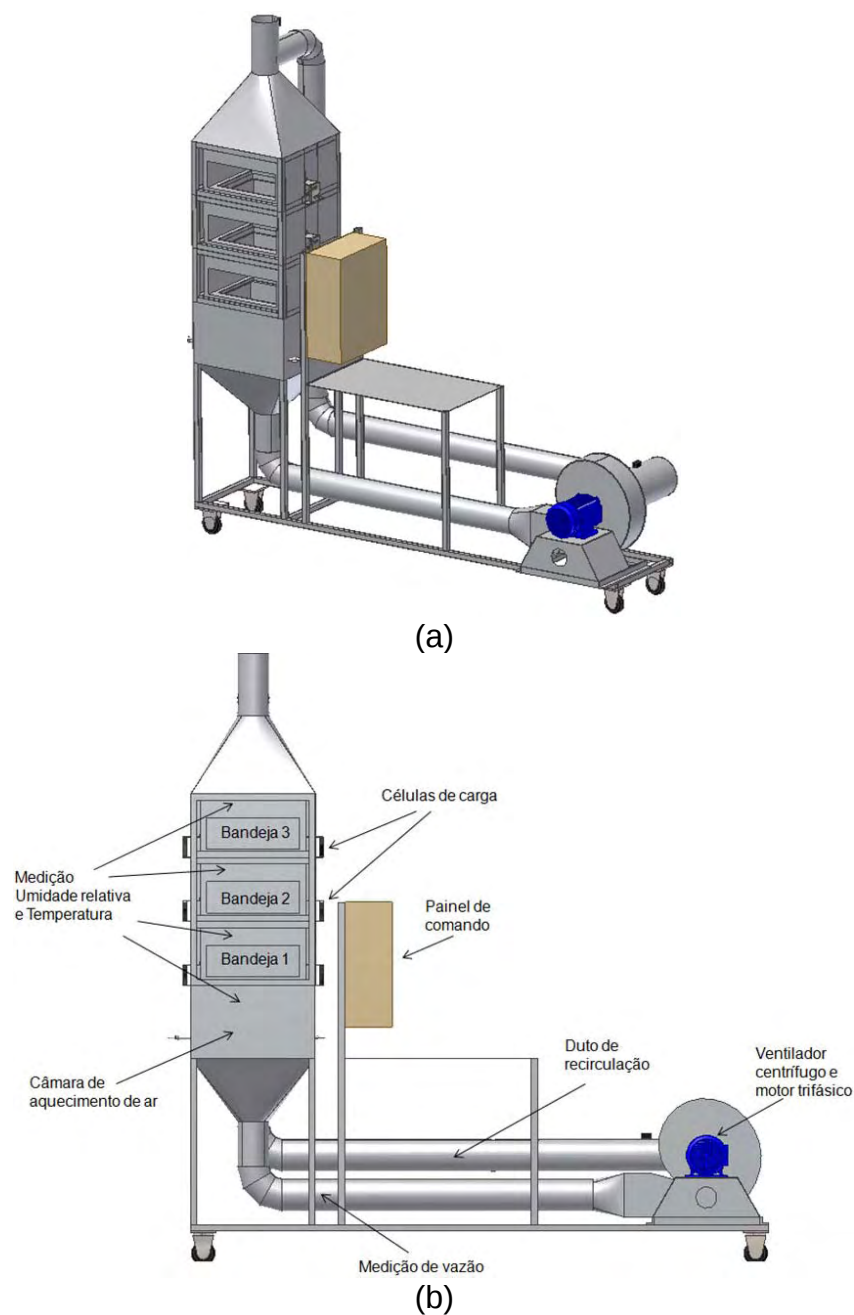


Figura 4.1 – Desenho do protótipo do secador: (a) vista geral e (b) perspectiva com algum detalhe.

A câmara de secagem do secador é constituída de três bandejas, com dimensões de $27 \times 27 \times 8,5$ cm. Cada bandeja possui, portanto, capacidade máxima de secagem para 6.196 cm^3 de produto e representa uma camada da massa de produtos a ser seco. Cada uma das bandejas é encaixada em uma estrutura fixa, apoiada em duas células de carga, permitindo a determinação da massa de produto em qualquer instante e, conseqüentemente, a determinação da variação do teor de água do produto em função do tempo, o que constitui a sua curva de secagem. Na estrutura fixa, foi construído um compartimento para colocação de óleo (selo de óleo), construído de forma a evitar que o ar escape pelas laterais de cada bandeja (Figura 4.2).

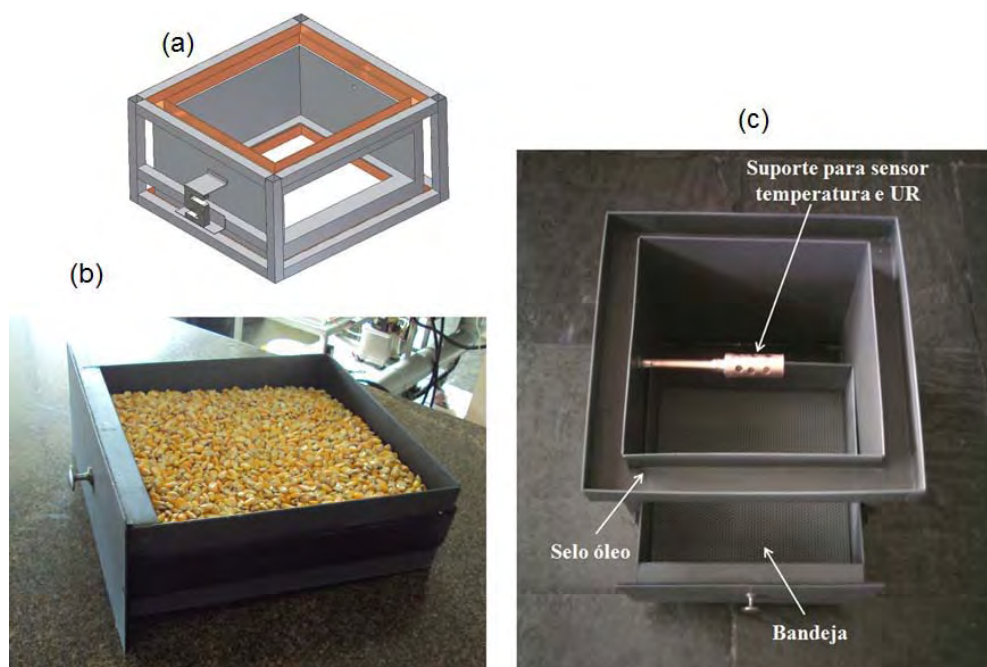


Figura 4.2 – Bandejas e localização dos sensores: (a) selo de óleo; (b) bandeja de secagem em detalhe; (c) detalhes do selo de óleo, bandeja e localização de sensores.

Para exaustão, recirculação e entrada de ar no secador foram instaladas três válvulas do tipo borboleta, acionadas eletronicamente por meio de servomotores. A válvula de exaustão foi instalada na tubulação de saída de ar. Próximo à entrada de ar, foram instaladas outras duas válvulas, sendo uma responsável pelo controle da entrada de ar ambiente e a outra, pela recirculação de parte do ar de exaustão. A entrada da mistura de ar ambiente

com ar recirculado no secador foi realizada por meio de um ventilador centrífugo acoplado a um motor de indução trifásico de 0,5cv (368 W).

O sistema de aquecimento do ar de secagem foi constituído de quatro resistências elétricas com potência nominal de 800W quando alimentadas em tensão alternada de 220 V . Assim, o sistema possui a capacidade nominal de 3.200 W . A vista superior do sistema de aquecimento do ar de secagem é mostrada no desenho da Figura 4.3.

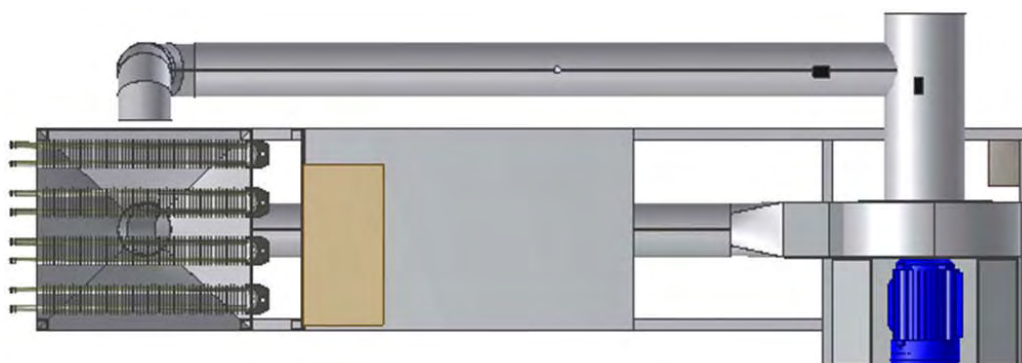


Figura 4.3 - Vista superior do secador de bandejas ilustrando as quatro resistências utilizadas para aquecimento do ar.

Com a finalidade de monitoramento e controle, foram distribuídos em posições específicas no interior do secador, sensores de temperatura, de umidade relativa e de pressão (para medição do fluxo de ar), além de dispositivos atuadores para controle da temperatura e do fluxo de ar, implementados com tecnologia 1-Wire™.

Foi também implementado um painel de controle, constituído por um circuito principal (ou de potência) e um de comando dos sistemas de aquecimento e de ventilação. Neste painel, encontram-se instalados disjuntores, chaves, botões, luzes de indicação, relés de proteção (falta de fase) e temporizado, contadores, bornes para ligação, fonte de alimentação para os circuitos eletrônicos de aquisição de dados e controle, controlador de temperatura. Além destes dispositivos, foi utilizado um inversor de frequência, da marca WEG, modelo CFW-08 Plus, para controle de velocidade do motor que aciona o ventilador.

Variando-se a frequência imposta ao inversor, pôde-se ajustar a velocidade do motor acoplado ao ventilador e, conseqüentemente, a vazão do ar de secagem.

Na parte frontal do painel de comando, foram instalados chaves para habilitação do modo de funcionamento (local ou remoto) dos sistemas de controle de temperatura e de vazão. Um controlador de temperatura, CT, modelo TH 91D 301, da marca Therma, montado na tampa frontal do painel de controle, foi instalado para visualização e controle da temperatura do ar de secagem, a partir do painel (controle local de temperatura).

Para os sistemas de aquecimento e de ventilação foram desenvolvidos circuitos de potência e de comando, alimentados pela rede trifásica por meio de um cabo PP $4 \times 4,0 \text{ mm}^2$. Desta forma, tensões alternadas de 220 V e de 127 V foram disponibilizadas para o funcionamento dos dispositivos que compõem o painel de comando.

No circuito de potência dos sistemas de aquecimento e ventilação (Figura 4.4), o disjuntor D1 atua protegendo o circuito inversor/motor contra curtos-circuitos e sobrecorrentes que eventualmente poderão comprometer esses equipamentos. Da mesma forma, o disjuntor D2 protege os dispositivos que compõem o sistema de aquecimento. Um terceiro disjuntor (D3), monofásico, foi utilizado para proteção e energização da fonte de corrente contínua, responsável pela alimentação do sistema de aquisição de dados, com dispositivos digitais endereçáveis e tecnologia 1-WireTM, e demais dispositivos eletrônicos.

Os contatores trifásicos C1 e C2 são responsáveis pela energização ou desenergização do inversor de frequência e do conversor de potência (CP), respectivamente, por meio da abertura ou fechamento dos seus contatos de potência.

O conversor de potência, montado fora do painel de comando, tem a função de controlar a potência disponível para as resistências de aquecimento, dispostas em configuração trifásica, ligadas em triângulo, permitindo a transferência de energia para cada uma das resistências em níveis controlados.

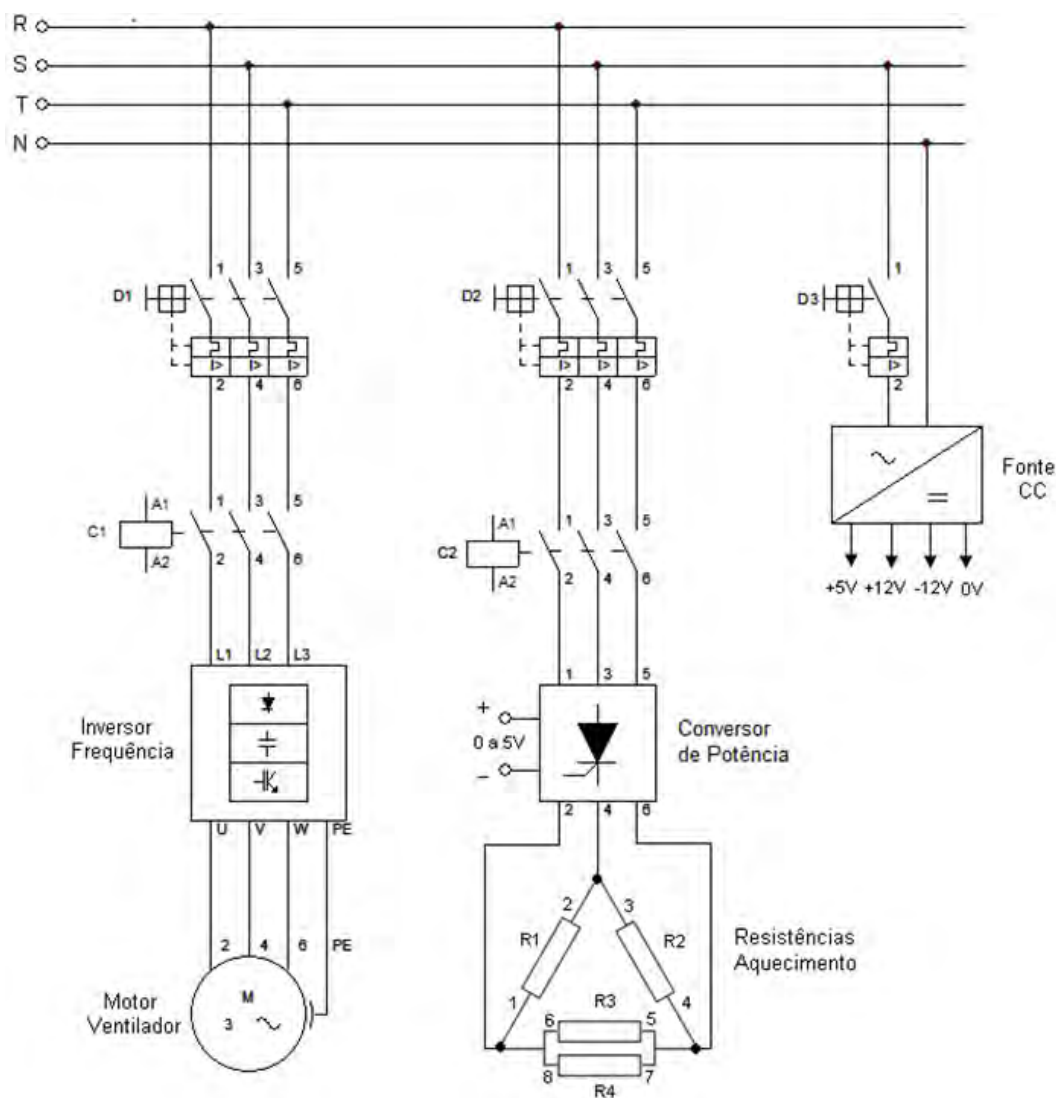


Figura 4.4 - Circuito principal ou de potência para sistema de aquecimento e de ventilação.

Nos testes experimentais, utilizou-se um conversor de potência microcontrolado baseado em triodos para corrente alternada (*TRIodes for Alternating Current – TRIAC's*), modelo TH 6200A-36, 220V/36A (THERMA, 2009). Neste modelo, a tensão alternada de saída para cada uma das resistências de aquecimento pode ser controlada pela aplicação de uma tensão contínua de 0 a 5 V em seus terminais de controle. No circuito de comando dos sistemas de ventilação e aquecimento (Figura 4.5), utilizou-se um relé de falta de fase com a função de proteção do sistema trifásico em caso de interrupção de quaisquer uma das fases, evitando-se, assim, sobrecargas de correntes nas fases restantes.

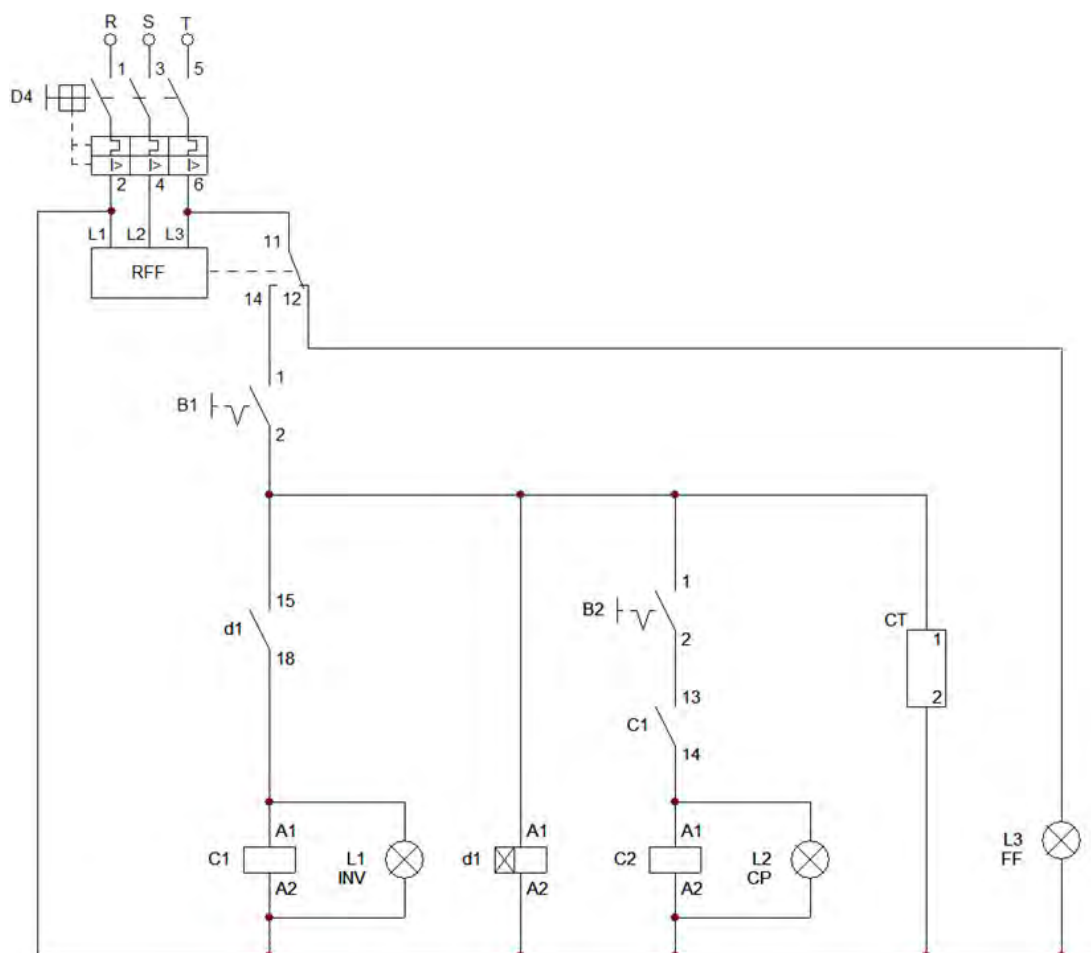


Figura 4.5 - Circuito de comando e sinalização para sistema de aquecimento e de ventilação do secador.

Quando todas as fases estão presentes, o relé é energizado, permitindo o funcionamento do sistema de aquecimento e ventilação, por meio do fechamento dos seus contatos normalmente abertos, NA, 11 e 14. Quando ocorre a falta de quaisquer uma das fases do sistema, o relé é desenergizado e os sistemas de aquecimento e ventilação são desligados por meio dos contatos normalmente fechados, NF, 11 e 12.

Nesse circuito, o botão B1 funciona como liga/desliga geral, enquanto que o botão B2 atua como liga/desliga para o sistema de aquecimento. Os sistemas de aquecimento e ventilação são ligados por meio da energização das bobinas dos contadores correspondentes (C1 e C2), depois do fechamento do contato normalmente aberto, NA, do relé de tempo d1. O funcionamento do contator C2 ficou condicionado à energização da bobina do contator C1, significando que o sistema de aquecimento não poderá funcionar com o inversor de frequência desenergizado.

O relé de tempo d1 foi utilizado com a função de religar todo o sistema, automaticamente, 30 segundos (selecionado no relé) depois de uma possível falta de energia, garantindo a retomada do funcionamento do sistema de secagem. O atraso de religamento é necessário para que o inversor de frequência possa voltar a operar normalmente depois de ser desenergizado.

O disjuntor trifásico D4 foi utilizado para proteção e energização do circuito de comando. Três lâmpadas de sinalização (L1, L2 e L3) foram utilizadas para indicação de inversor de frequência ligado (L1), controlador de potência energizado (L2) e falta de fase (L3).

4.2. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

4.2.1. Medição da temperatura e da umidade relativa do ar

As medições da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem foram realizadas por meio de dispositivos digitais endereçáveis (DDE) da tecnologia 1-Wire™, com base no circuito integrado DS2438, desenvolvido pela Dallas Semiconductor (MAXIM–DALLAS, 2009). Apesar de existirem outros sensores endereçáveis para medição de temperatura, tais como o DS1820, a escolha do DS2438 deve-se ao fato de que esse dispositivo contém dois conversores analógico-digitais (CAD's) para medição de tensão de sinais analógicos. O CAD principal desse dispositivo é capaz de efetuar leituras de 0 a 10 V, com 10 dígitos binários (10 *bits*), fornecendo resolução de 0,01 V.

Assim, utilizando-se um único DS2438 foi possível desenvolver um dispositivo digital endereçável conjugado para medição de temperatura e de umidade relativa do ar.

Foram desenvolvidos cinco circuitos idênticos para medição de temperatura e de umidade relativa do ar nos seguintes pontos do secador, conforme ilustrado na Figura 4.6:

1. Ar ambiente.
2. Ar de secagem.
3. Ar entre as bandejas 1 e 2.
4. Ar entre as bandejas 2 e 3.
5. Ar de exaustão.

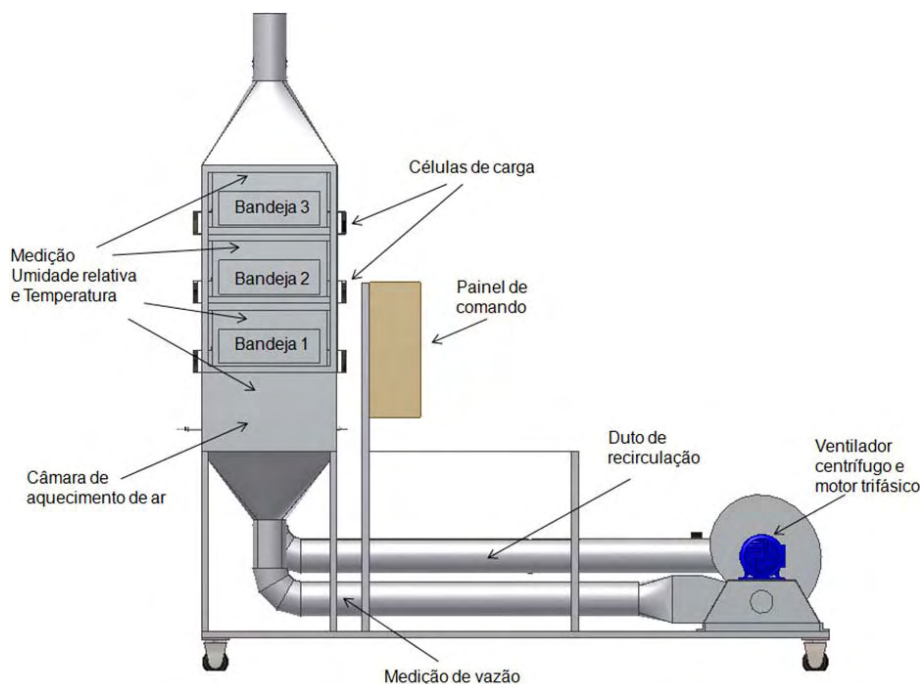


Figura 4.6 – Localização dos sensores de umidade relativa e de temperatura.

A medição da temperatura do ar foi realizada utilizando-se o sensor de temperatura interno de alta precisão do DS2438. Este sensor é capaz de fornecer valores digitais de 13 dígitos binários (13 *bits*) para cada dado medido, com resolução de 0,03125°C para temperaturas compreendidas entre -55°C e +125°C. A calibração deste sensor foi verificada por PINTO (2005).

A medição da umidade relativa do ar foi realizada conectando-se o sensor HIH-4000, fabricado pela empresa Honeywell, à entrada do conversor analógico-digital principal do DS2438. O sensor capacitivo HIH-4000 foi escolhido, dentre vários disponíveis no mercado, pelo fato de que ele possui uma resposta a variações de umidade bastante rápida, alta exatidão, alta linearidade, baixa histerese, grande estabilidade ao longo do tempo e medição em toda a faixa de umidade relativa (HONEYWELL, 2007), além de custo acessível. A máxima corrente elétrica de operação deste dispositivo é igual a 500 μA , sendo possível utilizá-lo com segurança em redes com tecnologia 1-Wire™.

No sensor HIH-4000, a umidade relativa medida varia linearmente com a tensão contínua obtida na sua saída, sendo esta tensão proporcional à tensão

de alimentação, V_{DD} . A alimentação típica desse sensor é de +5 V, podendo variar entre 4,0 e 5,8 V (HONEYWELL, 2007).

Como os sensores HIH-4000 são fornecidos com dados de calibração, foram obtidas equações para determinação da umidade relativa do ar. A Tabela 4.1 contém os valores de calibração fornecidos pelo fabricante, bem como as equações encontradas (incluindo o efeito da tensão de alimentação, V_{DD}) para cálculo da umidade relativa em função da tensão de saída para todos os sensores empregados.

Tabela 4.1 - Equações de calibração da umidade relativa (φ) em função da tensão de saída (V_φ) dos sensores HIH-4000 utilizados neste trabalho

Sensor	V_φ (V)		Sensibilidade $\left(\frac{mV}{\%}\right)$	Equação para determinação da Umidade Relativa do ar
	$\varphi = 0\%$	$\varphi = 75,3\%$		
1	0,800703	3,199577	31,8576	$\varphi = 156,948635 \left(\frac{V_\varphi}{V_{DD}} \right) - 25,13385$
2	0,797847	3,195893	31,8466	$\varphi = 157,002826 \left(\frac{V_\varphi}{V_{DD}} \right) - 25,05285$
3	0,795376	3,194299	31,8582	$\varphi = 156,945429 \left(\frac{V_\varphi}{V_{DD}} \right) - 24,96613$
4	0,794000	3,192566	31,8535	$\varphi = 156,968789 \left(\frac{V_\varphi}{V_{DD}} \right) - 24,92664$
5	0,801317	3,232478	32,2863	$\varphi = 154,864281 \left(\frac{V_\varphi}{V_{DD}} \right) - 24,81908$

De posse das equações de saída dos sensores contidas na Tabela 4.1, pôde-se obter uma única equação, para cálculo da umidade relativa do ar nos diversos pontos do sistema de secagem (Equação 4.1).

$$\varphi = 156,541436 \left(\frac{V_\varphi}{V_{DD}} \right) - 24,97927 \quad (4.1)$$

Estas equações são válidas para temperatura do ar igual a 25°C. Para obtenção dos valores de umidade relativa para temperaturas diferentes de 25°C, utiliza uma equação de correção, válida para todos os sensores da série HIH-4000 (HONEYWELL, 2007; AWTREY, 2008b).

$$\varphi_{\text{corr}} = \frac{\varphi}{1,0546 - 0,00216 T} \quad (4.2)$$

em que:

φ_{corr} - Umidade relativa corrigida em função da temperatura.

Para medição da umidade relativa é imprescindível, além da medição da tensão de saída do sensor de umidade, a medição da tensão de alimentação do sensor, V_{DD} , e da temperatura do sensor, para realização da compensação conforme as Equações (4.1 e 4.2. O dispositivo DS2438 permite as medições de todas essas grandezas, mostrando-se ideal para esse tipo de aplicação. Na Figura 4.7 encontra-se o esquema do circuito utilizado para a realização das medidas de temperatura e umidade relativa do ar nos pontos especificados anteriormente.

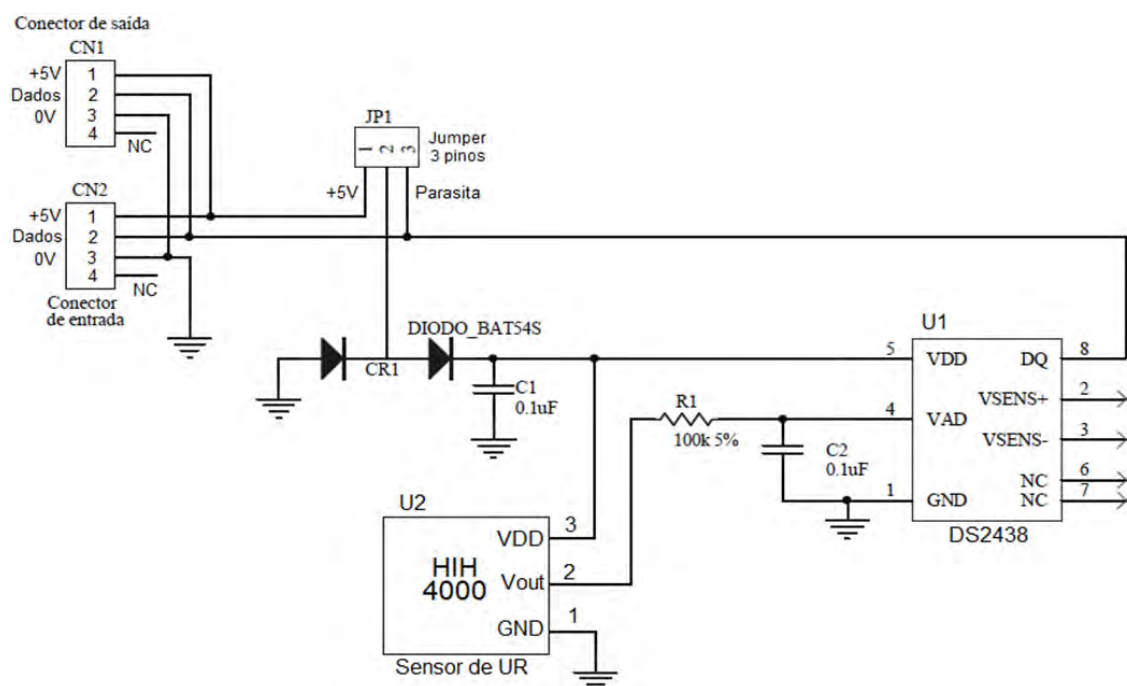


Figura 4.7 - Circuito para medição de umidade relativa usando o sensor de umidade HIH-4000 e o CAD DS2438.

Neste circuito, um dos diodos internos do CI BAT54S serve para proteger o circuito de sinais negativos. O diodo restante, juntamente com o capacitor C1, forma um retificador de meia onda que alimenta o sensor de

umidade e o dispositivo DS2438 por meio da linha de dados (alimentação parasita).

O circuito desenvolvido permite a escolha da alimentação (parasita ou externa) por meio da ponte (*jumper*) JP1. Com os terminais 1 e 2 fechados, a alimentação utilizada é de +5V. Fechando-se os terminais 2 e 3, trabalha-se com alimentação parasita. Em todas as medições, utilizou-se alimentação externa de +5V externa.

Um resistor, R1, de 100 k Ω e um capacitor, C1, de 0,01 μ F, constituíram um filtro passa-baixas, responsável por proteger a transmissão da tensão de saída do sensor de umidade ao DS2438, atenuando sinais de alta frequência.

Uma vez que cada dispositivo DS2438 possui um número de série próprio (ID), que o identifica, foi possível por meio do programa computacional desenvolvido, endereçá-los individualmente e monitorar os valores de temperatura e umidade relativa nos pontos especificados em tempo real (PINTO, 2005; MONTE et al., 2008, LOPES et al., 2008).

Como o sensor HIH-4000 é fotossensível, tomou-se o cuidado de protegê-lo contra a incidência de luz quando estava em operação. Em função da temperatura máxima de operação do HIH-4000 ser de 85°C, foi adotado que o sistema de medição conjunta de temperatura e umidade relativa do ar baseado no DS2438 poderia operar até no máximo 80°C, embora o sensor de temperatura do DS2438 pudesse medir temperaturas até 125°C, conforme sugere o fabricante (MAXIM-DALLAS, 2009).

4.2.2. Medição do fluxo de ar de secagem

O duto principal que leva o ar para as bandejas na câmara de secagem foi construído com diâmetro (D) igual a 0,10 m e comprimento (L) igual a 1 m. O comprimento deste duto foi escolhido de forma a equivaler a 10 diâmetros, como recomendado pela norma. Com o objetivo de homogeneizar o fluxo de ar, antes dos pontos de medição, foi instalado um homogeneizador de fluxo, a uma distância correspondente a 3,5 D, contados a partir da abertura de saída de ar do ventilador (Figura 4.8a). O homogeneizador foi construído em alvéolos

de seção quadrada, com lados iguais a 1,5 cm e espessura de 4,5 cm (Figura 4.8b).

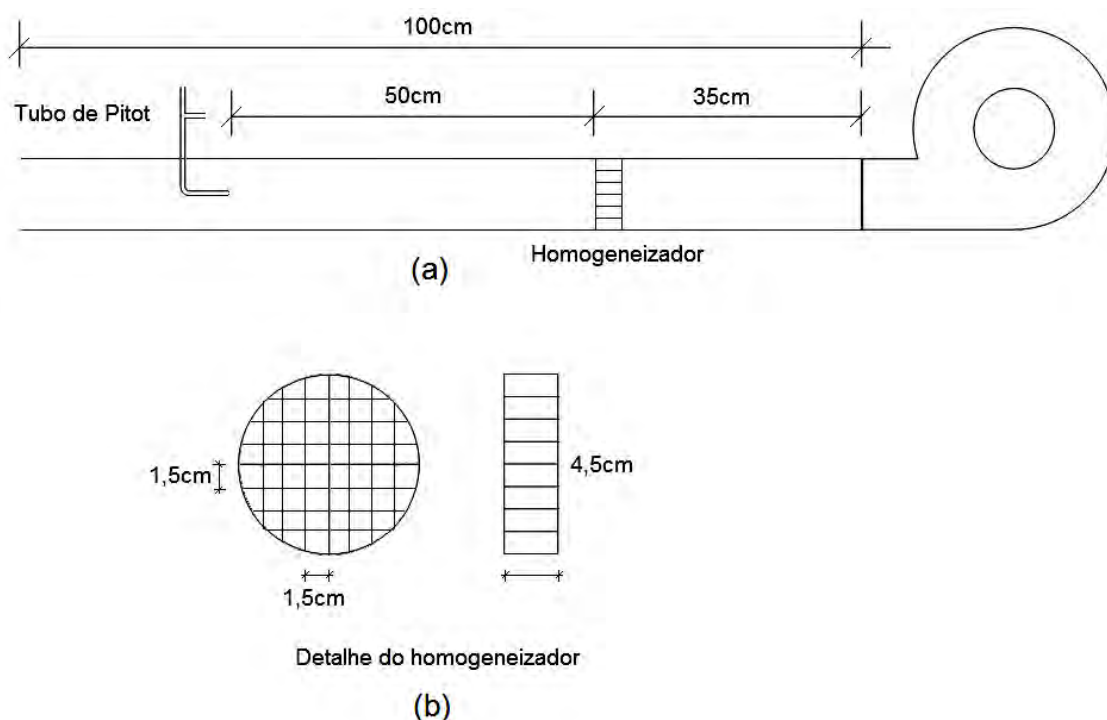


Figura 4.8 - Aspectos construtivos do duto onde foi inserido o tubo de Pitot.

O instrumento utilizado para medição da vazão de ar foi um tubo de Pitot estático, modelo TPL-03-300, da marca KIMO, que consiste em um tubo de Pitot tipo L, com diâmetro de 3 mm e comprimento de 300 mm. O tubo de Pitot foi inserido transversalmente no duto de alimentação de ar, a uma distância de, aproximadamente, 50 cm (cinco vezes o diâmetro) após o homogeneizador de ar.

O formato da ponta elipsoidal do tubo de Pitot possui um único orifício frontal para sentir a pressão total (P_{total}), enquanto que a pressão estática (P_{est}) é medida por meio de pequenos orifícios na parede do tubo externo (Figura 4.9). A diferença entre a pressão total e a pressão estática é definida como pressão dinâmica (P_{din}), que é a pressão decorrente da transformação da energia cinética do fluido em pressão (DELMÉE, 1995).

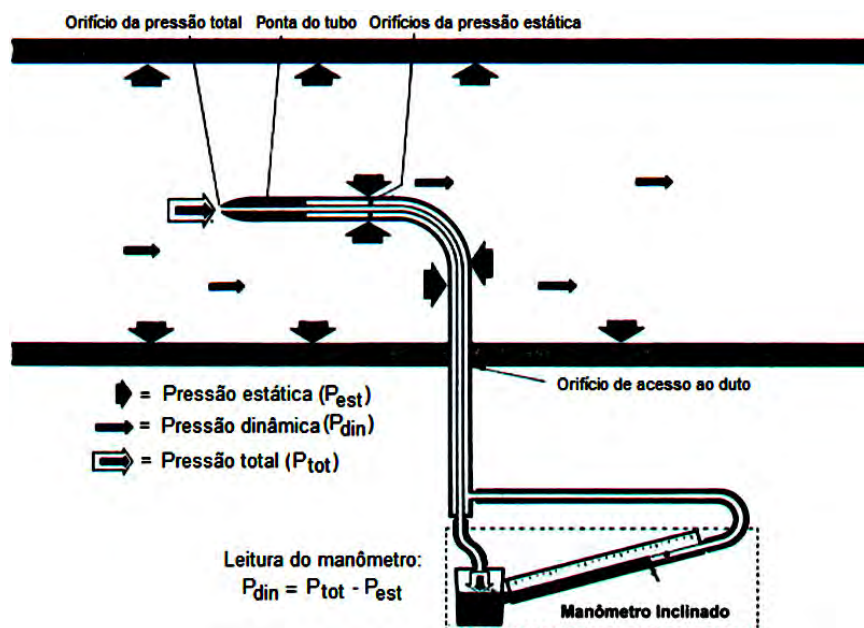


Figura 4.9 - Esquema de medições de pressão utilizando o tubo de Pitot.
Fonte: Airflow Brasil (2009).

Por meio do conhecimento da pressão dinâmica, pode-se obter a velocidade do escoamento em um ponto de medição qualquer, partindo-se da equação da conservação de energia de Bernoulli. A relação entre a velocidade do ar e a pressão dinâmica em um dado ponto da tubulação, obtida por meio do uso do tubo de Pitot estático, é dada pela Equação 4.3.

$$v = \sqrt{\frac{2(P_{\text{total}} - P_{\text{est}})}{\rho_{\text{ar}}}} = \sqrt{\frac{2P_{\text{din}}}{\rho_{\text{ar}}}} \quad (4.3)$$

em que:

- P_{total} - Medida da pressão total, Pa.
- P_{est} - Medida da pressão estática, Pa.
- P_{din} - Medida da pressão dinâmica, Pa.
- v - Velocidade pontual do ar, m s^{-1} .
- ρ_{ar} - Massa específica do ar, kg m^{-3} .

Expressando-se a pressão dinâmica, P_{din} , em milímetros de coluna de água (mmca) e admitindo-se, $\rho_{\text{ar}} = 1,204 \text{ kg m}^{-3}$, tem-se:

$$v = 4,04\sqrt{P_{\text{din}}} \quad (4.4)$$

A Equação 4.4 é válida para temperatura de 20°C e pressão atmosférica padrão (760 mm Hg ou 101.325 Pa). Para condições não-padrão do ar, a equação é a seguinte (AIRFLOW BRASIL, 2009):

$$v = 4,04\sqrt{\left(\frac{760}{P_{\text{bar}}}\right)\left(\frac{T}{293}\right)\left(\frac{10350}{10350 + P_{\text{est}}}\right)P_{\text{din}}} \quad (4.5)$$

em que:

P_{bar} - Pressão barométrica, mmHg.

P_{est} - Pressão estática, mmca.

P_{din} - Pressão dinâmica, mmca.

T - Temperatura do fluxo de ar, K.

A expressão $\frac{10350}{10350 + P_{\text{est}}}$ é uma correção da pressão estática no interior do duto. Se o valor de P_{est} for inferior a 250 mmca, esta expressão pode ser desconsiderada, já que seu valor se aproxima da unidade, neste caso.

O limite inferior de medição da velocidade com tubos de Pitot está relacionado à capacidade de deslocamento da coluna manométrica. A pressão dinâmica deve proporcionar uma altura manométrica que possa ser lida no aparelho medidor. Se a pressão diferencial for pequena, o uso do tubo de Pitot em escoamentos com velocidades inferiores a 2 m s^{-1} torna-se limitado.

A vazão, Q , de um fluido escoando através de uma seção de área S , é dada por:

$$Q = \int_S v \cdot dS = \bar{v} \cdot S \quad (4.6)$$

em que:

Q - Vazão, $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$.

$\bar{v}$ - Velocidade média, m s^{-1} .

S - Área da seção transversal, m^2 .

Conhecida a distribuição de velocidade, v , com relação à posição do tubo ou a velocidade média do escoamento, pode-se então obter a vazão deste escoamento.

O método mais simples para medição de vazão com tubo de Pitot consiste em escolher pontos de medição ao longo do raio da tubulação, espaçados de modo que as áreas de influência em forma de anel sejam iguais (Figura 4.10). Esse método, conforme sugere o nome, é conhecido como método de áreas iguais. A grande vantagem do método reside na facilidade do cálculo da vazão, uma vez que basta achar a média das velocidades medidas e multiplicar esta média pela área da tubulação. Como todas as áreas são iguais, as contribuições de cada ponto são iguais e a integração na área dada pela Equação 4.6, transforma-se numa simples soma algébrica. Existem outros métodos de divisão da seção transversal encontrados na literatura como os de Newton, de Chebyshev e de Gauss (DELMÉE, 1995).

Entretanto, esse método não é de aplicação prática quando se deseja controlar a vazão de ar. Para que se possa determinar, em tempo real, o valor da vazão, a utilização de vários medidores seria necessária, um em cada ponto de medição, tornando o sistema inviável e dispendioso.

O tubo de Pitot mede apenas a velocidade do ponto de impacto e não a velocidade média do escoamento. Assim sendo, realizando-se uma única medida, a indicação da vazão não é correta se a extremidade do tubo não for colocada no ponto onde se encontra a velocidade média do escoamento.

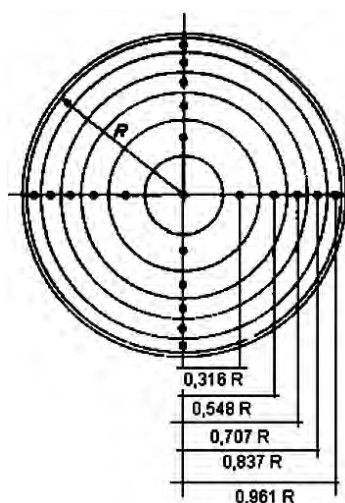


Figura 4.10 - Posicionamento do tubo de Pitot em relação ao raio, R , do duto para obtenção do perfil de velocidade e determinação da velocidade média.

Como a cada valor de vazão corresponde um perfil de velocidade diferente, o ponto em que a velocidade local coincide com a velocidade média varia com a vazão. Assim, não é possível estabelecer uma posição para o tubo de Pitot na qual a velocidade local coincida com a velocidade média para qualquer escoamento considerado.

É importante que se determine a distribuição de velocidade ao longo do raio da tubulação para se determinar a velocidade média. O perfil dessa distribuição irá depender do número de Reynolds, Re . A significância fundamental do número de Reynolds é que ele permite avaliar o tipo de escoamento (a estabilidade do fluxo), laminar ou turbulento. O número de Reynolds é dado por:

$$Re = \frac{\rho \cdot \bar{v} \cdot D}{\mu} \quad (4.7)$$

em que:

Re - Número de Reynolds, adimensional.

ρ - Massa específica do fluido, kg m^{-3} .

D - Dimensão linear característica do fluxo (diâmetro para o fluxo no tubo), m.

μ - Viscosidade dinâmica do fluido, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$.

Para o escoamento laminar, permanente e totalmente desenvolvido em um tubo circular de raio R , a distribuição de velocidades e a velocidade média são dadas por:

$$v(r) = v_{\text{máx}} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right) \quad (4.8)$$

$$\bar{v} = \frac{v_{\text{máx}}}{2} \quad (4.9)$$

em que:

r - Posição radial, m.

$v(r)$ - Medida da velocidade na posição r , m s^{-1} .

$v_{\text{máx}}$ - Velocidade máxima do escoamento

Para esse tipo de escoamento, a posição radial na qual a velocidade será igual à velocidade média, independentemente do valor da vazão, é dada por:

$$r = \frac{\sqrt{2}}{2} R \quad (4.10)$$

Exceto para escoamentos de fluidos muito viscosos em tubos de diâmetros pequenos, os escoamentos no interior de uma tubulação são, em geral, turbulentos. Para o escoamento turbulento, a velocidade flutua caoticamente com o tempo em cada ponto. A velocidade medida com o tubo de Pitot corresponde a uma velocidade média temporal em cada posição da tubulação. A distribuição de velocidades e a velocidade média do escoamento são dadas, neste caso, por (FOX et al., 2006):

$$v(r) = v_{\text{máx}} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{n}} \right) \quad (4.11)$$

$$\bar{v} = \frac{v_{\text{máx}}}{2} \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)} \quad (4.12)$$

Nas equações 4.11 e 4.12, o parâmetro n é um expoente da lei de potência.

Para valores do número de Reynolds, Re , menores que 100.000, o valor $n = 7$ é freqüentemente usado e para valores maiores do que este, n diminui. Fazendo-se $n = 7$, as Equações 4.11 e 4.12 podem ser reescritas como:

$$v(r) = v_{\text{máx}} \left(1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{7}} \right) \quad (4.13)$$

$$\bar{v} = \frac{49}{60} v_{\text{máx}} = 0,8167 \cdot v_{\text{máx}} \quad (4.14)$$

Por meio dos valores especificados para a vazão do ar de secagem, foram realizados alguns cálculos iniciais para verificação do regime do escoamento. Para o fluxo de ar mínimo de $0,1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ requerido para a secagem, a vazão encontrada foi de $0,54 \text{ m}^3 \text{ min}^{-1}$, o que fornece uma

velocidade média de $1,33 \text{ ms}^{-1}$ no ponto de medição e um número de Reynolds de 8.214.

Dessa forma, pode-se concluir que o escoamento do ar pela tubulação se dá de forma turbulenta. Então, combinando as Equações 4.4, 4.6 e 4.14 pode-se calcular a vazão conhecendo-se a velocidade média e a área da seção de escoamento do tubo. O tubo de Pitot foi posicionado no centro do tubo, de forma a se obter a velocidade neste ponto. Admitiu-se que o valor de velocidade medida no centro do tubo correspondesse à velocidade máxima. Portanto, a equação final para cálculo da vazão de ar de secagem resultou na seguinte expressão:

$$Q = \left(\frac{49}{60} \right) (4,04 \sqrt{P_{\text{din}}}) (S) = (3,30) (\sqrt{P_{\text{din}}}) (S) \quad (4.15)$$

De posse da vazão de ar, pode-se estimar o fluxo de ar ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$) de secagem que atravessa as bandejas, visto que a área das bandejas é conhecida ($0,09 \text{ m}^2$).

4.2.3. Monitoramento do fluxo de ar nas bandejas

Para o monitoramento contínuo da velocidade do fluxo de ar e registro dessas informações em forma de relatórios e gráficos, por meio de um programa computacional, utilizou-se um sensor de pressão diferencial acoplado a um conversor analógico digital DS2438, similar ao utilizado para medição de umidade relativa do ar.

As saídas de pressão total e estática do tubo de Pitot foram conectadas às entradas do sensor de pressão diferencial, de modo a obter-se a pressão dinâmica do fluxo de ar. Para a escolha do sensor de pressão diferencial, foi dada preferência à família de sensores piezorresistivos integrados do fabricante Freescale. Estes sensores possuem ampla faixa de medição e sensibilidade; são capazes de fornecer medidas absolutas, diferenciais e manométricas, além de serem economicamente viáveis.

O modelo escolhido foi o sensor diferencial MPX7002DP (Figura 4.11), que fornece uma tensão analógica proporcional à pressão diferencial entre as tomadas de alta e baixa pressão. A faixa de medição de pressão diferencial

deste sensor é de -2000 Pa a 2000 Pa . Apesar da extensa faixa de medição de pressão, muito maior do que a faixa de pressões de trabalho (0 a 100 Pa), este modelo apresentou uma ótima sensibilidade para medição da pressão dinâmica do ar de secagem dentro da faixa de operação.

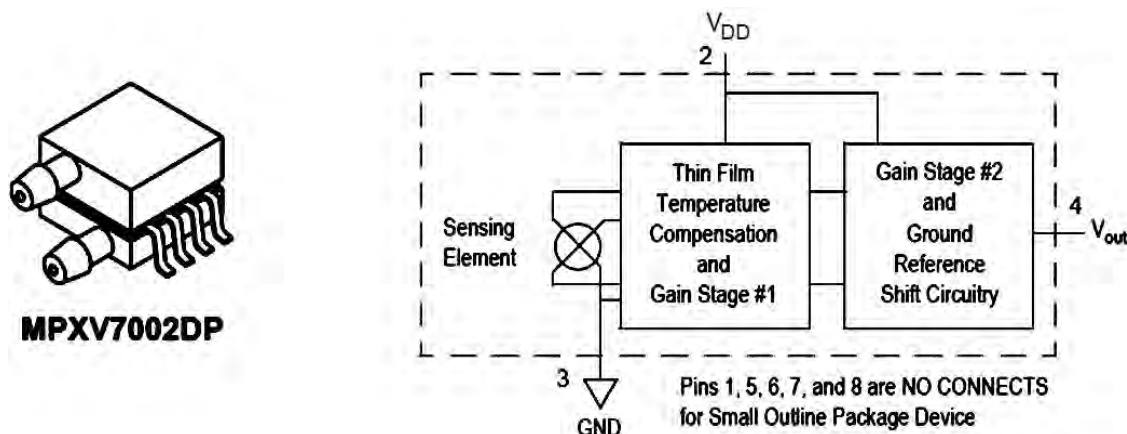


Figura 4.11 - Sensor de pressão MPX7002DP. Fonte: Freescale (2008).

O sensor de pressão MPX7002DP é piezorresistivo. Isto significa que a pressão aplicada nele gera uma variação na resistência do seu elemento sensível (*strain gauge*), possibilitando uma mudança na tensão de saída. Internamente, há um circuito de compensação de temperatura que permite a utilização do sensor em aplicações com variação de temperatura de 10 a 60°C (FREESCALE, 2008). Na aplicação deste trabalho, o sensor opera à temperatura ambiente, dentro de sua faixa de operação.

Este sensor deve ser alimentado com tensões contínuas entre $4,75\text{ V}$ e $5,25\text{ V}$. Quando alimentado com 5 V , a saída do sensor fica estável em, aproximadamente, $2,5\text{ V}$, caso não haja algum diferencial de pressão nas entradas. Caso seja aplicada diferença de pressão, a tensão de saída varia entre $0,5$ a $4,5\text{ V}$, dependendo do sentido aplicado. Na Tabela 4.2, são apresentadas algumas de suas especificações.

Tabela 4.2 - Características de operação do sensor diferencial de pressão, modelo MPX7002DP. Fonte: Freescale (2008)

Característica	Símbolo	Mínimo	Típico	Máximo	Unidade
Faixa de medição de pressão	P_{op}	-2,0	-	2,0	kPa
Tensão de alimentação	V_{DD}	4,75	5,0	5,25	V
Corrente de alimentação	I_o	-	-	10	mA
Compensação (<i>offset</i>) de pressão	V_{off}	2,25	2,5	2,75	V
Fundo de escala	V_{FSO}	4,25	4,5	4,75	V
Varredura (<i>Span</i>) de fundo de escala	V_{FSS}	3,5	4,0	4,5	V
Exatidão	-	-	$\pm 2,5$	$\pm 6,5$	$\%V_{FSS}$
Sensibilidade	$\frac{V}{P}$	-	1,0	-	$\frac{V}{kPa}$
Temperatura de operação	T_{OP}	10	-	60	°C
Tempo de resposta	t_R	-	1.0	-	ms

A variação de tensão na saída do sensor é linear e proporcional à pressão diferencial aplicada e à tensão de alimentação (Equação 4.16). Sua exatidão típica é de 2,5 % do valor da varredura (*span*) de fundo de escala, V_{FSS} , aproximadamente igual a 112,5 mV, podendo chegar a, no máximo, 6,25% de V_{FSS} (Figura 4.12).

$$V_{P_{din}} = V_{DD} (0,0002 P_{din} + 0,5) \quad (4.16)$$

em que:

$V_{P_{din}}$ - Tensão de saída do sensor de pressão, V.

V_{DD} - Tensão de alimentação, V.

P_{din} - Pressão diferencial utilizada para medição da pressão dinâmica, Pa.

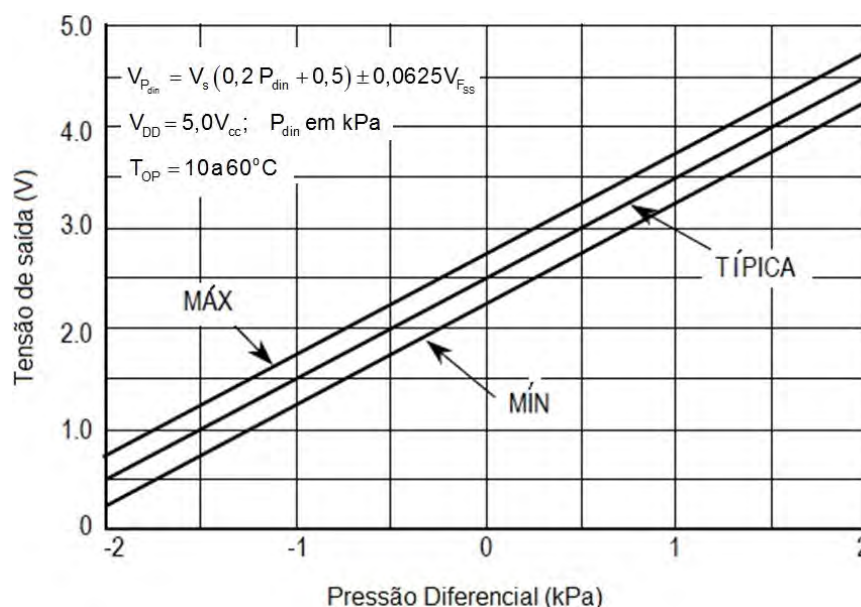


Figura 4.12 - Tensão de saída em função da pressão diferencial. Fonte: Freescale (2008).

Este sensor foi alimentado com uma tensão contínua regulada de 5 V. Dessa forma, a variação esperada da pressão diferencial em função da tensão de saída é dada por:

$$P_{din} = 1000 V_{P_{din}} - 2500 \quad (4.17)$$

4.2.4. Calibração do sensor de pressão

Como o sensor pode exibir curvas diferentes de saída, dependendo das condições de operação, tornou-se necessário efetuar sua calibração visando a obter medidas confiáveis. O primeiro procedimento de calibração do sensor foi realizado no Departamento de Hidráulica da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP. Utilizando-se um manômetro de tubo em forma de U, com água destilada como líquido manométrico, foram obtidas pressões diferenciais em toda a faixa de operação do sensor. O sensor foi alimentado com uma tensão contínua estabilizada de 5 V.

Por meio de testes preliminares, verificou-se que a faixa de operação do sistema de ventilação do secador era de 0 a 100 Pa (variação da pressão dinâmica observada), sendo a pressão dinâmica máxima obtida com sistema

sem produto nas bandejas, válvula de entrada totalmente aberta e frequência do motor de 60Hz (frequência máxima adotada).

Dessa forma, partiu-se para uma nova curva de calibração dentro desta faixa especificada. Para a obtenção dos dados de pressão, foi utilizado um manômetro de óleo (com densidade inferior à da água), sendo que este possui parte de sua escala de medição inclinada em relação à horizontal (manômetro inclinado), o que proporciona ao instrumento maior precisão de leitura, conforme ilustrado na Figura 4.13. Embora o fluido manométrico seja um óleo, a escala presente no manômetro possui valores em milímetros de coluna d'água (mmca).

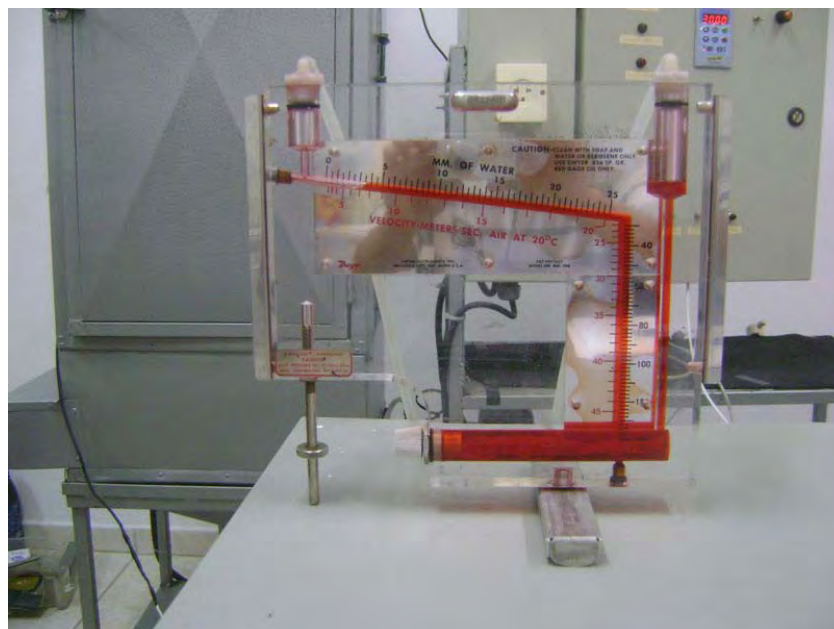


Figura 4.13 - Manômetro inclinado utilizando óleo como fluido manométrico, modelo Dwyer, utilizado como referência.

Diferentes pressões diferenciais puderam ser obtidas por meio da variação da frequência imposta ao motor que aciona o ventilador centrífugo, utilizando-se um inversor de frequência. Os testes foram realizados para o sistema de secagem com as bandejas vazias, tubo de Pitot com a ponteira posicionada no centro da tubulação. As saídas de pressão do tubo eram conectadas ora ao manômetro inclinado, ora às tomadas de pressão do sensor MPX7002DP.

Para a faixa de pressão diferencial de operação (0 a 100Pa), a saída do sensor ficou limitada a tensões de 2,630 V a 2,730 V. Devido à pequena faixa de variação da tensão de saída (0,100 V) foi desenvolvido um circuito eletrônico para condicionar o sinal de saída, utilizando-se um amplificador de instrumentação INA110, em conjunto com um amplificador operacional CA3140 (Figura 4.14).

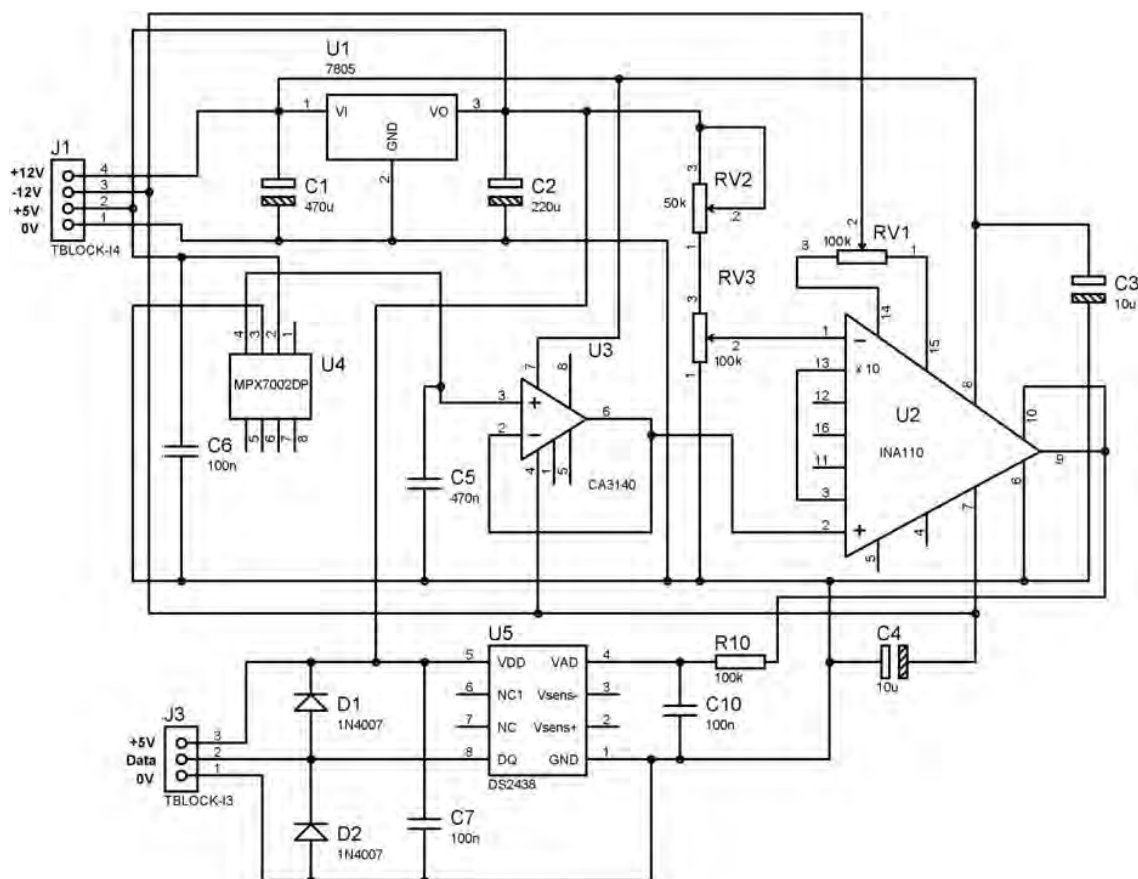


Figura 4.14 - Circuito para medição de pressão usando o sensor MPX7002DP e o Conversor A/D DS2438.

O amplificador de instrumentação INA110 utilizado permite ganhos fixos de 1, 10, 100, 200 e 500, mas outros ganhos podem ser obtidos por meio da utilização de um resistor externo entre pinos específicos. Além disso, este amplificador possui alta razão de rejeição em modo comum (RRMC), fácil ajuste do sinal de referência (valor do sinal de entrada que proporciona saída nula), altíssima impedância de entrada e baixo valor de corrente de polarização na entrada, o que o torna ideal para aplicações de instrumentação, nas quais são comuns sinais de pequena magnitude (BURR-BROWN, 2009).

Para o circuito desenvolvido, a saída do sensor de pressão foi aplicada a uma das entradas do amplificador de instrumentação INA110, por meio do isolador formado pelo amplificador operacional CA3140. Os resistores variáveis RV2 e RV3 foram utilizados com o objetivo de compensar o sinal de saída do sensor de pressão, que apresenta uma tensão diferente de zero para uma pressão diferencial nula. O ganho ajustado para o INA110 foi de 10, amplificando a diferença entre os sinais nas suas entradas. Foi utilizado outro resistor variável (RV1) para se obter, na saída do circuito, tensões a partir de 1 V (ajuste da tensão de referência).

Analogamente ao sistema de medição de umidade relativa, o sinal analógico de saída do circuito desenvolvido, proporcional à pressão diferencial do fluxo de ar, foi aplicado na entrada do conversor analógico digital (CAD) principal do CI DS2438, tornando esse sensor um dispositivo digital endereçável.

Assim, o circuito implementado permitiu obter tensões entre 1 V e 2 V, para a faixa de operação desejada (0 a 100Pa ou 0 a 10mmca), adequadas ao sistema de aquisição de dados aqui desenvolvido. Como a resolução de medição do CAD do DS2438 é de 0,01 V, pôde-se obter leituras de 100 valores distintos de pressão dinâmica para a faixa desejada (1 V), o que proporcionou resolução de 0,1 mmca ($\approx 1\text{Pa}$) para as leituras de pressão dinâmica.

4.2.5. Sistema de medição do teor de água do produto

O teor de água de produtos agrícolas, durante o processo de secagem, pode ser calculado conhecendo-se o teor de água inicial, a massa inicial e a massa de produto no instante em que se deseja obter o teor de água, aplicando-se a lei de conservação de massa expressa pela Equação 4.18.

$$m_0(1 - M_0) = m_t(1 - M_t) \quad (4.18)$$

em que:

- m_0 - Massa inicial de produto a ser seco, kg.
- M_0 - Teor de água inicial do produto, b.u., decimal.
- m_t - Massa de produto no instante t, kg.
- M_t - Teor de água do produto no instante t, b.u., decimal.

A partir da Equação 4.18 deduz-se que o teor de água em qualquer instante t é dado pela Equação 4.19.

$$M_t = 1 - \left(\frac{m_0}{m_t} \right) (1 - M_0) \quad (4.19)$$

A massa inicial, m_0 , é obtida por meio de pesagem direta utilizando-se uma balança com precisão satisfatória, ou pelo sistema de pesagem automática, utilizando-se a curva de calibração do sistema no instante inicial (início do processo). O teor de água inicial, M_0 , obrigatoriamente tem que ser obtido antes do início do processo por meio de um método padrão, geralmente o da estufa.

No Brasil, existe a Regra para Análise de Sementes (BRASIL, 2009), que é adotada como padrão oficial pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento para determinação do teor de água para grãos e sementes. Este método, apesar de simples, é bastante empregado para aferição de equipamentos que permitem medições rápidas, utilizadas no processo indireto. Esse método baseia-se na redução da massa do produto (método gravimétrico), consistindo em se colocar amostras de 25 a 30 g, do produto úmido em uma estufa regulada a uma temperatura de $105 \pm 1^\circ\text{C}$ durante um período de 24 horas. Depois deste período, pesa-se a amostra seca, obtendo-se o teor de água do produto pela diferença entre a massa inicial (produto úmido) e final (produto seco) do produto.

O teor de água dos grãos, em todas as etapas envolvidas neste trabalho, foi determinado pelo método padrão da estufa, $105 \pm 1^\circ\text{C}$, durante 24 horas, com três repetições, de acordo com as Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009).

A massa de produto no instante t , m_t , pode ser obtida utilizando-se um sistema de pesagem automática. Neste trabalho, este sistema foi implementado utilizando-se duas células de carga do tipo S, para cada bandeja de secagem, com características de tração/compressão, capacidade nominal de 98 N ($\approx 10\text{kgf}$) e sensibilidade de 2 mV/V. Cada célula de carga foi alimentada com uma tensão contínua de 10 V. Dessa forma, quando a célula

de carga for comprimida por uma força de 98 N (massa de 10 kg), o sinal de saída da célula será igual a 20 mV.

Segundo o fabricante, a faixa temperatura de trabalho compensada das células é de 0 a 50°C e a temperatura de trabalho útil é de -5 a +60°C. Com objetivo de minimizar a influência da temperatura e facilitar a manutenção do sistema de medição de massa, as células de carga foram montadas do lado de fora das bandejas.

A primeira proposta estudada para aquisição dos sinais de saída das células de carga pelo programa computacional envolveu o uso de amplificadores de instrumentação INA110, os mesmos utilizados no circuito de medição de vazão de ar, em conjunto com conversores analógico-digitais DS2438. O sinal de tensão amplificado foi aplicado na entrada do conversor analógico digital interno do dispositivo digital endereçável DS2438, utilizado para endereçar as células de carga, permitindo transformá-las em dispositivos digitais endereçáveis que podem ser conectados à rede 1-wire™ para determinação da massa de produto em qualquer instante durante o processo de secagem.

Com base nessa proposta, foram construídos circuitos (um para cada célula de carga) capazes de fornecer um sinal de saída para leitura pelo CAD DS2438, com tensão na faixa de 0V a 10 V (Figura 4.15). Dessa forma, quando a célula de carga for comprimida por uma força de 98 N (massa de 10 kg), o sinal de saída da célula será igual a 10 mV (sensibilidade de 1 V/kg).

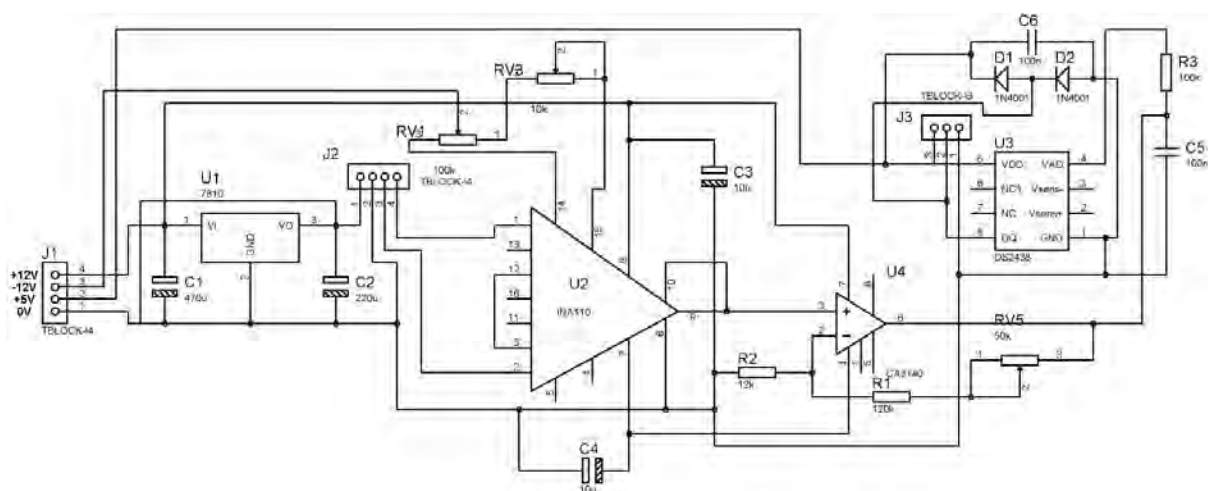


Figura 4.15 - Circuito implementado para medição do teor de água utilizando células de carga.

A resolução de medição de um sistema de aquisição de dados pode ser determinada aplicando-se a Equação 4.20.

$$R = \frac{\Delta V}{2^{N_b}} \quad (4.20)$$

em que:

- R - Resolução do sistema de medição, V.
- ΔV - Faixa de medição, V.
- N_b - Número de dígitos binários do conversor analógico-digital.

O CAD DS2438 é capaz de efetuar leituras de 0V a 10 V por meio de 10 dígitos binários (*bits*), fornecendo, portanto, resolução de 0,01V. Como a sensibilidade do circuito implementado foi de 1 V/kg, o valor mínimo obtido (resolução) para a determinação da massa de produto foi de 0,010kg. Como variações de massa menores que 0,01kg não puderam ser detectadas com o sistema desenvolvido, este não foi efetivamente utilizado.

Com intuito de melhorar a resolução de medição, foi utilizado um módulo de aquisição de dados que trabalha com um número maior de 10 dígitos binários (*bits*) para conversão analógico-digital. O modelo escolhido foi o módulo LR-7018 (fabricado pela empresa LR Informática Industrial), que possui oito canais de entradas diferenciais configuráveis por meio de programação. Neste modelo, cada canal de entrada realiza medições de sinais analógicos com 16 dígitos binários (*bits*).

Para medições de massa utilizando-se células de carga, o tipo de entrada configurada foi de $\pm 50\text{mV}$, uma vez que a tensão de saída das células poderá ser no máximo igual a 20mV, quando alimentadas com +10V. Assim, os terminais de saída das células de carga foram conectados diretamente aos canais de entrada do módulo de aquisição de dados, sem nenhuma amplificação.

Utilizando-se esse tipo de entrada ($\pm 50\text{mV}$), a resolução de medição passou a ser $0,0015\text{ mV}$. As células de carga foram alimentadas com tensão regulada de $+10\text{V}$, apresentando sensibilidade de $20\text{mV}/10\text{kg}$. Dessa forma, o valor mínimo correspondente que cada célula poderá ler é de $0,00075\text{kg}$ (menos do que $1,0\text{g}$). Como são utilizadas duas células por bandeja, admitiu-se, portanto, que o valor mínimo que pode ser medido, combinando as duas células, fosse de $1,5\text{g}$.

O módulo de aquisição de dados LR-7018 opera com o padrão serial RS-485, que utiliza um par de fios para comunicação, podendo ser utilizado em distâncias de até 1.200m . Como o computador utilizado não possui uma porta RS-485, a utilização de um conversor RS-485 para RS-232 (porta serial padrão do computador) tornou-se necessária, para que os valores medidos pudessem ser registrados pelo programa computacional desenvolvido. Foi utilizado o conversor LR-7520 (fabricado pela empresa LR Informática Industrial), para essa finalidade.

A massa de produto, em qualquer instante de tempo t , foi determinada por meio de uma curva de calibração, que correlaciona a massa com a soma das tensões de saída das células de carga, visto que foram utilizadas duas células de carga por bandeja.

O primeiro experimento realizado consistiu em verificar o comportamento das tensões de saída das células de carga na ausência de fluxo de ar. Utilizando-se regressão linear simples, obteve-se uma função de primeiro grau que relaciona a massa de produto com as tensões de saída das células de carga. Essas tensões de saída eram sempre conhecidas, pois eram registradas a cada instante pelo programa computacional.

Foram realizados novos testes com produto nas bandejas, com o secador operando com diferentes fluxos de ar e diferentes temperaturas com o intuito de verificar o comportamento das tensões de saída das células de carga nessas condições. A importância de se determinar esse comportamento consiste em se obter curvas consistentes de variação de massa do produto em função do tempo e, conseqüentemente, de teor de água em tempo real, sem a necessidade de desligar o fluxo de ar para realizar medições de massa.

Os testes foram realizados com milho totalmente seco, para garantir que ele não perdesse água quando submetido ao fluxo de ar aquecido.

4.2.6. Medição do consumo de energia elétrica

Foram utilizados dois medidores de energia para medições da quantidade de energia consumida pelo sistema de aquecimento e da quantidade total de energia consumida. Admitiu-se que a diferença entre essas duas quantidades de energia correspondeu à energia gasta pelo sistema de ventilação constituído pelo motor e o inversor de frequência, uma vez que o consumo energético do sistema eletrônico desenvolvido é muito baixo, se comparado ao consumo dos sistemas de aquecimento e de ventilação.

Optou-se por trabalhar com os medidores eletrônicos da marca KRON, modelo Mult-K 05. Esses medidores possibilitam a medição de até 44 parâmetros elétricos, tais como tensão de linha e tensões de fase, correntes de linha, frequência, potência ativa, potência reativa, potência aparente, fator de potência, energia ativa e reativa. O modelo escolhido possui saída serial RS-485, o que permite a obtenção da leitura de todos os parâmetros elétricos da carga, por meio de um programa computacional. Como o computador utilizado não possui porta serial RS-485 e sim RS-232, utilizou-se o mesmo conversor de RS-485 para RS-232, modelo LR-7520, empregado no sistema de monitoramento do teor de água.

A Figura 4.16 mostra os detalhes das ligações realizadas para as medições requeridas. Para obtenção das correntes, foram utilizados transformadores de corrente com relação de transformação de 50:5 A, adequadas às entradas de corrente do medidor utilizado.

Foi utilizado o programa do fabricante (Rede MB5) para obtenção das medidas, trabalhando paralelamente ao programa principal desenvolvido.

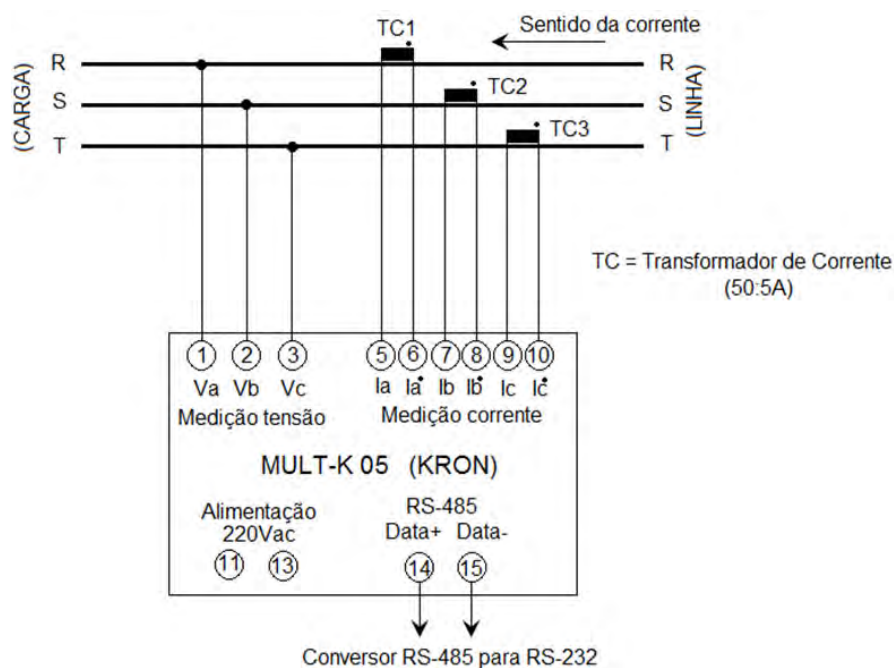


Figura 4.16 - Circuito para medição da quantidade de energia consumida.

4.2.7. Rede de aquisição e gerenciamento de dados

Para realizar as tarefas de aquisição de dados e gerenciamento do sistema desenvolvido, foi montada uma rede de aquisição e transmissão de dados utilizando-se a tecnologia 1-Wire™. Esta tecnologia permite utilizar dispositivos digitais endereçáveis (sensores, atuadores, conversores analógicos digitais, dentre vários outros) conectados em paralelo em uma rede formada por apenas um par de condutores.

Cada dispositivo 1-Wire™ possui um endereço de identificação único (ID) de 64 dígitos binários (8 bytes) sequenciais, definidos pelo fabricante, que o diferencia na rede em que está conectado e exclui a possibilidade de conflitos durante a transmissão de dados em redes com diversos dispositivos, tornando-o um dispositivo digital endereçável (DDE).

No presente trabalho foi montada uma rede com base na tecnologia 1-Wire™ formada pelos seguintes dispositivos digitais endereçáveis:

- 1 chave DS2406 para comando do inversor de frequência.
- 1 potenciômetro digital DS2890 para controle da temperatura do ar de secagem

- 1 potenciômetro digital DS2890 para controle da vazão do ar de secagem.
- 3 potenciômetros digitais para controle da abertura das válvulas de fluxo de ar por meio de servos-motores.
- 1 CAD DS2438 para medição da vazão do ar de secagem.
- 1 CAD DS2438 para medição da temperatura e umidade relativa do ar ambiente.
- 4 CAD's DS2438 para medição da temperatura e umidade relativa do ar de secagem na entrada e na saída das bandejas contendo o produto sendo seco.

Para conexão dos DDE's ao microcomputador foi utilizado um adaptador USB DS9490R (Figura 4.17). Por meio desse adaptador, os dispositivos digitais endereçáveis utilizados foram reconhecidos pelo protocolo 1-Wire™, permitindo, assim, o controle operacional de cada um desses dispositivos.

TERMNAL	FUNÇÃO	DESCRIÇÃO
1	V _{DD}	Saída 5VDC
2	GND	Terra
3	OW	Dados 1-Wire
4	GND_OW	Terra 1-Wire
5	SUSO	Saída USB em suspensão
6	N.C.	Não Conectado



Figura 4.17 - Adaptador DS9490R – USB/1-Wire™ (RJ11).

4.2.8. Programa computacional

O desempenho do secador foi otimizado por meio de um sistema de controle inteligente e computadorizado, responsável pela aquisição de dados, em tempo real, e pela tomada de decisões e ações de gerenciamento e controle do processo.

Para realizar a aquisição de dados, as ações de gerenciamento e de controle, foi implementado um programa computacional desenvolvido especificamente para este fim.

O programa computacional possui uma tela gráfica na qual são apresentadas as opções para entrada de variáveis relativas ao produto e das condições de secagem, definidas para cada tipo de produto.

O programa computacional, desenvolvido em Linguagem Delphi, foi dividido em sete módulos: Configurações Iniciais (Entrada de dados), Controle de Temperatura do ar de secagem, Calibração do Fluxo de Ar, Calibração das Células de Carga, Aquisição de Dados, Geração de Gráficos e Geração de Relatórios. Os módulos foram implementados em funções distintas, visando otimizar o fluxo de dados durante a execução do programa, facilitar a sua manutenção e simplificar a sua estrutura.

O programa computacional foi idealizado com base na premissa de que o produto deva ser seco até atingir o teor de água pré-definido pelo usuário. Ao atingir o teor de água desejado, o processo de secagem deverá ser automaticamente suspenso. Sendo assim, é de suma importância detectar o instante em que o produto alcança o teor de água desejado, de forma a evitar gastos desnecessários com energia.

Esse programa apresenta uma estimativa da quantidade de água (teor de água) retirada a cada instante do processo de secagem. Os dados coletados durante o processo são armazenados em arquivo de dados do tipo texto (.txt) para facilitar futuras manipulações.

Basicamente, o programa computacional desenvolvido deve realizar as seguintes tarefas:

- 1) Gerenciar toda a rede de transmissão de dados.
- 2) Realizar a aquisição, registro e processamento de dados.

- 3) Realizar as ações de tomada de decisões, com base em alguma estratégia pré-definida.
- 4) Executar as ações de controle de todo o sistema.

Sendo assim, o algoritmo proposto para controle e monitoramento do secador contempla os passos descritos a seguir.

Entrada de Dados:

- 1) Tipo de produto.
- 2) Teor de água inicial.
- 3) Teor de água desejado (final).
- 4) Temperatura de secagem desejada.
- 5) Fluxo de ar de secagem desejado.
- 6) Percentagem de ar de exaustão recirculado.

Processos:

- 1) Medição da temperatura e da umidade relativa do ar em diversos pontos do secador.
- 2) Medição e controle do fluxo de ar de secagem.
- 3) Controle de temperatura do ar de secagem.
- 4) Controle da percentagem de ar de exaustão recirculado (Sistema de controle da mistura de ar frio com ar de exaustão).
- 5) Controle automático do teor de água, por meio da verificação contínua do peso da amostra.

Saída de Dados:

- 1) Valores de temperatura e umidade relativa.
- 2) Temperatura e fluxo de ar de secagem.
- 3) Quantidade de água retirada do produto.
- 4) Teor de água instantâneo do produto.

- 5) Tempo de secagem.
- 6) Consumo específico de energia (kJ/kg de água evaporada) com e sem recirculação de ar.
- 7) Gráficos e tabelas.

O algoritmo proposto, é apresentado na forma de fluxogramas. Na Figura 4.18 é apresentado o fluxograma proposto para o controle do teor de água do produto, da temperatura e do fluxo de ar de secagem, bem como a percentagem de recirculação do ar de exaustão.

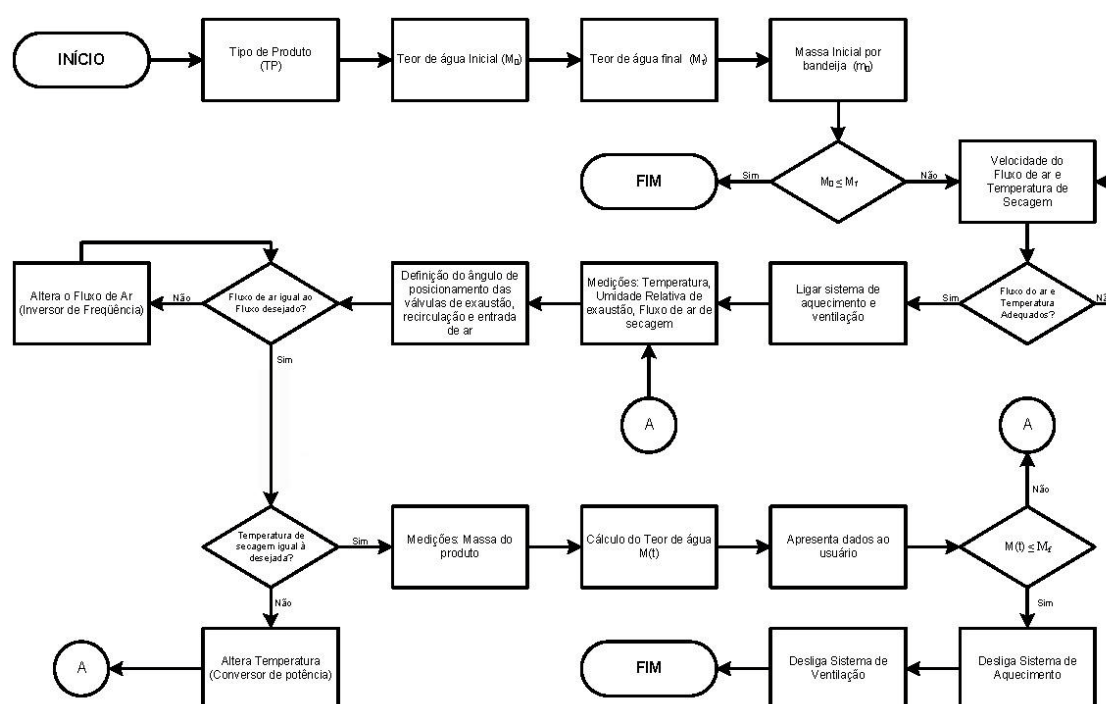


Figura 4.18 - Fluxograma de controle do processo de secagem.

4.3. DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE CONTROLE AUTOMÁTICO

Para monitoramento e controle da operação do sistema de secagem de produtos agrícolas com reaproveitamento do ar de exaustão proposto, foi desenvolvido e implementado um sistema de controle automático computadorizado, com base em um sistema de aquisição de dados em tempo real, que utiliza dispositivos digitais endereçáveis da série 1-Wire™ (AWTREY, 2008a; AWTREY, 1997).

4.3.1. Controle do fluxo de ar

O fluxo do ar necessário para a secagem foi imposto pela utilização de um ventilador centrífugo acionado por um motor de indução trifásico. Para este sistema, existem algumas formas usuais de se alterar a vazão do ar. A mais comum consiste em se alterar mecanicamente a posição de um diafragma que controla a entrada de ar para o ventilador.

Também é comum realizar-se a variação de vazão por meio de registros do tipo borboleta ou do tipo veneziana, com lâminas paralelas, cuja inclinação se pode graduar manual ou automaticamente. Quanto maior for a obstrução causada pelo registro, maior será a perda de carga e, conseqüentemente, maior a pressão total necessária para atender a esta perda, de modo que o ponto de funcionamento deslocar-se-á para uma posição correspondente a uma menor vazão (Figura 4.19). Neste caso, há introdução de perda de carga acidental na curva do sistema, proporcionando desperdício de energia.

A vazão de um sistema de ventilação também pode ser alterada variando-se o número de rotações do eixo do ventilador por meio do emprego de um variador de velocidade eletrônico (inversor de frequência). Para ventiladores centrífugos, a vazão é diretamente proporcional à velocidade no eixo do ventilador, a pressão varia com o quadrado da velocidade e a potência desenvolvida varia com o cubo da velocidade (MACINTYRE, 1988).

Assim, variando-se a velocidade do motor, é possível controlar a vazão de ar e a pressão, permitindo aumento da eficiência energética do conjunto

motor-ventilador, adequando-o ao tipo e volume do produto a ser secado (Figura 4.20).

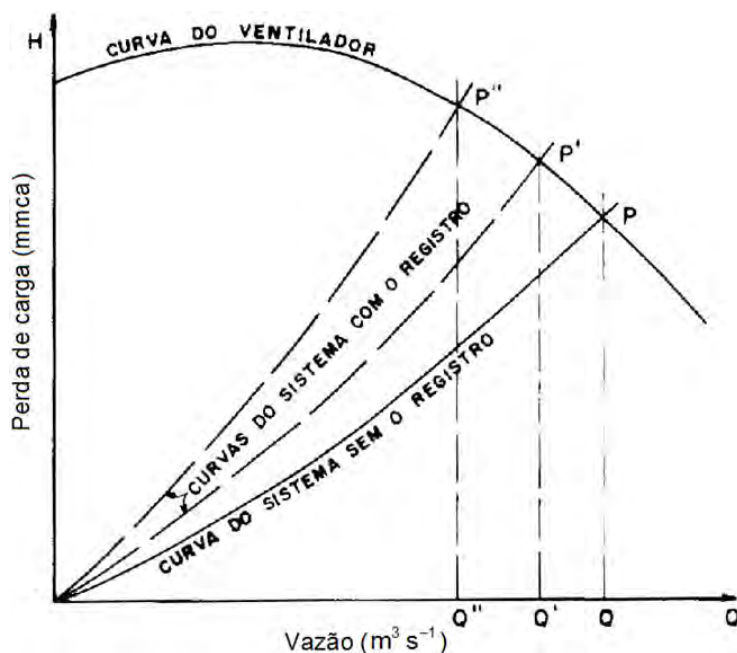


Figura 4.19 - Regulagem da vazão do sistema de dutos com emprego do registro. Fonte: Macintyre (1998).

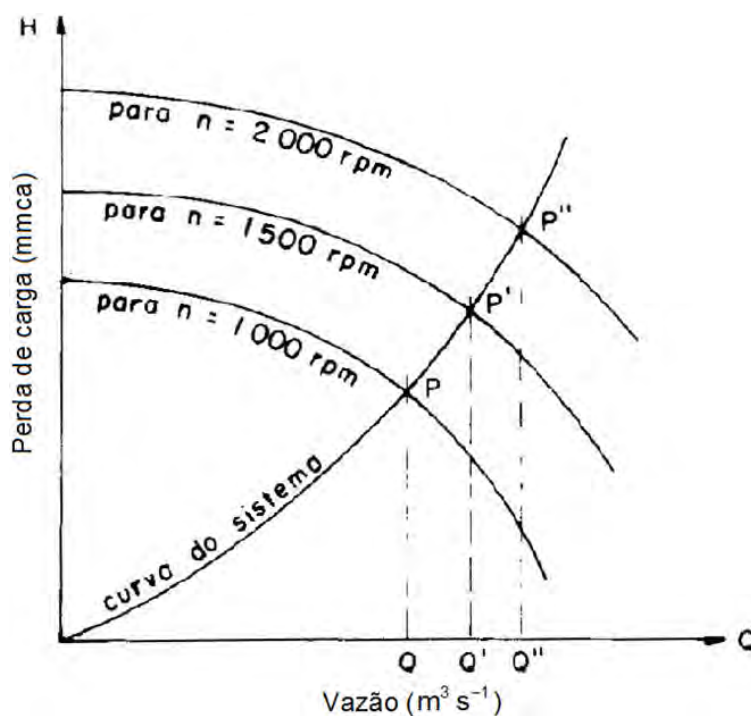


Figura 4.20 - Variação da vazão Q de um sistema pela variação do número de rotações por minuto do ventilador. Fonte: Macintyre (1998).

No presente trabalho, a vazão do ar de secagem foi controlada pela utilização de um inversor de frequência que alimenta o motor do ventilador

centrífugo. Inversores de frequência estão sendo amplamente utilizados em processos agrícolas (SILVA JÚNIOR e CAGNON, 2005; CARVALHO et al., 2000; SCARCELLI, 2009). As principais vantagens de se utilizar um inversor de frequência em sistemas de acionamento são (MASCHERONI et al., 2005):

- 1) Possibilidade de controlar as partidas e frenagens dos motores.
- 2) Permitir operações em vários regimes de carga.
- 3) Possibilidade de controle local ou remoto utilizando-se interfaces humano-máquinas ou sistemas mais sofisticados baseados em computadores ou microcontroladores.
- 4) Manutenção da capacidade de conjugado aplicado à carga durante toda a faixa de variação de velocidade.
- 5) Possibilidade de se implantar um controle em malha fechada por meio de uma rotina PID interna ao inversor.
- 6) Possibilidade de minimizar o consumo de energia quando se utiliza rotações menores.

O controle do fluxo de ar de secagem foi realizado utilizando-se um inversor de frequência, modelo WEG CFW-08 Plus, por meio de seu controlador PID interno. O fluxo de ar foi medido utilizando-se o sensor de pressão MPX7002DP. O inversor de frequência detecta o valor desejado e compara com o medido, controlando a rotação do motor de indução trifásico, de tal forma que o fluxo de ar de secagem se ajuste ao valor desejado. Dessa forma, o inversor executa a função principal de controle do fluxo de ar, funcionando tanto como elemento de ajuste de velocidade como elemento regulador no processo de controle (Figura 4.21). De posse do valor lido e do valor desejado de velocidade, são realizadas ações de controle PID para a determinação da frequência a ser imposta ao motor do ventilador para proporcionar a vazão de ar desejada no sistema.

A quantidade de ar de exaustão recirculada, embora controlada, é considerada uma perturbação para o sistema de controle em questão. Independentemente da quantidade de ar reaproveitada e da quantidade de ar frio adicionado ao fluxo succionado pelo ventilador, o inversor de frequência

deverá manter o fluxo de secagem no valor especificado pelo usuário durante todo o processo de secagem.

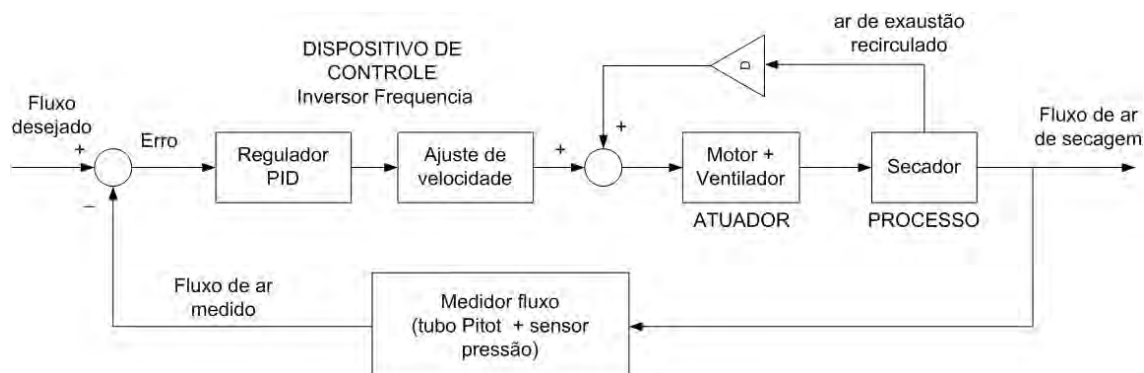


Figura 4.21 – Diagrama de blocos para controle do fluxo de ar de secagem

Foram utilizadas as duas entradas analógicas (AI1 e AI2) do inversor de frequência para implementação do controle PID do fluxo de ar (Figura 4.22).

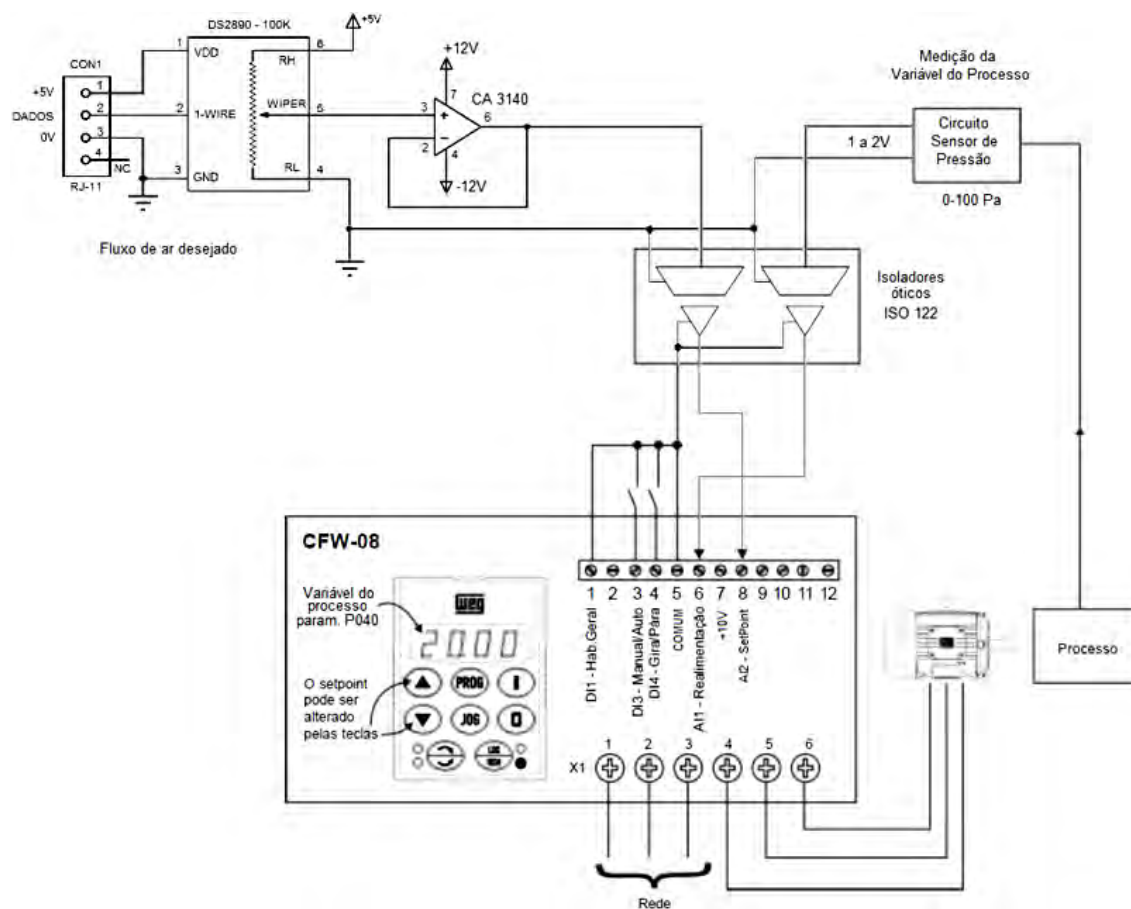


Figura 4.22 - Ligações das entradas analógicas e digitais do inversor de frequência para controle do fluxo de ar.

Com intuito de minimizar a interferência eletromagnética (IEM) causada pelo inversor de frequência nos circuitos desenvolvidos, estas entradas foram isoladas, óticamente, por meio de dois isoladores óticos ISO 122. Na primeira entrada analógica do inversor (AI1) foi lida a variável do processo, ou seja, o valor medido do fluxo de ar obtido pelo sensor de pressão MPX7002DP. Por meio da aplicação de um sinal analógico ajustável, advindo de um potenciômetro digital DS2890 (MAXIM–DALLAS, 2008) à entrada analógica 2 (AI2) do inversor, pôde-se estabelecer o valor desejado para o fluxo de ar.

O potenciômetro digital DS2890 é um dispositivo digital endereçável que apresenta na sua saída três terminais: central (WIPER), inferior (RL) e superior (RH), além dos terminais de dados, terra e alimentação (+5V). Por meio da aplicação de um valor digital de 0 a 255 na entrada de dados desse componente, pode-se regular digitalmente a posição do terminal central em relação aos outros terminais. Assim, pode-se obter uma tensão ajustável com 256 valores distintos (0 a 255) na saída desse componente, variando-se a resistência entre os terminais central e inferior.

Como esse componente é um dispositivo digital endereçável, a tensão analógica de saída pode ser ajustada pelo programa computacional para se estabelecer o fluxo de ar de secagem desejado, impondo-se a posição necessária. A expressão matemática utilizada para relacionar a tensão de saída de controle do fluxo de ar com a posição é dada pela Equação 4.21.

$$V_F = \left(\frac{V_{DD}}{255} \right) \cdot D_F \quad (4.21)$$

em que:

- V_F - Tensão de saída de controle do potenciômetro digital DS2890 para imposição do fluxo de ar desejado, V.
- V_{DD} - Tensão de alimentação, aplicada no terminal superior (RH) do DS2890, V.
- D_F - Posição do terminal central em relação ao terminal inferior do DS2890 utilizado no controle do fluxo de ar.

Como foi utilizada uma tensão constante $V_{DD} = +5V$, a Equação 4.21 simplifica, tornando-se:

$$V_F = 0,0196 \cdot D_F \quad (4.22)$$

Além das entradas analógicas, foram utilizadas três entradas digitais do inversor para habilitação do controle automático PID (entrada DI3) e colocação em funcionamento (entradas DI1 e DI4). A entrada digital DI1 parametrizada como *habilita geral* foi mantida sempre acionada. Dessa forma, o comando de *girar/parar* o motor foi realizado por meio da entrada digital DI4. O acionamento dessa entrada pode ser realizado de duas formas: (i) *localmente* - utilizando-se um botão no painel de comando local ou (ii) *remotamente* - por meio da utilização de uma chave digital endereçável DS2406 da tecnologia 1-Wire™ controlada pelo programa computacional.

Na Tabela 4.3, é descrita toda a parametrização realizada no inversor para colocação dele em funcionamento e regulação automática da vazão do ar de secagem.

Na entrada analógica 1 do inversor foi utilizado um ganho de 2, significando que o sinal de saída do circuito do sensor (1 a 2V) será multiplicado por 2, obtendo-se, assim, um sinal com variação de 2 a 4V. Este sinal será comparado com o sinal analógico de referência aplicado na entrada analógica 2, que estabelece o fluxo de ar desejado. O ganho utilizado para essa entrada foi unitário, de forma que o sinal de referência assumisse valores de 0 a 5V por meio da variação do potenciômetro digital DS2890.

Como foram utilizados acopladores óticos e núcleos de ferrite para isolamento dos sinais de entrada do inversor de frequência, ocorreram pequenas mudanças nos valores de tensão desses sinais. Com o propósito de quantificar essas mudanças e estabelecer o valor desejado correto para o fluxo de ar de secagem por meio do potenciômetro digital, foi realizada análise de regressão linear. Dessa forma, pôde-se determinar a equação final que relaciona a tensão analógica de referência (fornecida pelo dispositivo DS2890) com o valor do fluxo de ar desejado.

Tabela 4.3 – Parametrização realizada no Inversor de Frequência modelo CFW08-Plus

Parâmetro	Descrição	Ajuste Final
P100	Tempo de aceleração	10 s
P101	Tempo de desaceleração	10 s
P133	Frequência mínima	5 Hz
P134	Frequência máxima	66 Hz
P203	Seleção de funções especiais	1 = Regulador PID
P220	Seleção da fonte Local/remota	6 = Interface Remota Serial (HMI-CFW08-RS)
P221	Seleção da referência – Situação local	0 = Referência pelas teclas das IHM's
P222	Seleção da referência – Situação remota	2 = Referência pela entrada analógica 2 (AI2)
P229	Seleção de comandos – Situação local	2 = Comando local pela Interface Remota Serial
P230	Seleção de comandos – Situação remota	1 = Comando remoto por meio dos bornes do inversor
P231	Sentido de giro – Situação local e remota	1 = sempre anti-horário
P234	Ganho da entrada analógica AI1	2
P235	Sinal da entrada analógica AI1	0 = sinal de 0 - 10 V
P236	Compensação da entrada analógica AI1	0
P238	Ganho da entrada analógica AI2	1
P239	Sinal da entrada analógica AI2	0 = sinal de 0 - 10V
P240	Compensação da entrada analógica AI2	0
P263	Função da entrada digital DI1	0 = Habilita geral
P264	Função da entrada digital DI2	2 = Sem função
P265	Função da entrada digital DI3	15 = seleção modo manual/automático (PID)
P266	Função da entrada digital DI4	8 = Gira/Para

Os parâmetros da ação de controle PID foram ajustados diretamente no inversor de frequência por meio dos parâmetros correspondentes. Com esta opção, o usuário tem a possibilidade de escolher os ganhos proporcional, integral e derivativo para a melhor sintonia do sistema de controle do fluxo de ar. Caso se deseje trabalhar com um controle PI, basta escolher valor nulo para

a constante derivativa. Na Tabela 4.4 sumariza-se a parametrização realizada para obtenção do controle do fluxo de ar de secagem.

Tabela 4.4 – Parâmetros do Regulador PID

Parâmetro	Descrição	Ajuste Final
P520	Ganho Proporcional	1
P521	Ganho Integral	1
P522	Ganho derivativo	0
P525	Referência via teclas do Regulador PID	Definido pelo usuário 0 - 100% (não utilizado)
P526	Filtro da variável do processo	0,1 s
P527	Tipo de ação do regulador PID	0 = Direto
P528	Fator da escala da variável do processo	0,1
P536	Ajuste automático de P525	0 = Ativo

4.3.2. Interferência eletromagnética

A utilização de inversores de frequência exige certos cuidados na instalação, de forma a se evitar a ocorrência de interferência eletromagnética (conhecida por IEM). Esta se caracteriza pelo distúrbio no funcionamento normal dos inversores ou de componentes próximos dele, tais como sensores eletrônicos, equipamentos de rádio, sistemas de aquisição de dados e outros equipamentos eletrônicos.

Os primeiros testes de operação de dispositivos 1-WireTM com inversores de frequência mostraram que o funcionamento do inversor interferia na estabilidade da rede. A rede 1-WireTM apresentou um comportamento muito vulnerável à interferência eletromagnética provocada pelo inversor, sobretudo quando foram acoplados os cabos de saída de controle do sistema 1-WireTM às entradas analógicas do inversor, para realização do controle do fluxo de ar de secagem. Problemas de interferência eletromagnética em redes 1-WireTM foram registrados por Monte et al. (2008), que relatou a presença de ruídos irradiados por um inversor de frequência de grande potência, provocando instabilidade em sua rede de aquisição de dados.

Possivelmente, a instabilidade se deve ao fato de que a comunicação de dados opera com sinais de pequena amplitude (+5V) entre a linha de dados e

a de referência (terra), o que acarreta em menor margem de ruído. Dessa forma, ruídos introduzidos na linha de dados podem interferir na comunicação dos dados. O ruído é, inevitavelmente, acoplado aos cabos de sinal por meio do ambiente eletromagnético ao redor deles.

Com objetivo de minimizar este efeito na comunicação de dados foram tomadas as seguintes providências:

- 1) Aterramento do inversor e do motor, bem como das fontes de alimentação.
- 2) Separação entre os cabos de potência e de dados.
- 3) Uso de filtro supressor de ruído, de forma a minimizar o ruído via rede de alimentação, entre o inversor e sua alimentação (Figura 4.23).
- 4) Colocação de capacitores de filtragem de 100nF (cerâmicos) nas alimentações de cada circuito impresso das placas de aquisição de dados e de controle.
- 5) Uso de cabos blindados com pares de fios trançados.
- 6) Uso de acopladores óticos, de forma a prover isolamento física e elétrica entre o circuito de controle e as entradas do inversor de frequência.
- 7) Inserção de um núcleo toroidal de ferrite no cabo de interligação do inversor e circuitos de controle 1-WireTM.



Figura 4.23 - Filtro supressor de ruído (RFI) utilizado.

4.3.3. Controle de temperatura do ar de secagem

O aumento ou diminuição da temperatura do ar de secagem foram obtidos variando-se a potência elétrica aplicada a cada uma das resistências que compõem o sistema de aquecimento.

Para essa finalidade, foi utilizado o conversor de potência microcontrolado trifásico baseado em triodos para corrente alternada (*TRIodes for Alternating Current – TRIAC's*), da marca Therma, modelo TH 6200A-36, 220V/36A (THERMA, 2009), conforme ilustrado na Figura 4.24. Este modelo utiliza apenas duas fases para o controle da potência aplicada à carga. Com o controle de duas das três fases, obteve-se o controle das três tensões de linha que alimentam a carga resistiva.

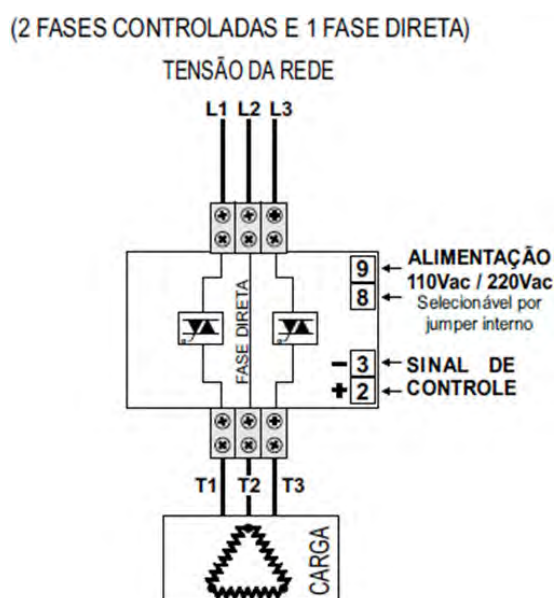


Figura 4.24 - Conversor de potência trifásico para sistema de aquecimento do ar usando-se resistências elétricas.

O modelo TH 6200A-36, 220V/36A utiliza o sistema de disparo por trem de impulsos no qual a potência de saída é modulada por meio do envio de pulsos de senóides de duração controlada. O controle da duração dos pulsos e, conseqüentemente, da potência elétrica é realizado pela aplicação de uma tensão contínua de 0 a 5 V nos seus terminais de controle (2 e 3), conforme mostrado na Figura 4.25.

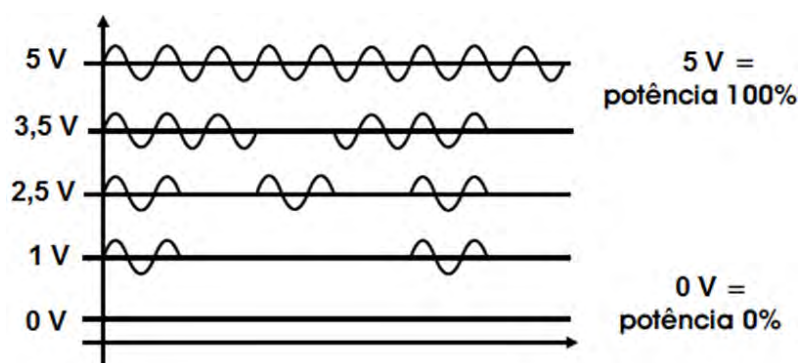


Figura 4.25 - Controle de potência por meio de um sinal de 0 a 5V.

O diagrama de blocos da

Figura 4.26 é uma ilustração do controle de temperatura desenvolvido. Neste diagrama, nota-se que o fluxo do ar de secagem atua como distúrbio do sistema de controle de temperatura, atuando, portanto, como um comando direto de atuação, ilustrado por meio de um triângulo.

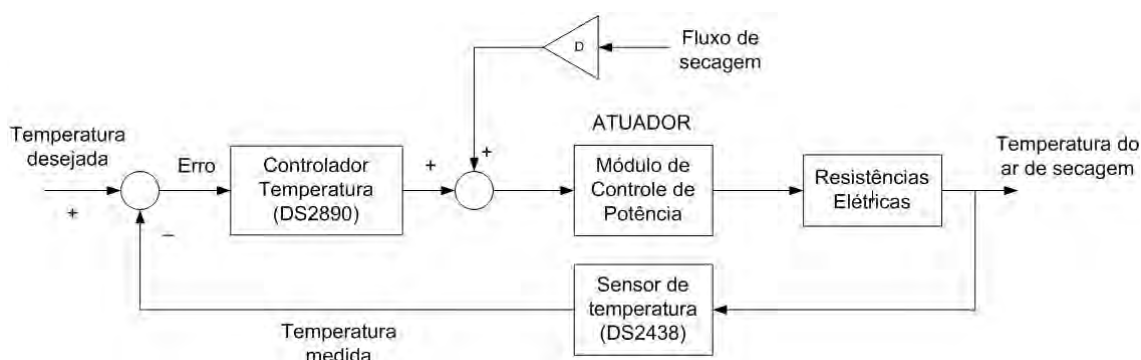


Figura 4.26 – Diagrama de blocos do controle de temperatura do ar de secagem.

A temperatura de secagem foi medida por meio do sensor de temperatura interno do dispositivo endereçável DS2438, conforme descrito anteriormente.

Todo o controle foi feito por meio do programa computacional desenvolvido na linguagem de programação Delphi. O usuário estabelece o valor desejado para a temperatura de secagem. O computador lê o valor desejado e compara com o medido, de forma a ajustar a temperatura do ar de secagem ao valor de referência.

Para imposição da temperatura do ar de secagem foi utilizado um dispositivo digital endereçável baseado no potenciômetro digital DS2890,

idêntico ao utilizado no controle do fluxo de ar de secagem. Por meio da aplicação de um sinal analógico ajustável (tensão de controle de temperatura), advindo do potenciômetro digital DS2890 conectado à entrada de controle do conversor de potência microcontrolado, pôde-se realizar o controle da potência fornecida a cada uma das resistências e, conseqüentemente, da temperatura do ar de secagem.

A equação utilizada que relaciona a tensão de saída de controle com a posição imposta no potenciômetro DS2890 é dada por:

$$V_T = \left(\frac{V_{DD}}{255} \right) \cdot D_T \quad (4.23)$$

em que:

- V_T - Tensão de saída de controle do potenciômetro digital DS2890 para imposição da temperatura desejada, V.
- V_{DD} - Tensão aplicada no terminal superior (RH) do DS2890, V.
- D_T - Posição do terminal central em relação ao terminal inferior do DS2890 utilizado no controle de temperatura.

A tensão V_{DD} na Equação 4.23 foi mantida constante e igual a +5 V.

As estratégias de controle desenvolvidas para o controle de temperatura incluem o controle liga-desliga e o controle PID, além do controle manual.

A primeira opção de controle, denominada de controle manual, realiza o ajuste de temperatura por meio da aplicação direta da tensão de controle, sem realimentação e comparação com o valor desejado. Embora seja pouco robusta, essa estratégia permitiu verificar qual a temperatura de estabilização do ar de secagem para uma dada velocidade do ar e tensão de controle, servindo como ajuste para os métodos liga-desliga e PID, descritos a seguir.

A segunda estratégia de controle implementada, denominada de controle liga-desliga, foi uma variação do tradicional método de controle no qual se aplica potência máxima para o estado ligado e potência nula para o estado desligado. O controle de temperatura foi realizado alternando a tensão de controle entre dois limites que podem ser ajustados pela mudança das posições inferior e superior do potenciômetro digital DS2890. Assim, a potência

de saída para o estado ligado e o estado desligado pode ser controlada por meio da mudança das posições de controle inferior e superior, respectivamente.

A terceira opção de controle implementada no programa computacional consiste na utilização de controle PID. Com esta opção, o usuário tem a possibilidade de escolher os ganhos proporcional, integral e derivativo para a melhor sintonia do sistema de controle. Caso se deseje trabalhar com um controle PI, basta escolher valor nulo para a constante derivativa.

De posse do valor lido e do valor de referência de velocidade, são realizadas ações de controle PID para o cálculo da tensão de controle que deve ser aplicada na entrada do controlador de potência para se obter a temperatura desejada.

Conforme descrito anteriormente, o protótipo desenvolvido também utiliza um controlador de temperatura modelo TH 91D 301, da marca Therma, montado na tampa frontal do painel de comando, que permite visualizar e controlar a temperatura do ar de secagem, a partir do painel (controle local de temperatura).

Pode-se escolher o modo de controle de temperatura (local ou remoto) por meio de uma chave no painel de comando. Quando a chave estiver posicionada no modo local, a tensão de controle enviada ao controlador de potência é oriunda do controlador de temperatura local. Na posição remota, o controle é realizado pelo potenciômetro digital DS2890 controlado pelo programa computacional.

Em todos os métodos de controle de temperatura implementados, a umidade relativa do ar de secagem pode ser ajustada, mas não de forma independente da temperatura. Com o aumento da temperatura do ar de secagem, ocorre a diminuição da umidade relativa do ar e vice-versa.

4.3.4. Controle da mistura de fluxo de ar

O processo de reaproveitamento do ar de secagem deve resultar em um melhor aproveitamento do sistema de secagem, racionalizando o uso de energia elétrica. As propriedades psicrométricas do ar de exaustão e do ar de

entrada devem ser analisadas. Com base nos valores dessas propriedades, a percentagem de ar a ser recirculado pode ser determinada.

A estratégia de aproveitamento do ar de exaustão foi baseada na umidade relativa do ar e na sua temperatura.

Foram utilizadas três válvulas do tipo *borboleta*, responsáveis, respectivamente, pela exaustão, recirculação e entrada de ar no secador, todas elas acionadas eletronicamente por meio de servo-motores.

Um servo-motor é um pequeno dispositivo com um eixo que pode ser posicionado numa posição angular desejada pelo envio de sinais codificados. Enquanto existir um sinal aplicado na entrada, o servo irá manter a posição angular do eixo. Quando o sinal mudar, a posição angular do eixo também muda (OLIVEIRA, 2005).

Na Figura 4.27, podem-se observar as partes que compõem um servo, descritas a seguir.

- 1) **Circuito de Controle** - responsável por receber os sinais e energia do receptor, monitorar a posição do potenciômetro e controlar o motor de acordo com o sinal do receptor e a posição do potenciômetro.
- 2) **Potenciômetro** - ligado ao eixo de saída do servo, possibilita ao circuito de controle monitorar o ângulo atual do servo-motor. Se o eixo estiver no ângulo correto, o motor para. Se o circuito detecta que o ângulo está incorreto, ativa o motor no sentido correto até que o ângulo esteja correto.
- 3) **Motor** - movimenta as engrenagens e o eixo principal do servo.
- 4) **Engrenagens** - Reduzem a rotação do motor e transferem mais força ao eixo principal de saída e movimentam o potenciômetro junto com o eixo.

A ligação elétrica desse dispositivo é feita por meio de três fios. Um fio (vermelho) leva a alimentação de $5 V_{CC}$ ao motor. Outro fio (preto) leva o sinal de referência (terra). O terceiro fio (branco) leva o sinal de controle de posicionamento ao dispositivo.

A velocidade do motor é proporcional à distância (ângulo) que o eixo tem de percorrer. Assim, se esse eixo tem que girar um grande ângulo, o motor gira com máxima velocidade. Se tiver que girar um pequeno ângulo, o motor vai girar a baixa velocidade.

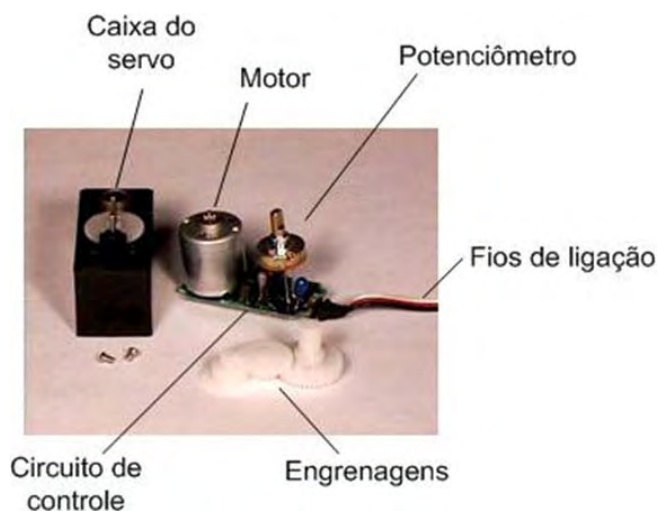


Figura 4.27 - Detalhes dos componentes do micro servo-motor.

O ângulo desejado é determinado pela duração (largura) do sinal de controle. O circuito de controle do servo-motor fica monitorando este sinal em intervalos de 20 ms. Se dentro deste intervalo, ele percebe uma alteração do sinal de 0V para 5V, durante um intervalo mínimo de 0,5 ms, até um intervalo máximo de 2,5 ms, ele altera a posição do seu eixo proporcionalmente ao sinal que recebeu (Figura 4.28). O controle de posição é então realizado por modulação de largura de pulsos (MLP).

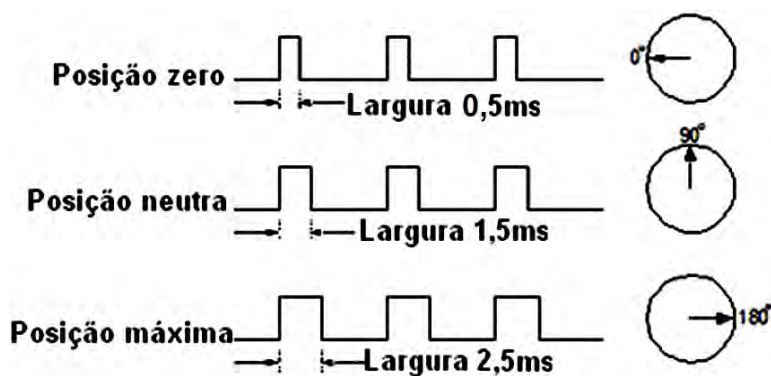


Figura 4.28 - Exemplo de posicionamento do servo-motor em função da largura do sinal na entrada de controle.

Como foram utilizados três servos-motores, foi necessária a elaboração de um circuito eletrônico capaz de gerar esses sinais com pulsos de largura controlada. Utilizou-se para este fim um microprocessador PIC16F873.

O PIC (Controlador de Interface Periférica - *Peripheral Interface Controller*) é um circuito que integra, em um único componente, um microprocessador, memórias, dispositivos de entrada e saída (E/S) e outras funções. O microcontrolador do tipo utilizado neste trabalho é produzido em diferentes modelos e diferentes marcas, variando suas características, como tamanho de memória, número de entradas e saídas, dentre outras. No entanto, todos os modelos têm o funcionamento semelhante (PEREIRA, 2004; MICROCHIP, 2009).

Um microcontrolador é um circuito eletrônico digital com as seguintes características:

- 1) Contém todos os componentes de um computador, mas de forma simplificada: ULA (Unidade Lógica e Aritmética) e UCP (Unidade Central de Processamento), memória para execução do programa e memória para armazenar os dados, além de pinos de entrada e saída de periféricos.
- 2) Executa um programa que se encontra em seu interior, sendo possível modificá-lo ou adaptá-lo para atender a necessidade do projeto, por meio de um compilador apropriado tal como o CCS e o MPLAB.

Na Figura 4.29 são mostrados detalhes e a pinagem do PIC16F873 utilizado.

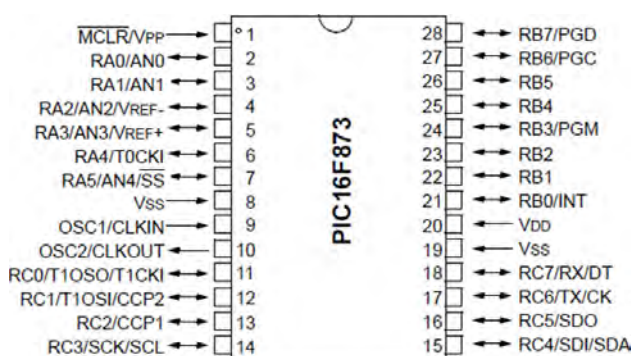


Figura 4.29 - Detalhes e pinagem do PIC16F873.

Para geração dos três sinais de controle dos servos-motores, foram utilizadas três saídas digitais (RC0, RC1 e RC2) do PIC16F873, sendo que a mudança de nível dessas saídas, bem como o tempo em que cada uma dessas saídas se manteve em nível lógico alto foi controlada por meio de três entradas analógicas do microcontrolador (AN0, AN1 e AN3). Utilizando-se a entrada analógica AN0, pode-se controlar o servo-motor 1, por meio da saída RC0. O servo-motor 2 foi controlado pela entrada analógica AN1, utilizando-se a saída digital RC1. Para o acionamento do servo-motor 3, foi utilizada a entrada analógica AN3 e a saída digital RC2.

A largura dos pulsos é proporcional ao valor da tensão analógica de entrada. O PIC trabalha com tensões analógicas de 0 a +5V nos seus pinos de entrada. A proposta de acionamento assumiu que para se obter um ângulo de 0°, equivalente a uma duração de pulsos de 0,5 ms, deveria se aplicar uma tensão nula. Para se obter um ângulo de 180°, equivalente a uma duração de pulsos de 2,5 ms, deveria se aplicar uma tensão contínua de 4V. Essa foi a lógica responsável para transformar um sinal analógico em largura de pulsos.

Para a abertura e fechamento das válvulas, os limites escolhidos para o ângulo de posicionamento foi de 0 a 90°, em que 0° indica válvula totalmente fechada e 90°, válvula totalmente aberta. Assim, foram utilizadas tensões entre 0 e 2V, sendo o ângulo de posicionamento das válvulas diretamente proporcional ao valor das tensões aplicadas em cada uma das entradas AN0, AN1 e AN3 do PIC utilizado (Equação 4.24).

$$\alpha = \frac{90}{2} \cdot V_{\alpha} = 45 \cdot V_{\alpha} \quad (4.24)$$

em que:

- α - Ângulo de abertura das válvulas, grau.
- V_{α} - Tensão de controle aplicada nas entradas analógicas do PIC para controle dos ângulos de posicionamento dos eixos dos servos-motores empregados, V.

Para que o controle do posicionamento do eixo dos servos-motores fosse realizado pelo computador, foram utilizados três potenciômetros digitais

DS2890, com funções idênticas daqueles aplicados no controle da temperatura e do fluxo de ar de secagem. Com a utilização desses componentes, pôde-se facilmente integrar o sistema à rede 1-Wire™, tornando os servos-motores, dispositivos endereçáveis. A Figura 4.30 é uma ilustração do circuito desenvolvido para o acionamento dos servos-motores de controle das válvulas do secador.

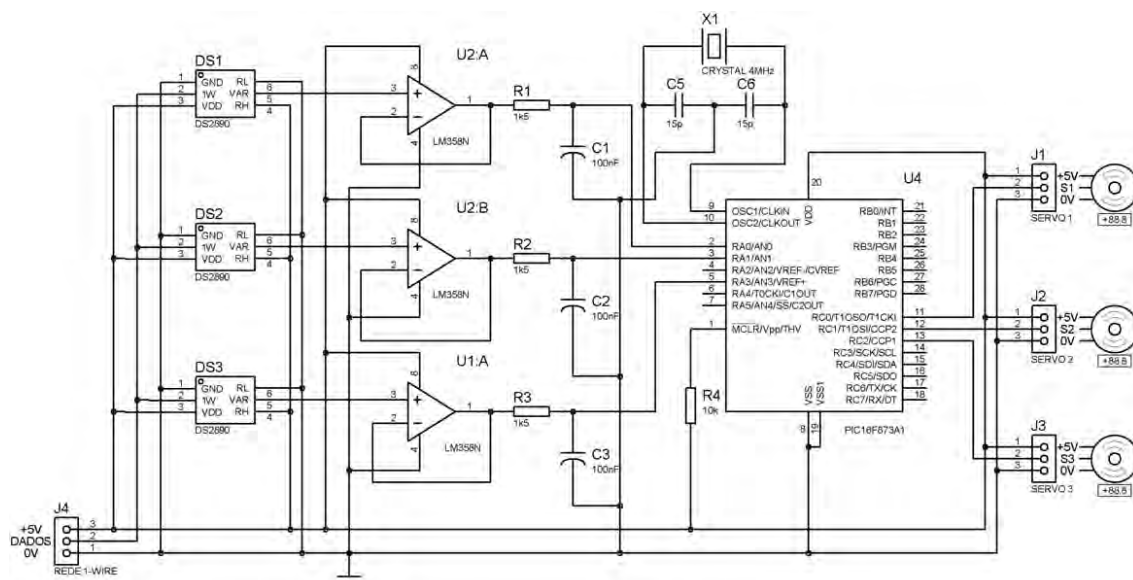


Figura 4.30 - Circuito de acionamento dos servos-motores para controle das válvulas.

A equação utilizada que relaciona a tensão de controle na saída dos servos-motores com a posição imposta no potenciômetro DS2890 é dada por:

$$V_{\alpha} = \left(\frac{V_{DD}}{255} \right) \cdot D_{\alpha} \quad (4.25)$$

em que:

- V_{DD} - Tensão aplicada no terminal superior (RH) do DS2890, V.
- D_{α} - Posição do terminal central em relação ao terminal inferior do DS2890 utilizado no controle do ângulo de posicionamento do eixo do servo-motor.

A tensão V_{DD} na Equação (4.25) foi mantida constante e igual a +5V.

Com base nas Equações (4.24) e (4.25), obtém-se a expressão para determinação da posição a ser aplicada em função do ângulo desejado (Equação 4.26):

$$D_{\alpha} = \frac{255 \cdot V_{\alpha}}{5} = 51 \cdot \frac{\alpha}{45} = 1,1333 \cdot \alpha \quad (4.26)$$

A criação de programas para microcontroladores pode-se tornar uma tarefa difícil, dependendo da aplicação a ser desenvolvida. Como a linguagem de programação C oferece alta eficiência na tradução para a linguagem de máquina, gerando um código com menor esforço durante a programação, além de facilitar o acesso aos recursos dos microcontroladores PIC, o programa de controle dos servos-motores foi desenvolvido utilizando esta linguagem.

A conversão do programa em linguagem C para a linguagem de máquina do microcontrolador foi executada com o compilador PCH (*PCH Compiler for PIC*) do fabricante CCS Inc. O compilador CCS foi utilizado devido à sua facilidade de uso e literatura disponível sobre o compilador (PEREIRA, 2009). A linguagem de máquina é o formato pelo qual o programa convertido pode ser gravado na memória do microcontrolador. O programa convertido utiliza as instruções disponíveis no PIC16F873A.

Utilizou-se o ambiente de desenvolvimento MPLAB IDE do fabricante Microchip para gravação do programa na memória do microcontrolador. Este ambiente de desenvolvimento é gratuito e está disponível no site do fabricante.

4.4. TESTES DE VALIDAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO

Com o intuito comprovar o funcionamento e validar o sistema desenvolvido, alguns testes de secagem de milho foram realizados com diferentes valores de teor de água inicial e temperatura de secagem, para fluxo de ar fixo.

Como, na ocasião da realização dos testes, não se dispunha de milho recém colhido com alto teor de água, os testes foram realizados com milho reumedecido.

O teor de água do milho, em todas as etapas envolvidas no presente trabalho, foi determinado pelo método padrão da estufa, $105 \pm 3^\circ\text{C}$, durante 24 h, com três repetições (BRASIL, 2009).

Os testes foram realizados com temperaturas do ar de secagem de 50°C e 80°C , com um fluxo de ar de $0,40 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

A temperatura do ar de secagem foi mantida constante nos valores especificados pelo sistema de controle projetado e implementado neste trabalho.

O controle de velocidade do ar de secagem foi feito por meio do inversor de frequência conforme descrito nos itens anteriores.

Durante a secagem, foi utilizada a bandeja central carregada com 1.500 g de milho, perfazendo uma camada de produto com, aproximadamente, 2 cm de espessura. Foram realizadas três repetições para cada um dos testes.

O final do processo de secagem foi determinado, automaticamente, em função do teor de água final desejado, o que definiu o valor da massa de produto na bandeja de secagem. Terminado o processo, o sistema de controle desligava, primeiramente, o sistema de aquecimento e, depois que a temperatura do ar de secagem atingia um valor de 30°C , o sistema de ventilação também era desligado.

Para ajustar a curva de secagem utilizou-se o modelo de Page. Para calcular os valores da razão do teor de água, M_r , utilizaram-se os valores de teores de água calculados segundo a Equação 4.19 e o teor de água de equilíbrio estimado pela equação de Henderson modificada (Equação 3.14).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este trabalho foi desenvolvido em quatro etapas, como descrito na metodologia. A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos para cada etapa, bem com alguns problemas que dificultaram a obtenção de todos os resultados da forma como planejada.

Um protótipo de secador de produtos agrícolas foi projetado e desenvolvido. Foi implementado um sistema de controle automático, com base em um sistema de aquisição de dados em tempo real, que utiliza dispositivos digitais endereçáveis da série 1-Wire™, para monitorar e controlar a operação do secador com reaproveitamento do ar de secagem. Um programa computacional na linguagem Delphi foi desenvolvido para gerenciar todo o sistema de controle automático, realizando aquisição de dados em tempo real e executando as ações de controle.

5.1. PROTÓTIPO DO SISTEMA DE SECAGEM

O protótipo do secador proposto está ilustrado na Figura 5.1.

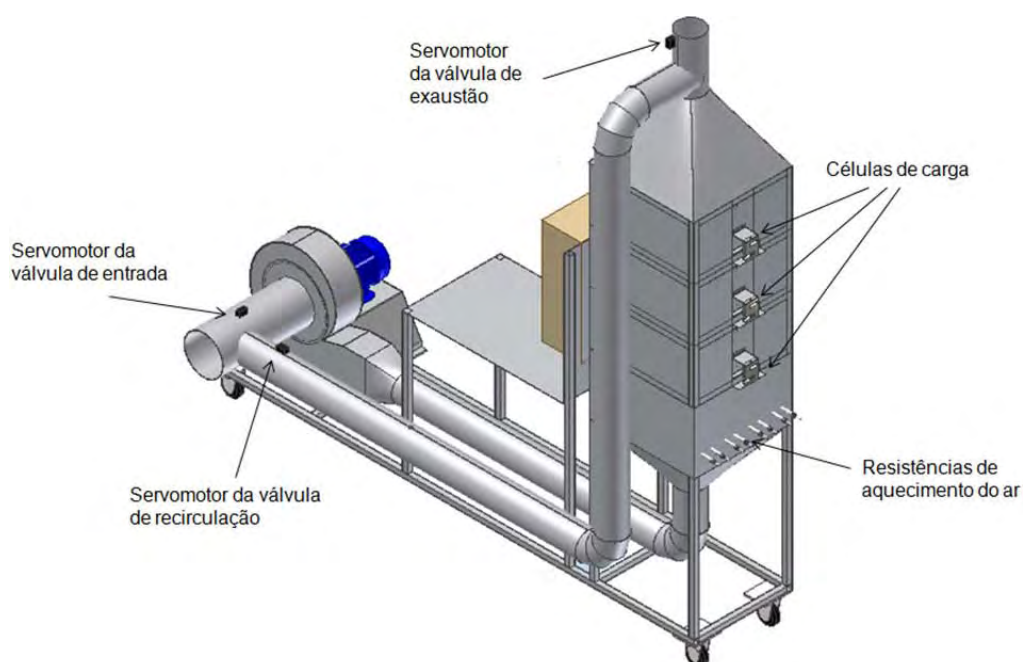


Figura 5.1 – Protótipo completo do secador proposto.

Em testes de funcionamento do secador, observou-se que todo o sistema apresentou funcionamento satisfatório, estando, portanto, pronto para realização de testes experimentais de secagem e de rotina.

O sistema de instrumentação e aquisição de dados foi implementado e constou da distribuição, em posições específicas no interior do secador, de sensores de temperatura, de umidade relativa e de fluxo de ar, além de dispositivos atuadores para controle da temperatura e do fluxo de ar, implementados com tecnologia 1-Wire™.

Nos testes preliminares, a variação de frequência imposta no inversor permitiu o ajuste da velocidade do motor acoplado ao ventilador e, conseqüentemente, o ajuste do fluxo de ar de secagem. O uso de um conversor de potência, controlando a potência disponível para as resistências de aquecimento, a partir de uma tensão contínua ajustável, facilitou o controle da temperatura do ar de secagem.

O painel de controle desenvolvido para comandar o sistema de secagem foi implementado, conforme mostrado na Figura 5.2.

Por meio de chaves e botões específicos, localizados na parte frontal do painel de comando implementado, pôde-se habilitar o modo de funcionamento (local ou remoto) dos sistemas de controle de temperatura e de vazão.

Apesar de o inversor de frequência ser controlado remotamente pelo programa computacional para ajuste do fluxo de ar desejado, o sistema desenvolvido permitiu ao usuário, por meio da interface homem-máquina do inversor, ajustar a frequência de trabalho, para obtenção do fluxo de ar de secagem desejado (controle local de vazão).

A utilização do controlador de temperatura possibilitou maior flexibilidade do sistema desenvolvido, uma vez que o operador pode definir a temperatura desejada de secagem, sem a utilização do programa computacional.

Observa-se que, apesar da utilização de diversos componentes eletro-eletrônicos, o painel foi montado em um gabinete próprio tornando-se bastante compacto, mantendo-o protegido das ações de intempéries e facilitando a manutenção.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.2 – (a) Vista externa do painel de comando; (b) Detalhes externo do painel de comando; (c) Painel pronto mostrando os dispositivos utilizados em sua montagem.

5.2. SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

5.2.1. Temperatura e umidade relativa do ar

Utilizando-se um único componente DS2438 foi possível desenvolver um dispositivo digital endereçável conjugado para medição da temperatura e da umidade relativa do ar, utilizando-se o protocolo 1-Wire™.

A Figura 5.3 contém a foto da placa desenvolvida para medição da umidade relativa e temperatura do ar, mostrando os componentes utilizados.

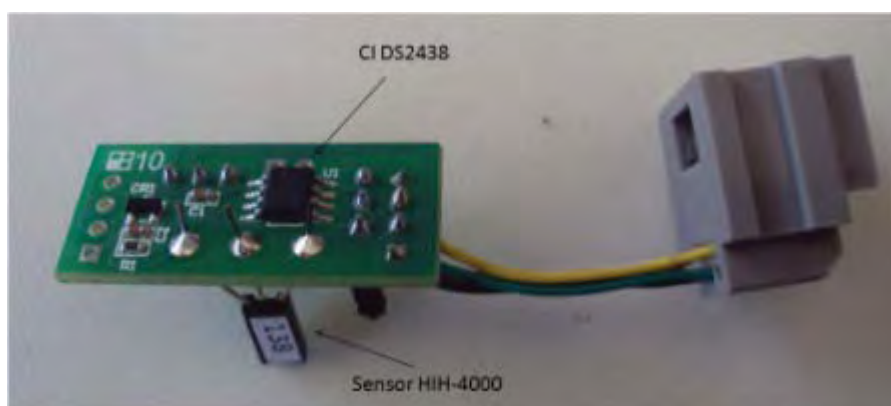


Figura 5.3 - Placa de aquisição de dados de temperatura e umidade relativa do ar usando o sensor de umidade HIH 4000 e o conversor A/D DS2438.

Como o valor de umidade relativa, medido por meio do sensor HIH-4000, necessita de compensação de temperatura e depende do valor da tensão de alimentação, a utilização do dispositivo DS2438, em conjunto com o sensor de umidade relativa, mostrou-se ideal, uma vez que o DS2438 permitiu a medição de todas essas grandezas.

Os sensores de umidade relativa HIH-4000 (HONEYWELL, 2007) e de temperatura utilizados, colocados em posições específicas do secador, internamente e externamente, atenderam ao experimento de uma forma geral, e o seu monitoramento foi feito de forma contínua, fornecendo valores de temperatura e umidade relativa com resultados satisfatórios.

As equações para estimação da umidade relativa em função da tensão gerada na saída do sensor de HIH-4000, V_{ϕ} , da tensão de alimentação, V_{DD} , e da temperatura no local, T , são:

$$\varphi = 156,541436 \left(\frac{V_{\varphi}}{V_{DD}} \right) - 24,97927 \quad (5.1)$$

$$\varphi_{\text{corr}} = \frac{\varphi}{1,0546 - 0,00216 T} \quad (5.2)$$

Essas equações foram incluídas no programa computacional de forma a obter, em tempo real, a temperatura e umidade relativa.

A tela do programa computacional, contendo informações sobre a coleta de dados e gráficos de temperatura e umidade relativa do ar de secagem, é apresentada na Figura 5.4.

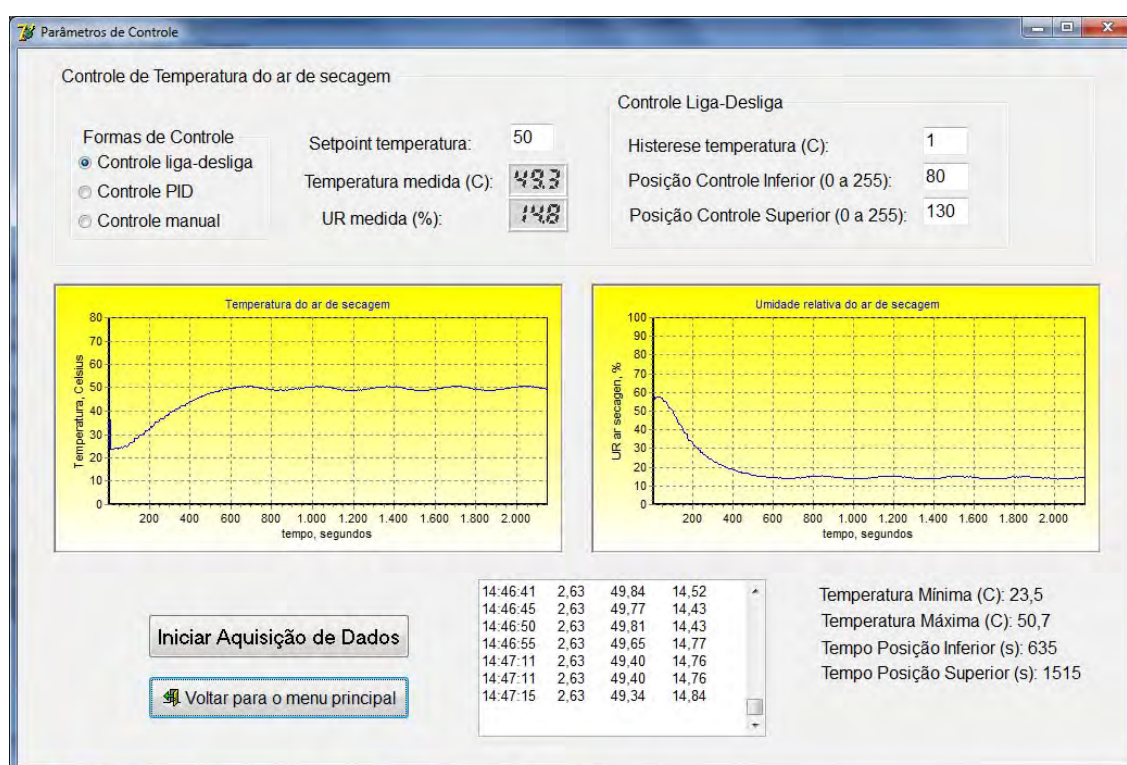


Figura 5.4 - Tela do programa computacional, contendo informações sobre a coleta de dados e gráficos de temperatura e umidade relativa do ar de secagem.

Em função da temperatura máxima de operação do HIH-4000 ser de 85°C, foi adotado que o sistema de medição conjunta de temperatura e umidade relativa do ar, baseado no DS2438, poderia operar até no máximo de 80°C, embora o sensor de temperatura interno do DS2438 pudesse medir temperaturas até 125°C, conforme informação do fabricante. Em alguns testes, a temperatura do meio, onde os sensores estiveram inseridos, alcançaram

valores superiores a 90°C e, ainda assim, as leituras de umidade relativa e temperatura foram realizadas satisfatoriamente.

5.2.2. Fluxo de ar de secagem

A equação ajustada aos dados observados de tensão na saída do sensor de pressão, em função da pressão diferencial dinâmica medida com um manômetro de tubo em forma de U, é expressa pela Equação 5.3 e os resultados encontram-se representados graficamente na Figura 5.5.

$$V_{P_{din}} = 0,001 P_{din} + 2,6372; \quad R^2 = 1 \quad (5.3)$$

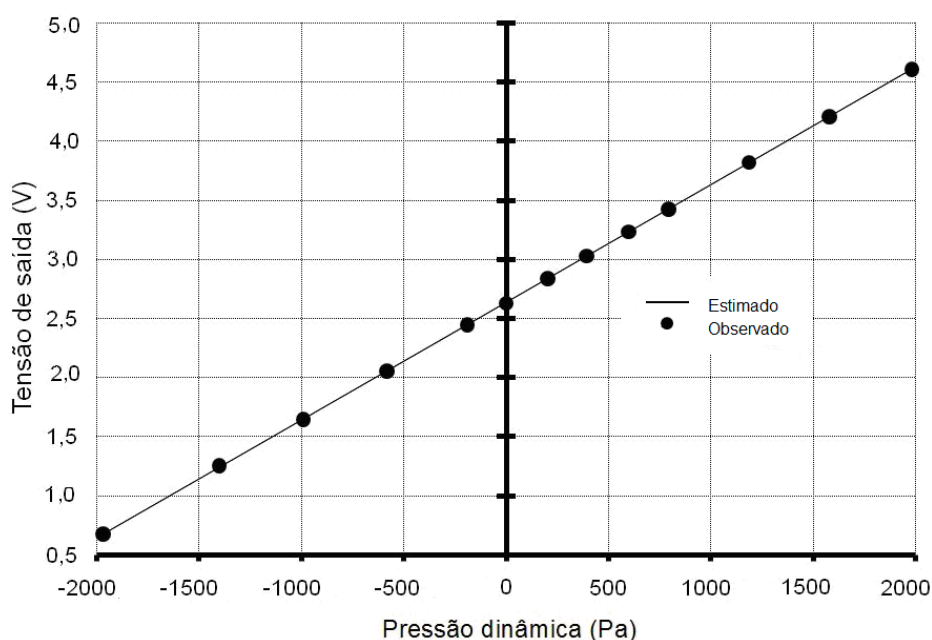


Figura 5.5 - Curva de calibração do sensor MPX7002DP na faixa de medição -2kPa a +2kPa.

Por meio de testes preliminares, verificou-se que a faixa de operação do sistema de ventilação do secador era de 0 a 100Pa (variação da pressão dinâmica observada). Esta era a pressão dinâmica máxima obtida com o sistema sem produto nas bandejas, válvula de entrada totalmente aberta e frequência do motor de 60Hz (frequência máxima adotada).

Foi necessário, então, uma nova curva de calibração dentro daquela faixa especificada. Desta vez utilizou-se um manômetro de óleo (com densidade inferior à da água) para obtenção dos dados de pressão.

Variando-se a frequência imposta ao motor que aciona o ventilador centrífugo foi possível obter diferentes valores de pressão diferencial. A equação ajustada aos dados observados é expressa pela Equação 5.4.

$$V_{P_{din}} = 0,001 P_{din} + 2,6302; \quad R^2 = 0,9995 \quad (5.4)$$

Os resultados observados e os estimados utilizando a Equação 5.4 encontram-se na Figura 5.6.

Observa-se uma correlação quase perfeita entre a tensão de saída do sensor e a pressão dinâmica do fluxo de ar ($R^2 = 0,9995$).

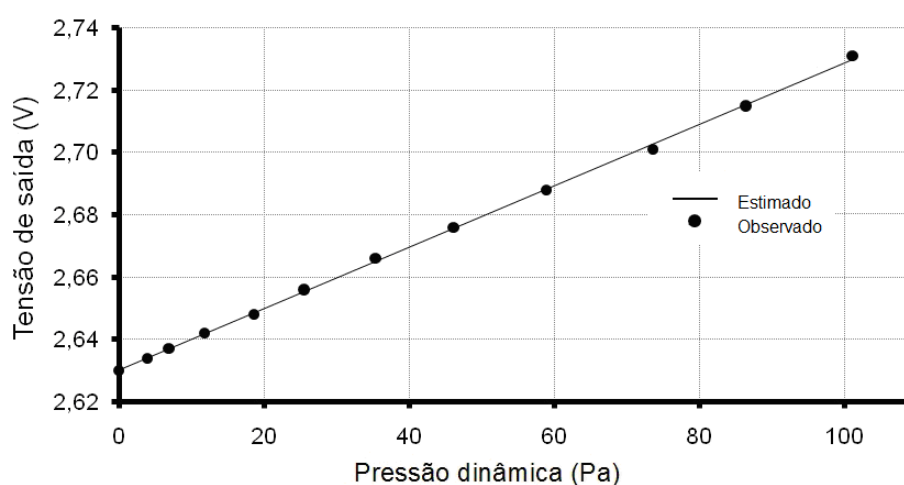


Figura 5.6 - Tensão na saída do sensor de pressão MPX7002DP em função da pressão dinâmica.

Não obstante esta correlação quase perfeita, para a faixa de pressão diferencial de operação (0 a 100Pa), a saída do sensor ficou limitada a tensões de 2,630 V a 2,730 V, proporcionando uma pequena faixa de variação da tensão de saída de apenas 0,100 V. Então, foi necessário desenvolver um circuito eletrônico para condicionar o sinal de saída, utilizando-se um amplificador de instrumentação INA110, em conjunto com um amplificador operacional CA3140. A Figura 5.7 contém a foto da placa desenvolvida.

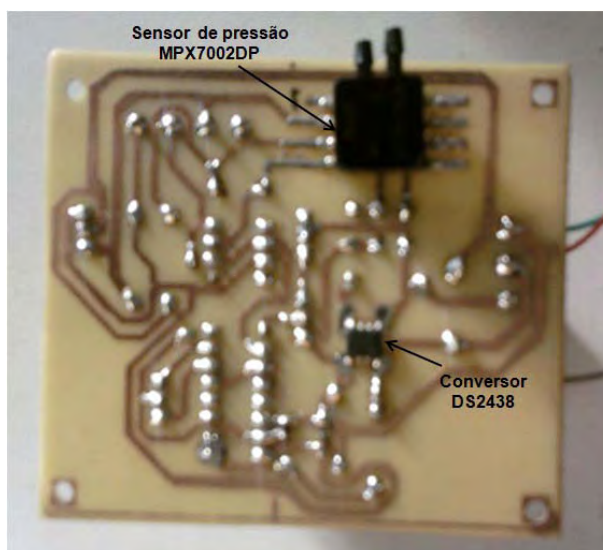


Figura 5.7 - Circuito para medição de pressão usando o sensor MPX7002DP e o CAD DS2438.

O circuito implementado permitiu obter tensões entre 1 V e 2 V, para a faixa de operação desejada (0 a 100Pa ou 0 a 10mmca), adequadas ao sistema de aquisição de dados aqui desenvolvido. Como a resolução de medição do CAD do DS2438 é de 0,01 V, pôde-se obter leituras de 100 valores distintos de pressão dinâmica para a faixa desejada (1 V), o que proporcionou resolução de 0,1 mmca ($\approx 1\text{Pa}$) para as leituras de pressão dinâmica.

A equação ajustada aos dados observados por meio de regressão é dada pela Equação 5.5 e curva de calibração final é mostrada na Figura 5.8.

$$P_{\text{din}} = 10,845 V_{\text{SP}_{\text{din}}} - 10,904 ; \quad R^2 = 0,9983 \quad (5.5)$$

em que:

$V_{\text{SP}_{\text{din}}}$ - Tensão de saída do circuito desenvolvido para medição da pressão diferencial (circuito de condicionamento de sinal), V.

P_{din} - Pressão dinâmica medida no tubo de Pitot, mmca.

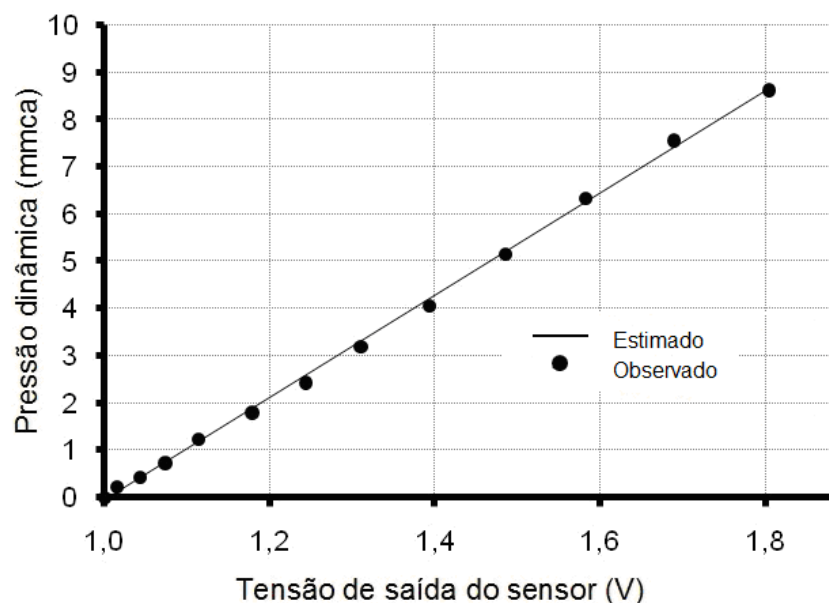


Figura 5.8 - Curva de calibração final.

Observa-se, novamente, uma alta correlação entre a pressão dinâmica e a tensão na saída do sensor de pressão. Com a curva de calibração final, foram feitas leituras de tensão na saída do circuito utilizando-se o DS2438, e o programa computacional realizou o cálculo em tempo real da pressão dinâmica do ar no local de medição.

5.2.3. Teor de água do produto

O teor de água de produtos agrícolas, durante o processo de secagem, foi calculado conhecendo-se o teor de água inicial, a massa inicial e a massa de produto no instante em que se deseja obter o teor de água, aplicando-se a Equação (4.19).

Para determinação da massa de produto em qualquer instante t foi utilizado o sistema de pesagem automático desenvolvido neste trabalho. A montagem final deste sistema é mostrada na Figura 5.9.



Figura 5.9 - Disposição das células de carga utilizadas.

As células de carga responderam perfeitamente aos estímulos de esforços a elas impostos, mantendo-se de acordo como o especificado pelo fabricante para condições de teste, quando submetidas a esforços de compressão.

As leituras de tensão na saída das células de carga utilizadas nos canais analógicos de entrada do módulo de aquisição de dados apresentaram valores equivalentes aos valores de tensão medidos utilizando-se um voltímetro digital, simultaneamente. Dessa forma, comprovou-se a fidelidade das medidas proporcionadas pelo sistema de aquisição de dados utilizado.

A massa de produto foi determinada pela correlação da massa com a soma das tensões de saída das células de carga, visto que foram utilizadas duas células de carga por bandeja.

A primeira curva de calibração foi realizada para verificar o comportamento das tensões de saída das células de carga na ausência de fluxo de ar. Utilizando-se regressão linear simples, obteve-se uma função de primeiro grau que relaciona a massa de produto com as tensões de saída das

células de carga. Essas tensões de saída eram sempre conhecidas, pois eram registradas a cada instante pelo programa computacional.

A Tabela 5.1 contém os valores médios da tensão total na saída das células de carga em função da massa de produto colocada na bandeja, na ausência de fluxo de ar.

Tabela 5.1 - Valores médios da tensão medida na saída das células de carga, V_s , em mV, em função da massa de produto colocada na bandeja, na ausência de fluxo de ar

Tensão total nas células de carga (mV)	Massa de produto na bandeja (g)	Massa de produto estimada (g)	Resíduo (g)	Erro relativo (%)	Coefficiente de variação (%)
16,001	250,08	252,48	-2,40	-0,96	1,35
16,481	500,04	499,19	0,85	0,17	0,68
16,967	749,92	748,99	0,93	0,12	0,45
17,456	999,97	1000,32	-0,35	-0,04	0,34
18,427	1500,12	1499,40	0,72	0,05	0,23
19,392	2000,30	1995,40	4,90	0,25	0,17
20,386	2500,34	2506,30	-5,96	-0,24	0,14
21,345	3000,51	2999,21	1,30	0,04	0,11

Observa-se na Tabela 5.1 que, à medida que a quantidade de produto colocada na bandeja de secagem aumenta, diminui o coeficiente de variação. Para uma massa de 1500,12 g, o coeficiente de variação foi de apenas 0,23 %.

A equação de regressão ajustada aos dados experimentais observados contidos na Tabela 5.1 é expressa pela Equação 5.6, com um coeficiente de determinação, R^2 , igual a 1,000 e desvio padrão, s , igual a 3,40 g.

$$m = 513,98 V_s - 7971,78; \quad R^2 = 1,000 \quad (5.6)$$

em que:

m - Massa de produto, g.

V_s - Soma das tensões medidas na saída das células de carga, mV.

A Figura 5.10 contém a curva de calibração observada e a estimada pela equação de regressão ajustada aos dados observados. Observa-se,

claramente, que a variação da massa em função da tensão na saída das células de carga é perfeitamente linear e diretamente proporcional à variação de tensão. Assim, essa expressão pôde ser utilizada para determinação da massa de produto com precisão satisfatória, no início e no fim no processo de secagem.

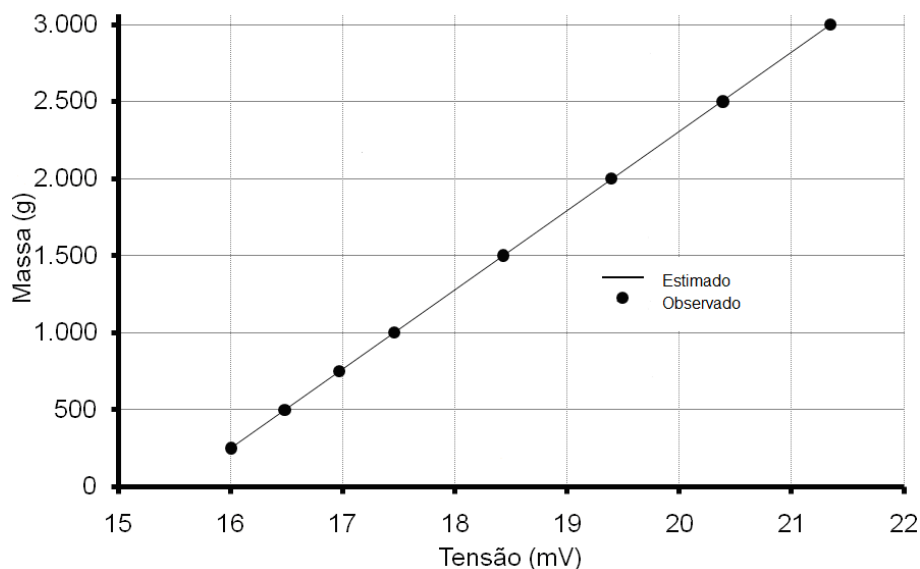


Figura 5.10 - Curva de calibração observada e a estimada.

A Figura 5.10 comprova a linearidade da variação da massa em função da tensão na saída das células de carga. Entretanto, em situação real de trabalho, há a presença do produto a ser seco e o fluxo aquecido para realizar a operação de secagem. Então, são necessárias novas curvas de calibração com o secador operando com diferentes fluxos de ar, em diferentes temperaturas, com a presença do produto nas bandejas de secagem.

Para obtenção destas curvas, foram realizados testes utilizando-se milho como produto de trabalho. O milho foi totalmente seco previamente para garantir que ele não perdesse água quando submetido ao fluxo de ar aquecido.

A Figura 5.11 contém os resultados obtidos pelo sistema de pesagem utilizando-se células de carga, quando uma quantidade de produto de 1.500g foi submetida ao fluxo de ar aquecido com velocidades variáveis de 0,30, 0,35, 0,40 e 0,45 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ e temperaturas de secagem de 30, 50, 60, 70 e 80°C.

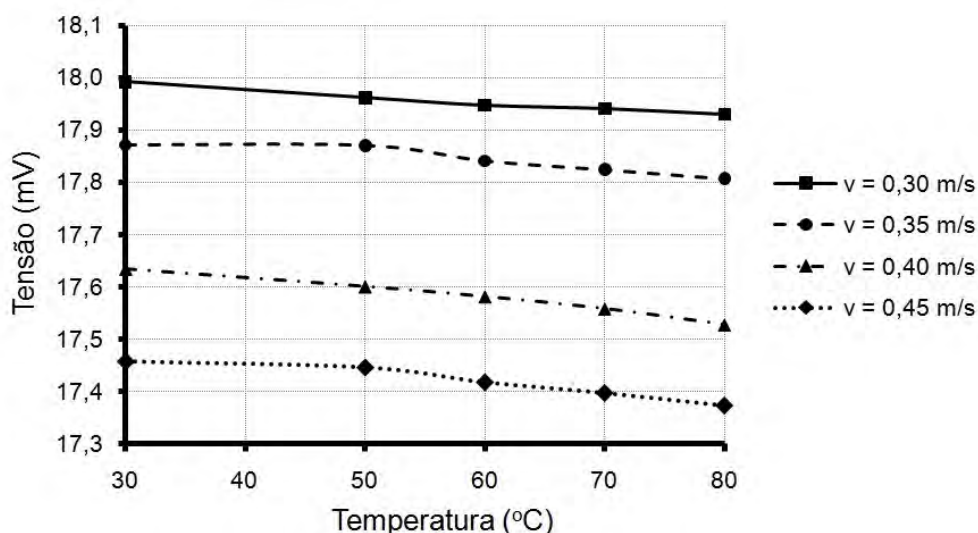


Figura 5.11 - Variação da tensão na saída das células de carga em função do fluxo de ar e da temperatura de secagem.

Observa-se claramente que, à medida que o a velocidade do fluxo de ar aumenta, o sinal de saída das células de carga diminui, isto é o fluxo de ar através da massa de grãos favoreceu a diminuição da deformação das células de carga.

No entanto, foi observada a variação do sinal de saída das células de carga com a variação de temperatura. Este comportamento é indesejado. Observou-se que, fixados o fluxo de ar de secagem e a quantidade de produto, à medida que a temperatura aumentava, o valor da tensão na saída das células de carga diminuía. Este efeito foi observado, porque não foi possível realizar totalmente a isolamento térmica das células de carga. Assim, para cada fluxo de ar considerado, tornou-se necessária a inclusão de um fator de compensação de temperatura.

Foram realizados testes para vários fluxos de ar, com o intuito de verificar o comportamento da tensão de saída das células de carga em função da quantidade de produto e da temperatura de secagem escolhida.

Na Figura 5.12 é apresentada a tela do gráfico obtido com o programa computacional, mostrando os testes de calibração das células de carga com massas de produto variáveis de 500 a 2.000 g e velocidade do fluxo de ar de secagem de $0,30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

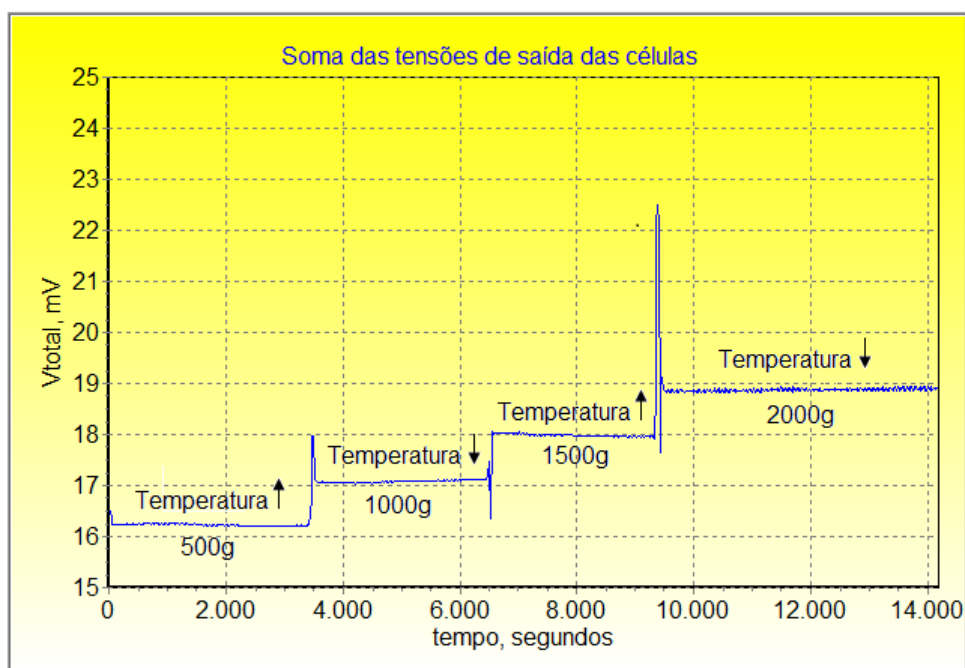


Figura 5.12 - Tela do programa computacional mostrando os testes de calibração das células de carga com massas de produto variáveis de 500 a 2.000 g e velocidade do fluxo de secagem de $0,30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Nos ensaios realizados, para uma determinada quantidade de produto, variou-se a temperatura entre 30 a 80°C e os dados de saída das células de carga foram registrados.

Observa-se, novamente, a influência da temperatura no sinal de tensão na saída das células de carga. As variações bruscas de tensão na saída das células foram registradas nos momentos em que a bandeja foi retirada para colocação de mais produto.

A Tabela 5.2 sumariza os resultados obtidos para fluxos de ar de secagem de $0,30$; $0,35$ e $0,45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ e temperaturas de 30, 50, 70 e 80°C .

Tabela 5.2 - Valores médios da tensão na saída das células de carga, V_s , em mV, com ar aquecido para diferentes fluxos de ar e diferentes temperaturas

Velocidade do fluxo de ar ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Massa de produto (g)	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)			
		30	50	70	80
0,30	500	16,254	16,223	16,208	16,200
	1000	17,109	17,089	17,066	17,055
	1500	18,025	17,994	17,968	17,961
	2000	18,899	18,881	18,857	18,851
	2500	19,834	19,798	19,779	19,771
0,35	500	16,090	16,074	16,060	16,047
	1000	16,868	16,857	16,838	16,824
	1500	17,723	17,716	17,664	17,649
	2000	18,599	18,584	18,516	18,513
	2500	19,495	19,463	19,398	19,380
0,45	500	15,938	15,927	15,922	15,902
	1000	16,705	16,627	16,618	16,591
	1500	17,429	17,404	17,375	17,367
	2000	18,240	18,185	18,164	18,156
	2500	19,086	19,048	18,986	19,018

A Tabela 5.3 contém os valores médios da tensão total na saída das células de carga com fluxo de ar aquecido a 50°C , para um fluxo de ar igual a $0,30\text{ms}^{-1}$, em função da massa de produto colocada na bandeja de secagem.

A equação de regressão ajustada aos dados experimentais contidos na Tabela 5.3 é expressa pela Equação 5.7, com um coeficiente de determinação, R^2 , igual a 0,9999.

$$m = 559,04 V_s - 8561,2 ; \quad R^2 = 0,9999 \quad (5.7)$$

Tabela 5.3 - Valores médios da tensão de saída, V_s , em mV, das células de carga com fluxo de ar com velocidade de $0,30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, aquecido a 50°C , em função da massa colocada na bandeja

Tensão total nas células de carga (mV)	Massa de produto na bandeja (g)	Massa de produto estimada (g)	Resíduo (g)	Erro relativo (%)
16,223	500	507,94	-7,938	-1,59%
17,089	1000	992,35	7,654	0,77%
17,994	1500	1498,28	1,722	0,11%
18,881	2000	1994,09	5,910	0,30%
19,798	2500	2506,84	-6,842	-0,27%

A Figura 5.13 retrata a correlação perfeita entre a massa de produto, estimada com a Equação (5.7), e a tensão na saída da célula de carga, para um fluxo de ar com velocidade de $0,30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ e aquecido a 50°C .

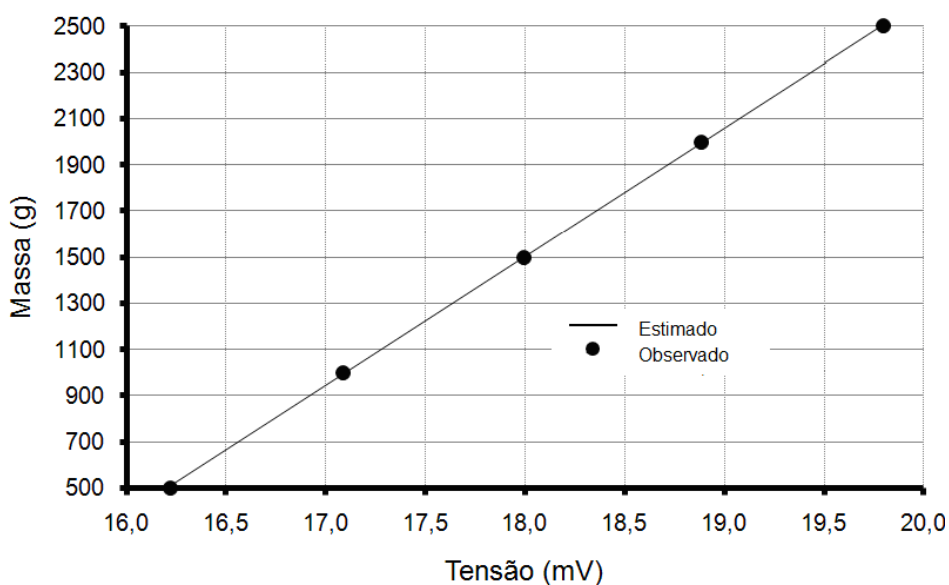


Figura 5.13 – Variação da massa de produto em função da tensão na saída da célula de carga, para uma velocidade do fluxo de ar de secagem de $0,30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, aquecido à temperatura de 50°C .

Considerando o mesmo fluxo de ar de $0,30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, agora aquecido à temperatura de 80°C , a equação de regressão ajustada aos dados experimentais da é expressa pela Equação 5.8), com um coeficiente de determinação, R^2 , de 0,9999.

$$m = 559,68 V_s - 8560,5; \quad R^2 = 0,9999 \quad (5.8)$$

Os resultados observados e os estimados utilizando a Equação 5.8 encontram-se na Figura 5.14. Observa-se, novamente, uma correlação quase perfeita entre a massa de produto e a tensão de saída das células de carga ($R^2 = 0,9999$) para essa situação. Pode-se observar, ainda, que não há praticamente, diferença entre as duas equações ajustadas (Equações 5.7 e 5.8).

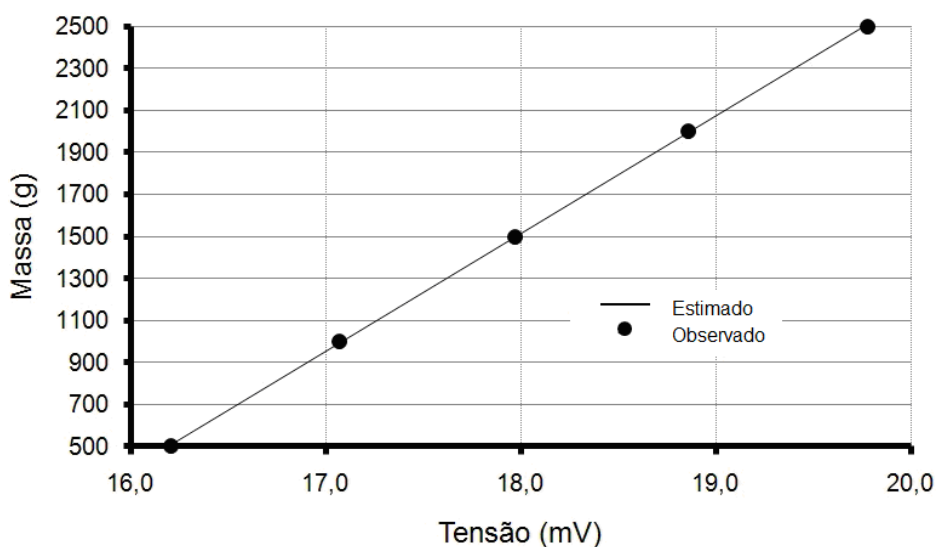


Figura 5.14 – Variação da massa de produto em função da tensão na saída da célula de carga, para uma velocidade do fluxo de ar de secagem de $0,30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, aquecido à temperatura de 80°C .

Para os dois casos analisados, observa-se que os coeficientes angulares das equações são praticamente idênticos, bem como os coeficientes lineares, o que não significa que possa ser utilizada uma única equação para todo o intervalo de temperatura estudado.

Dessa forma, para cada fluxo considerado, foram obtidas expressões da tensão de saída das células de carga em função da massa colocada na bandeja, incluindo o fator de compensação de temperatura do ar de secagem. As equações finais para cada fluxo de ar considerado, obtidas por meio de regressão linear múltipla, são apresentadas na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Equações de calibração das células de carga para fluxos de ar de secagem de 0,30; 0,35 e 0,45 m s^{-1}

Velocidade do fluxo de ar ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Equação ajustada e coeficiente de determinação (R^2)	Erro padrão (g)
0,30	$m = 559,12 V_s + 0,634 T - 8595,6$ $R^2 = 0,9998$	9,16
0,35	$m = 592,10 V_s + 0,905 T - 9042,8$ $R^2 = 0,9992$	20,11
0,45	$m = 559,12 V_s + 0,634 T - 8595,6$ $R^2 = 0,9985$	27,67

Observa-se alta correlação entre os valores estimados e os valores reais, evidenciado pelo alto valor do coeficiente de determinação, R^2 , das equações ajustadas.

Quando foram utilizados fluxos de ar de secagem com velocidades mais elevadas, ocorreram maiores oscilações nas tensões de saída das células de carga e, conseqüentemente, nos valores estimados para a massa de produto. Este fato pode ser claramente evidenciado pelos valores obtidos do erro padrão para cada uma das equações (Tabela 5.4).

Obviamente, era esperado que as equações generalizadas encontradas para a massa de produto em função da tensão de saída das células de carga apresentassem uma correlação um pouco menor do que aquelas apresentadas para uma temperatura específica. Entretanto, as equações encontradas permitem a estimação da massa de produto para outros valores de temperatura dentro do intervalo considerado ($30^\circ\text{C} \leq T \leq 80^\circ\text{C}$).

5.2.4. Consumo de energia elétrica

A Figura 5.15 mostra a foto de um dos medidores utilizados no sistema de medição de consumo de energia elétrica desenvolvido.

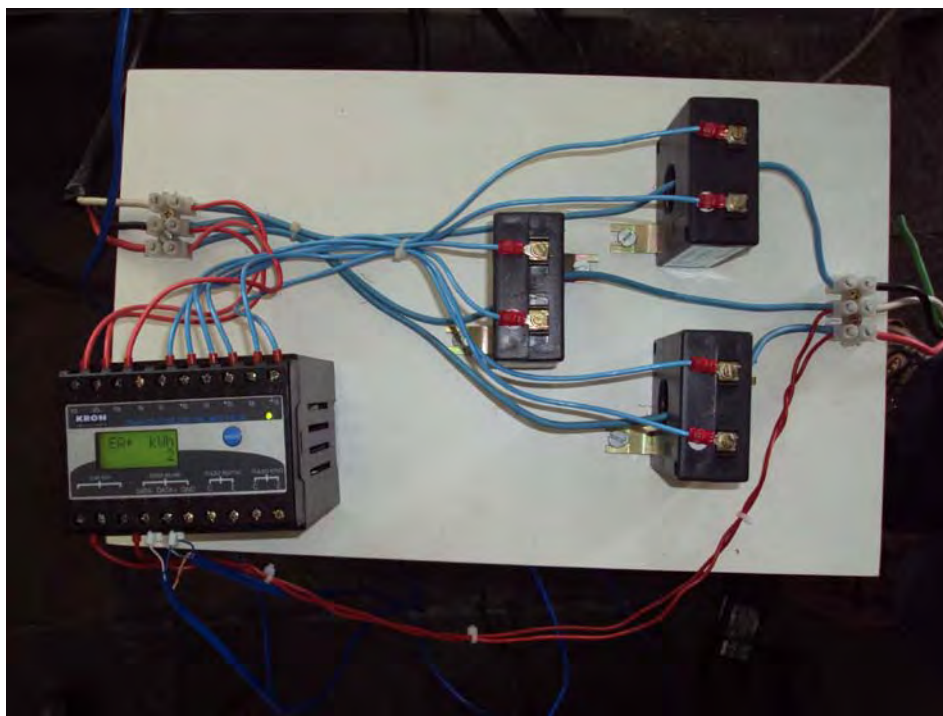


Figura 5.15 – Um dos medidores utilizados no sistema de medição de consumo de energia elétrica.

O sistema implementado para medição da quantidade de energia elétrica consumida no processo atendeu às expectativas, uma vez que permitiu obter leituras consistentes do consumo de energia de todos os aparelhos medidores instalados.

A quantidade de energia consumida pelo sistema de ventilação foi calculada pela diferença entre o consumo de energia total e o consumo do sistema de aquecimento, uma vez que o consumo de energia do sistema eletrônico desenvolvido é muito baixo, quando comparado ao consumo dos sistemas de aquecimento e de ventilação.

A Figura 5.16 mostra a interface do programa utilizado para a medição de energia elétrica, consumida pelo sistema de aquecimento do ar de secagem. Por meio da utilização desse programa, pôde-se obter, em tempo real, o consumo de energia elétrica de cada sistema, bem como os valores de

corrente e tensão em cada uma das fases que energizava a carga. Pode-se observar, em destaque, o consumo de energia elétrica do sistema de aquecimento.

XP2 05 - Ler

Série: 695062 | Endereço: 3 | Descrição: **Sistema Aquecimento** | Código: 95 | Versão: 2.0 | ☒ Para Leitura

TP: 1.00 | TC: 10.00 | KE: 0 | TL: 48 | TI: 15 | Sequência Ponto Flutuante: F2, F1, F0, EXP

Medição		Trifásico		L1 / L12		L2 / L23		L3 / L31	
U	226,956 V		224,546 V		227,323 V		226,777 V		
I	8,449 A		9,524 A		9,620 A		6,397 A		
P	3,308 kW		1,222 kW		1,247 kW		829,038 W		
Q	-99,494 VA		-253,857 VA		180,759 VA		-26,717 VA		
S	3,310 kVA		1,256 kVA		1,268 kVA		834,718 VA		
FP	1,000		0,979		0,990		0,999		
F	60,0 Hz								
U Máx	232,364 V	THD U	2,90 %	2,60 %	2,90 %				
I Máx	8,468 A	THD I	3,60 %	2,90 %	3,00 %				
TMP	0,0 °C	L12		L23		L31			

Energia

EA+	3,538 kWh
ER+	0,000 VAh
EA-	-304,468 Wh
ER-	-135,201 VAh

Demanda

DA	0,000 W
MDA	2,284 kW
DS	0,000 VA
MDS	2,317 kVA

STATUS: Funcionamento normal | MODBUS COM4 9600 8N2 | 23/12/10 | 16:57

Figura 5.16 – Interface do programa computacional utilizado para medição de consumo de energia elétrica.

5.2.5. Rede de aquisição e gerenciamento de dados

A Figura 5.17 representa o resultado final da rede de aquisição e gerenciamento de dados, bem como a utilização dos dispositivos atuadores (potenciômetros digitais, inversor de frequência, conversor de potência e servomotores).

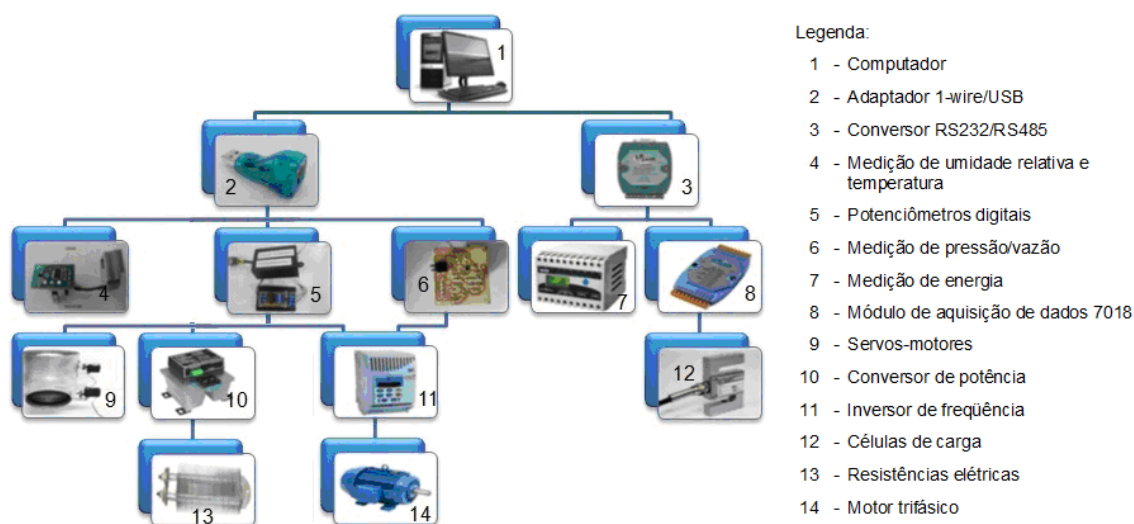


Figura 5.17 – Rede de dispositivos utilizados para aquisição de dados e controle do processo.

Todos os dispositivos e componentes foram gerenciados pelo computador que atuou como dispositivo mestre da rede, gerenciando e comandando todo o sistema de controle com base em estratégias implementadas em um programa computacional desenvolvido especialmente para essa finalidade.

O sistema utilizou sensores, chaves e potenciômetros da tecnologia 1-Wire™, bem como os módulos de aquisição de dados do fabricante LR Informática Industrial.

Pode-se observar na Figura 5.17 o inter-relacionamento entre os componentes do sistema, indicando as vias de comunicação entre eles e o dispositivo mestre, proporcionando ao programa computacional obter as informações necessárias para o gerenciamento e o controle simultâneo de todos os dispositivos.

Na Figura 5.18 é mostrada uma foto dos circuitos eletrônicos desenvolvidos para aquisição de dados e controle do processo.

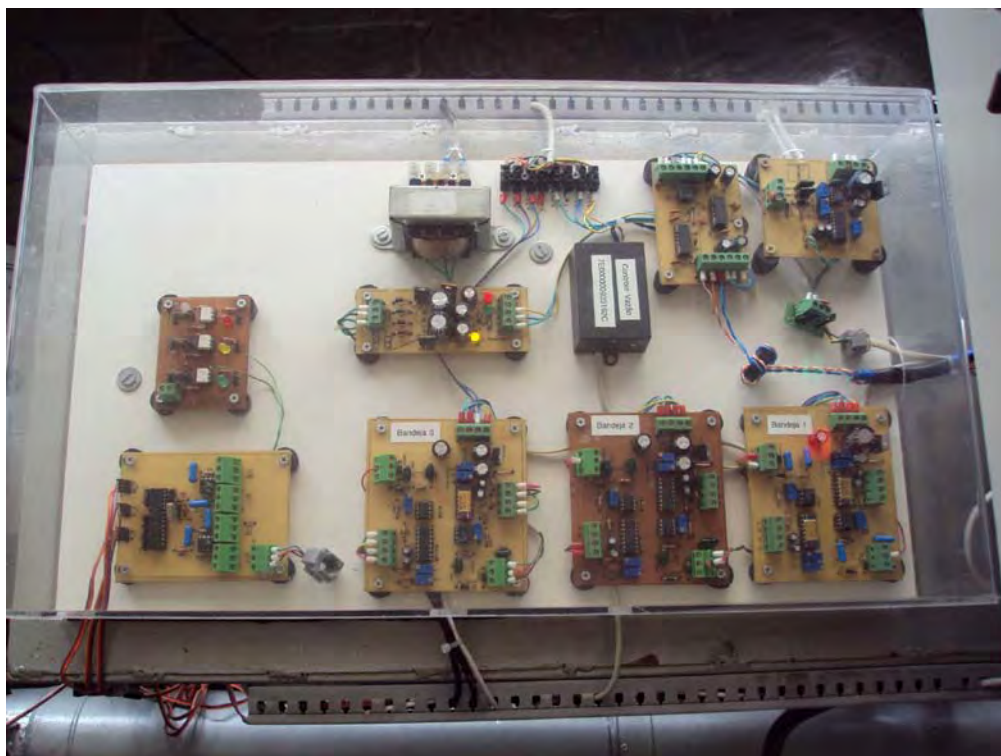


Figura 5.18 – Circuitos eletrônicos desenvolvidos para aquisição de dados e controle do processo.

Inicialmente, foram encontrados alguns problemas com a troca de dados entre o computador mestre e os dispositivos 1-Wire™ escravos, quando o inversor de frequência era ligado. Os testes revelaram que o funcionamento do inversor interferia na estabilidade da rede. A rede 1-Wire™ apresentou um comportamento muito vulnerável à interferência eletromagnética provocada pelo inversor de frequência, sobretudo quando foram acoplados os cabos de saída de controle do sistema 1-Wire™ às entradas analógicas do inversor, para realização do controle do fluxo de ar de secagem.

Quando foram resolvidos estes problemas, pôde-se constatar que a rede de aquisição e gerenciamento de dados funcionou dentro do esperado, possibilitando a troca de dados entre o computador mestre e os dispositivos 1-Wire™ escravos.

Especificamente, no caso da rede 1-Wire™, foi possível comprovar a facilidade de interação entre os dispositivos, a comunicação entre o dispositivo mestre e os dispositivos escravos por meio de endereçamento e a facilidade de interconexão entre eles por meio de um único cabo de dados.

5.2.6. Programa computacional

Na Figura 5.19 é mostrada a tela principal do programa desenvolvido para controle e aquisição de dados.

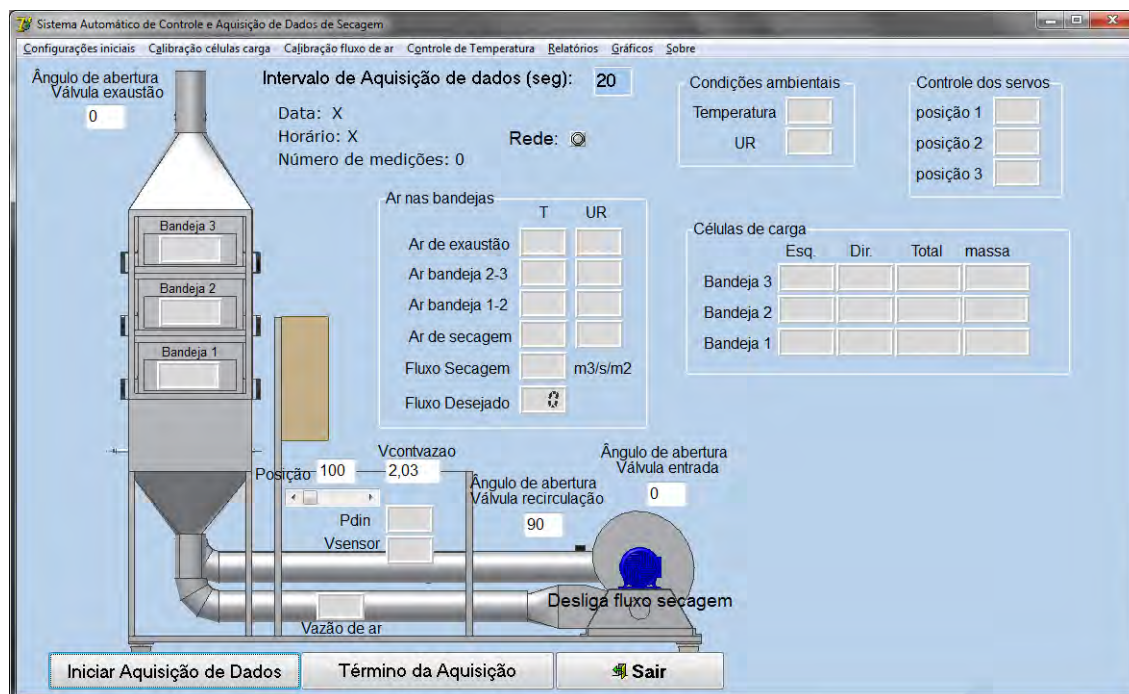


Figura 5.19 - Tela principal do programa desenvolvido para controle e aquisição de dados.

As condições de funcionamento do sistema de secagem são determinadas pelo módulo denominado de *Configurações Iniciais*, que corresponde à tela inicial do programa. Nesta tela, o usuário pode entrar com as condições de secagem (temperatura e fluxo de ar de secagem desejado), a massa de produto colocada em cada uma das bandejas, o teor de água inicial do produto e o teor de água final desejado. Nesta tela, existe a opção de escolha do modo de controle de temperatura: local (controlador de temperatura do painel de comando) ou remoto (realizado pelo programa computacional).

A Figura 5.20 contém uma ilustração detalhada da tela do módulo denominado de *Configurações Iniciais*.

Uma vez inicializada a aquisição de dados, os dados são automaticamente armazenados em um arquivo texto, sendo possível visualizá-los em uma tela denominada de *Relatórios*. A Figura 5.21 contém detalhes dessa tela com a aquisição de dados sendo realizada.

Configurações Iniciais

Temperatura Secagem (°C)

Fluxo de Secagem (m3/seg/m2)

Percentual recirculação ar

Umidade relativa para recirculação

Massa de Produto (g)

- Bandeja 1

- Bandeja 2

- Bandeja 3

Teor de água inicial (% b.u.):

Teor de água final (% b.u.):

Controle de temperatura de secagem

☐ Local (Controlador do Painel Comando)

☒ Remoto (Programa Computacional)

Figura 5.20 – Tela de *Configurações Iniciais* (abertura) para entrada de dados.

Dados de Aquisição

Data: 13/12/2010

Horário	Tamb	URamb	Tsecagem	URsecage	Texaustac	URexaust	Texaustac	URexaust	Texaustac	URexaust	VcontVaz	VsaídaPd	Pdin	Vazao	Fluxo ar	V/total	m/total	V2total	m2total	mprodutoC	Umidade2	mprodutoC	Umidade3
14:27:21	0,00	52,92	0,00	6,00	0,00	7,76	0,00	13,31	0,00	12,71	2,43	1,14	1,46	1,88	0,43	15,756	7,881	17,862	9,163	1,600,10	31,56	1,515,10	27,73
14:27:41	28,03	55,98	68,59	7,06	66,28	8,99	61,38	16,26	61,59	14,97	2,43	1,12	1,24	1,73	0,40	15,754	7,880	17,890	9,177	1,616,40	32,26	1,531,40	28,50
14:28:01	27,91	55,80	68,78	6,70	66,00	8,89	60,06	16,90	60,69	15,29	2,43	1,14	1,46	1,88	0,43	15,764	7,885	17,886	9,175	1,614,00	32,16	1,529,00	28,39
14:28:21	27,91	55,80	68,88	6,63	65,84	8,81	58,84	17,98	60,06	15,26	2,43	1,13	1,35	1,81	0,41	15,768	7,887	17,891	9,178	1,617,40	32,30	1,532,40	28,54
14:28:41	27,94	55,48	69,38	6,29	65,94	8,50	57,19	18,94	59,06	15,57	2,43	1,14	1,46	1,88	0,43	15,792	7,899	17,877	9,170	1,608,50	31,92	1,523,50	28,12
14:29:01	28,09	55,82	70,00	6,23	66,16	8,73	55,50	19,89	58,22	15,89	2,43	1,12	1,24	1,73	0,40	15,775	7,891	17,833	9,148	1,611,30	32,04	1,526,30	28,26
14:29:21	28,13	55,83	70,41	6,30	66,41	8,51	54,31	20,17	57,41	16,54	2,43	1,14	1,46	1,88	0,43	15,745	7,876	17,819	9,140	1,607,70	31,89	1,522,70	28,08
14:29:41	28,09	55,50	70,91	6,24	66,63	8,43	52,94	21,47	56,56	16,51	2,43	1,12	1,24	1,73	0,40	15,773	7,889	17,843	9,153	1,599,20	31,52	1,514,20	27,67
14:30:01	28,09	55,50	71,44	5,96	67,00	8,52	51,94	21,86	55,97	16,83	2,43	1,13	1,35	1,81	0,41	15,778	7,892	17,836	9,149	1,594,10	31,30	1,509,10	27,43
14:30:21	28,00	55,49	71,72	5,90	67,19	8,36	51,00	22,15	55,38	17,24	2,43	1,14	1,46	1,88	0,43	15,777	7,892	17,833	9,148	1,587,30	31,01	1,502,30	27,11
14:30:41	28,03	55,33	71,91	5,90	67,50	8,45	50,34	22,35	54,75	17,21	2,43	1,13	1,35	1,81	0,41	15,792	7,899	17,816	9,139	1,582,20	30,79	1,497,20	26,86
14:31:01	27,79	55,46	72,03	5,97	67,63	8,45	49,88	21,99	54,41	16,77	2,43	1,14	1,46	1,88	0,43	15,765	7,886	17,787	9,124	1,580,20	30,70	1,495,20	26,76
14:31:21	27,81	55,79	71,84	6,04	67,59	8,37	49,50	22,07	53,81	16,83	2,43	1,13	1,35	1,81	0,41	15,749	7,878	17,795	9,128	1,576,30	30,53	1,491,30	26,57
14:31:41	27,94	55,48	71,86	6,04	67,75	8,53	49,22	22,06	53,69	16,74	2,43	1,13	1,35	1,81	0,41	15,785	7,896	17,828	9,145	1,570,60	30,28	1,485,60	26,29
14:32:01	28,16	55,67	71,34	5,86	67,63	8,37	49,28	21,72	53,34	16,82	2,43	1,14	1,46	1,88	0,43	15,800	7,903	17,812	9,137	1,569,80	30,24	1,484,80	26,25
14:32:21	28,03	55,49	71,31	5,96	67,47	8,36	49,03	21,28	53,19	17,06	2,43	1,12	1,24	1,73	0,40	15,762	7,884	17,766	9,113	1,567,20	30,13	1,482,20	26,12
14:32:41	27,94	55,64	70,72	6,31	67,47	8,45	49,25	21,14	53,28	16,73	2,43	1,14	1,46	1,88	0,43	15,768	7,887	17,780	9,121	1,561,20	29,85	1,475,20	25,82
14:33:01	28,00	55,49	70,69	6,24	67,25	8,52	49,44	20,72	53,13	16,81	2,43	1,11	1,13	1,66	0,38	15,743	7,875	17,757	9,109	1,560,40	29,82	1,475,40	25,78
14:33:21	27,81	55,46	70,47	6,30	67,25	8,44	49,50	20,38	52,91	16,80	2,43	1,13	1,35	1,81	0,41	15,756	7,881	17,788	9,125	1,555,90	29,62	1,470,90	25,55
14:33:41	27,84	55,47	70,63	6,24	67,00	8,35	49,69	20,05	52,97	16,37	2,43	1,14	1,46	1,88	0,43	15,793	7,900	17,803	9,132	1,551,10	29,40	1,466,10	25,31
14:34:01	27,94	55,48	70,47	6,30	67,00	8,35	49,84	20,06	53,06	16,38	2,43	1,14	1,46	1,88	0,43	15,793	7,900	17,788	9,115	1,550,10	29,36	1,465,10	25,26

Figura 5.21 - Tela de *Relatórios* do programa computacional.

Esta tela possui uma opção interessante que permite exportar os dados para uma planilha eletrônica em tempo real, para que os dados adquiridos possam ser processados. Esta importante opção foi muito utilizada quando foi realizada a calibração do sistema de medição do teor de água do produto utilizando células de carga. Na Figura 5.22 é mostrada a tela do programa *Excel* aberta, depois da exportação dos dados.

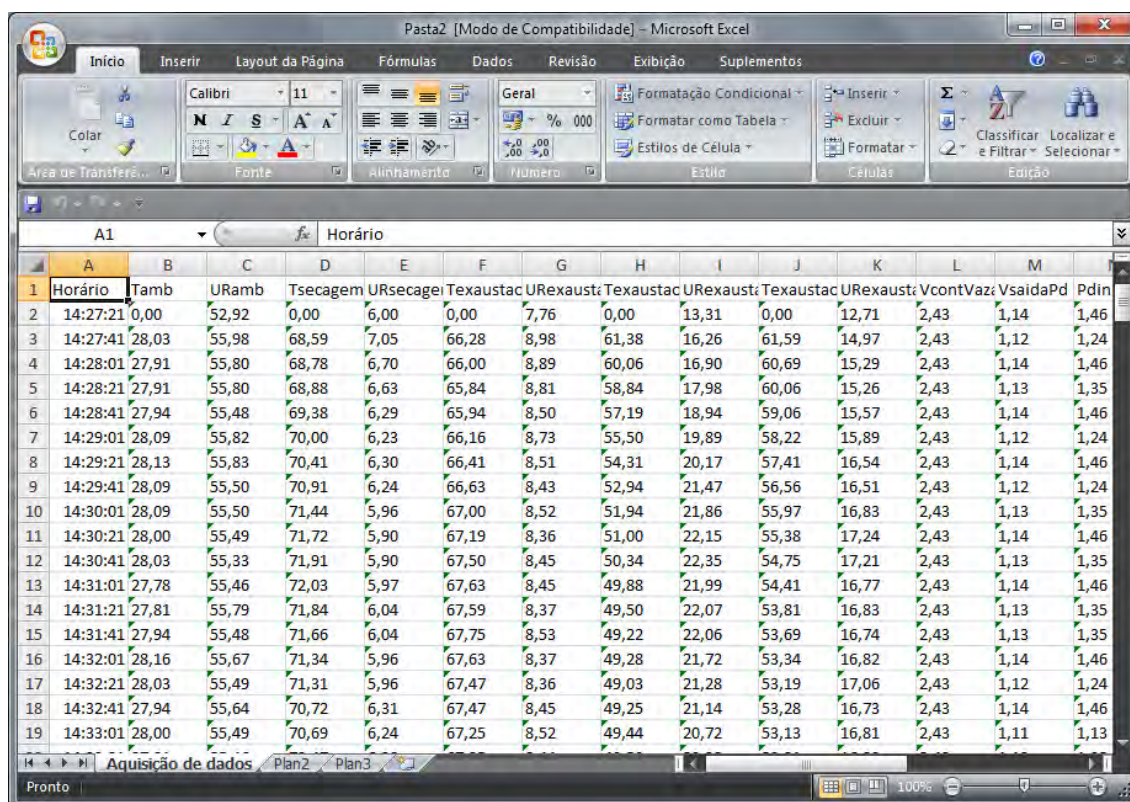


Figura 5.22 - Exportação das informações do programa de aquisição de dados para o Excel.

O programa computacional permite ainda, a visualização de gráficos de tendências das grandezas monitoradas. A Figura 5.23 contém a tela mostrando estes tipos de gráficos.

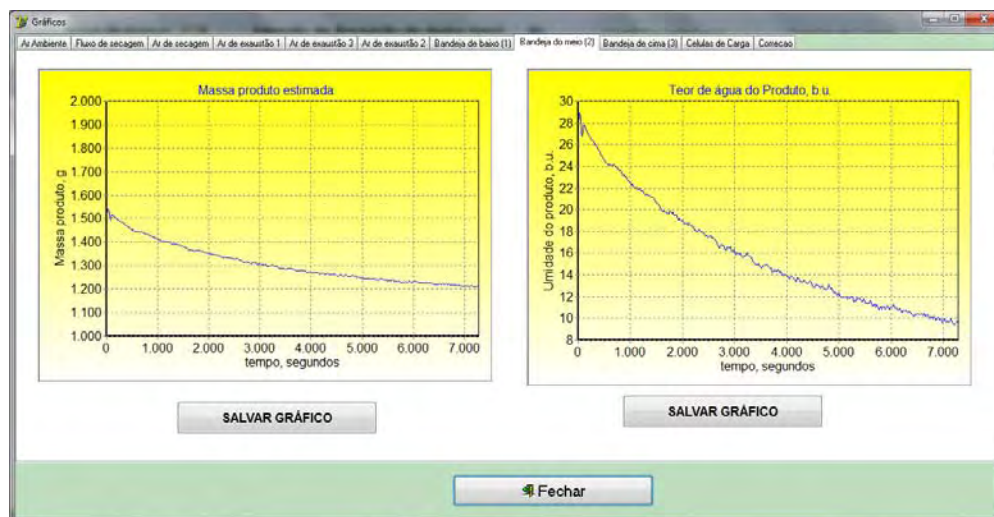


Figura 5.23 - Visualização de gráficos de tendências das grandezas monitoradas.

5.3. SISTEMA DE CONTROLE AUTOMÁTICO

5.3.1. Controle do fluxo de ar

A vazão do ar de secagem e, conseqüentemente, o fluxo de ar de secagem foram determinados em função da tensão na saída do circuito desenvolvido para medição da pressão dinâmica, utilizando as Equações 4.15 e 5.5.

O valor desejado para o fluxo de ar foi ajustado utilizando-se o dispositivo digital endereçável DS2890 por meio da variação da tensão de controle obtida nos seus terminais, conforme Equação 4.22.

Na Figura 5.24 é apresentada a relação entre a tensão de controle (referência), imposta pelo potenciômetro digital, variando-se a posição dos seus terminais, e a tensão na saída do circuito do sensor de pressão dinâmica. A expressão obtida que relaciona a tensão de controle (referência) e a tensão na saída do circuito do sensor de pressão dinâmica é dada pela Equação 5.9.

$$V_F = 1,9984 V_{SP_{din}} + 0,0481; \quad R^2 = 0,9987 \quad (5.9)$$

em que:

V_F - Tensão de controle na saída do potenciômetro digital DS2890 para imposição do fluxo de ar desejado, V.

$V_{SP_{din}}$ - Tensão na saída do circuito do sensor de pressão dinâmica, V.

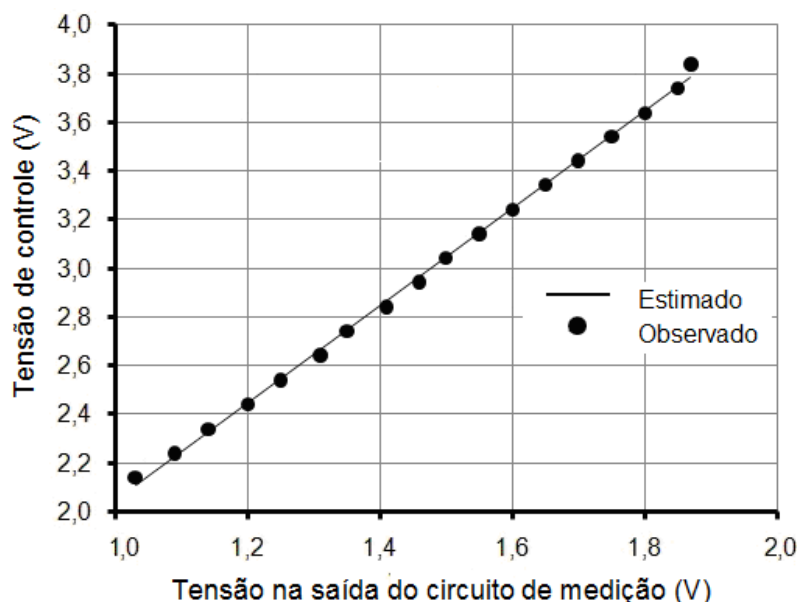


Figura 5.24 - Relação entre a tensão de controle (V_F) e a tensão na saída do circuito de medição do fluxo de ar para secagem ($V_{SP_{din}}$).

A análise da Equação 5.9 permite concluir que, para se obter um fluxo de ar especificado, proporcional à tensão na saída do sensor, a tensão de controle deve ser, praticamente, o dobro do sinal da tensão na saída do circuito medidor de fluxo. Este valor está coerente, uma vez que estes dois valores de tensão foram aplicados nas duas entradas analógicas do inversor de frequência para implementação do controle de vazão. Na entrada analógica 1 do inversor de frequência foi utilizado um ganho de 2, significando que o sinal na saída do circuito do sensor (1 a 2 V) foi multiplicado por 2, obtendo-se, assim, um sinal com faixa de variação de 2 a 4 V. Este sinal foi comparado com o sinal analógico de referência aplicado na entrada analógica 2, que estabelece o fluxo de ar desejado. O ganho utilizado para essa entrada foi unitário, de forma que o sinal de referência assumiu valores de 0 a 5 V, por meio da variação do potenciômetro digital DS2890.

O pequeno desvio (erro de compensação) apresentado (0,0481 V) pode ter sido introduzido nas etapas de condicionamento dos sinais (amplificadores operacionais e isoladores óticos) ou nas próprias entradas do inversor. Uma das possibilidades de compensação deste desvio seria a imposição de compensação nas entradas analógicas do inversor. No entanto, optou-se por compensar o desvio apresentado por meio de programa computacional, utilizando-se a Equação 5.9 no código do programa desenvolvido.

A Figura 5.25 contém o gráfico de variação da velocidade do ar de secagem em função do tempo, quando a velocidade do ar de secagem foi ajustada para $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. O gráfico obtido ilustra que o sistema de controle de velocidade implementado com o inversor de frequência apresentou um desempenho muito bom, ajustando a velocidade no valor desejado com pequenas variações em torno deste valor.

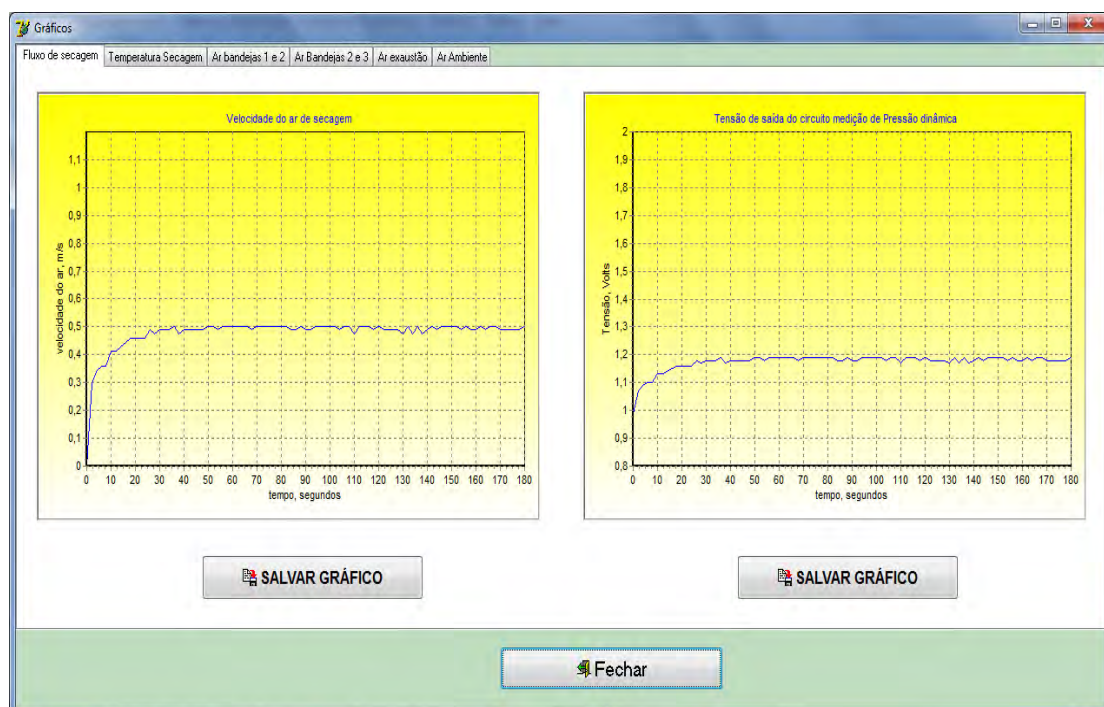


Figura 5.25 - Variação da velocidade do ar de secagem em função do tempo, para o valor ajustado de $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Ressalta-se que o programa computacional não realizou o controle de velocidade, somente enviou a tensão de referência para a velocidade desejada. Todo o controle foi realizado pelo inversor de frequência. Neste processo, o inversor executou duas importantes funções: (i) regulador PID para controle de velocidade do ar e, (ii) elemento de ajuste de velocidade fornecendo tensões trifásicas com a frequência necessária para o motor trifásico, que acionou o ventilador centrífugo.

Os parâmetros utilizados para o regulador PID interno ao inversor foram os seguintes:

P520 - Ganho Proporcional: 1

P521 - Ganho Integral: 1

P522 - Ganho derivativo: 0

Os resultados obtidos por meio da parametrização realizada, atuando-se nos parâmetros P520, P521 e P522, mostraram-se satisfatórios, visto que a velocidade não apresentou sobre-sinal, nem erro em regime permanente. O tempo de resposta desse sistema foi de, aproximadamente, 35 segundos.

Geralmente, o uso do ganho derivativo é indicado para processos com dinâmica rápida. Entretanto, apesar do controle de vazão ser um processo rápido, o controlador PI mostrou-se suficiente para controlar o processo.

5.3.2. Interferência eletromagnética

Os testes iniciais revelaram que o funcionamento do inversor de frequência interferia na estabilidade da rede 1-Wire™. A rede apresentou um comportamento muito vulnerável à interferência eletromagnética provocada pelo inversor, sobretudo quando foram acoplados os cabos de saída de controle do sistema 1-Wire™ às entradas analógicas do inversor, para realização do controle do fluxo de ar de secagem.

A Figura 5.26 é uma foto da tela do osciloscópio na qual é mostrada a tensão na linha de dados. Observa-se, claramente, a presença de ruídos introduzidos na linha de dados devido ao funcionamento do inversor de frequência. Esses ruídos tornaram a comunicação dos dados muito instável com freqüente falta de reconhecimento dos dispositivos escravos e conseqüente perda de dados.

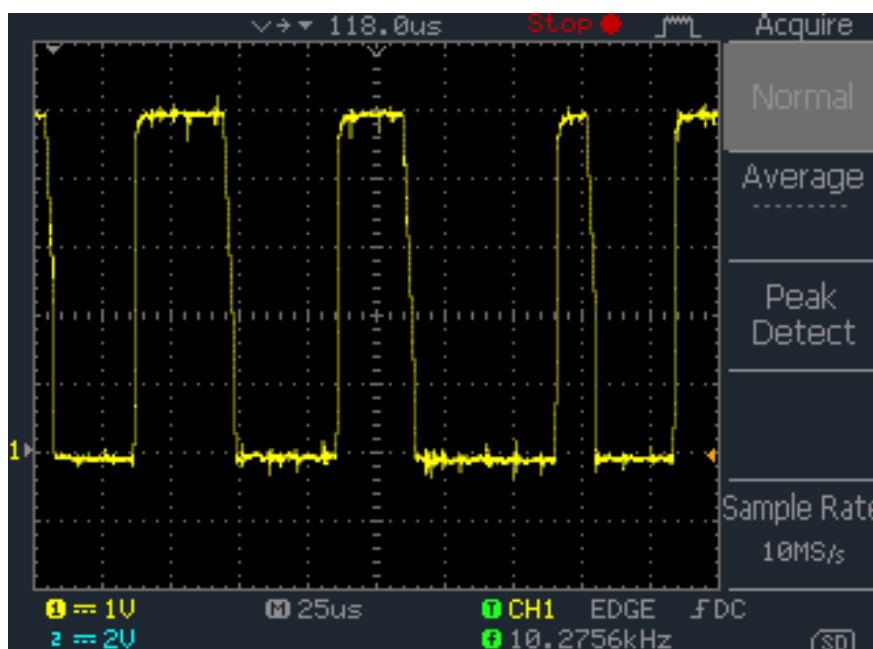


Figura 5.26 - Interferência eletromagnética na comunicação da rede 1-Wire™.

Depois de tomar as providências relatadas na metodologia, os ruídos foram filtrados em níveis que não interferiram mais na comunicação dos dados, garantindo, assim, a confiabilidade do sistema de aquisição de dados. Este problema foi de difícil solução e consumiu alguns meses de trabalho, até encontrar a solução necessária. Todas as providências tomadas foram importantes e agiram em conjunto.

Entretanto, uma das providências tomadas foi vital para a solução do problema, que foi a inserção de um núcleo toroidal de ferrite no cabo de interligação do inversor e circuitos de controle 1-Wire™. As ferrites têm como finalidade o aumento da indutância dos cabos, fazendo com que estes funcionem como filtros passa-baixas (deixam passar a corrente contínua ou as baixas frequências e filtram as altas frequências), eliminando a entrada ou saída de ruídos parasitas de alta frequência.

A Figura 5.27 é uma fotografia da tela do osciloscópio mostrando a diminuição da interferência eletromagnética na rede de comunicação de dados.

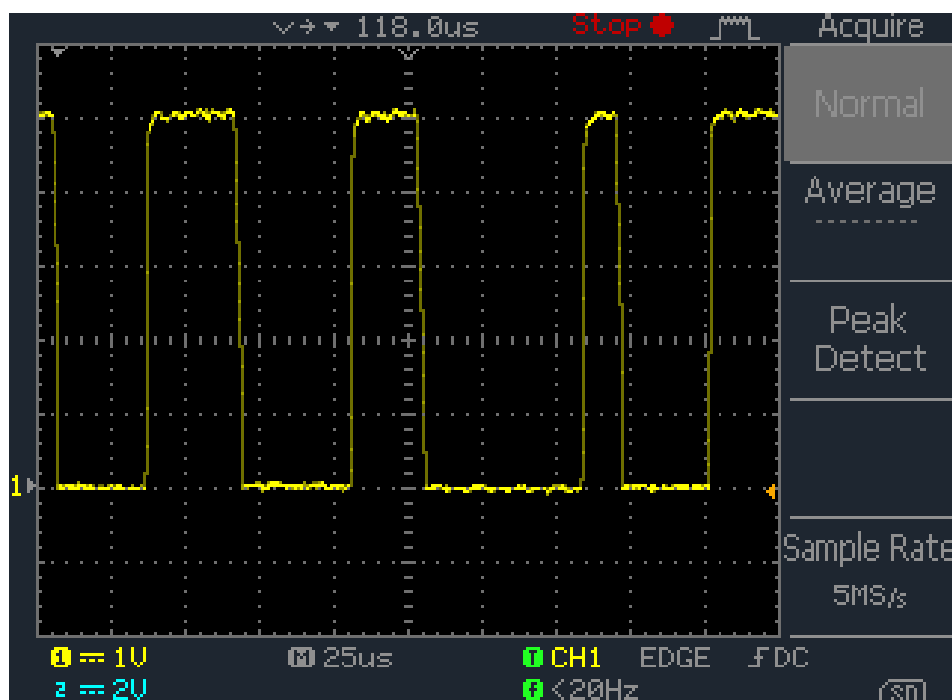


Figura 5.27 - Redução da interferência eletromagnética na rede de comunicação 1-Wire™.

5.3.3. Controle da temperatura do ar de secagem

O controle de temperatura foi realizado variando-se a tensão de controle aplicada nos terminais do conversor de potência que controla a potência das resistências do sistema de aquecimento do ar de secagem.

O controle remoto foi realizado pelo potenciômetro digital controlado pelo programa computacional desenvolvido. Observa-se, na Figura 5.28, que a tensão de controle pode ser controlada de forma linear por meio da variação da posição de controle imposta pelo programa computacional. A relação entre estas duas variáveis é expressa pela Equação 5.10.

$$V_T = 0,0202 \cdot D_T; \quad R^2 = 1 \quad (5.10)$$

em que:

V_T - Tensão de controle na saída do potenciômetro digital DS2890 para imposição da temperatura desejada, V.

D_T - Posição de controle imposta pelo DS2890 para controle da tensão nos terminais do conversor de potência.

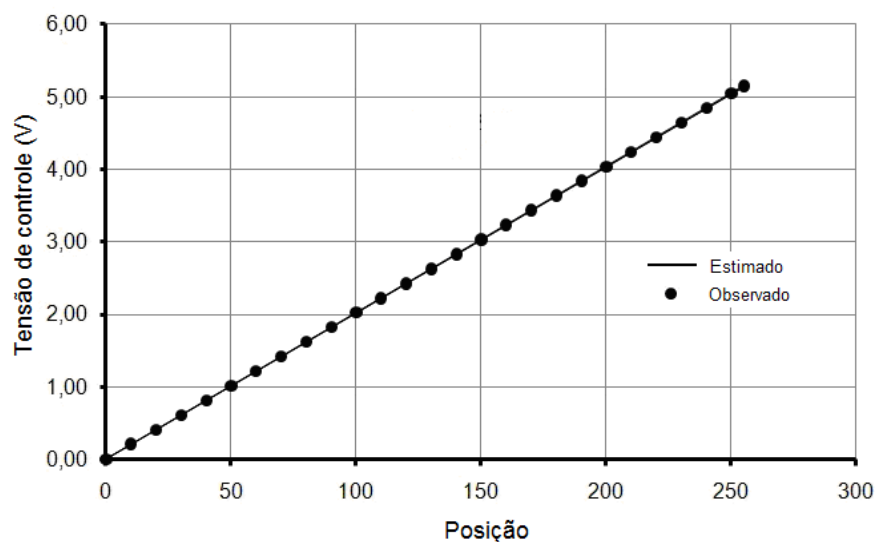


Figura 5.28 – Variação da tensão de controle (V_T) em função da posição do potenciômetro de controle de temperatura (D_T).

O controle manual de temperatura é um controle de temperatura em malha aberta tal como encontrado em chuveiros elétricos. Dependendo da posição de controle, a temperatura irá se estabilizar em um valor final que dependerá da temperatura ambiente e do fluxo de ar considerado. A Tabela 5.5 contém os resultados obtidos para a temperatura do ar de secagem em função da tensão de controle, quando foi utilizado um fluxo de ar com velocidade de $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

A Figura 5.29 contém o gráfico mostrando o controle manual de temperatura para uma tensão de controle de 2 V . Para esta condição, a posição de controle empregada foi de 99. O teste foi realizado para temperatura ambiente igual a $22,22^\circ\text{C}$, umidade relativa igual a $75,4\%$ e fluxo de ar com velocidade de igual a $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. A temperatura obtida para o ar de secagem foi igual a $47,3^\circ\text{C}$.

Tabela 5.5 - Temperatura do ar de secagem em função da tensão de controle, fluxo de ar com velocidade de $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, temperatura ambiente de $22,22^\circ\text{C}$ e umidade relativa de 75,4%

Tensão de controle (V)	Temperatura final do ar de secagem ($^\circ\text{C}$)
0,5	22,2
1,0	34,5
1,5	45,8
2,0	47,3
2,5	58,1
3,0	64,7
3,5	70,3
4,0	75,8
4,5	> 80,0
5,0	Não utilizado

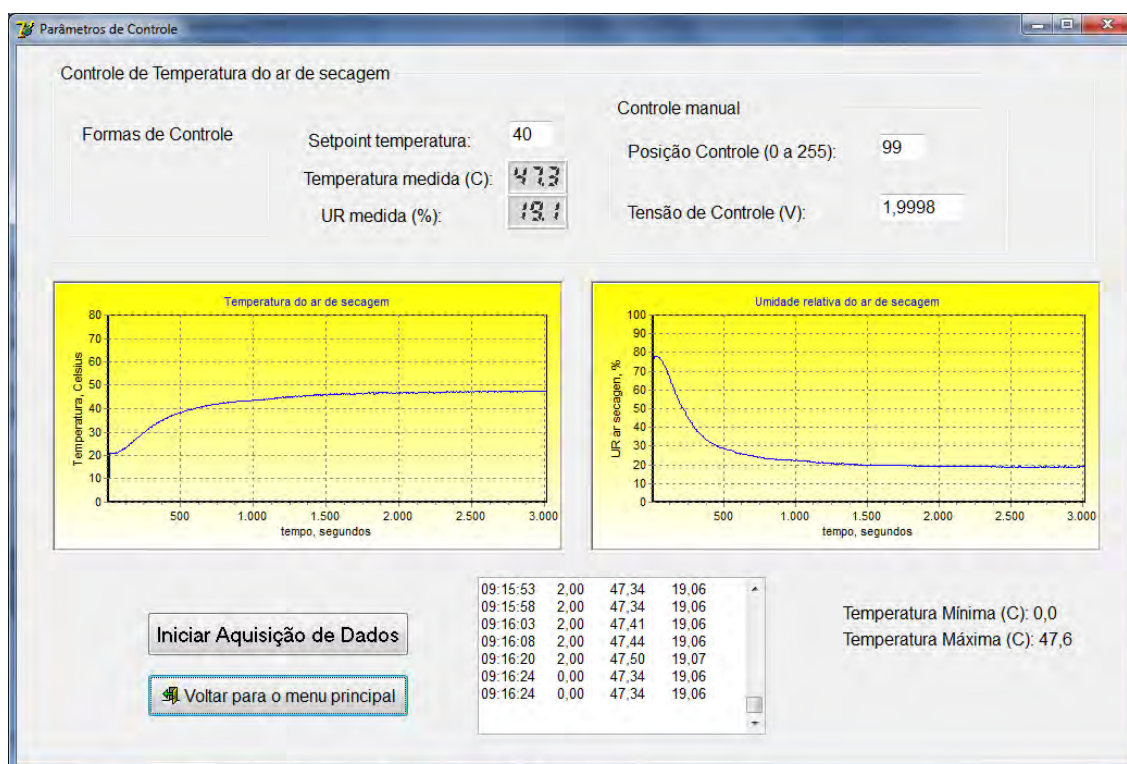


Figura 5.29 - Controle manual de temperatura para tensão de controle de 2 V e velocidade do ar de $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Neste tipo de controle, como não há realimentação, é quase impossível estabelecer qual deve ser a posição de controle para que se obtenha a

temperatura desejada, uma vez que a temperatura pode variar com o fluxo de ar secagem e com a temperatura no ambiente. É um tipo de controle simples e pouco eficiente, mas que serviu como referência para o desenvolvimento das outras duas formas de controle. Não obstante, como foi utilizado um valor fixo de tensão de controle, pôde-se estabelecer a relação entre a quantidade de energia elétrica consumida em função da tensão de controle aplicada.

A Tabela 5.6 contém a relação obtida entre a tensão de controle de temperatura e a potência de aquecimento. Nestes testes, a tensão de controle foi obtida por meio da variação da posição de controle, enquanto a potência dissipada pelo sistema de aquecimento foi obtida por meio do medidor de energia.

Tabela 5.6 - Relação entre a tensão de controle de temperatura e a potência de aquecimento

Posição (0 a 255)	Tensão de controle (V)	Tempo de medição (min)	Energia consumida (W h)	Potência dissipada (W)	Potência estimada (W)
50	1,0	30	202,545	405,09	320,840
74	1,5	30	351,300	702,60	661,945
99	2,0	30	488,262	976,52	1003,050
124	2,5	30	635,922	1.271,84	1344,155
148	3,0	30	820,662	1.641,32	1685,260
173	3,5	30	962,676	1.925,35	2026,365
298	4,0	30	1147,974	2.295,95	2367,470
223	4,5	30	1355,340	2.710,68	2708,575
247	5,0	30	1608,936	3.217,87	3049,680

A equação de regressão ajustada para a potência em função da tensão de controle da temperatura é dada pela Equação 5.11.

$$P = 654,19 V_T - 309,98 ; \quad R^2 = 0,9973 \quad (5.11)$$

em que:

P - Potência de aquecimento, W.

V_T - Tensão de controle da temperatura, V.

Na Figura 5.30 está representada a relação entre a potência dissipada pelo sistema e a tensão de controle da temperatura.

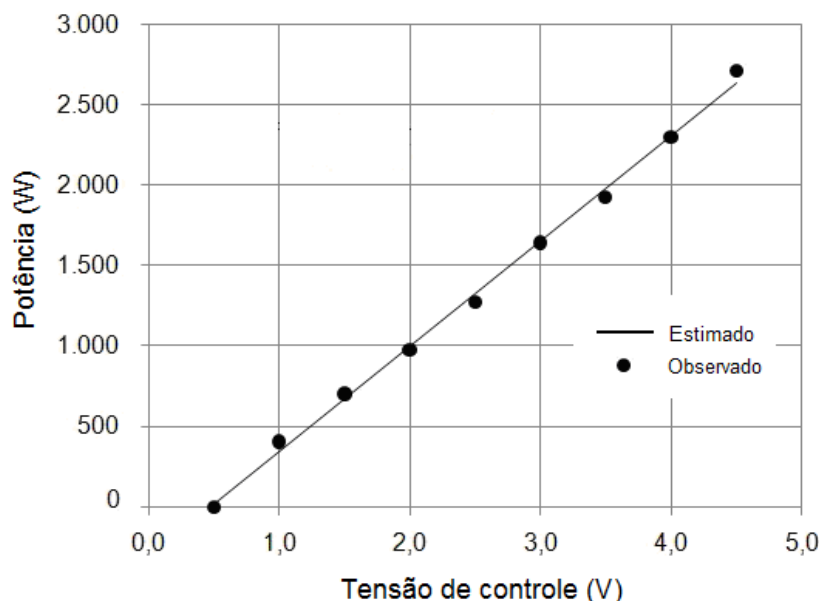


Figura 5.30 - Relação entre a potência dissipada pelo sistema (P) e a tensão de controle da temperatura (V_T).

Assim, por meio da medição da tensão de controle de temperatura, pode-se estimar qual será a potência gasta no sistema de aquecimento do ar de secagem, que utiliza o conversor de potência como elemento atuador. A análise da Figura 5.30 mostra que, para esse conversor, a potência de aquecimento é modulada de acordo com a aplicação de uma tensão contínua no terminais de controle.

A Equação 5.11, inserida no programa computacional, mostrou uma outra funcionalidade do programa, permitindo ao usuário a estimativa da quantidade de energia dissipada no sistema de aquecimento.

Para o controle de temperatura, a alternativa mais simples de ser implementada e que não exige ajuste de qualquer parâmetro do sistema, consistiu na utilização de um controle liga-desliga, embora esse sistema tenha a desvantagem de introduzir oscilações na variável do processo.

Os resultados obtidos quando foi utilizado o controle liga-desliga convencional está mostrado na Figura 5.31. Para realização dessa estratégia de controle, foram ajustados os valores mínimos (0) e máximos (255) das posições de controle, inferior e superior, aplicando, respectivamente, potência nula e máxima ao sistema de aquecimento. Os resultados obtidos mostraram que a temperatura do ar de secagem não se estabilizou no valor desejado

(50°C), apresentando maior oscilação na temperatura do ar de secagem ($\pm 7^{\circ}\text{C}$).

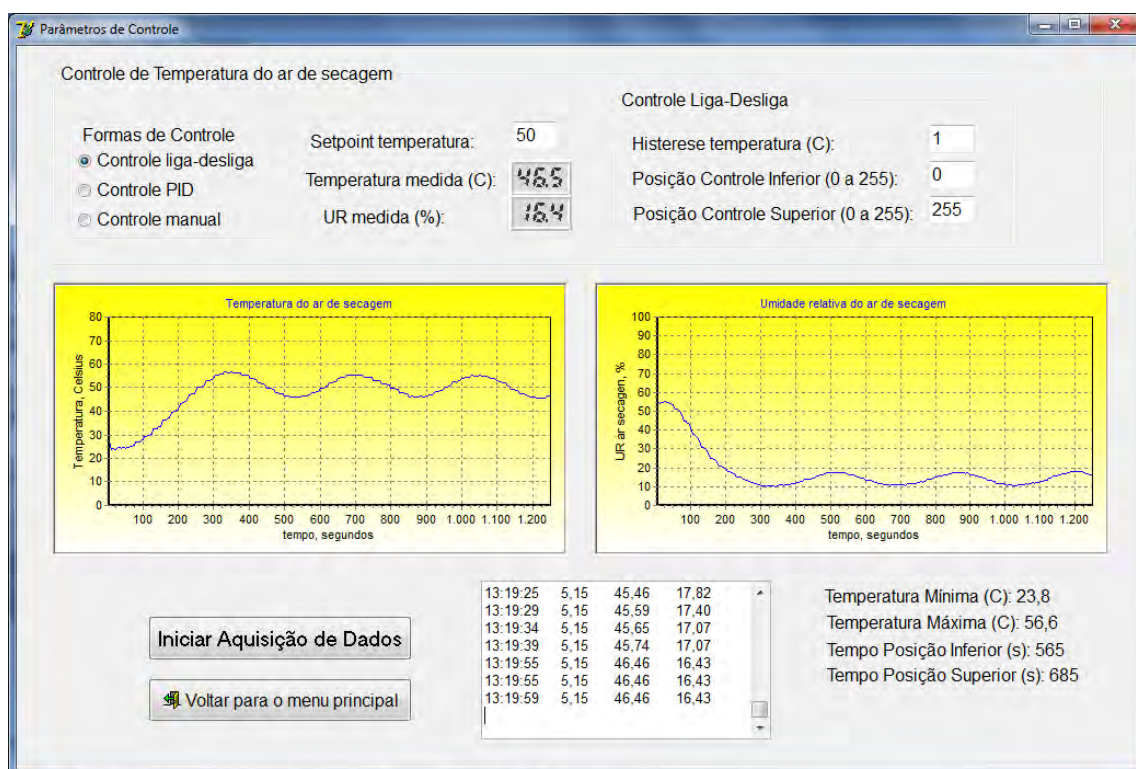


Figura 5.31 - Controle liga-desliga com limite inferior 0 e superior 255.

Os resultados obtidos quando foi utilizado o controle liga-desliga proposto com limites ajustáveis (diferentes tensões de controle) estão apresentados na Figura 5.32. Quando as posições de controle inferior e superior foram ajustadas em valores apropriados para a obtenção da temperatura desejada, o sistema apresentou uma oscilação na temperatura do ar de secagem muito pequena, praticamente desprezível.

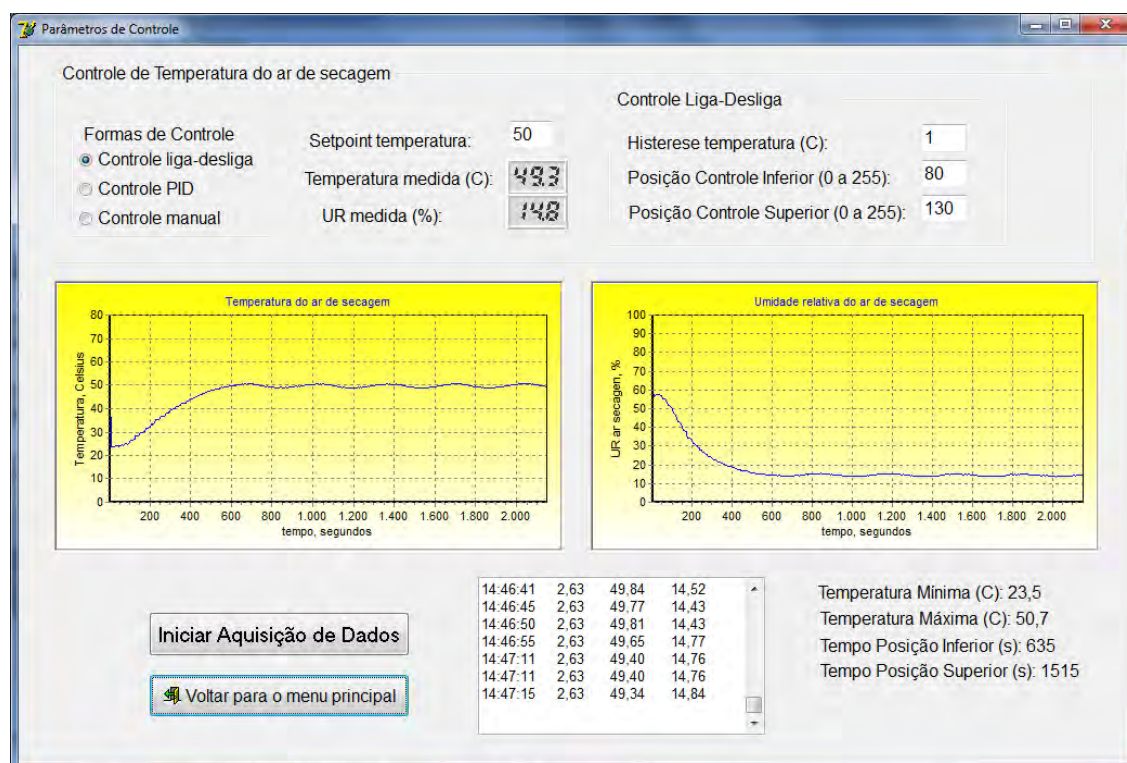


Figura 5.32 - Controle liga-desliga com limites inferior e superior ajustáveis: posição inferior 80 e superior 130.

O controle PID apresentou uma dificuldade de sintonia. Entretanto, uma vez ajustado, esse tipo de controle reduziu a oscilação da temperatura em torno do valor desejado. Praticamente, reduziu o erro em regime permanente.

Quando foi realizada a auto-sintonia utilizada para ajuste dos parâmetros PID, para controle da temperatura do secador, foram encontrados os valores de K_p , K_i e K_d . Como a temperatura possui dinâmica lenta, o uso da derivada mostrou-se adequado, pois melhorou o tempo de resposta do sistema ao erro na entrada, antecipando a correção a partir da tendência encontrada. Esta situação está representada na Figura 5.33.

Em todos os métodos de controle de temperatura implementados, a umidade relativa do ar de secagem pode ser ajustada, mas não de forma independente da temperatura. Com o aumento da temperatura do ar de secagem, há diminuição da umidade relativa do ar e vice-versa.

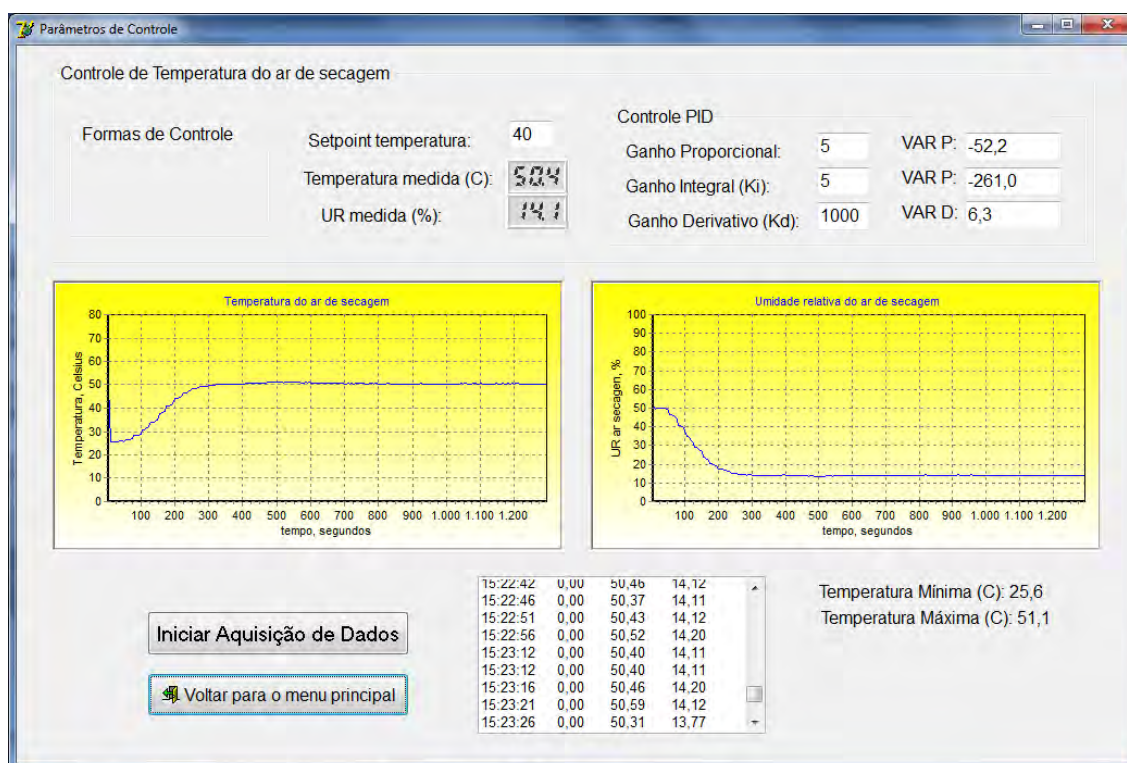


Figura 5.33 - Controle PID de temperatura com ganhos ajustáveis.

5.3.4. Mistura dos fluxos de ar

A placa desenvolvida para o acionamento dos servos-motores de controle das válvulas de entrada, exaustão e recirculação de ar no secador, utilizando-se o microcontrolador PIC 16F873, é mostrada na Figura 5.34.

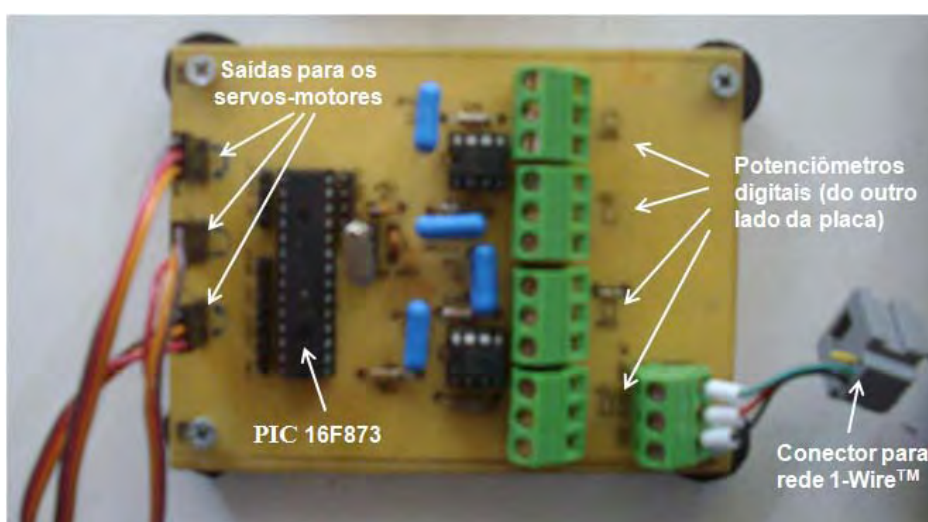


Figura 5.34 - Placa de acionamento dos servos-motores de controle das válvulas do secador.

A forma de onda do sinal de uma das saídas do microcontrolador utilizadas para o acionamento de um dos servos-motores está mostrada na Figura 5.35. O sinal de saída possui uma frequência fixa de, aproximadamente, 50 Hz, correspondente a um período de 20 ms, conforme pode ser observado na tela do osciloscópio e no freqüencímetro (à esquerda).

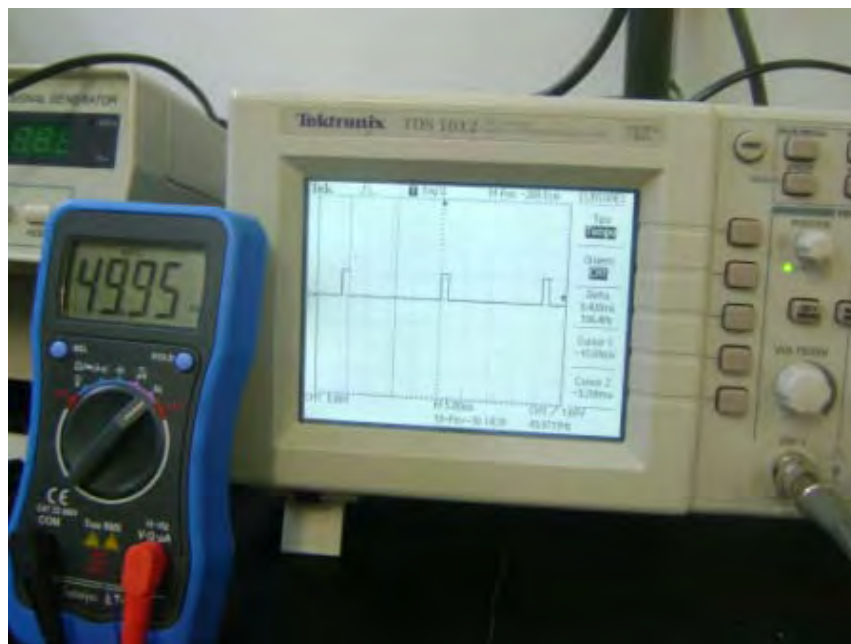


Figura 5.35 - Controle de posicionamento dos servo-motores utilizando modulação por largura de pulso – MLP (PWM).

Apesar da frequência fixa, a largura dos pulsos pôde ser ajustada por meio dos potenciômetros digitais, utilizando-se modulação por largura de pulsos (MLP), obtendo-se, dessa forma, o posicionamento desejado para o eixo dos servos-motores (Figura 5.36).

Como, para a abertura e fechamento das válvulas, os limites escolhidos para o ângulo de posicionamento variou de 0 a 90°, em que 0° indica válvula totalmente fechada e 90°, válvula totalmente aberta, foram utilizadas tensões entre 0 e 2 V para geração dos pulsos com largura mínima de 0,5 ms e máxima de 1,5 ms.

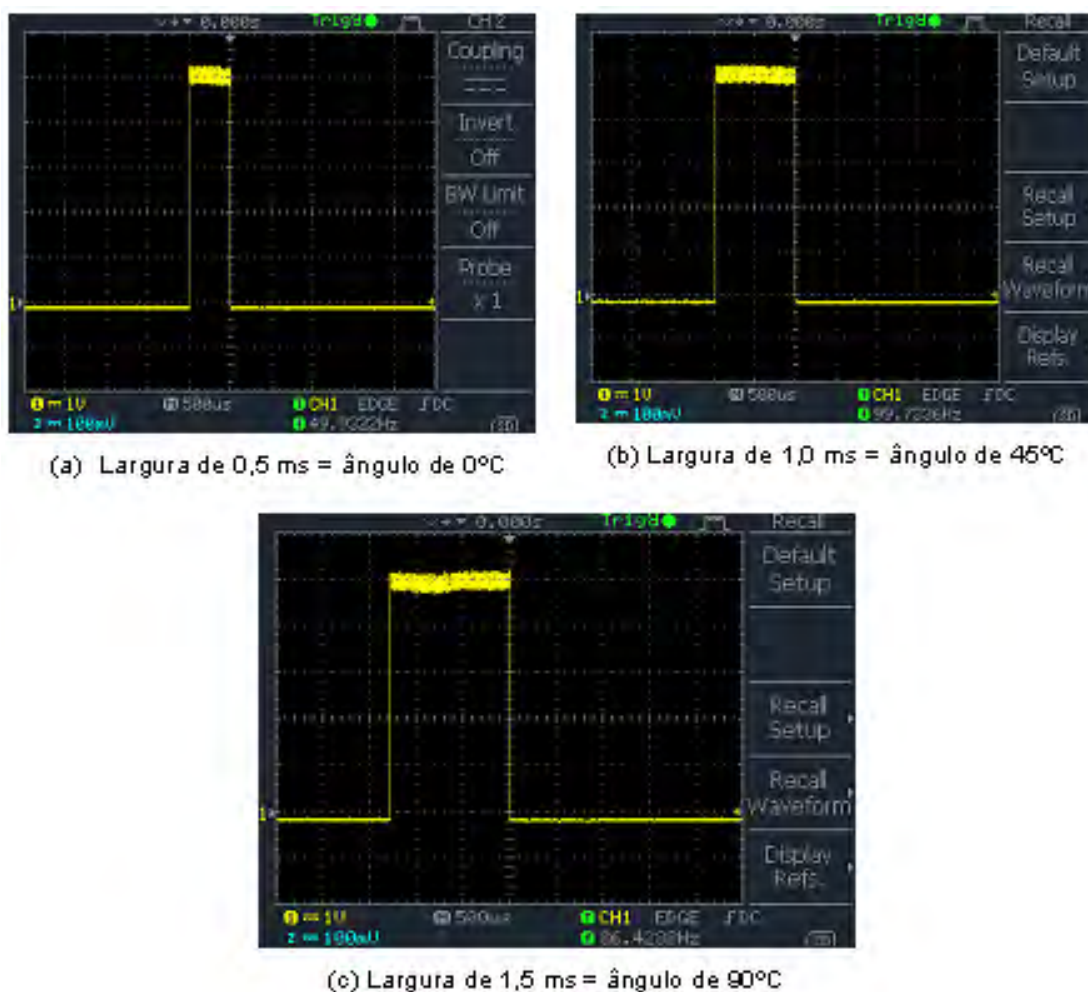


Figura 5.36 – Ajuste das larguras de pulso por meio de potenciômetros.

O microcontrolador utilizado para controle dos servos foi programado para geração de pulsos de 0,5 ms a 2,5 ms em suas saídas digitais. Como a largura dos pulsos depende dos valores das tensões de controle aplicadas nas entradas analógicas correspondentes, para garantir uma varredura máxima de 0 a 90°, limitou-se a tensão de controle até, no máximo, 2 V.

Alterando-se a posição dos potenciômetros digitais no programa computacional, obteve-se a variação da tensão de controle dos servos-motores e, conseqüentemente, do ângulo desejado para o eixo do servo-motor. A variação mínima para o ângulo de posicionamento das válvulas foi menor do que 1°, obtida quando se variou a posição dos potenciômetros em uma unidade (resultado esperado de acordo com a Equação 4.26).

A Figura 5.37 ilustra a abertura total da válvula de entrada do ar obtida para um ângulo de posicionamento de 0°C, quando se aplica um sinal com largura de pulsos igual a 0,5 ms no fio de controle do servo-motor.



Figura 5.37 – Posicionamento da válvula de entrada de ar para um ângulo de abertura igual a 0°C

Esta etapa foi implementada e o funcionamento de seus mecanismos foi testado, com resultados satisfatórios. Todavia, testes experimentais para determinar a melhor combinação da mistura dos dois fluxos de ar não puderam ser realizados dentro do cronograma estabelecido para o término deste trabalho, ficando esta etapa para trabalhos futuros.

5.4. TESTES DE VALIDAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO

Para testar o sistema de controle e validar o programa computacional foram realizados alguns testes de secagem de milho em camada fina com teor de água inicial de 27% b.u.

Neste trabalho, foram utilizadas nos testes de secagem amostras de milho com massa de milho de 1.500 g, com teor de água inicial de 27%. As temperaturas do ar de secagem foram 70°C e 80°C e o fluxo de ar foi ajustado em $0,35 \text{ m}^{-3} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Para realização destes testes, foi utilizada a equação de calibração das células de carga submetidas a um fluxo de ar de secagem de $0,35 \text{ m}^{-3} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, obtidas para produto totalmente seco (Tabela 5.4).

A Figura 5.38 contém os gráficos mostrando a variação da massa e do teor de água do produto ao longo do processo de secagem, obtidas com o programa computacional, para uma temperatura de secagem igual a 80°C .

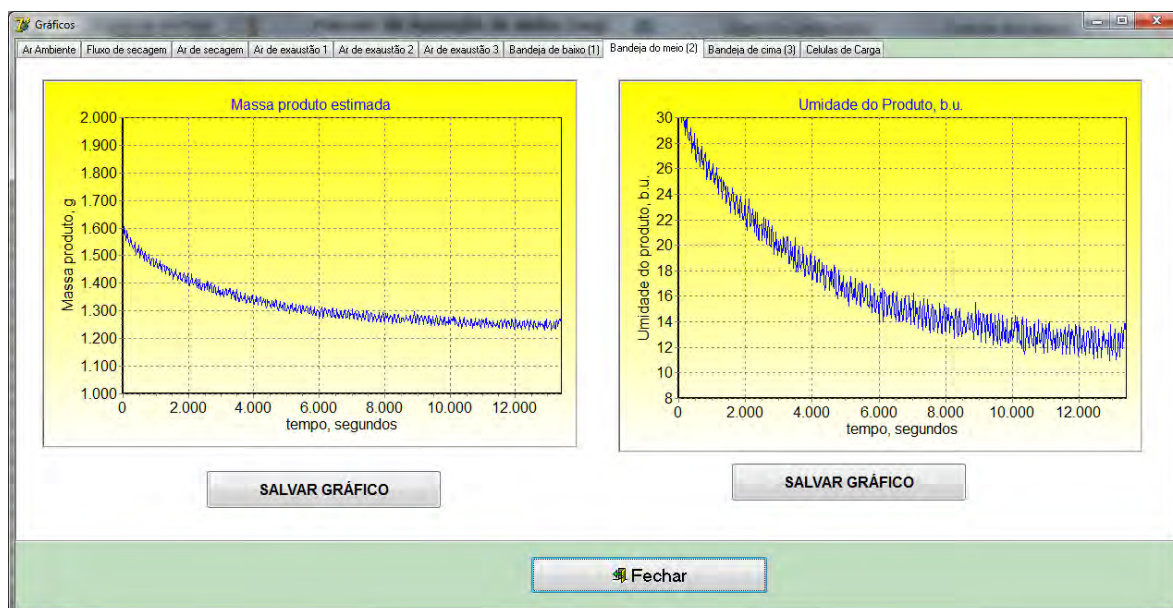


Figura 5.38 – Variação da massa e do teor de água do produto ao longo do processo de secagem para uma temperatura igual a 80°C .

Observa-se que os valores iniciais de massa e de teor de água obtidos para o produto úmido (1.580 g e 30,6% b.u., respectivamente) no início da secagem (tempo zero) foram superiores aos valores reais (1.500 g e 27% b.u., respectivamente).

Essa diferença pode ser explicada devido ao fato de que as equações de calibração foram obtidas para produto totalmente seco. Nos testes de secagem, devido à umidade do produto, a mesma quantidade de produto apresentou maiores deformações nas células de carga, acarretando em um maior valor de massa detectado pelas células.

Algumas soluções para correção dessas diferenças foram estudadas. A solução final, apresentada por Martins (1988), consistiu em se obter uma nova curva de calibração da massa de produto em função das tensões na saída das células de carga. Assim, foram determinados, por meio de uma balança

analítica de precisão, os valores inicial e final da massa de produto, m_0 e m_f , sendo registrados os valores de tensão das células de carga correspondentes a m_0 e m_f , respectivamente.

Para o teste de secagem a 80°C, encontraram-se os seguintes resultados, sumarizados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Valores de tensão das células de carga correspondentes às massas inicial e final para a temperatura de secagem de 70°C

Instante	Massa de produto (g)	Tensão de saída (mV)	Teor de água (% b.u.)
Inicial	1500,00	17,842	27,0
Final	1158,78	17,259	6,8

Uma vez que a massa de produto varia linearmente com a tensão de saída, V_s , das células de carga, a nova curva de calibração para essa condição é dada por um segmento de reta que passa por dois pontos correspondentes aos instantes inicial e final do processo de secagem, expressa pela Equação 5.12.

$$m = 581,295 \cdot V_s - 8873,79 \quad (5.12)$$

em que:

m - Massa de produto em qualquer instante durante a secagem, g.

V_s - Soma das tensões de saída das células de carga, V.

Como os dados de tensão na saída das células durante a secagem foram registrados pelo programa computacional, puderam-se obter novos valores corrigidos de massa do produto, utilizando-se a Equação 5.12.

Para calcular os valores da razão do teor de água, M_r , foi utilizada a Equação 3.5. Nessa equação, os valores de teores de água foram calculados segundo a Equação 4.19 e o teor de água de equilíbrio foi estimado pela equação de Henderson modificada (Equação 3.14).

A umidade relativa do ar medida pelo sistema para a temperatura de secagem de 80°C foi de 4%, o que proporcionou um teor de água de equilíbrio do produto igual a 1,91% b.u., determinada pela Equação 3.14. O modelo

ajustado para uma temperatura de secagem de 80°C e fluxo de ar de $0,35\text{ m}^3\text{ s}^{-1}\text{ m}^2$ é expressa pela Equação 5.13.

$$M_r = \exp(-0,0337 t^{0,7745}); \quad R^2 = 0,9864 \quad (5.13)$$

A Figura 5.39 contém os resultados observados de razão do teor de água e os valores estimados pelo modelo de Page, para uma temperatura do ar de secagem de 80°C e fluxo de ar de $0,35\text{ m}^3\text{ s}^{-1}\text{ m}^2$.

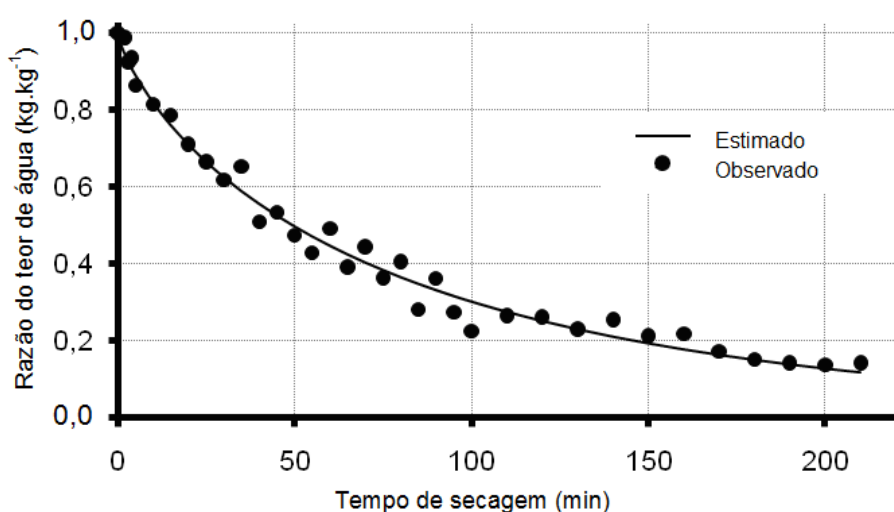


Figura 5.39 - Resultados observados da razão do teor de água e os valores estimados pelo modelo de Page, para temperatura de 80°C e fluxo de ar de $0,35\text{ m}^3\text{ s}^{-1}\text{ m}^2$.

Observa-se um bom ajuste da equação de Page aos dados experimentais. Além disso, os dados observados apresentaram pouca dispersão, demonstrando o bom funcionamento do sistema de pesagem automática.

Similarmente, para a mesma massa de 1.500 g de milho com teor de água inicial de 27% b.u., temperatura do ar de secagem de 70°C e fluxo de ar de $0,35\text{ m}^3\text{ m}^{-2}\text{ s}^{-1}$, foram encontrados os seguintes resultados sumarizados pela

Tabela 5.8.

Tabela 5.8 - Valores de tensão das células de carga correspondentes às massas inicial e final para a temperatura de secagem de 70°C

Instante	Massa de produto (g)	Tensão de saída (mV)	Teor de água (% b.u.)
Inicial	1500,00	17,850	27,0
Final	1179,53	17,300	7,2

A nova curva de calibração para esta condição é dada pela Equação 5.14.

$$m = 582,673 \cdot V_s - 8900,71 \quad (5.14)$$

A equação que melhor se ajustou aos dados experimentais, com um coeficiente de determinação, R^2 , igual a 0,9821, é dado pela seguinte expressão:

$$M_r = \exp(-0,0340 t^{0,7385}); \quad R^2 = 0,9821 \quad (5.15)$$

Para o cálculo da razão do teor de água do produto, a umidade relativa do ar de secagem medida pelo sistema para a temperatura de secagem de 70°C foi de 6%, o que forneceu um teor de água de equilíbrio do produto de 2,61% b.u., calculada utilizando a Equação 3.14.

Analogamente, a Figura 5.40 contém os resultados observados de razão do teor de água e os valores estimados pelo modelo de Page, para uma temperatura do ar de secagem de 70°C e fluxo de ar de $0,35 \text{ m}^{-3} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

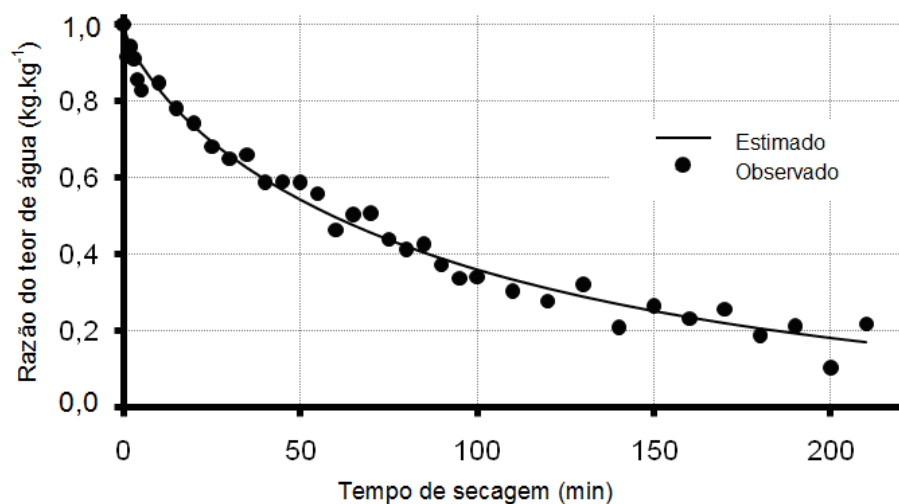


Figura 5.40 - Resultados observados de da razão do teor de água e os valores estimados pelo modelo de Page, para temperatura de 70°C e fluxo de ar de $0,35\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^2$.

A Figura 5.41 contém os resultados estimados de razão do teor de água pelo modelo de Page, para temperaturas do ar de secagem de 70°C e 80°C, e fluxo de ar de $0,35\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^2$. A comparação destas duas curvas mostra que os resultados são coerentes. Portanto, o sistema de aquisição de dados e de controle desenvolvidos neste trabalho apresentou excelentes resultados, embora alguns ajustes necessitem ser feitos no projeto do secador.

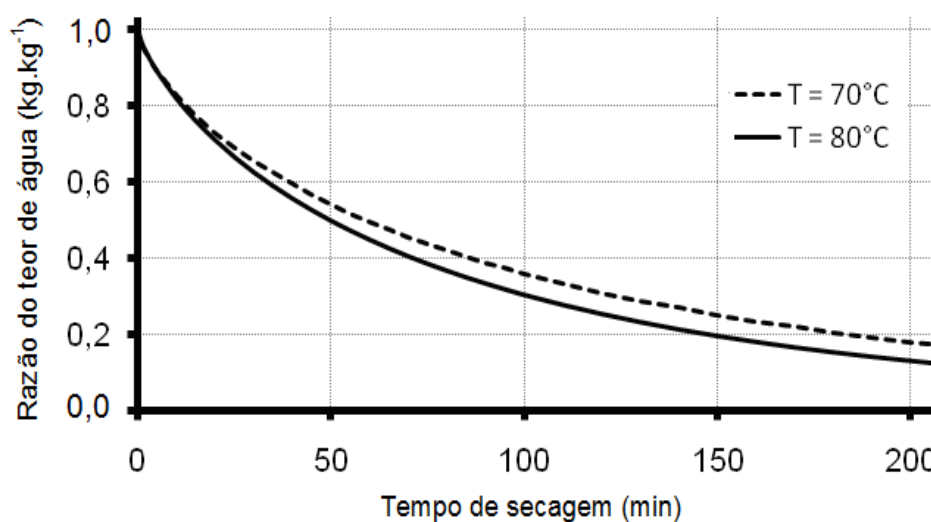


Figura 5.41 – Curvas de secagem estimadas pelo modelo de Page, para temperaturas de 70°C e 80°C, e fluxo de ar de $0,35\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^2$.

Na Figura 5.42 é mostrada a variação da temperatura de exaustão do ar durante o teste de secagem à temperatura de 70°C. Observa-se um pequeno resfriamento do ar de secagem no início do teste, devido à troca de energia entre o ar e o produto úmido. Posteriormente, o ar de exaustão tende a entrar em equilíbrio térmico com a temperatura de secagem.

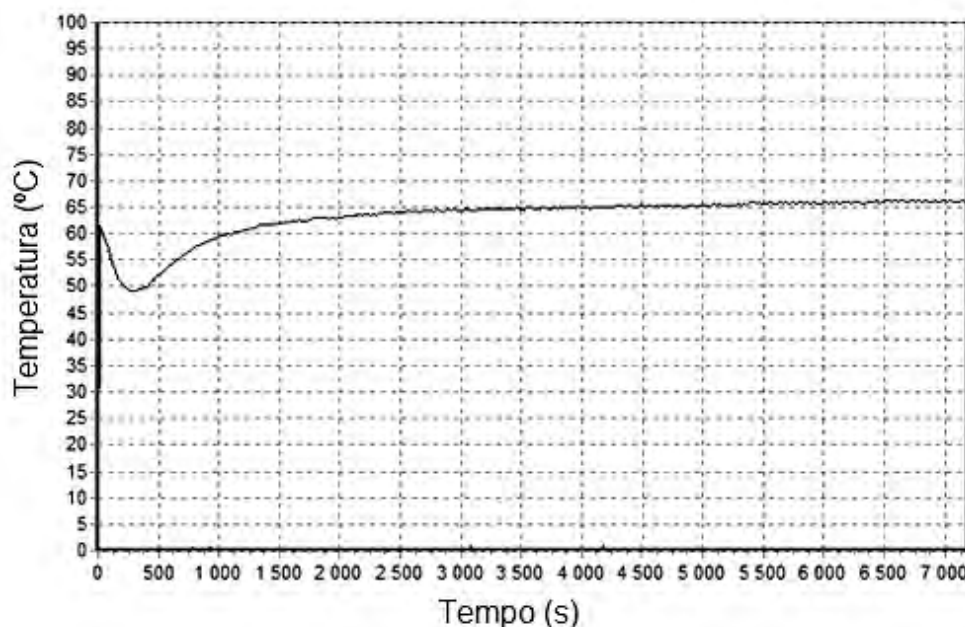


Figura 5.42 – Variação da temperatura de exaustão para o teste de secagem a 70°C e fluxo de ar de $0,35\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^2$.

Na Figura 5.43 é mostrada a variação da umidade relativa do ar de exaustão do ar durante o teste de secagem à temperatura de 70°C. Observa-se um aumento da umidade relativa do ar de secagem no início do teste, devido à transferência de massa entre do produto úmido para o ar. Posteriormente, o ar de exaustão tende a atingir a umidade relativa de equilíbrio do produto seco.

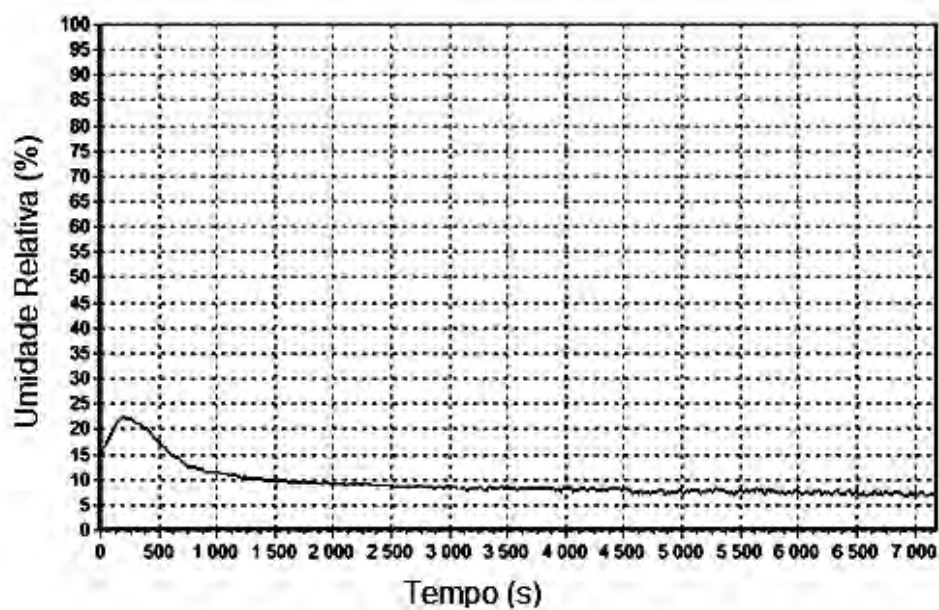


Figura 5.43– Variação da umidade relativa do ar de exaustão para o teste de secagem a 70°C e fluxo de ar de $0,35\text{m}^3\text{s}^{-1}\text{m}^2$.

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos neste trabalho concluiu-se que:

O sistema de aquisição de dados e de controle desenvolvidos com base na tecnologia 1-Wire™ mostrou-se ser um sistema de monitoramento automático, confiável e versátil se comparado aos demais sistemas de aquisição de dados presentes no mercado.

Especificamente, no caso da rede 1-Wire™, foi possível comprovar a facilidade de interação entre os dispositivos, a comunicação entre o dispositivo mestre e os dispositivos escravos por meio de endereçamento e a facilidade de interconexão entre eles por meio de um único cabo de dados.

O sistema de aquisição de dados desenvolvido utilizando-se dispositivos digitais endereçáveis da série 1-Wire™ permitiu a aquisição de dados em tempo real por meio da utilização de vários dispositivos DS2438 (conversores A/D, sensores de temperatura).

Os sensores de umidade relativa e de temperatura utilizados, colocados em posições específicas do secador, internamente e externamente, atenderam ao experimento de uma forma geral, e o seu monitoramento foi feito de forma contínua, fornecendo valores de temperatura e umidade relativa com resultados satisfatórios.

A utilização eficiente de conversores A/D, comunicando-se em rede com o computador mestre, acenou para sua utilização em aquisição de dados de quaisquer tipos de sensores, desde que apresentem características elétricas adequadas às permitidas por esses conversores.

A utilização de potenciômetros digitais favoreceu o controle de temperatura e do fluxo de ar para secagem, bem como o controle dos servomotores das válvulas de exaustão, recirculação e entrada de ar, visto que esses dispositivos são facilmente controlados por meio do programa computacional desenvolvido.

O uso de inversores de frequência em sistemas 1-Wire™ requer a utilização de medidas para reduzir o efeito da interferência eletromagnética criada por esses dispositivos.

O sistema de pesagem automática de produto em um secador de bandejas funcionou durante testes de secagem de grãos de milho. O registro automático da variação do peso da massa de grãos foi realizado pelo sistema e, ao final de cada processo, possibilitou a geração de gráficos e relatórios.

Pôde-se apresentar uma solução para o problema da retirada da amostra do secador, durante o processo de secagem, tornando o procedimento de pesagem da amostra de produtos uma tarefa automática, evitando a interrupção do processo.

Com os testes realizados, foi possível apresentar, na tela principal do programa computacional, as leituras de todas as grandezas envolvidas no processo de secagem. O programa tornou possível o controle, em tempo real, das condições de secagem, principalmente da temperatura e do fluxo de ar.

Para que o equipamento possa ser utilizado para diversos produtos agrícolas, é necessária a obtenção da curva de calibração para esses produtos, seguindo a mesma metodologia apresentada neste trabalho.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Trabalhar na estrutura física do secador, melhorando o selo de óleo, de forma que se possa trabalhar efetivamente com todas as bandejas e para que possam ser realizados testes em camada espessa conforme sugerido no trabalho.

Realizar testes de secagem com aproveitamento do ar de exaustão para comprovar a melhoria da eficiência energética, visto que o controle das válvulas e o monitoramento das condições psicrométricas do ar de secagem, por meio do programa computacional, encontram-se desenvolvidos e em funcionamento.

Possivelmente, o processo de reaproveitamento do ar de exaustão poderá proporcionar, por meio do controle da mistura com o ar que entra no secador, maior rendimento para o sistema, além de aumentar as possibilidades e estratégias de controle.

Realizar testes do equipamento com diversos produtos agrícolas de modo a comprovar definitivamente o seu funcionamento e eficiência, para que ele possa ser usado de forma sistemática, em atividades laboratoriais.

Integrar o processo de medição da quantidade de energia consumida utilizando-se medidores eletrônicos ao programa computacional desenvolvido, por meio de códigos adequados, para que ele possa registrar, em tempo real, o consumo de energia de todos os subsistemas que compõem o sistema automático desenvolvido.

Integrar o sistema desenvolvido com outros sistemas para comunicação a maior distância, usando a transmissão de dados via onda de rádio ou pela *internet*.

8. REFERÊNCIAS

ABDEL-JABBAR, N.M.; JUMAH, R.Y.; ALI, M.Q.A. State estimation and state feedback control for continuous fluidized bed dryers. **Journal of Food Engineering**, v.70, p.197-203, 2005.

AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; VILARINHO, M.C.; FRANÇA, A.S. Dinâmica da contração volumétrica do fruto de café durante o processo de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.Especial, n.8, p.29-35, 2004.

AIRFLOW BRASIL. **Tubo de Pitot Estático**. Disponível em: <http://www.airflowbrasil.com.br>. Acesso em julho de 2009.

AKPINAR, E.K. Determination of suitable thin layer drying curve model for some vegetables and fruits. **Journal of Food Engineering**, v.73, p.75-84, 2006.

ALENCAR, E.R. **Efeitos das condições de armazenagem sobre a qualidade da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) e do óleo bruto**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ALVARENGA, L.C.; FORTES, M.; PINHEIRO FILHO, J.B.; HARA, T. Transporte de umidade no interior de grãos de feijão-preto sob condição de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, v.5, n.1, p.5-18, 1980.

AREGBA, A.W.; NADEAU, J.P. Comparison of tow non-equilibrium models for static deep-bed drying by numerical simulations. **Journal Food Engineering**, v.78, p.1174–1187, 2007.

ARJONA, R.; OLLERO, P.; VIDAL B., F. Automation of an olive waste industrial rotary dryer. **Journal of Food Engineering**, v.68, p. 239–247, 2005.

ARSLAN, N.; TOGRUL, H. The fitting of various models to water sorption isotherms of tea stored in a chamber under controlled temperature and humidity. **Journal of Stored Products Research**, v. 42, p. 112–135, 2006.

ARTEAGA, M.S. Modelación del processo de secado. In: Seminário de secado solar, 2, 1986, Cusco, Peru. **Resumos...** Lima: Instituto General de Investigación, p.51-56, 1986.

ASAE. Moisture relationship of plant-based agricultural products: ASAE Standard D245.5. St. Joseph, Michigan, 2001.

ASTRÖN, K.J; HÄGGLUND, T. **PID Controllers: Theory, Design and Tuning**. 2a Edição. Instrument Society of America, USA, 1995.

AWTREY, D. 1-Wire Addressable Digital Instruments for Environmental Monitoring. **Sensors Magazine**, 2001. Disponível em: <http://www.sensorsmag.com>. Acesso em maio de 2008a.

AWTREY, D. A 1-Wire Humidity Sensor. **Sensors Magazine**, 2000. Disponível em: <http://www.sensorsmag.com>. Acesso em julho de 2008b.

AWTREY, D. Transmitting data and power over a one wire bar. **Sensors Magazine**, Vol. 14, n. 2, p.48-51, 1997.

BERBERT, P.A.; QUEIROZ, D.M.; SILVA, J.S.; PINHEIRO FILHO, J.B. Simulation of coffee drying in a fixed bed with periodic airflow reversal. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, v.60, n.3, p.167-173, 1995.

BIAGI, J.D.; BERTOL, R.; CARNEIRO, M.C. **Secagem de grãos para unidades centrais de armazenamento**. In: LORINI, I; MIIKE, L.H.; SCUSSEL, V.M. (Eds). Armazenagem de grãos. Campinas: Instituto Bio Geneziz, 2002, p.289-3074.

BOLTON, W. **Engenharia de controle**. Makron Books do Brasil, São Paulo, 1995, 191 p.

BRAGA, N. C. Aquisição de Dados. **Revista Saber Eletrônica**, v. 44, n. 425, 2008.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Regras para análise de sementes**. Brasília : Mapa/ACS, 2009. 399 p.

BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. **DRYING AND STORAGE OF OILSEEDS**, The AVI Publishing Company, New York, 1992. 450p.

BURR-BROWN. **INA110 - Fast-Settling FET Input instrumentation amplifier**. Datasheet. Disponível em: <http://www.datasheetcatalog.com/>. Acesso em: março de 2009.

BUTTS, C.L.; WILLIAMS, E.J.; SANDERS, T.H. Algorithms for automated temperature controls to cure peanut. **Postharvest Biology and Technology**, v.24, p.309–316, 2002.

CARVALHO, J.A.; MELLO, C.R., BRAGA JÚNIOR, R.A., REINATO, C.H.; SANTANA, M.J. Utilização do inversor de frequência em sistemas de irrigação para controle de vazão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.4, n.1, p.51-56, 2000.

CAVALCANTI MATA, M.E.; DANTAS, L.A.; BRAGA, M.E.D. Programa Computacional para simulação de secagem de grãos. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.1, n.1, p.33-50, 1999.

CAVALCANTI MATA, M.E.R.M.; ALMEIDA, F.A.C.; DUARTE, M.E.M. **Secagem de sementes**. In: ALMEIDA, F.A.C; DUARTE, M.E.M.; CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. (Eds.). Tecnologia em armazenagem em sementes. Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2006, p.273-370.

CHEN, X. D.; MUJUMDAR, A. S. **Drying Technologies in Food Processing**. 1ª Edição. Singapura: Blackwell Publishing Ltd, 2008.

CHUNG, J.H.; VERMA, L.R.; MAILANDER M.P. Simulation of a rice drying system. **Transactions of ASAE**, v.34, n.5, p. 2065 - 2072, 1991.

CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; VALENTE, D.S.M. Moisture sorption isotherms and isosteric heat of sorption of coffee in different processing levels. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 45, p. 2016-2022, 2010.

COURTOIS, F.; NOUAFO, J.L.; TRYSTRAM, G. Control strategies for corn mixed-flow dryers. **Journal of Drying Technology**, v.13, n.1-2, p.147-164, 1995.

DALPASQUALE, V.A.; SPERANDIO, D.; SILVA, L.H.M.; KOLLING, E. Fixed-bed drying simulation of agricultural products using a new backward finite difference scheme. **Applied Mathematics and Computation**, v. 200, p. 590–595, 2008.

DELMÉE, G. J. Manual de medição de vazão. 2a. edição. São Paulo: Edgard Blücher, 1995. 466p.

DIDRIKSEN, H. Model based predictive control of a rotary dryer. **Chemical Engineering Journal**, v.86, p.53-60, 2002.

DORF, R.C.; BISHOP, R.H. **Sistemas de controle modernos**. 8ª Edição. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2001, 680p.

ERTEKIN, C.; YALDIZ, O. Drying of eggplant and selection of a suitable thin layer drying model. **Journal of Food Engineering**, v.63, p.349–359, 2004.

FARKAS, I., REMÉNYI, P., BIRÓ, A.. Modelling aspects of grain drying with a neural Network. **Computers and Electronics in Agriculture**, n.29, p.99–113, 2000.

FORTES M.; OKOS, M.R.; Drying theories. In: **Advances in Drying**. MUJUMDAR, A.S. New York: Hemisphere Publishing, v.1, 1980.

FORTES, M.; OKOS, M.R. Heat and mass transfer in hygroscopic capillary extruded products. **AIChE Journal**, St. Joseph, v.27, n.2, p.102-113, 1981.

FOX, R.W.; MCDONALD, A.T.; PRITCHARD, P.J. **Introdução à mecânica dos fluídos**. 6a ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006. 798p.

FRANÇA, A.S.; FORTES, M.; HAGHGHI, K. Numerical Simulation of Intermittent and Continuous Deep-Bed Drying of Biological Materials, 1994. **Drying Technology**, v.12, n. 7, p. 1537-1560, 1994.

FREESCALE. **MPX7002 - Integrated Silicon Pressure Sensor On-Chip Signal Conditioned, Temperature Compensated and Calibrated**. Datasheet. Disponível em : <http://www.freescale.com>. Acesso em: março de 2008.

GINER, S.A.; CALVELO, A. Modeling of wheat drying in fluidized beds. **Journal of Food Science**, v. 12, p. 1537-1560, 1987.

GINER, S.A.; DE MICHELIS, A. Evaluation of the thermal efficiency of wheat drying in fluidized beds: influence of air temperature and heat recovery. **JOURNAL OF AGRICULTURAL ENGINEERING RESEARCH**, v.41, n.1, p.11–23, 1988.

HALL, C.W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport: AVI, 382p, 1980.

HII, C.L.; LAW, C.L.; CLOKE, M. Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. **Journal of Food Engineering**, v.90, p.191-198, 2009.

HONEYWELL. Sensing and Control. **HIH-4000 Series - Humidity Sensors**. Disponível em <http://www.phanderson.com/>. Acesso em outubro de 2007.

HUKILL, W. V. Grain drying. In: CHRISTENSEN, C.M.. **Storage of cereal and their products**. 2. Ed. St. Paul: Ameican Asssossiation of Cereal Chemists, 1974. P. 481-508.

IBRAHIM, D. **Microcontroller based applied digital control**. 1ª Edição. Chichester, 2006.

IGUAZ, A.; LOPEZ A.; VÍRSEDA, P. Influence of air recycling on the performance of a continuous rotary dryer for vegetable wholesale by-products. **JOURNAL OF FOOD ENGINEERING**, v.54, p.289–297, 2002.

INMETRO. **Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia**. 4. ed. Revisada. Rio de Janeiro, 2007. 72p. Disponível em <http://www.inmetro.gov.br/>. Acesso em: 23/07/2008.

JAYAS, D.S.; KUKELKO, D.A.; WHITE, N.D.G. Equilibriun moisture-equilibriun relative humidity relationship for canola meal. **Transactions of the Asae**, St. Joseph, v.36, n.1, p. 1585-1593, 1988.

KASHANINEJAD, M.; MORTAZAVI, A.; SAFEKORDI, A.; TABIL, L.G. Thin-layer drying characteristics and modeling of pistachio nuts. **Journal of Food Engineering**, v.78, p.98-108, 2007.

KREYGER, J. Pratical observations on the drying of seed. **Seed Science and Technology**, v.1., n.3, p.645-670, 1973.

LACERDA FILHO, A.F.; MELO, E.C. **Racionalização de Energia no Processo de Secagem de Café**. In: ZAMBOLIM, L. (Ed.). Teconologias de produção de café com qualidade. Viçosa: UFV, 2001, p.527-564.

LAHSASNI, S.; KOUHILA, M.; MAHROUZ, M.; JAOUHARI, J.T. Drying kinetics of prickly pear fruit (*Opuntica ficus indica*). **Journal of Food Engineering**, v.61, n.2, p.173–179, 2004.

LASSERAN, J.C. Princípios gerais de secagem. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.3, n.3, p. 17-46. 1978.

LAW, A.M.; KELTON, D.W. **Simulation modeling and analysis**. 2. Ed. New York. Mc.Graw-Hill, 1991.

LEITE, J.C.A.; SOUSA, R.F.; SILVA, A.S.; GOUVEIA, J.P.G.; SILVA, M.M.; SOUSA, A.G. Simulação de secagem de milho (*Zea mays* L.) utilizando o modelo matemático de Thompson. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v.5, n.2, 2005.

LIU, Q.; BAKKER-ARKEMA, F.W. Automatic control of crossflow grain dryers, Part 1: Development of a Process Model. **JOURNAL OF AGRICULTURAL ENGINEERING RESEARCH**, v.80, n.1, p.81-86, 2001a.

LIU, Q; BAKKER-ARKEMA, F.W. Automatic control of crossflow grain dryers, part 2: design of a model-predictive controller. **JOURNAL OF AGRICULTURAL ENGINEERING RESEARCH**, v.80, n.2, p.173-181, 2001b.

LIU, Q; BAKKER-ARKEMA, F.W. Automatic control of crossflow grain dryers, part 3: Field Testing of a Model-Predictive Controller. **JOURNAL OF AGRICULTURAL ENGINEERING RESEARCH**, v.80, n.3, p.245-250, 2001c.

LIU, X.; CHEN, X.; WU, W., PENG, G. A neural network for predicting moisture content of grain drying process using genetic algorithm. *Food Control*, v.18, p.928-933, 2007.

LOPES, D. C. ; MARTINS, J. H. ; LACERDA FILHO, A. F. ; MELO, E. C. ; MONTEIRO, P. M. B. ; QUEIROZ, D. M. . Aeration strategy for controlling grain storage based on simulation and on real data acquisition. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 63, p. 140-146, 2008.

LOPES, D. C. ; MARTINS, J. H. ; MONTEIRO, P. M. B. ; QUEIROZ, D. M. . Redes 1-Wire aplicadas à aeração de grãos armazenados. **Acta Scientiarum (UEM)**, Brasil, v. 29, n. 4, p. 157-163, 2007.

LOPES, D.C.; MARTINS, J.H.; STEIDLE NETO, A.J.; STEIDLE FILHO, A.J. Simulação de Secagem de grãos com baixas temperaturas utilizando-se o modelo de Hukill: uma Nova abordagem, **Exacta**, v. 3, p.85-93, 2005.

MACINTYRE, A.J. **Ventilação Industrial e Controle da Poluição**. Rio de Janeiro: Guanabara, 1988. 403p.

MARTINS, J. H. Calibração da curva de secagem em camada fina. Viçosa, MG. **Comunicação pessoal**. 2010.

MARTINS, J.H., PINTO, P.R., LOPES, D.C., MONTEIRO, P.M.B., MONTE, J.E.C. Utilização de conversores analógico-digitais endereçáveis para medições de variáveis climáticas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.8, n.2, p.95-102, 2006.

MARTINS, J.H.. **Thin-layer drying rates of corn hybrids related to performance of high-speed, high temperature batch dryer**. Purdue University, Indiana. 340p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). 1988.

MARTINS, J.H.; CAVALCANTI MATA, M.E.R.M. Introdução a teoria e simulação matemática de secagem de grãos. Campina Grande: UFPB, 1984. 104p.

MASCHERONI, J.M.; LICHTBLAU, M.; GERARDI, D. **Guia de Aplicação de Inversores de Frequência**. WEG Automação, 2ª Edição, Florianópolis, 2005. 192p.

MAXIM-DALLAS. **DS2438 - Smart Battery Monitor**. Datasheet. Disponível em: <http://www.maxim-ic.com>. Acesso em: outubro de 2009.

MAXIM-DALLAS. **DS2890 - 1-Wire Digital Potentiometer**. Datasheet. Disponível em: <http://www.maxim-ic.com>. Acesso em: setembro de 2008.

MICROCHIP. **PIC 16F877X**. Datasheet. Disponível em <http://www.microchip.com>. Acesso em: fevereiro de 2009.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single layer drying. **Drying Technology**, v.20, n.7, p.1503–1513, 2002.

MONTE, J.E.C.; MARTINS, J.H.; LOPES, D.C.; MONTEIRO, P.M.B., PINTO, P.R. Sistema automático para secagem de produtos agrícolas em camada fina. **Acta Sci. Agron.**, v.30, n.3, p. 307-312, 2008.

MONTEIRO, P.M.B. **Tecnologia 1-Wire™ aplicada ao controle em tempo real de sistemas de aeração de grãos**. Viçosa, Minas Gerais: Imprensa Universitária, Universidade Federal de Viçosa, 2002. 135p. Tese de Doutorado.

MONTEIRO, P.M.B., MARTINS, J.H., MOTA, A.M.M.N., CORRÊA, P.C. **Real Time Control System Applied to Aeration Process of Stored Grains**. 5th Portuguese Conference on Automatic Control – CONTROLO 2002, Aveiro, Portugal, 2002.

MOREY, R.V.; KEENER, H.M.; THOMPSON, T.L.; WHITE, G.M.; BAKKER-ARKENA, F.W. **The presents status of grains dryings simulation**. St. Joseph: ASAE, 24p, 1978. (Paper 78-3009).

NAGHAVI, Z.; MOHEB, A.; ZIAEI-RAD, S. Numerical simulation of rough rice drying in a deep-bed dryer using non-equilibrium mode. **Energy Conversion and Management**, v.5, p.258–264, 2010.

NAGLE, M., AZCÁRRAGA, J. C. G., MAHAYOTHEE, B., HAEWSUNGCHARERN, M., JANJAI, S., MÜLLER, J.. Improved quality and energy performance of a fixed-bed longan dryer by thermodynamic modifications. **Journal of food engineering**, v.99, p.392–399, 2010.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 4ª Edição. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

OLIVEIRA, G.H.H.; CORREA, P.C.; ARAÚJO, E.F.; VALENTE, D.S.M.; BOTELHO, F.M. Desorption isotherms and thermodynamic properties of sweet corn cultivars (*Zea mays* L.). **International Journal of Food Science and Technology**, v.45, p.546–554, 2010.

OLIVEIRA, J.R. **Desenvolvimento de um sistema de secagem para grãos em camada fina e camada espessa: Comparação entre modelos matemáticos de simulação para grãos de feijão-maçácar (*Vigna unguiculata (L.) Walpers*)**. p 2006. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB.

OLIVEIRA, J.R. **Notas complementares sobre micro servo-motor**. DCA FECC, Ceará, 2005.

ORTEGA, M.G.; CASTAÑO, F.; VARGAS, M.; RUBIO, F.R. Multivariable robust control of a rotary dryer: **Analysis and design. Control Engineering Practice**, v.15, p.487-500, 2007.

PARDESHI, I. L., ARORA, S., BORKER, P. A. Thin-layer drying of green peas and selection of a suitable thin-layer drying model. *Drying Technology*, v.27, n.288–295, 2009.

PEREIRA, F. **Microcontroladores PIC: Programação em C**. – 7. ed. – São Paulo: Editora Érica, 2009.

PEREIRA, F. **Microcontroladores PIC: Técnicas Avançadas**. – 3. ed. – São Paulo: Editora Érica, 2004.

PÉREZ-CORREA, J.; CUBILLOS, F.; ZAVALA, E., SHENE, C.; ÁLVAREZ, P. Dynamic simulation and control of direct rotary dryers. **Food Control**, v.9, n.4, p.195–203, 1998.

PINTO, P.R. **Instrumentos Digitais Endereçáveis com Base na Tecnologia 1-Wire™**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

QUEIROZ, D.M., PEREIRA, J.A. **Higroscopia**. Viçosa. Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 2009, 22p.

QUEIROZ, D.M.; PEREIRA, J.A.M., MELO, E.C. **Modelos matemáticos de simulação de secagem de grãos**. Viçosa: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, 2005. 59p.

ROSSI, S.J.; ROA, G. **Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural**. São Paulo: Academia de Ciências do Estado de São Paulo, 1980, 295p.

SARSAVADIA, P.N. Development of a solar-assisted dryer and evaluation of energy requirement for the drying of onion. **RENEWABLE ENERGY**, v.32, p. 2529–2547, 2007.

SAVARESI, S.M.; BITMEAD, R.R., PEIRCE, R. On modelling and control of a rotary sugar dryer. **Control Engineering Practice**, v.9, p.249-266, 2001.

SCARCELLI, R. O. C. ; OLIVEIRA FILHO, D. ; RIBEIRO, M. C. ; LOPES, D. C. . Economia de Energia com Uso de Inversor de frequencia em sistemas de

Bombeamento de água para Perímetro irrigado. **Engenharia na Agricultura**, v. 17, p. 462-472, 2009.

SHABDE, V. S.; HOO, K. A. Optimum controller design for a spray drying process. **Control Engineering Practice**, v.16, p.541–552, 2008.

SILVA JÚNIOR, A.N.; CAGNON, J.A. Armazenagem de grãos: Economia de energia elétrica possibilitada pelo uso do inversor de frequência. **Energ. Agric. Botucatu**, v.20, n.3, p.31-49, 2005.

SOUZA, C.M.A.; QUEIROZ, D.M.; LACERDA FILHO, A.F. Simulação do processo de secagem de sementes de milho em camada fixa. **Scientia agricola**, v.59, n.4, p.653-660, 2002.

SRZEDNICKI, G.S.; HOU, R.; DRISCOLL R.H. Development of a control system for in-store drying of paddy in Northeast China. **JOURNAL OF FOOD ENGINEERING**, v.77, p.368-377, 2006.

STEIDLE NETO, A.J. Avaliação do sistema 1-wireTM para aquisição de dados de temperatura em instalações agrícolas. 2003. 110 f. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais e Ambiente) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa - MG, 2003.

STEIDLE NETO, A.J.; BAÊTA, F.C.; MARTINS, J.H.; ZOLNIER, S.; MONTEIRO, P.M.B. Avaliação da transmissão de dados de temperatura no sistema 1-wireTM. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.1, p.29-36, jan./abr. 2005.

SUN, Y.; PANTELIDES, C.C.; CHALABI, Z.S. Mathematical modeling and simulation of near-ambient grain drying. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 13, p. 243–271, 1995.

THERMA, **Catálogo de Mini Conversores de potência - Série TH6200**. Disponível em <http://www.therma.com.br/>. Acesso em junho de 2009.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P.U.B. **Sensores Industriais: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Érica Ltda, 2005. 220p.

THOMPSON, T.L.; PEART, R.M.; FOSTER, G.H. Mathematical simulation of corn drying – A new model. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, v.11, n.4, p.582-586, 1968.

TIPPAYANWONG, N.; TANTAKITTI, C.; THAVORNUN, S. Energy efficiency improvements in longan drying practice. **Energy**, v.33, n.7, p.1137-1143, 2008.

TRELEA, I.C.; COURTOIS, F.; TRYSTRAM, G. Dynamics analysis and control strategy for a mixed flow corn dryer. **Journal of Process Control**, v.7, n.1, p.57-64, 1997.

VALENTE, D.S.M; SOUZA, C.M.A.; QUEIROZ, D.M. Simulação de Secagem de Milho e Arroz em Baixas temperaturas. In: Congresso Brasileiro da Sociedade Brasileira de Informática Aplicada à Agropecuária, 2003, Porto Seguro. **Resumos Expandidos**. IV Congresso Brasileiro da Sociedade Brasileira de Informática Aplicada à Agropecuária, 2003.

VEGA-GÁLVEZ, A., MIRANDA, M., DIAZ, L. P., LOPEZ, L., RODRIGUEZ, K., DI SCALA, K. Effective moisture diffusivity determination and mathematical modeling of the drying curves of the olive-waste cake. **Bioresource Technology**, v.101, p.7265–7270, 2010.

VEGA-GÁLVEZ, A.; LÓPEZ, J.; MIRANDA, M.; SCALA, K.; YAGNAM, F.; URIBE, E. Mathematical modelling of moisture sorption isotherms and determination of Isosteric heat of blueberry variety O'Neil. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 44, p. 2033–2041, 2009.

VERMA, L.R., BUCKLIN, R.A., ENDAN, J.B., WRATTEN, F.T.,. Effects of drying air parameters on rice drying models. **Transactions of the ASAE**, no. 28, p. 296–301, 1985.

WANG, C.Y.; SINGH, R.P. A single layer drying equation for rough rice. **Transaction of the ASAE**, St. Joseph, p. 2978-3001, 1978.

WHITFIELD, R.D. An unsteady-state simulation to study the control of concurrent and counter-flow dryers. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.32,p.171-178, 1986.

YOUNG J.H. Energy conservation by partial recirculation of peanut drying air. **TRANSACTIONS OF ASAE**, v.27, n.3, p.928-934, 1984.

ZANOELO, F.; ABITANTE, A.; MELEIRO, L.A.C. Dynamic modeling and feedback control for conveyors-belt dryers of mate leaves. **Journal of Food Engineering**, v.84, p. 458-468, 2008.

ZARE, D.; CHEN, G. Evaluation of a simulation model in predicting the drying parameters for deep-bed paddy drying. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 68, p. 78–87, 2009.

ZARE, D.; MINAEI, S.; ZADEH, M.M.; KHOSHTAGHAZA, M.H. Computer simulation of rough rice drying in a batch dryer. **Energy Conversion and Management**, v. 47, p. 3241–3254, 2006.

ZHANG, Q; LITCHFIELD, J.B. Fuzzy logic control for a continuous crossflow grain dryer. **Journal of Food Process Engineering**, v.16, n.1, p.59-77, 1993.