

**JOSÉ EDUARDO CARVALHO MONTE**

**SISTEMA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO APLICÁVEL A  
SECADORES EM CAMADA FINA UTILIZANDO-SE  
INSTRUMENTOS DIGITAIS ENDEREÇÁVEIS**

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

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2006

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

T

M772s  
2006

Monte, José Eduardo Carvalho, 1961-

Sistema de controle e automação aplicável a secadores em camada fina utilizando-se instrumentos digitais endereçáveis / José Eduardo Carvalho Monte. – Viçosa : UFV, 2006.

xviii, 88f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndice.

Orientador: José Helvecio Martins.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 86-88.

1. Equipamento de secagem - Automação. 2. Secadores de grãos - Projetos e construção. 3. Cereais - Secagem - Equipamento e acessórios. 4. Peso (Física) - Medição. 5. Circuitos eletrônicos. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 631.3

**JOSÉ EDUARDO CARVALHO MONTE**

**SISTEMA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO APLICÁVEL A  
SECADORES EM CAMADA FINA UTILIZANDO-SE  
INSTRUMENTOS DIGITAIS ENDEREÇÁVEIS**

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

Aprovada em: 30 de março de 2006.

---

Prof. Agnaldo José da Rocha Reis

---

Profa. Ilda de Fátima Ferreira Tinoco

---

Prof. Adílio Flauzino de Lacerda Filho

---

Prof. Paulo Marcos de Barros Monteiro  
(Conselheiro)

---

Prof. José Helvecio Martins  
(Orientador)

Ao meu pai, José Pio Monte, batalhador incansável, que sempre nos norteou e, à minha mãe, Dodora, nossa condutora, batalhadora e defensora, sempre presente em nossos dias;

À minha irmã, Aninha, austera, correta e emotiva, em defesa dos seus princípios;

Aos companheiros e alunos do CEFET - Ouro Preto, apresento.

## AGRADECIMENTO

A Deus, sempre presente.

Aos meus pais, Maria Auxiliadora de Carvalho Monte (*in memoriam*) e José Pio Monte e à minha Irmã, Dra. Ana Luísa N. de Carvalho Monte, sempre presentes e amigos.

Ao grande amigo Paulo Raimundo Pinto, pelo grande incentivo e total apoio.

À Universidade Federal de Viçosa, por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, pela acolhida.

Ao apoio e tolerância dos grandes amigos Professores Orientadores José Helvecio Martins, Paulo Marcos de Barros Monteiro e Ricardo Capúcio de Resende, pela orientação e compreensão da difícil tarefa de se dedicar à dupla jornada Professor-Aluno entre a docência no Centro Federal de Educação Tecnológica de Ouro Preto e Mestrado na Universidade Federal de Viçosa.

Aos meus amigos e colegas da Pós-Graduação na UFV Daniela de Carvalho Lopes, Antônio José Steidle Neto, Cláudia Valéria Cabral, Marcos Caldeira, Carlos Alberto Teixeira, Reginaldo Santos, Douglas Romeu e Pedro Luis Almeida Costa, pelo companheirismo, pela solicitude e cotidianos ensinamentos, sempre prestimosos e colaboradores para a elaboração desta tese.

Aos Professores Adílio Flauzino de Lacerda Filho e Antonio Carlos Vieira, pela bela amizade gratuita e pelo apoio nas horas de angústia e frustração.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa e ao “esperançoso” senhor Joel de Freitas Gomide, pela prestimosa colaboração.

A todos que sorriram com minhas vitórias e se entristeceram a meu lado, por colaborarem, e muito, com este trabalho.

## BIOGRAFIA

**JOSÉ EDUARDO CARVALHO MONTE**, filho de Maria Auxiliadora de Carvalho Monte e José Pio Monte, nasceu em Ouro Preto, Estado de Minas Gerais, em 27 de agosto de 1961.

Em 1976, iniciou o Curso de Técnico em Metalurgia na Escola Técnica Federal de Ouro Preto, graduando-se em 1979.

Em 1980, iniciou suas atividades profissionais atuando na área de fabricação de produtos de Ferro Ligas para a indústria siderúrgica.

Em 1981, iniciou o Curso de Engenharia Elétrica no Instituto Nacional de Telecomunicações, em Santa Rita do Sapucaí, Estado de Minas Gerais, graduando-se em dezembro de 1986.

Em julho de 1987, iniciou a carreira de Docência no Curso de Informática Industrial da Escola Técnica Federal de Ouro Preto, como professor contratado, sendo efetivado em dezembro de 1988. Ministra aulas de Eletrônica Digital e Analógica, Microcontroladores, Controle de Processos, Teleprocessamento, Periféricos de Computadores, Eletrotécnica, até então, no Curso de Instrumentação Eletrônica e Controle de Processo, do atual Centro Federal de Educação Tecnológica de Ouro Preto.

Em maio de 1994, concluiu o curso de Especialização em Informática Industrial e Automação na Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, em Belo Horizonte.

Em março de 2004, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola na UFV na área de Energia do Departamento de Engenharia Agrícola, defendendo tese em março de 2006.

<b>ÍNDICE</b>	
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	viii
<b>LISTA DE EQUAÇÕES</b>	xi
<b>LISTA DE TABELAS</b>	xii
<b>LISTA DE ABREVIATURAS</b>	xiv
<b>RESUMO</b>	xv
<b>ABSTRACT</b>	xvii
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	1
<b>2. OBJETIVO</b>	5
<b>3. REVISÃO DE LITERATURA</b>	6
3.1. Tecnologia <i>1-Wire</i> <sup>TM</sup>	6
3.2. Interface entre dispositivos mestre escravo com 1-Wire <sup>TM</sup>	7
3.3. Processo de Identificação dos Dispositivos em Rede 1-Wire <sup>TM</sup>	8
3.4. Verificação de redundância cíclica – CRC	9
3.5. Protocolo de comunicação do sistema 1-Wire <sup>TM</sup>	10
3.6. Sistema de Alimentação dos Dispositivos da Série 1-Wire <sup>TM</sup>	12
3.6.1. Sistema de Alimentação Parasita	13
3.6.2. Sistema de Alimentação Externa	14
3.7. Dispositivos Eletrônicos Endereçáveis da Série 1-Wire <sup>TM</sup>	14
3.7.1. Introdução	14
3.7.2. Considerações sobre alguns dispositivos eletrônicos endereçáveis	15
3.7.2.1. Conversor analógico-digital DS2438	15
3.7.2.2. Chave digital DS2406	19
3.8. Célula de Carga	23
3.8.1. Princípio de Funcionamento da célula de carga	23
3.8.2. Extensômetros Coláveis (Strain Gauges)	24
3.8.3. Deformação de materiais	26
3.8.4. Extensômetros Coláveis de Resistência Elétrica	27

3.8.5. Extensômetros coláveis de resistência elétrica	28
3.8.6. Principais tipos de células de carga	29
3.8.7. Especificações e características de uma célula de carga	30
3.8.8. Fatores que interferem na medição de deformação	31
3.8.9. Fatores para escolha de extensômetros	31
3.8.10. Calibração de uma ponte com extensômetro	32
3.9. Secagem em camada fina	34
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>35</b>
4.1. Desenvolvimento do Sistema de Controle do Secador	35
4.1.1. Descrição do Sistema de Secagem	35
4.1.2. Sistema de Pesagem Automática	39
4.2. Sistema de Medição de Temperatura	46
4.3. Determinação do Teor de Umidade do Grão e da Curva de Secagem	46
4.4. Construção da Rede	47
4.5. Interface entre a Rede 1-Wire <sup>TM</sup> e o Computador	51
4.6. Alimentação da Rede e dos Dispositivos 1-Wire <sup>TM</sup>	52
4.7. Programa Computacional	54
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>55</b>
5.1. Sistema de Controle	55
5.1.1. Rede 1-Wire <sup>TM</sup>	55
5.1.2. Conexões em Hubs 1-Wire e Cabeamento	56
5.1.3. Chave digital “ACIONA AC”	57
5.1.4. Sistema de Pesagem	58
5.1.5. Curva de Calibração do Sistema de Pesagem	61
5.2. Medição de Temperatura e Umidade Relativa usando os Circuitos DS2438	70
5.3. Programa Computacional	72

5.4. Teste do Sistema de Controle e Validação do Programa Computacional	78
<b>6. RESUMO E CONCLUSÕES</b>	<b>82</b>
<b>7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>85</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>86</b>
<b>APÊNDICES</b>	
APÊNDICE 1 – CARACTERÍSTICAS DE UMA CÉLULA DE CARGA	A.1.1
APÊNDICE 2 – ANÁLISE DE INCERTEZAS	A.2.1

## LISTA DE FIGURAS

Figura	Título	Pág.
1	- Circuito básico do Conector DS1411	7
2	- Código de identificação dos dispositivos	8
3	- Gerador de código de CRC do sistema <i>1-wire</i> <sup>TM</sup>	9
4	- Níveis lógicos dos Padrões TTL / CMOS convencionais	10
5	- Níveis lógicos do sistema <i>1-wire</i> <sup>TM</sup>	11
6	- Seqüência de comunicação entre o mestre e um escravo	11
7	- Esquema de ligação convencional do sistema de barramento <i>1-wire</i> <sup>TM</sup>	12
8	- Circuito básico do sistema de alimentação parasita	13
9	- Circuito básico do sistema de alimentação externa.	14
10	- Terminais do conversor A/D DS2438	16
11	- DS2406 – Encapsulamento TO-92	19
12	Corrente de ruptura dos transistores de PIO ( $I_s$ ) em função da tensão de polarização externa do DS2406 ( $V_{pup}$ ).	22
13	- Célula de carga com os extensômetros interligados.	23
14	- Extensômetro tipo folha	24
15	- Curva de variação da tensão aplicada sobre o material em função de sua deformação.	25
16	- Extensômetro elétrico de resistência	27
17	- Código de identificação de um Extensômetro Colável	29
18	- Extensômetros resistivos dispostos em forma de ponte de Wheatstone	32
19	- Resistência de Calibração em paralelo com a resistência do Extensômetro	34
20	- Secador de grãos em camada fina.	35
21	- Diagrama em Bloco do dispositivo UMETER® 1.1 e vista da placa do circuito montado	36
22	- Vista de cima da caixa do medidor de umidade UMETER® 1.1	37
23	- Circuito da chave digital de acionamento de cargas em corrente alternada ACIONA AC	38
24	- Desenho da Placa da chave Digital com DS2406	38
25	- Chave Digital ACIONA AC com DS2406, TIC226D, MOC3010	38

Figura	Título	Pág.
26	Fotografia dos dois circuitos com chaves digitais DS2406 instalados no painel de controle, em paralelo com as chaves mecânicas.	39
27	Vistas de frente e de topo do sistema de pesagem da amostra.	41
28	Foto da Célula de Carga GL-10, da Alfa Instrumentos, montada no sistema de pesagem	41
29	Desenho do apoio fixo do prato da balança, com regulagem da altura	42
30	Efeitos das forças de apoio e deflexão do prato da balança e regiões de maior ou menor sensibilidade	43
31	Diagrama em bloco do sistema elétrico de pesagem	44
32	Amplificador conectado aos terminais do DS2438	45
33	Amplificador de Instrumentação com CA3140 usado para amplificar o sinal de saída da célula de carga	45
34	Circuito do amplificador diferencial de 3 estágios com CA 3140, com ganhos ajustáveis	46
35	Conectores RJ-11 macho e conectores RJ-11 fêmeas	47
36	Hub com 4 RJ-11 fêmeas e conexão de rede RJ-11	48
37	Conectores RJ-11 fêmea e macho, codificados de acordo com a rede 1-Wire <sup>TM</sup> utilizada no projeto.	48
38	Diagrama esquemático da Rede 1-Wire <sup>TM</sup> , com os dispositivos e conexões	50
39	Esquema do circuito da interface 1-Wire <sup>TM</sup> e o computador	51
40	Fonte de alimentação com os conectores RJ-11 Fêmea	53
41	Circuito da fonte estabilizada simétrica	53
42	Diagrama do sistema de controle de secagem de grãos	55
43	Engate entre conectores RJ-11 Macho e Fêmea em um Hub 1-Wire <sup>TM</sup>	57
44	Posicionamento do peso sobre o prato da balança para verificar a influência da posição no resultado da pesagem	58
45	Diagrama de Sensibilidade - Influência de uma carga fixa nas diversas regiões do prato da balança	60
46	Valores estimados (linha contínua) e experimentais (pontos) de massa em função da tensão na saída da célula de carga, para temperatura de 60°C	63

Figura	Título	Pág.
47	- Curva de correspondência entre os valores estimados de massa e os valores reais para temperatura de 60°C	64
48	- Valores estimados (linha contínua) e experimentais (pontos) de massa em função da tensão na saída da célula de carga, para temperatura de 80°C.	66
49	- Curva de correspondência entre os valores estimados de massa e os valores reais para temperatura de 80°C	67
50	- Valores estimados (linha contínua) e experimentais (pontos) de massa em função da tensão na saída da célula de carga, sem a presença de fluxo de ar.	69
51	- Curva de correspondência entre os valores estimados de massa e os valores reais sem fluxo de ar.	69
52	- Fluxograma da rotina inicial do programa.	74
53	- Fluxograma da rotina de seleção do teor de umidade final do processo.	75
54	- Fluxograma da rotina de procedimento para atingir o teor de umidade diferente da umidade de equilíbrio	76
55	- Fluxograma da rotina de procedimento para atingir a umidade de equilíbrio	77
56	- Interface humano – máquina.	78
57	Dados experimentais e estimados pela equação transformada.	81
58	Dados experimentais e estimados pela equação de Page.	81

**LISTA DE EQUAÇÕES**

Equação	Título	Página
1	- Verificação de redundância cíclica para 8 bits	9
2	- Sensibilidade do extensômetro	25
3	- Tensão de deformação	26
4	- Deformação Específica	26
5	- Lei de Hooke	26
6	- Resistência equivalente	33
7	- Razão de umidade pelo Modelo de Page	33
8	- Umidade de Equilíbrio de Henderson	34
9	- Equação de conservação de massa	46
10	- Equação ajustada aos dados experimentais	62
11	- Equação ajustada aos dados experimentais	65
12	- Equação ajustada aos dados experimentais	67
18	Modelo de regressão	79
19	Modelo de Page	79

## LISTA DE QUADROS

Quadros	Título	Página
1	- Descrição dos terminais do CI DS 2438	17
2	- Características do Termômetro digital incorporado ao DS2438	17
3	- Características elétricas para faixa de temperatura de - 40°C a 85°C e tensão $2,4V \leq VDD \leq 10,0V$	18
4	- Características elétricas dos conversores A/D DS2438	18
5	- Pinagem do DS2406 - Chaves Digitais em TO-92.	19
6	- Parâmetros elétricos dos pinos de dados da chave DS2406	20
7	- Parâmetros elétricos dos pinos de Acionamento PIO da chave DS2406	21
8	- Parâmetros elétricos – Características Elétricas DC da chave DS2406	21
9	- Parâmetros elétricos – Capacitâncias dos terminais da chave DS2406	21
10	- Parâmetros elétricos – Características Elétricas DC da chave DS2406	22
11	- Codificação de pinos usada para configuração dos conectores RJ-11 utilizados na rede 1-Wire™	49
12	- Valores de tensão na saída do amplificador para um peso padrão de balança de 2 kgf concentrado em três regiões do prato do sistema de pesagem	59
13	- Valores médios de tensão na saída da célula de carga com fluxo de ar aquecido a 60°C em função da massa colocada na bandeja de pesagem.	62
14	- Valores médios de tensão na saída da célula de carga com fluxo de ar aquecido a 80°C em função da massa colocada na bandeja de pesagem	65

Quadros	Título	Página
15	- Valores médios de tensão na saída da célula de carga sem fluxo de ar, em função da massa colocada na bandeja de pesagem	68
16	- Comparação entre valores de temperatura medidos usando um termômetro padrão e o termômetro interno do DS2438	71
17	- Comparação entre valores de umidade relativa medidos usando um psicrômetro padrão e DS2438 / HIH-3610 (UMETER)	71
18	- Razão de umidade experimental e estimada pelo modelo de Page, para um teor de umidade inicial de 26% b.u., umidade relativa do ar de 5,5 %, teor de umidade de equilíbrio de 2,4 % b.u. e temperatura de 80 °C	80

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

- CAD - Conversor Analógico Digital
- CRC - Verificação de redundância cíclica
- GND - Ground – Tensão de referência
- I/O - Entrada / saída
- IDE - Instrumentos Digitais Endereçáveis
- IHM - Interface Humano Máquina
- LSB - Bit menos significativo
- MSB - Bit mais significativo
- PID - Controlador Proporcional - Integrativo - Derivativo
- PIO - Terminal de Input / Output – entrada e saída
- ROM - Memória somente de leitura
- V<sub>cc</sub> - Tensão de Alimentação – Malha do Coletor – Corrente Contínua
- V<sub>DD</sub> - Tensão de Alimentação – Malha do Dreno – Corrente Contínua

## RESUMO

**MONTE, José Eduardo Carvalho**, Universidade Federal de Viçosa, março de 2006. **Sistema de Controle e Automação Aplicável a Secadores em Camada Fina Utilizando-se Instrumentos Digitais Endereçáveis**. Orientador: José Helvecio Martins. Conselheiros: Paulo Marcos de Barros Monteiro e Ricardo Capúcio de Resende.

Diversos modelos de secadores de grãos são encontrados nas mais diversas configurações e para diferentes aplicações. Dentre estes os secadores em camada fina possibilitam análises detalhadas do processo de secagem. De posse dos resultados dessas análises podem-se fazer as análises para secadores em camada espessa. O secador de grãos em camada fina usado neste trabalho contém um sistema de resistências para aquecimento do ar de secagem e um ventilador movido por um motor de 368W, que succionava o ar através do secador e da amostra de grãos. Um dispositivo baseado em chaves digitais DS2406 - tecnologia 1-Wire™ desenvolvida pela Dallas Semiconductor - e componentes eletrônicos semicondutores de potência foi desenvolvido para controlar o funcionamento do ventilador e o sistema de aquecimento do secador. Foi chamado de “Aciona AC®”. O controle desse secador está condicionado às características do processo de secagem da amostra de grãos em teste. Os sensores usados para medição de umidade relativa e temperatura ambiente utilizam o dispositivo UMETER®1.1, que é baseado no sensor de umidade relativa HIH-3610 da Honeywell e no conversor DS2438 da Dallas Semiconductor. O processo de verificação da redução do teor de umidade da amostra foi realizado por meio de uma balança com célula de carga equipada com extensômetros resistivos. Para a montagem da balança, a bandeja foi colocada sobre três apoios, (dois como apoios simples e o outro fixado sobre a célula de carga). O fundo da bandeja da balança que recebeu a camada fina de grãos era composto por uma peneira com abertura de malha 10, por onde passava o ar de secagem. Estes dispositivos, em rede, dispostos na topologia barramento, foram gerenciados por um mestre. Um programa computacional foi responsável por ligar o sistema que comandava os acionadores do ventilador e do aquecimento (liga ou desliga), assim como registrava as medições e os comandos, emitia gráfico e relatórios e

desligava o sistema quando as condições finais desejadas eram atendidas. Para validar o sistema, foram realizadas secagens de amostras de milho, para obtenção das curvas de secagem. Neste trabalho, pôde-se operar com sensores de temperatura e com conversores A/D na identificação dos sinais, além de associar esses dispositivos a outros circuitos, demonstrando sua versatilidade e flexibilidade, dentro de suas faixas operacionais. A confiabilidade da rede 1-Wire<sup>TM</sup> foi colocada à prova, uma vez que os dispositivos estavam sujeitos a perturbações eletromecânicas. Com certa frequência, foram submetidos a processos de partida e funcionamento de motor, promovendo turbulências eletromagnéticas sempre prejudiciais às redes de comunicação de dados.

## ABSTRACT

**MONTE, José Eduardo Carvalho**, M.S., Universidade Federal de Viçosa, March 2006. **Automation and control system applicable to thin-layer grain dryer by using digital addressable Instruments**. Advisor: José Helvecio Martins. Committee members: Paulo Marcos de Barros Monteiro and Ricardo Capúcio de Resende.

Many grain-dryers models with different configurations and applications are encountered worldwide. Among those a thin-layer dryer makes it possible to perform detailed analysis of the drying process. With the results from this analysis results, the drying curves can be modeled and the deep bad grain drying process can be predicted.

The thin layer grain dryer used in this work has an electrical resistance system to heat the drying air, and fan driven by a 368 W motor to push the air trough the dryer and grain samples. A device based on DS2406 digital switches - the 1-wire™ technology developed by Dallas Semiconductor - and others electronics devices based on power semiconductors were developed to control the fan and dryer heating system operation. This system was called "ACIONA AC®". The dryer control is based on the drying process characteristics of the grain samples been tested. The relative humidity and temperature sensors use a device called UMETER® 1.1, based on a HIH-3610 humidity sensor developed by Honeywell, and on a DS2438 A/D converter developed by Dallas semiconductor. The verification process of the grain samples moisture content reduction is performed by using a scale with a load cell (manufactured with resistive strain gauges). To construct the scale the sample tray was supported by three points (two fixed points and the other one over the load cell). The bottom of the tray that receives the grains samples is made up of a ten mesh screen, where the drying air passes. These devices were networked, and installed in bus topology configuration, and were controlled by a master device. Software is responsible to power up the system, turn on or off the fan and the heating system, as well as, record the measurements and commands, emit graphics and reports, and turn off the systems when the final conditions are achieved. To validate the system, several drying tests were carried out using shelled corn samples to obtain the drying curves. It was possible to demonstrate one

more possibility for use the 1-Wire™ technology. In this work it was possible to use temperature sensors and A/D converters in the signal identification and associate these devices with others circuits, showing their versatility and a good flexibility in their operation bands. The feasibility of the 1-Wire™ network was extensively proved because the devices were subject on electro-mechanical disturbs. Frequently the system was submitted to starts process and motors operation, promoting electromagnetic disturbs, always harmful to the data communications networks.

## 1- INTRODUÇÃO

O número de dispositivos ligados aos computadores para comunicação e instrumentação (medições e acionamentos) aumenta continuamente. Por isso, as redes de comunicação entre computadores e seus periféricos, ou suas interfaces, tornam-se cada vez mais complexas devido às necessidades específicas de cada processo.

A evolução da tecnologia de redes permite deixar o sistema de comunicação, protocolos e cabeamentos, cada vez mais simples e confiáveis, mantendo ainda alta velocidade de comunicação.

Normalmente, transferência de informações entre o computador e os dispositivos conectados a ele, é estabelecida por meio de cabos com múltiplos condutores que ligam e alimentam, individualmente, cada um destes dispositivos.

O grande número de fios e cabos usados para transmissão dos sinais de controle e para comunicação de dados torna o sistema vulnerável a interferências nos sinais, por estarem trabalhando em ambientes próximos a locais onde ocorrem muitos acionamentos eletromecânicos, tais como relés, contadores e chaves eletromecânicas.

Para evitar essas interferências, novos sistemas de controle têm sido implementados, visando incorporar sistemas de troca de informações e de dados a sistemas de acionamentos.

Busca-se sempre a confiabilidade do sistema para uma aplicação específica, que tenha, ao mesmo tempo, grande desempenho e alta velocidade de transferência de dados.

Uma nova tecnologia, desenvolvida pela Dallas Semiconductor, conhecida como 1-Wire<sup>TM</sup>, possibilita uma transferência bidirecional de informação por meio de um único condutor (operando em semi-duplex), ao mesmo tempo em que alimenta dispositivos remotos por meio da própria linha de transmissão de dados (AWTREY, 1997; AWTREY, 1998; AWTREY, 2002).

Esses dispositivos operam com transmissão serial de dados, com verificação de erro por redundância cíclica, o que garante maior coerência dos valores recebidos e transmitidos.

Os vários requisitos de comunicação podem ser apresentados em um modelo de três níveis diferentes de requisitos, que abrangem todo sistema automatizado:

*Nível de informação* - Intensa troca de dados com constantes de tempo da ordem de grandeza de segundos;

*Nível de automação e controle* - Moderada troca de dados com constantes de tempo da ordem de grandeza de centenas de milissegundos, para integração entre unidades inteligentes, com aplicações de características contínuas, de baixa velocidade e alta segurança. Opera com mensagens complexas, com razoável nível de informações de diferentes propósitos;

*Nível de dispositivos de campo* - Menor troca de dados com constantes de tempo da ordem de grandeza de dezenas de milissegundos, usado em sensores e atuadores de natureza discreta. As ações são executadas no nível dos dispositivos, sem necessidade de interação com níveis superiores.

Na maioria das vezes uma única rede local de comunicação de dados, chamada de LAN (Local Area Network), dificilmente atenderá esses três níveis, com desempenho desejado. Como solução, costuma-se implementar diferentes redes para atender a cada característica específica.

A escolha de determinado tipo de rede depende de algumas características tais como taxa de transmissão de bits, o ambiente no qual irá trabalhar, quais protocolos de comunicação são mais interessantes e se encontram disponíveis para a aplicação desejada, além dos equipamentos a serem usados.

A maioria dos protocolos de comunicação de dados apresenta uma setoração em camadas. Uma das camadas é a camada de Enlace, que é responsável por interligar os diversos dispositivos, fisicamente, propiciando a troca de pacotes de dados, interligando origem e destino. É a

implementação que agrega a cada mensagem enviada o endereço da estação de destino.

Redes mais recentes usam um modelo diferente para implementar a camada de enlace, chamado mestre-escravo. Esta implementação está baseada no conceito de que alguns dispositivos são produtores de informações e outros são usuários receptores destas.

Nessa implementação, quando um dispositivo fornece sua informação, esta é colocada na rede e fica acessível para todos os dispositivos que sejam usuários dessa informação ao mesmo tempo, reduzindo o número de mensagens a serem emitidas, bem como reduzindo o próprio comprimento da mensagem, uma vez que o endereço de remetente já é conhecido. Para o sistema mestre-escravo, para o escravo, na ordem e para o mestre, na resposta, é necessário, somente, identificar a informação a ser transmitida.

O modelo mestre-escravo empregado nas redes encontradas recentemente no mercado representa um modelo de rede eficiente quanto à maximização de troca de dados e quanto o aumento da flexibilidade das redes.

Existem métodos e sistemas de secagem de grãos em camadas finas que operam por etapas distintas. Isto é, faz-se a verificação do teor inicial de água da amostra, inicia-se o processo de secagem, interrompe-se para verificação do teor de água em instantes definidos, repete-se as operações de secagem e verificação do teor de água até atingir aos níveis adequados ou desejados para teor final de água, parando o processo.

O Controle do processo de secagem proposto por esse trabalho é composto por um controle automático do teor de umidade, por meio da verificação contínua do peso da amostra.

Fornece-se um de fluxo de ar constante à parte inferior da camada de grãos, na temperatura ambiente ou previamente aquecido.

Para esse processo, é necessário o conhecimento prévio do teor inicial de água do produto, a massa inicial de grãos, a temperatura e a umidade relativa do ar.

Para controlar as operações foram empregados dispositivos digitais endereçáveis controlados por um programa de computador desenvolvido para esse fim.

Em geral, quando se faz um estudo do processo de secagem em camada delgada, seu objetivo é a determinação das taxas de secagem de um produto em particular em função de algumas variáveis selecionadas. O método comumente utilizado para a coleta de dados nesses estudos consiste em colocar as amostras em um ou mais secadores e, com o passar do tempo, registrar as perdas de massa que irão ocorrer na amostra durante o processo de secagem. Para obter a perda de massa, em função do tempo de secagem, seria necessário retirar a amostra do secador, para levar a um dispositivo de pesagem. Essa operação é a principal fonte de erro na determinação das taxas de secagem, devido à interrupção do processo de secagem, caso seja por tempos maiores, e, por consequência, ao resfriamento da amostra durante o período em que ela permanece fora do secador ou, por perda de parte da amostra durante essa etapa de pesagem. Isto ocorre em intervalos periódicos, fazendo com que a secagem seja aproximada por um processo discreto, envolvendo um grande número de intervalos.

Com a tecnologia 1-Wire<sup>TM</sup> apoiada em outros dispositivos eletrônicos que permitem tratar os sinais de controle, esse problema pode ser resolvido de forma a se controlar e registrar as variáveis do processo. Todavia, ainda é necessário o desenvolvimento de programas computacionais que, aliados às rotinas de aquisição de dados, irão tratar e preparar os dados coletados, realizar análises estatísticas e apresentação gráfica dos resultados de maneira integrada. Além disso, como os secadores de camada fina ainda não são padronizados, eles devem ser desenvolvidos com vistas a uma padronização dos procedimentos de secagem em laboratórios.

## 2- OBJETIVO

No presente trabalho visou-se o desenvolvimento e implementação de um sistema de controle automático, com base em um sistema de aquisição de dados em tempo real, que utiliza dispositivos eletrônicos endereçáveis da série 1-Wire<sup>TM</sup> para monitorar e controlar um sistema de pesagem automática de amostras de produto em secador de grãos em camada fina.

Especificamente, o presente trabalho tem as seguintes metas:

Desenvolver e testar um sistema de pesagem automática de amostras em um secador de grãos em camada fina.

Desenvolver e testar um sistema de controle inteligente para um processo de secagem de grãos em camada fina, com base no sistema de aquisição de dados em tempo real, utilizando dispositivos eletrônicos endereçáveis da série 1-Wire<sup>TM</sup>.

### 3- REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 - Tecnologia 1-Wire™

A tecnologia de rede de comunicação de dados conhecida como rede 1-Wire™, é uma rede local baseada em um microcontrolador. Trata-se de um sistema mestre-escravo, com saída em dreno aberto e arquitetura de múltiplas saídas, capazes de interligar, com apenas um condutor de dados, além do condutor de referência (terra), dispositivos da série 1-Wire™, desenvolvidos pela empresa Dallas Semiconductor, tais como sensores de temperatura, dispositivos de entrada e saída digitais, conversores analógico-digitais, interfaces e memórias, dentre outros.

Por mestre, entende-se o dispositivo que inicia, controla e conclui uma transferência de dados. Por escravo, entende-se o dispositivo endereçado e controlado pelo mestre.

A saída em dreno aberto constitui-se de um transistor MOSFET de saída, cujo dreno está desconectado e necessita da colocação de um resistor externo, chamado de resistor de polarização (Pull-Up). Para uma tensão de saída baixa, considerada como nível lógico baixo, esse transistor apresenta uma baixa impedância de saída, capaz de permitir, efetivamente, a circulação de corrente. Para uma tensão de saída alta, considerada como nível lógico alto, esse transistor apresenta uma impedância de saída muito elevada, que impede a circulação de corrente (MONTEIRO, 2002a).

Cada dispositivo possui um código de identificação único de 64 bits, o que permite eliminar gastos com condutores extras e fontes de alimentação remotas (MOTA, 2001).

Existem outros sistemas semelhantes, embora não tão versáteis quanto esse sistema proposto pela empresa Dallas Semiconductor, tais como os denominados de I<sup>2</sup>C, desenvolvido pela Philips (ELETRÔNICA, 2001), Philips Semiconductors I<sup>2</sup>C-bus Information, 2001.

([http://www.semiconductors.philips.com/products/interface\\_control/i2c](http://www.semiconductors.philips.com/products/interface_control/i2c)) e CANBAN e DeviceNet, desenvolvidos pela Invensys Systems (LAW, 2001).

Neste trabalho, utiliza-se um computador como mestre, enquanto circuitos integrados (CI) da série 1-Wire™, fabricados pela Dallas Semiconductor, como as chaves digitais DS2406 e os conversores analógico-digitais (CAD) de duas entradas analógicas DS2438, que possui incorporado a ele um sensor de temperatura DS1820, funcionam como escravos.

### 3.2 – Interface entre os Dispositivos Mestre e Escravos na Tecnologia 1-Wire™

Os dispositivos escravos são conectados ao mestre por meio de um circuito integrado DS2480, denominado acionador de linha, instalado em um conector DS1411, como mostrado na Figura 1, que faz a alimentação e o interfaceamento do barramento 1-Wire™ com a porta serial RS-232C do computador e de onde sai um condutor que, junto com um condutor de referência (GND), interliga todos os dispositivos escravos do sistema (MARTINS, 2002).

A comunicação entre o mestre (computador) e os escravos (sensores, contadores e conversores analógico-digitais) é feita por meio de condutores metálicos com funções específicas, quais sejam: suprimento de energia ao sistema, transmissão de dados e aterramento. Por convenção, o sistema 1-Wire™ possui apenas um único condutor no qual são conectados todos os dispositivos da série 1-Wire™, já que, por convenção, o condutor de referência ou aterramento não é considerado.

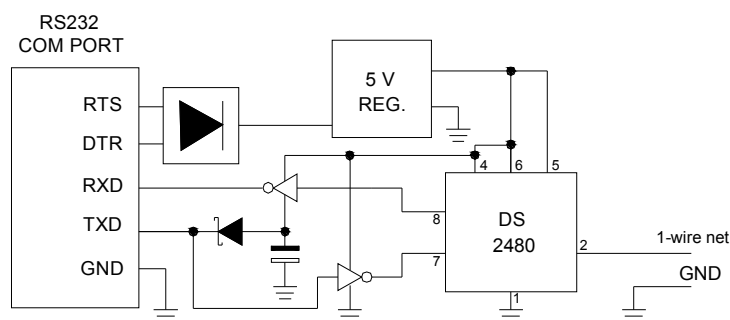


Figura 1 - Circuito básico do conector DS1411.

O código individual de identificação de 64 bits (8 bytes) de cada dispositivo 1-Wire™ escravo, definido pela própria Dallas Semiconductor, possibilita conectar diversos dispositivos à mesma linha de transmissão de dados. Cada dispositivo é auto temporizado por meio de seu próprio oscilador interno (MONTEIRO, 2002b). Cada dispositivo será endereçado de acordo com a necessidade de se obter ou de enviar informações.

No código individual de identificação, representado na Figura 2, o primeiro byte determina o código de família do dispositivo, os 6 bytes seguintes correspondem ao número de série que caracteriza o dispositivo e o último byte representa a verificação de redundância cíclica (CRC) dos sete primeiros bytes, utilizada para garantir a integridade dos dados.

CRC - 8 bits		Identificação – 48 bits		Família – 8 bits	
MSB	LSB	MSB	LSB	MSB	LSB

Figura 2 - Código de identificação dos dispositivos.

A obtenção dos códigos dos dispositivos ligados a um barramento 1-Wire™ pode ser feita por um processo recursivo de procura em árvore, por meio de um programa específico, ou então, utilizando-se um programa de identificação de dispositivos, como por exemplo, WINDIAG ou iButton Viewer, disponibilizado na rede mundial de computadores (Internet) pela Dallas Semiconductor.

### 3.3 – Processo de Identificação dos Dispositivos em uma Rede 1-Wire™

Um algoritmo de eliminação permite ao barramento mestre determinar a quantidade e identificar o código de 64 bits gravado a laser na memória ROM de cada um dos dispositivos escravos conectados à rede.

O processo de procura na memória ROM consiste na repetição de uma rotina simples de três passos: (1) ler um bit, (2) ler o complemento deste bit e, (3) em seguida, escrever o valor desejado deste bit. O barramento mestre executa esta rotina para cada bit da ROM de um dispositivo. Ao concluí-la, determina o

conteúdo desta ROM, que corresponde ao código de identificação do dispositivo. O número de dispositivos restantes e seus códigos ROM podem ser identificados repetindo-se o processo para cada um deles.

### 3.4 - Verificação de redundância cíclica - CRC

O controle de redundância cíclica (CRC) é um número decorrente de um conjunto de dados a serem transmitidos. Depois da transmissão, este valor deve ser recalculado e comparado com o valor original a fim de detectar se houve algum tipo de erro na transmissão. Cada dispositivo 1-Wire™ tem um CRC de 8 bits armazenado no byte mais significativo da memória de apenas leitura (ROM) de 64 bits gravada a laser.

A verificação do dado transmitido (enviado e recebido) é verificada por meio de um algoritmo de verificação de erro (CRC) no dispositivo receptor, para verificar a fidelidade da informação recebida com o CRC gerado durante a transmissão. Qualquer discrepância é tratada como erro da informação transmitida. A função polinomial usada para este controle de redundância cíclica é:

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

Em que:

**CRC** = Erro de redundância cíclica,

**X** = Cada bit do dado transmitido,

O controle de redundância cíclica (CRC) do sistema 1-Wire™ é gerado utilizando-se um gerador polinomial constituído por um registrador de deslocamento e portas **OU** exclusivo (**XOR**), conforme mostrado na Figura 4.

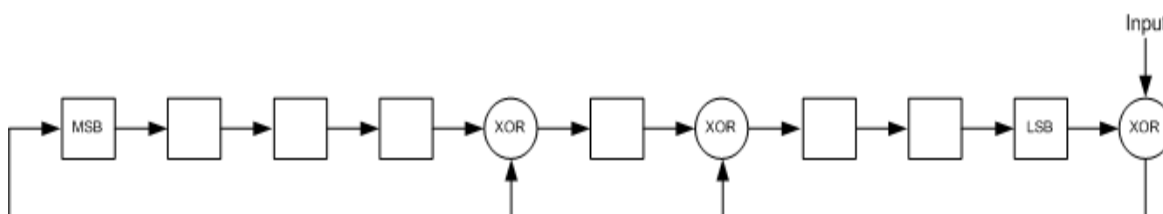


Figura 3 - Gerador de código de CRC do sistema 1- Wire™.

### 3.5 - Protocolo de Comunicação do Sistema 1-Wire™

O sistema 1-Wire™ é composto, basicamente, por três elementos:

- O mestre e seu programa computacional de controle;
- Os condutores e os conectores que compõe a rede;
- Os dispositivos 1-Wire™ conectados à rede.

O protocolo da rede 1-Wire™ utiliza níveis lógicos TTL/CMOS (Lógica com Transistor-Transistor / Lógica com transistores MOSFET de forma complementar) convencionais, em que uma tensão igual ou inferior a 0,8 V corresponde ao estado ou nível lógico baixo TTL e tensões iguais ou superiores a 2,2 V correspondem ao estado ou nível lógico alto TTL (Figura 4).

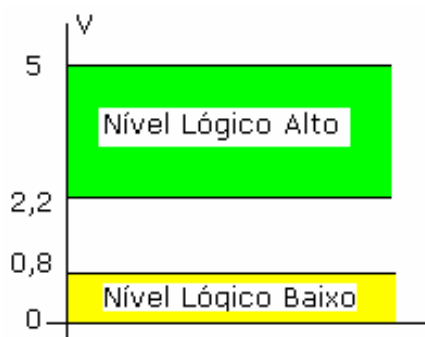


Figura 4 - Níveis lógicos dos Padrões TTL/CMOS convencionais.

Tanto o mestre como os escravos são configurados como transceptores, isto é, permitem o fluxo de dados em ambas as direções, porém em uma direção de cada vez (semi-duplex). Portanto, a transferência de dados é em via única e seqüencial a partir do *bit* menos significativo.

No sistema 1-Wire™, os dados são transmitidos em função da duração do intervalo de tempo em que a linha fica no nível lógico baixo. Para se escrever um “1” lógico (*bit* igual a um), o barramento é mantido no nível lógico baixo por, no máximo, 15  $\mu$ s. Para escrever um “0” lógico (*bit* igual a zero), o barramento é mantido no nível lógico baixo por um tempo igual ou superior a 60  $\mu$ s.

O nível lógico baixo é definido pela saturação de um transistor de efeito de campo, usando óxido de silício / metal / semiconductor (MOSFET),

ao passo que o nível lógico alto é obtido pelo resistor de polarização, quando esse transistor estiver cortado (Figura 5).

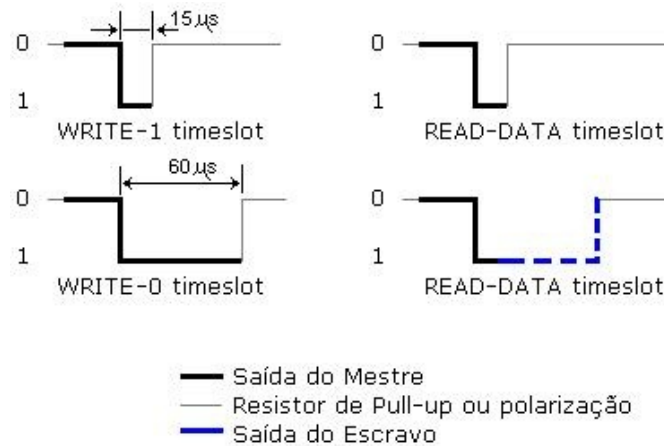


Figura 5 - Níveis lógicos do sistema 1-Wire™.

Quando em operação, o mestre inicializa a rede com um pulso de inicialização, colocando o barramento no nível lógico baixo por, pelo menos, 480  $\mu\text{s}$ . Os escravos respondem ao pulso de inicialização com pulsos de presença, com duração entre 15  $\mu\text{s}$  e 60  $\mu\text{s}$ . A seguir, o mestre acessa um determinado escravo chamando seu endereço e enviando, em seguida, um comando específico exigido pelo dispositivo. Finalmente, ocorre a transferência de dados entre eles. A Figura 6 mostra a seqüência de comunicação entre o mestre e o escravo.

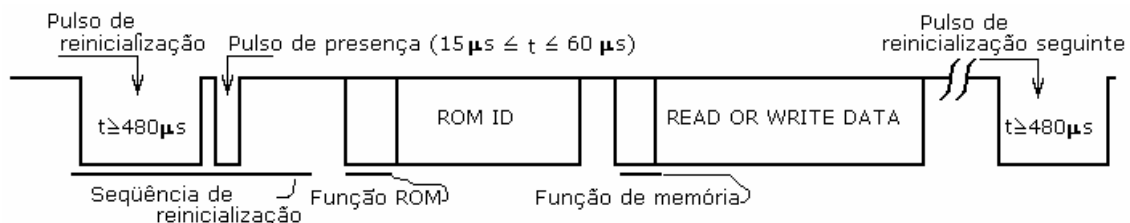


Figura 6 - Seqüência de comunicação entre o mestre e um escravo.

Para funcionar, o barramento 1-Wire™ deve ser alimentado por meio de um resistor de polarização de, aproximadamente, 5 k $\Omega$ , ligado ao terminal positivo da fonte de alimentação, com a finalidade de manter, durante o período de repouso, a tensão do barramento em estado de nível lógico alto, conforme mostrado no circuito equivalente da Figura 7, na qual o

dispositivo 1-Wire™, é um conversor analógico-digital DS2438, funcionando como um dispositivo escravo, com saída em dreno aberto, disponível no pino de entrada e saída (I/O).

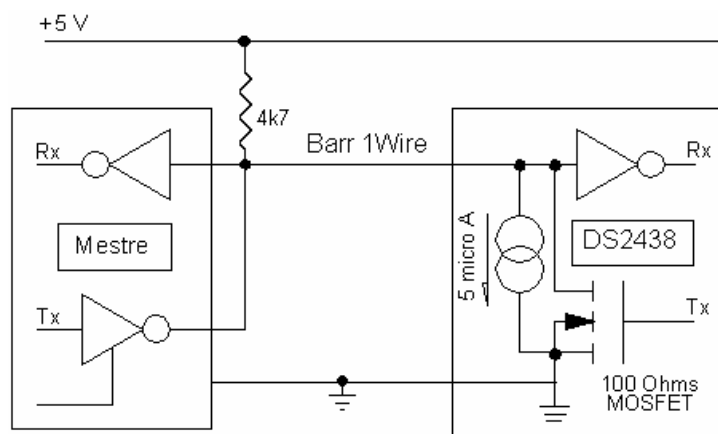


Figura 7 - Esquema de ligação convencional do sistema de barramento 1-Wire™

### 3.6 - Sistema de Alimentação dos Dispositivos da Série 1-Wire™

Esse sistema pode ser energizado por uma fonte de corrente contínua com tensão entre 3 V e 5 V, ligada ao condutor de dados por meio de um resistor de polarização, denominada de alimentação parasita, ou conter mais um condutor ligado diretamente à alimentação dos dispositivos, denominada de alimentação externa (AWTREY, 1997; MONTEIRO, 2002a).

#### 3.6.1 - Sistema de Alimentação Parasita

Na alimentação parasita, os dispositivos 1-Wire™ podem ser energizados pela própria linha de transmissão de dados, por meio de um capacitor e um retificador de meia onda, embutidos em cada dispositivo, conforme mostrado na Figura 8.

Sempre que a linha de transmissão de dados é colocada no estado ou nível lógico alto, próxima de +5 V, por meio do resistor de polarização, o

diado do retificador de meia-onda conduz e carrega o capacitor interno. Quando a tensão da linha de transmissão de dados cai abaixo da tensão do capacitor, o diodo fica polarizado reversamente, isolando a carga. A carga armazenada no capacitor fornece, então, energia para alimentar o dispositivo escravo durante o intervalo de tempo em que a linha de transmissão de dados encontra-se no estado ou nível lógico baixo.

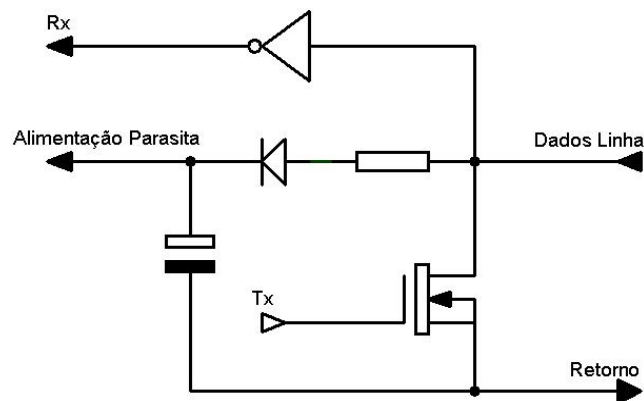


Figura 8 - Circuito básico do sistema de alimentação parasita.

As vantagens da alimentação parasita são, além da não necessidade de fonte no local para medição em pontos remotos, a possibilidade de acesso à memória apenas de leitura (ROM) sem necessidade de uma fonte de alimentação convencional.

### 3.6.2 – Sistema de Alimentação Externa

O uso da alimentação parasita, para os dispositivos 1-Wire<sup>TM</sup> conectados à linha, só é possível quando ele estiver endereçado. Assim que deixar de ser endereçado, cessa a alimentação pela pura ausência de sinal elétrico em seu interior. Portanto, caso se queira manter leitura contínua ou se deseje manter dados armazenados em algum meio de gravação (memórias, por exemplo), existe a necessidade de alimentação por uma fonte externa. Neste caso, a utilização de mais um condutor ( $V_{CC}$ ) torna-se necessário, a fim de fornecer alimentação a cada dispositivo.

A vantagem da utilização de uma fonte externa é que, quando diversos dispositivos são ligados ao mesmo barramento 1-Wire™ e todos são alimentados por esta fonte, o barramento mestre pode realizar a conversão e a transferência de dados, simultaneamente (Figura 9).

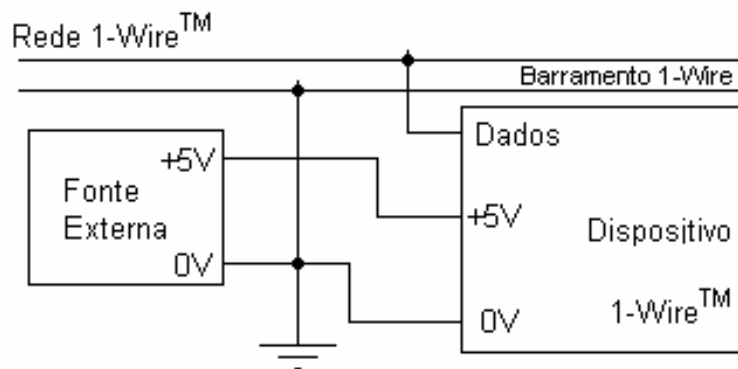


Figura 9 - Circuito básico do sistema de alimentação externa.

### 3.7 - Dispositivos Eletrônicos Endereçáveis da Série 1-Wire™

#### 3.7.1 - Introdução

Vários tipos de conversores analógico-digitais (CAD) têm sido introduzidos no mercado. No caso de dispositivos CAD escravos da série 1-Wire™, é possível a medição de várias propriedades ou grandezas, utilizando-se apenas um simples par de condutores trançados, do tipo empregado em linhas telefônicas comuns, e abrem os caminhos para uma nova geração de transdutores denominados instrumentos digitais endereçáveis (IDE).

Um IDE é composto por um ou mais elementos sensores, em uma pastilha (chip) que convertem o sinal de entrada para um formato digital e alguns componentes de proteção e periféricos. (PINTO, 2005)

Uma vantagem distinta dos IDE's é que a interface entre todos eles e o dispositivo mestre é feita da mesma maneira, independentemente da propriedade que está sendo medida. Tanto o mestre quanto os escravos são configurados como transceptores (transmissor ou receptor), permitindo que os dados fluam, de maneira seqüencial, em ambas as direções, porém em apenas uma direção a

cada vez ou semi-duplex (AWTREY, 1997). Essa característica é contrastante com a maioria dos métodos que incorporam circuitos de condicionamento de sinal, em que requeiram saídas diversificadas para dados, controles e alimentação para cada sensor.

O endereço de identificação único (ID) é a chave para o barramento mestre interpretar qual IDE e qual parâmetro está medindo, o que permite a colocação de múltiplos IDE's no mesmo barramento, reduzindo-se os custos de instalação e manutenção.

### **3.7.2 – Considerações sobre alguns dispositivos eletrônicos endereçáveis**

#### **3.7.2.1 - Conversor analógico-digital DS2438**

Com a função inicial de medir a condição de um conjunto de baterias, o dispositivo DS2438 contém dois conversores analógico-digitais (CAD) e um sensor de temperatura similar ao DS18B20.

O CAD principal executa a conversão de 10 bits de um sinal de tensão de entrada de 0 a +10 V, ou a conversão de 9 bits de um sinal de tensão de 0 a +5 V com um multiplexador interno que permite ler a tensão aplicada ao seu pino da fonte de potência.

O outro CAD é usado para medir a tensão entre os terminais devido às grandes correntes de bateria que circulam através de um resistor externo de  $0,05 \Omega$ , com uma precisão assinalada de 10 bits de  $\pm 250$  mV, na leitura máxima da escala.

Dentre outras características, tais como relógio de tempo real, este circuito integrado (CI) possui 40 bytes de memória não-volátil, o que é útil para armazenar informação sobre calibração, localização e função (AWTREY, 2002).

Como o DS2438 contém CAD para temperatura e tensão, ele pode ser utilizado para medir outras grandezas por meio de sensores apropriados conectados a seus terminais, tais como medição da umidade relativa utilizando um sensor capacitivo.

Na medição de temperatura, o DS2438 fornece valores digitais de 13 bits para cada dado medido. O tempo de conversão do valor de temperatura de analógico para digital é de, aproximadamente, 10 ms. A faixa de medição de temperatura varia de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $+125^{\circ}\text{C}$  com resolução de  $0,03125^{\circ}\text{C}$  e exatidão de  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  para temperaturas compreendidas entre  $-40$  e  $85^{\circ}\text{C}$  (Dallas Semiconductor, 2003c). A faixa de medição de tensão varia de 0 a 10 V com resolução de 0,01 V. Os dados medidos são fornecidos na forma digital em valores de 10 bits, com tempo de conversão próximo aos 200  $\mu\text{s}$ . Para tensões (VDD) na faixa de 2,4 V a 10 V, as medidas realizadas apresentam exatidão de  $\pm 0,01$  V para os dados obtidos pelo pino VDD e exatidão de  $\pm 0,025$  V para os dados obtidos pelo pino VAD.

Para o DS2438, o código de família é  $(00100110)_2$ , correspondente a  $(26)_H$  (hexadecimal) ou  $(38)_{10}$  (decimal). Como todo dispositivo 1-Wire<sup>TM</sup>, o DS2438 possui um número de série próprio, o que permite endereçamentos individuais e monitoramento de diversas grandezas ao mesmo tempo, pelo barramento 1-Wire<sup>TM</sup>.

Os circuitos integrados DS2438 estão disponíveis em encapsulamento SOIC, de 8 terminais, conforme mostrado na Figura 10.

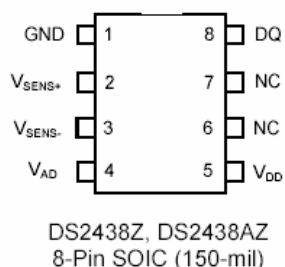


Figura 10 - Terminais do CAD DS2438.

No Quadro 1, tem-se a descrição de cada um dos terminais para cada tipo de encapsulamento do CAD DS2438. Os Quadros 2, 3 e 4 resumem as características elétricas fundamentais para o projeto de circuitos com o DS2438. Os valores são referenciados ao condutor de terra (GND).

O protocolo para acessar os dispositivos DS2438 conectados à linha, por meio do barramento 1-Wire<sup>TM</sup> e a porta serial RS-232-C, é implementado em quatro etapas: Inicialização, Comando de função ROM, Comando de função Memória e Transferência de dados.

Quadro 1 - Descrição dos terminais do CAD DS2438

Terminal	Símbolo	Descrição
1	GND	Terminal de referência ou terra
2	V <sub>SENS+</sub>	Terminal de entrada para conversão A/D + corrente
3	V <sub>SENS-</sub>	Terminal de entrada para conversão A/D – corrente
4	V <sub>AD</sub>	Terminal de entrada para conversão A/D – tensão
5	V <sub>DD</sub>	Terminal para alimentação externa do sensor
6	NC	Terminal não implementado (não conectar)
7	NC	Terminal não implementado (não conectar)
8	DQ	Terminal de entrada e saída de dados

Quadro 2 - Características elétricas: Termômetro digital

Parâmetro	Símbolo	Condição	Mín.	Típico	Máx.	Unid.
Erro	T <sub>ERR</sub>				±2	°C
Tempo de conversão	T <sub>CONVT</sub>			3	10	ms

Quadro 3 - Características elétricas: - 40°C a 85°C;  $2,4 \text{ V} \leq V_{DD} \leq 10,0 \text{ V}$ 

Parâmetro	Símbolo	Condição	Mín	Típico	Máx.	Unid.
Nível alto	$V_{IH}$		2,0			V
Nível baixo	$V_{IL}$		-0,3		0,5	V
Corrente desativado	$I_{DDI}$	DQ = 0		25		$\mu\text{A}$
Corrente ativado	$I_{DD}$	DQ = 1, AD Volt ou AD Ampère ou Temperatur a ativo		50	100	$\mu\text{A}$
Resistência de entrada	$R_i$	DQ		500		k $\Omega$

Quadro 4 - Características elétricas: Conversores A/D

Parâmetro	Símbolo	Condição	Mín.	Típico	Máx.	Unid.
Erro de conversão 1	$V_{DDERR}$	VDD entr.	$\pm 10$	$\pm 50$		mV
	$V_{ADERR}$	VAD entr.	$\pm 25$	$\pm 75$		
Erro de conversão 2	$I_{ADERR}$	$V_{SENS+}$ - $V_{SENS-}$ $\leq 125 \text{ mV}$			$\pm 2$ 1	LSB %
Faixa de entrada	$V_{ADR}$	$V_{AD}$	1,5		10,0	V
Faixa de entrada $V_{DD}$	$V_{DDR}$		2,4		10,0	V
Faixa de entrada	$I_{ADRANG}$				250	mV
$V_{SENS+} - V_{SENS-}$	E					
Tempo de conversão	$t_{CONV}$		3		10	ms

### 3.7.2.2 - Chave Digital Endereçável DS2406

Uma das etapas de um sistema de controle é a etapa de acionamento. A chave digital é um dispositivo encontrado de diversas formas que, assim que for acionada, pode desencadear uma seqüência de eventos ou, quando desacionada, pode desencadear uma outra seqüência.

Dentre os dispositivos da tecnologia 1-Wire™, encontram-se circuitos de chaves digitais que, na condição de dispositivos escravos, podem promover acionamentos, quando selecionados pelo mestre da rede 1-Wire™.

A chave digital endereçável DS2406 pode ser encontrada em dois modelos de encapsulamento. Um dos modelos de DS2406 é encontrado em encapsulamento TO-92 (Figura 11), que, tendo somente uma chave (chave A), apresentando como características do PIO-A (pino 3), isolação até 13 V, capacidade para correntes de até 50 mA e uma tensão de contato fechado próxima a 0,4 V. O Quadro 5 apresenta a descrição dos terminais da chave DS2406. (Dallas Semiconductors)

Dallas Semiconductors - DS2406 - Dual Addressable Switch Plus 1kb Memory 2003 [http://www.maxim-ic.com/quick\\_view2.cfm/qv\\_pk/2907](http://www.maxim-ic.com/quick_view2.cfm/qv_pk/2907)

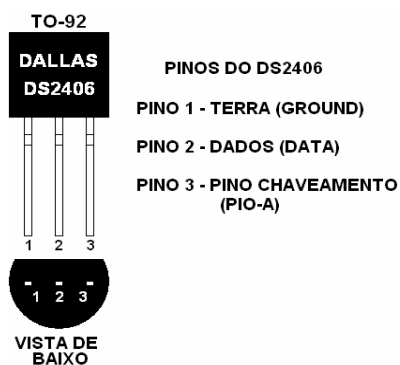


Figura 11 - DS2406 – Encapsulamento TO-92.

Quadro 5 - Pinagem do DS2406 - Chaves Digitais em TO-92.

Terminal	Símbolo	Descrição
1	GND	Terminal de Referência
2	DQ	Terminal de entrada e saída de dados
3	PIOA	Terminal de chaveamento

A Chave DS 2406 é um dispositivo da tecnologia 1-Wire™ que oferece um modo simples para controlar remotamente um transistor em dreno aberto e para monitorar o nível lógico no transistor de saída, por meio do barramento 1-Wire™ por laço de controle fechado. Do mesmo modo que os DS2438, cada DS2406 é único e tem seu próprio código de identificação (ID) gravado a laser durante a fabricação, garantindo sua identificação quando operando em rede com outros componentes.

A comunicação com o DS2406 se dá por meio do protocolo 1-Wire™, podendo ser acoplado com *hardware* mínimo, como um simples terminal de uma porta de um microcontrolador.

Diversos DS2406 podem ser colocados em uma mesma rede e operados independentemente. O dispositivo escolhido para operar responderá ao comando de busca, promovendo a operação de estado do transistor de saída.

As principais características elétricas da chave DS2406 são apresentadas nos Quadros 6, 7, 8, 9 e 10 e na Figura 12.

Quadro 6 - Parâmetros elétricos dos pinos de dados

PINO DE DADOS	(V <sub>PUP</sub> =2,8V a 6,0V; -40°C a +85°C)				
PARÂMETRO	SÍMB.	MÍN.	TÍP.	MÁX.	UNID.
Entrada 1-Wire nível alto	V <sub>IH</sub>	2,2			V
Entrada 1-Wire nível baixo	V <sub>IL</sub>	-0,3		0,8	V
Saída 1-Wire nível baixo a 4 mA	V <sub>OL</sub>			0,4	V
Saída 1-Wire nível alto	V <sub>OH</sub>		V <sub>PUP</sub>	6,0	V
Corrente de Carga de Entrada	I <sub>L</sub>		5		μA
Tensão de programação a 10 mA	V <sub>PUP</sub>	11,5		12,0	V

Quadro 7 - Parâmetros elétricos dos pinos de acionamento PIO

PINO DE PIO		$(V_{PUP}=2,8V \text{ A } 6,0V; -40^{\circ}C \text{ A } +85^{\circ}C)$			
PARÂMETRO	Símb.	Mín.	Típ.	Máx.	Unid.
Lógica 1 (A)	$V_{IHA}$	2,2		12	V
Lógica 0 (A)	$V_{ILA}$	-0,3		0,6	V
Corrente máxima de saída a 4V (A)	$I_{SA}$	Veja Figura 12			mA
Saída nível lógico alto (A)	$V_{OHA}$		$V_{PUPA}$	12,0	V
Lógica 1 (B)	$V_{IHB}$	2,2		12	V
Lógica 0 (B)	$V_{ILB}$	-0,3		0,6	V
Corrente máxima de saída a 4V (B)	$I_{SB}$	Veja Figura 12			mA
Saída nível lógico alto (B)	$V_{OHB}$		$V_{PUPB}$	12,0	V
Resistência de Entrada	$R_i$	7	10	13	$M\Omega$

Quadro 8 - Parâmetros elétricos – Características elétricas de corrente contínua

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS		$(V_{PUP}=2,8V \text{ a } 6,0V; -40^{\circ}C \text{ a } +85^{\circ}C)$			
CC					
PARÂMETRO	Símb.	Mín.	Típ.	Máx.	Unid.
Lógica 1 (A)	$V_{IHC}$	2,8		6,0	V
Lógica 0 (A)	$V_{ILC}$	-0,3		0,8	V
Corrente máxima de saída a 4V (A)	$I_{CC}$			4,0	$\mu A$

Quadro 9 - Parâmetros elétricos – Capacitâncias dos terminais

CAPACITÂNCIAS		$(t_A=25^{\circ}C)$			
PARÂMETRO	Símb.	Mín.	Típ.	Máx.	Unid.
Capacitância do Pino de Dados	$C_D$			800	pF
Capacitância do Pino PIO-A	$C_A$		100		pF
Capacitância do Pino PIO-B	$C_B$		25		pF
Capacitância do Pino de Vcc	$C_C$		10		pF

## Quadro10 - Parâmetros elétricos – Características Elétricas CA

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS CA ( $V_{PUP}=2,8V$ a $6,0V$ ; $-40^{\circ}C$ a $+85^{\circ}C$ )					
PARÂMETRO	Símb.	Mín.	Típ.	Máx.	Unid.
Tempo de “abertura”	$t_{slot}$	60		120	$\mu s$
Tempo de escrita de nível 1	$t_{LOW1}$	1		15	$\mu s$
Tempo de escrita de nível 0	$t_{LOW0}$	60		120	$\mu s$
Tempo de leitura de nível 1	$t_{LOR1}$	1		15	$\mu s$
Validação do dado de leitura	$t_{RDV}$		15		$\mu s$
Tempo de Liberação	$t_{RELEASE}$	0	15	45	$\mu s$
Dado de ajuste 1-Wire de leitura	$t_{SU}$			1	$\mu s$
Tempo de gravação	$t_{REC}$	1			$\mu s$
Tempo de reset alto	$t_{RSTH}$	480			$\mu s$
Tempo de reset baixo	$t_{RSTL}$	480		960	$\mu s$
Detetor de presença nível alto	$T_{PDH}$	15			$\mu s$
Detetor de presença nível baixo	$T_{PDL}$	60			$\mu s$
Dado de ajuste de leitura PIO-A	$t_{SUA}$	0,5			$\mu s$
Dado de ajuste de leitura PIO-B	$t_{SUB}$	0,5			$\mu s$
Atraso para Programa	$t_{DP}$	5			$\mu s$
Atraso para Verificação	$t_{DV}$	5			$\mu s$
Largura do pulso de Programa	$t_{PP}$	480		5000	$\mu s$
Tempo de subida de tensão programada	$t_{RP}$	0,5		5,0	$\mu s$
Tempo de falha de tensão programada	$T_{FP}$	0,5		5,0	$\mu s$

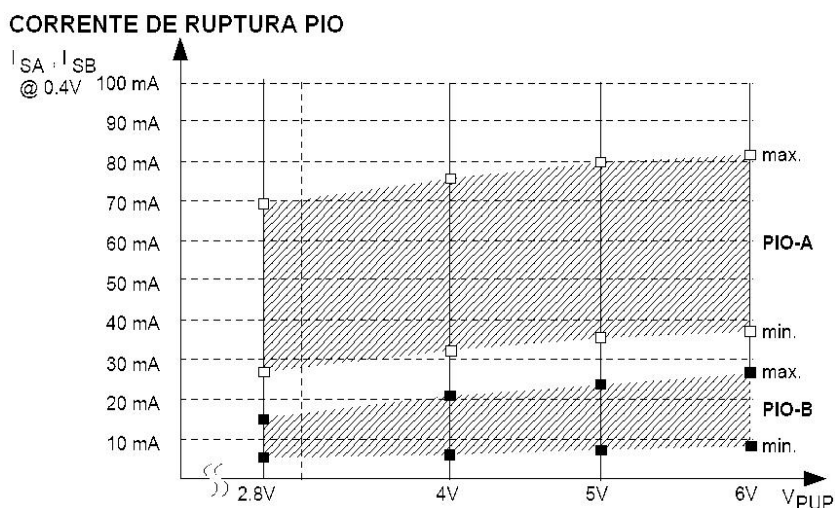


Figura 12 - Corrente de ruptura dos transistores de PIO ( $I_s$ ) em função da tensão de polarização externa do DS2406 ( $V_{pup}$ ).

O modelo do dispositivo DS2406, com encapsulamento TSOC de 6 pinos, pode obter sua alimentação integralmente do barramento 1-Wire™. O processo de alimentação parasita ocorre da mesma forma que para o DS2438.

Os dispositivos DS2406 com encapsulamento TO-92 não podem ser alimentados por uma fonte externa. Os diversos DS2406 são ligados ao mesmo barramento 1-Wire™ e todos os circuitos a serem chaveados são alimentados por uma fonte externa, eles podem fazer maior número de chaveamento, mantendo os transistores de saída conduzindo com maior corrente fluindo por eles.

### 3.8 - Células de carga

As células de carga são estruturas mecânicas, planejadas para receber esforços e deformar-se dentro do regime elástico para os quais foram planejadas.

Embora essa deformação seja pequena, é suficiente para gerar um sinal de saída compatível com a carga aplicada sobre a célula.

As células de carga podem ser utilizadas para medição de esforços de tração ou compressão em prensas, cabos, máquinas de ensaio, dinamômetros e vários outros equipamentos, sempre que a medição de força for necessária.

#### 3.8.1 - Princípio de Funcionamento da célula de carga

O princípio de funcionamento é baseado na variação da resistência ôhmica de um extensômetro resistivo chamado Strain Gauge, quando submetido a uma deformação. Portanto, a célula de carga mede a deformação da peça em teste pela sua própria deformação e a traduz em variação da resistência ôhmica (THOMAZINI et al., 2005). Essa variação é devida à deformação imposta à seção transversal dos condutores do extensômetro (Figura 13).

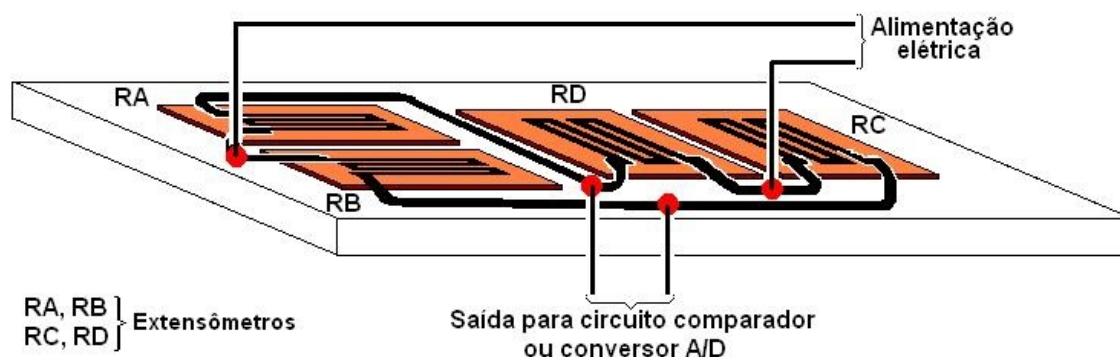


Figura 13 - Célula de carga com os extensômetros interligados.

### 3.8.2 - Extensômetros Coláveis

Na sua forma mais completa, extensômetro elétrico é um resistor composto de uma finíssima camada de material condutor depositado sobre um composto isolante. Então, o extensômetro é colado sobre a estrutura em teste com auxílio de adesivos como epóxi ou cianoacrilatos. Pequenas variações de dimensões da estrutura são então transmitidas mecanicamente ao extensômetro que transforma essas variações em variações equivalentes de sua resistência elétrica. Por esta razão, os extensômetros são definidos como transdutores (Figura 14).

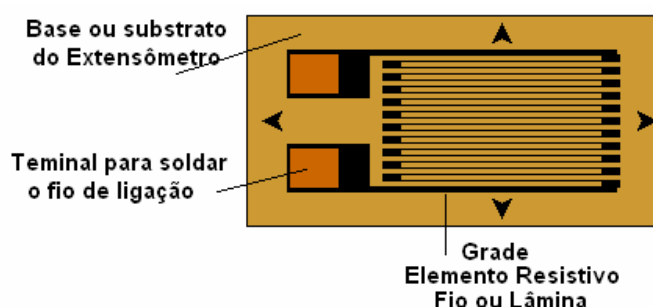


Figura 14 - Extensômetro tipo folha (strain gauge).

A seleção do extensômetro apropriado para determinada aplicação é influenciada pelas características seguintes: objetivo (tipo) da medição, o material sobre o qual ele será colado, dimensões do extensômetro, precisão, potência que ele pode dissipar, material da grade metálica e sua construção, material do suporte isolante, material do adesivo, tratamento e proteção do medidor e configuração (THOMAZINI et al., 2005).

Os extensômetros possuem um baixo e previsível efeito térmico de simples compensação. Métodos de correção permitem uma operação de precisão em altas faixas de temperatura.

Para fazer medidas com os extensômetros elétricos, eles devem ser fixados, segundo procedimento criterioso, na superfície da peça em teste, de tal forma que as deformações da peça sejam integralmente transferidas para eles. Para isso, o adesivo deve transmitir as variações mecânicas com o mínimo de interferência possível, por isso deve ter alta resistência mecânica, alta resistência ao cisalhamento, resistência dielétrica e capacidade de adesão, baixa restrição de temperatura e facilidade de aplicação.

Pode-se calibrar a variação relativa de resistência em função da deformação relativa da peça sob regime elástico. Define-se a sensibilidade do extensômetro da seguinte forma:

$$S = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)}{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)} \quad (2)$$

Em que:

**S** = Sensibilidade do extensômetro, adimensional.

$\frac{\Delta R}{R}$  = Variação relativa da resistência do extensômetro.

$\frac{\Delta L}{L}$  = Variação relativa da deformação do extensômetro.

### 3.8.3 - Deformação de materiais

O gráfico apresentado na Figura 15 mostra uma curva de tensão-deformação típica para materiais dúcteis.

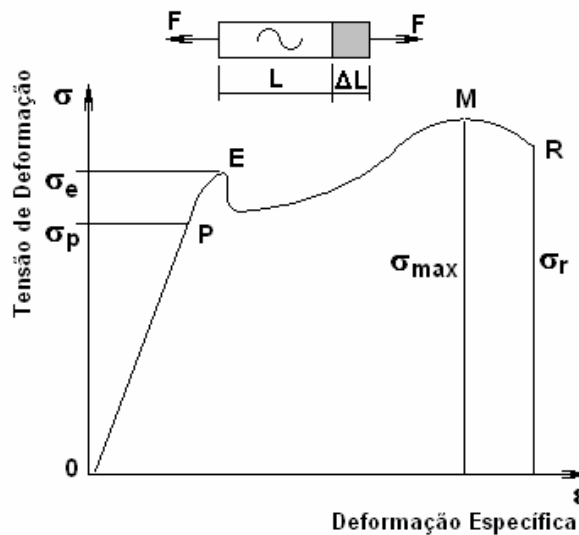


Figura 15 - Curva de variação da tensão aplicada sobre o material em função de sua deformação.

No eixo das ordenadas da Figura 15 está representada a tensão de deformação aplicada sobre o material que é definida como segue:

$$\sigma = F / A \quad (3)$$

Em que:

$\sigma$  = Tensão de deformação,  $\text{N m}^{-2}$ .

$F$  = Força aplicada na direção normal à seção transversal do material, N.

$A$  = Área da seção transversal do material,  $\text{m}^2$ .

No eixo das abscissas da Figura 15 está representada a deformação específica do material, definida como segue:

$$\varepsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} = \frac{\Delta L_t}{L_0} \quad (4)$$

Em que:

$\varepsilon$  = Deformação específica do material, adimensional.

$L_0$  = Comprimento inicial do material, m.

$L_f$  = Comprimento final do material, m.

No trecho OP da curva mostrada na Figura 15, a tensão aplicada é proporcional à deformação. A expressão matemática que define esta relação é chamada de Lei de Hooke, definida como segue:

$$\sigma = k \times \varepsilon \quad (5)$$

Em que:

$\varepsilon$  = Deformação específica do material, adimensional.

$k$  = Módulo de elasticidade,  $\text{N m}^{-2}$ .

Nessa parte da curva, o material se comporta de forma elástica. A tensão correspondente ao ponto P,  $\sigma_P$ , é chamada de limite de proporcionalidade do material. A partir do ponto P, o material começa a perder a proporcionalidade definida pela Lei de Hooke e, quanto mais próximo do ponto E, perderá também a

elasticidade, ou seja, haverá uma pequena deformação residual se a tensão deixar de ser aplicada.

O ponto E da curva marca o início do escoamento e a tensão correspondente,  $\sigma_E$ , é chamada de tensão de escoamento do material.

A tensão atingirá um valor máximo,  $\sigma_{m\acute{a}x}$ , no ponto M, marcando o início da fase de ruptura. Esta tensão é chamada de resistência à tração do material. A partir daí, ocorre uma redução da seção em certo local da barra, denominado estrição. Assim, a tensão diminui e atinge o valor  $\sigma_r$  no ponto R, definido como tensão de ruptura. Para que o material não seja levado a sofrer deformação plástica ou mesmo ruptura, adota-se um coeficiente de segurança ou fator de segurança, que expressa, numericamente, a razão entre a tensão máxima permitida e a tensão de trabalho que se pretende utilizar.

#### 3.8.4 - Extensômetro elétrico de resistência

O uso de extensômetro elétrico de resistência possibilita a medição e respectivo registro gráfico do fenômeno de deformação sob a forma de uma grandeza elétrica em diversos tipos de estruturas. Quando associado a instrumentos especiais, chamados de transdutores, possibilita a medição de pressão, tensão, força, aceleração e outras medições mais sensíveis, como, por exemplo, aplicações na medicina, como inspeções cirúrgicas. A Figura 16 mostra a estrutura de um extensômetro de resistência.

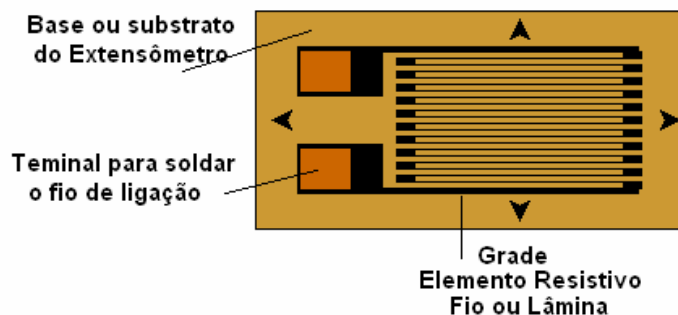


Figura 16 - Extensômetro elétrico de resistência.

Os processos de fabricação de extensômetros de resistência são classificados, basicamente, em dois tipos: (a) impressão e (b) deposição.

### **(a) Processo de impressão**

O processo de fabricação de extensômetro por impressão usa a corrosão química para esculpir em uma folha de metal muito fina (3 a 8  $\mu\text{m}$  de espessura), uma estrutura no formato da grade mostrada na Figura 16. Essa grade metálica é fixada a um material isolante também muito fino que serve de base ou suporte para o extensômetro. Os metais utilizados são ligas de resistividade elevada como Constantan (45% de Níquel e 55% de Cobre) ou Nicromo (80% de Níquel e 20% de Cromo), que permitem obter resistências padronizadas de 60, 120, 240, 350, 500 e 1000  $\Omega$ .

### **(b) Processo de deposição**

Nesse processo, uma finíssima camada de material condutor é depositada sobre um composto isolante, de tal maneira que se construa a grade do extensômetro. Os materiais usados são, praticamente, os mesmos do processo de impressão química. Quando está pronto, o extensômetro é colado sobre a estrutura em teste com auxílio de adesivos como epoxi ou cianoacrilatos. Pequenas variações de dimensões da estrutura são transmitidas mecanicamente ao extensômetro, que transforma essas variações em variações equivalentes de sua resistência elétrica. Por esta razão, são definidos como transdutores.

#### **3.8.5 - Extensômetros coláveis de resistência elétrica**

Estes tipos de extensômetros possuem uma codificação feita por um conjunto de letras e números que identifica o extensômetro, conforme suas características. A Figura 17 mostra este tipo de codificação.

Eles também possuem um fator de sensibilidade, cujo valor teórico é 2,1. Os valores reais, informados pelo fabricante, apresentam pequenas variações, de lote para lote, sempre em torno do valor teórico.

Os extensômetros apresentam um código de identificação em que apresentam siglas correspondentes ao material usado no filme em que são construídos, compensação de temperatura, dimensões da grelha, valor da resistência ôhmica de cada ramo e aparência com modo de fixação, como mostrado na Figura 17.

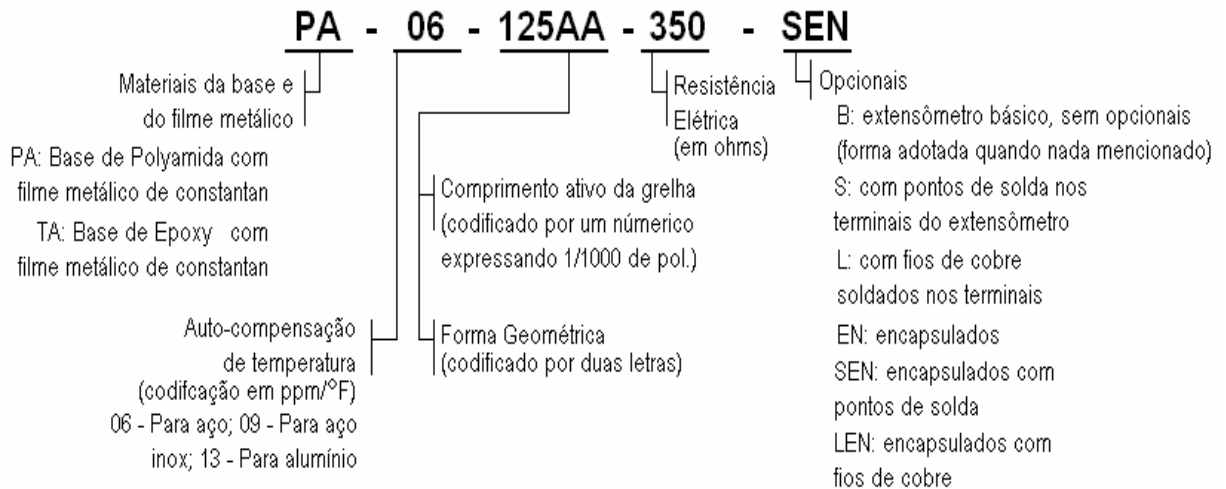


Figura 17 - Código de identificação de um extensômetro colável.

### 3.8.6 - Principais tipos de células de carga

De acordo com o tipo de deformação que se pretende medir, as células de carga são classificadas em vários tipos: (a) flexão, (b) cisalhamento e (c) compressão.

#### (a) Células do tipo flexão

Medem as deformações de tração ou compressão decorrentes do carregamento de viga em balanço. Normalmente utilizadas em medições de 0,05 a 20 N.

#### (b) Células do tipo cisalhamento

Medem as deformações produzidas por tensões de cisalhamento atuantes de tração. Normalmente utilizadas em medições de 20,4 N a 5.100 N.

#### (b) Células do tipo compressão

Medem as tensões de compressão produzidas pela carga. Normalmente utilizadas para forças acima de 5.100 N.

### 3.8.7 - Especificações e características de uma célula de carga

As principais características e especificações de uma célula de carga que devem ser utilizadas em medições são descritas a seguir.

#### (a) Capacidade Nominal

É a força máxima que a célula suporta. Os fatores de segurança são 50% de sobrecarga contra danos de funcionamento e 300% para ruptura, intrínsecos da própria célula.

#### (b) Sensibilidade

Quando uma célula está carregada, este valor é dado em mV por V aplicado e, normalmente, situa-se entre 2 e 3mV/V.

#### (c) Precisão

É o erro máximo admissível relacionado com as divisões de capacidade nominal. Pode em ser dividida em:

- **Baixa precisão** - até 1.000 divisões, precisão de 0,1% da capacidade nominal;
- **Média precisão** - de 3.000 a 5.000 divisões, precisão de 0,03 a 0,02 % da capacidade nominal;
- **Alta precisão** – 10.000 divisões, precisão de 0,01% da capacidade nominal.

#### (d) Formato

De acordo como a aplicação, determinados formatos são exigidos. Se a carga for apoiada utilizam-se células do tipo viga, se a carga for sustentada utilizam-se células do tipo Z, se a carga introduzir momentos tensores na célula utiliza-se células do tipo ponto simples. Em suma, utiliza-se uma forma geométrica de modo a conduzir a uma linearidade das medidas, de acordo com as formas da peça.

**(e) Ambiente de trabalho**

O ambiente de trabalho é classificado de acordo com a hostilidade química ou mecânica, ou ambas. Em ambientes com vibração intensa, pode ocorrer o fenômeno da ressonância. Vale destacar que o projeto de uma célula de carga leva em conta a frequência natural das vibrações mecânicas.

**(f) Dispositivo de montagem**

Deve ser escolhido de tal forma que não transmita à célula de carga qualquer esforço, a não ser aqueles que se desejam medir.

**(g) Tempo de pesagem**

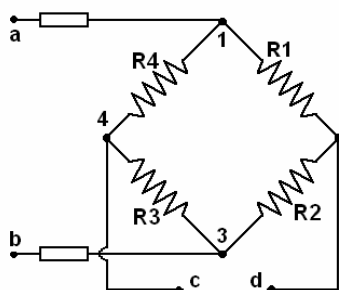
Muitas vezes, dispõe-se de um tempo limitado para efetuar a medição. Neste caso, deve-se considerar um segundo como um tempo mínimo para estabilizar o valor médio.

**3.8.8 - Fatores que interferem na medição de deformação**

Considerando que a temperatura gera deformações em corpos sólidos e que elas poderiam ser confundidas com aquelas deformações provocadas pela ação a ser medida, há a necessidade de se compensar esses efeitos com a introdução resistências especiais, que variam inversamente com a temperatura, no circuito de Wheatstone.

**3.8.9 - Fatores para escolha de extensômetros**

Transdutores a extensômetros apresentam uma resposta à frequência muito boa. Podem ser usados em aplicações de métodos estatísticos ou dinâmicos e excitados (alimentados) tanto com corrente contínua quanto corrente alternada (Figura 18).



Extensômetros **R1** e **R3** – Compressão

Extensômetros **R2** e **R4** - Tração

Tensão  $V_{ab}$  - Alimentação

Tensão  $V_{cd}$  - Saída

Figura 18 - Extensômetros resistivos dispostos em forma de ponte de Wheatstone.

A interconexão mais usada é a aplicação de 4 extensômetros ligados em forma de ponte equilibrada de Wheatstone. Como resultado da deformação, a ponte tornar-se-á desbalanceada de forma proporcional a essa deformação (força que provoca a deformação). Pela medição deste desbalanceamento, obtém-se o valor da força aplicada. (Almeida, 1999)

### 3.8.10 - Calibração de uma ponte com extensômetro

Para uma verificação imediata da instrumentação, as deformações específicas podem ser simuladas pelo emprego de resistores em paralelo ao extensômetro elétrico, denominados de resistores de calibração. Recomenda-se que estes resistores sejam resistores de precisão. Acoplando-se o resistor de calibração em paralelo ao extensômetro, como um dos ramos da ponte de Wheatstone, tem-se a Figura 19.

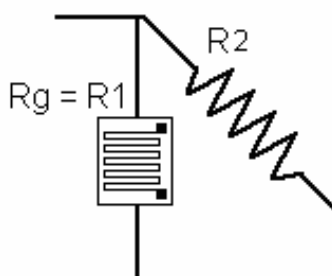


Figura 19 - Resistor de calibração em paralelo ao extensômetro.

A partir da Figura 19, obtém-se:

$$R_{eq} = \left( \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (6)$$

Em que:

- R1** = Resistência do extensômetro,  $\Omega$ ;
- R2** = Resistência de calibração,  $\Omega$ ;
- R<sub>eq</sub>** = Resistência equivalente,  $\Omega$ .

### 3.9 - Secagem em camada fina

A predição de taxas de secagem de grãos é uma componente importante para a modelagem matemática do processo de secagem em camada espessa (THOMPSON, 1967; MARTINS, 1988). Durante vários anos, vários pesquisadores têm coletado dados sobre secagem em camada fina de vários produtos agrícolas, principalmente grãos, sob diferentes condições. Na maioria dos casos, esses dados são utilizados para ajustar equações normalmente empíricas, usadas na predição das taxas de secagem nos modelos em camada espessa.

Existem vários modelos de secagem em camada fina, disponíveis na literatura. Dentre esses, um dos mais utilizados para descrever o processo de secagem em camada fina, é o modelo sugerido por Page em 1949. Por esta razão foi escolhido para ser utilizado neste trabalho (MARTINS, 1988).

A seguir, apresenta-se o modelo de Page, descrito pela Equação 7.

$$R_u = \frac{U(t) - U_e}{U_o - U_e} = \exp(-K t^N) \quad (7)$$

Em que:

- R<sub>u</sub>** = Razão de umidade, adimensional;
- U(t)** = Teor de água do produto no tempo t, decimal, b.s.;
- U<sub>o</sub>** = Teor inicial de água do produto, decimal, b.s.;
- U<sub>e</sub>** = Teor em equilíbrio de água do produto, decimal, b.s.;
- K, N** = Parâmetros característicos do produto.

Os parâmetros **K** e **N** na Equação 7 são funções da temperatura do ar de secagem e do teor inicial de água. A forma matemática dessas funções depende do tipo da variedade do grão que está sendo seco (MARTINS, 1988).

Uma das propriedades fundamentais do grão, muito importante no estudo de secagem, é o teor de umidade do produto, em equilíbrio do produto. O teor de umidade de equilíbrio determina o teor mínimo de umidade mínimo até o qual o produto pode ser seco sob um dado conjunto de condições. Ele é dependente da umidade relativa do ar e da temperatura do ambiente, bem como da espécie, variedade e estágio de maturação do produto (BROOKER et al, 1992).

Uma das equações mais utilizadas para estimar o teor de umidade de equilíbrio de grãos é a equação de Henderson modificada (Martins, 1988), expressa pela Equação 8.

$$U_e = 0,01 \left[ \frac{\ln(1 - UR)}{-C_1(T + C_3)} \right]^{\frac{1}{C_2}} \quad (8)$$

Em que:

- UR** = Umidade relativa do ar, decimal;
- T** = Temperatura do ar, °C;
- C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>** = Parâmetros que dependem do produto.

Em particular, para grãos de milho em geral, encontram-se na literatura os seguintes valores para os parâmetros **C<sub>1</sub>**, **C<sub>2</sub>** e **C<sub>3</sub>**:

$$C_1 = 8,6541 \times 10^{-5}; \quad C_2 = 1,8634; \quad C_3 = 49,810$$

## 4 - MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Pré-processamento de Produtos Agrícolas e no Laboratório de Instrumentação, ambos do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa e nos Laboratórios de Instrumentação Eletrônica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Ouro Preto (CEFET - Ouro Preto). Este trabalho foi dividido em duas partes:

- (1) Desenvolvimento de um sistema de controle inteligente para secagem de grãos em camada fina.
- (2) Desenvolvimento de um sistema de pesagem automática de amostras em um secador de grãos em camada fina.

### 4.1 - Desenvolvimento do Sistema de Controle do Secador

#### 4.1.1 – Descrição do Sistema de Secagem

Todo o trabalho foi realizado com base em um secador de grãos em camada fina existente no laboratório de processamento de grãos, com vistas à sua automatização, com o objetivo de tornar o processo de secagem em camada fina mais confortável de ser realizado em laboratório. A Figura 20 mostra detalhadamente o secador utilizado neste trabalho.

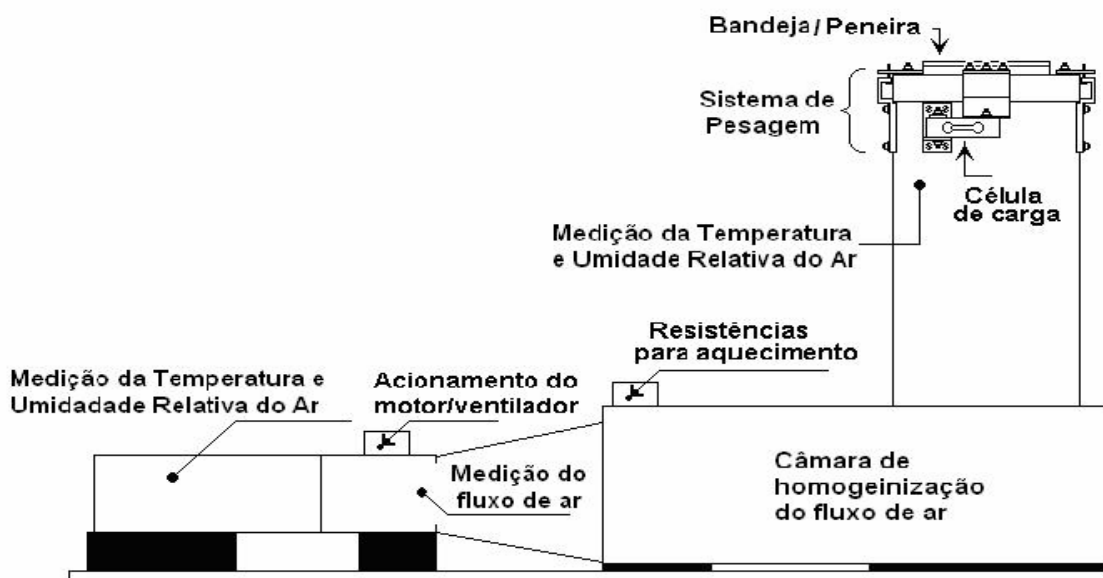


Figura 20 - Secador de grãos em camada fina.



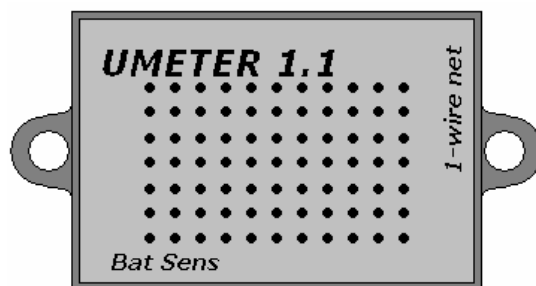


Figura 22 - Vista de cima do medidor de umidade UMETER<sup>®</sup> 1.1 encapsulado em forma final.

Os valores de umidade relativa foram estabelecidos por meio de condicionamento do ar antes de entrar no secador. Assim, a umidade relativa foi monitorada.

O dispositivo para medição de umidade relativa foi desenvolvido para operar com alimentação parasita ou com alimentação a três fios, usando bloqueio de linha com diodo 1N4001. Além do conversor analógico digital que recebe os valores do sensor de umidade HIH-3610, foi disponibilizado o recurso monitor de corrente, conectado entre os pinos 2 e 3 do circuito integrado DS2438.

Os sistemas de acionamentos do motor do ventilador e do aquecimento de ar com resistências foram baseados nas chaves digitais DS2406 da série 1-Wire<sup>™</sup>, associadas a um circuito acionador com *triac* TIC226D, montado em dissipador de calor, e com o acoplador (fotodiac) MOC 3010. Este sistema foi chamado de CHAVE DIGITAL ACIONA AC<sup>®</sup> (Figuras 23 e 24) e garante isolamento elétrico entre o acionamento digital pela rede 1-Wire<sup>™</sup> e a rede energizada de corrente alternada (127 V ou 220 V). A Figura 25 apresenta a aparência final da chave. A Figura 26 mostra uma fotografia dos dois circuitos com chaves digitais DS2406, instalados no painel de controle, em paralelo com as chaves mecânicas.

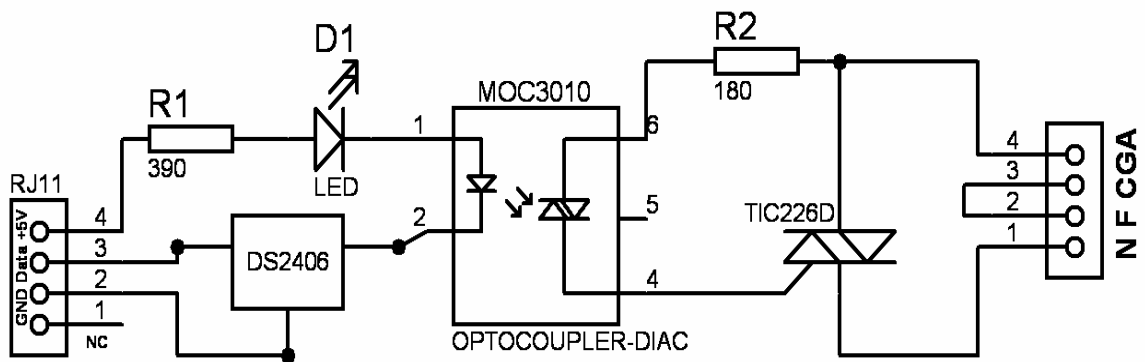


Figura 23 - Circuito da chave digital de acionamento de cargas em corrente alternada - ACIONA AC.

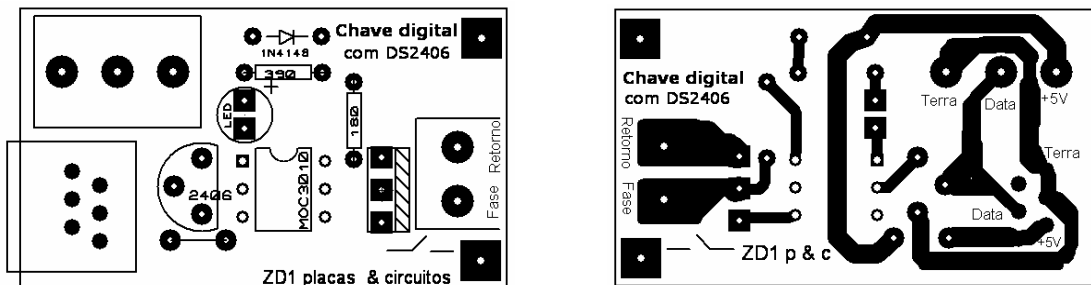


Figura 24 - Desenho da Placa da chave Digital com DS2406



Figura 25 - Chave Digital ACIONA AC com DS2406, TIC226D, MOC3010.

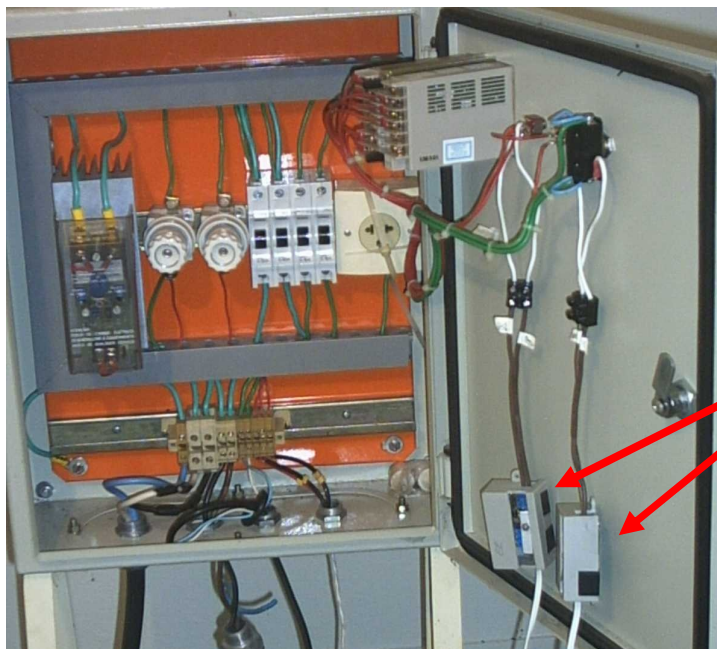


Figura 26 - Fotografia dos dois circuitos com chaves digitais DS2406 instalados no painel de controle, em paralelo com as chaves mecânicas.

Succionado pelo ventilador, ar de secagem passa através de um sistema de resistências elétricas, ligadas e controladas por um controlador proporcional-integral-derivativo (PID), capaz de manter a temperatura do ar em um valor pré-estabelecido.

Depois de aquecido, o ar é conduzido para a câmara de homogeneização do secador, sendo conduzido através de um duto cilíndrico vertical, para a parte inferior da bandeja, atravessando a massa de grãos. A temperatura e a umidade relativa do ar de secagem foi medida imediatamente abaixo do fundo da bandeja.

#### 4.1.2 – Sistema de Pesagem Automática

A bandeja de secagem foi composta por uma peneira de fundo telado com abertura de 10 malhas por polegada (10 mesh) e faz parte do sistema de pesagem. Além de receber a amostra de grãos a serem secos, funcionava, também, como prato da balança do sistema de pesagem que registrava as variações da massa de grãos, durante o processo de secagem.

A amostra a ser seca, com teor de água conhecido, foi pesada em uma balança de precisão antes de iniciar o processo de secagem. A partir do início da secagem, por meio de um programa computacional realizam-se as leituras da tensão de saída da célula de carga, da temperatura e da umidade relativa do ar de secagem, em intervalos de tempo pré-estabelecido. Esses dados eram, automaticamente, registrados em um arquivo do tipo texto, arquivo este que poderia ser processado posteriormente ou simultaneamente ao processo de secagem.

A Tensão de saída da célula de carga é diretamente proporcional à variação de massa do produto devido à perda de água eliminada no processo de secagem. Então, por meio de uma curva de calibração, obtinha-se a massa de grãos a cada instante em que o sistema registrava as pesagens.

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

A Figura 27 contém a vista superior e a de frente do sistema de pesagem das amostras.

O sistema de pesagem foi idealizado com base em uma célula de carga com capacidade para 98 N (10 kgf), da Alfa Instrumentos, modelo GL-10, montada na estrutura do sistema de secagem, conforme a foto da Figura 28.

O prato e os suportes da balança foram confeccionados em chapa de alumínio com espessura de 2,5 mm, para reduzir o peso do sistema, que haviam sido, anteriormente, confeccionados em chapa galvanizada.

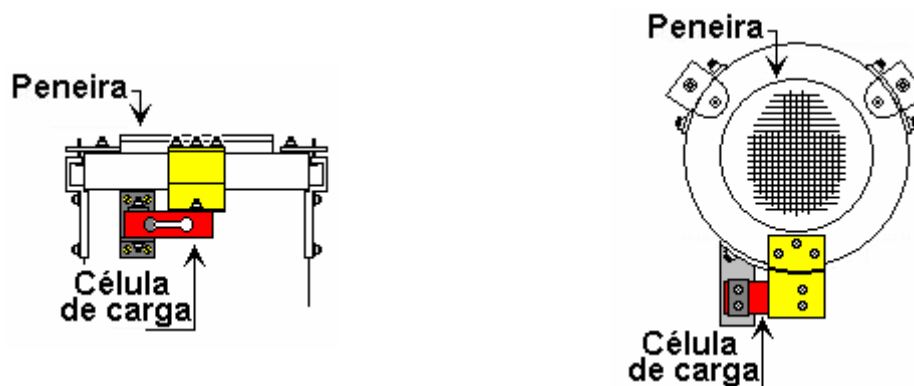


Figura 27 - Vistas de frente e de topo do sistema de pesagem da amostra.

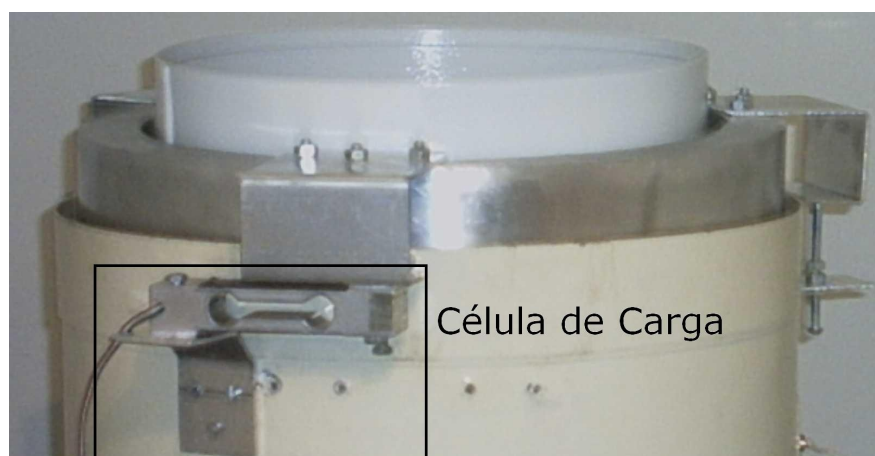


Figura 28 - Foto da Célula de Carga GL-10, da Alfa Instrumentos, montada no sistema de pesagem.

O Sistema de pesagem foi montado baseado no princípio de três apoios, sendo somente um deles, o da célula de carga, móvel. Os demais foram apoiados sobre hastes reguláveis para nivelamento (Figura 29). Os três apoios foram posicionados eqüidistantes entre si a uma distância angular equivalente a  $120^\circ$ , radialmente em relação ao prato da balança (bandeja).

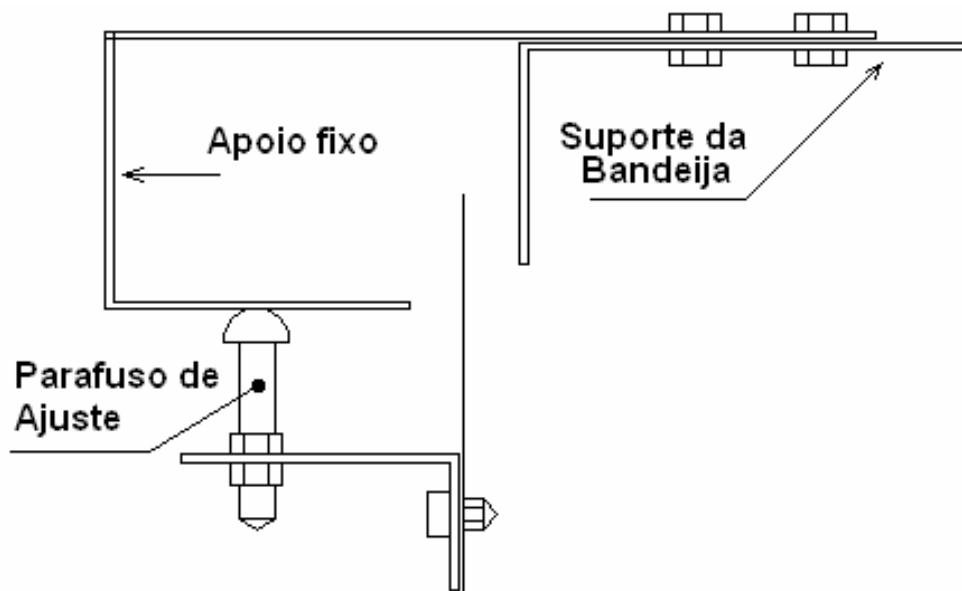


Figura 29 - Desenho do apoio fixo do prato da balança, com regulagem da altura.

O sistema de medição do peso foi baseado na diferença de potencial entre os terminais da ponte de Wheatstone, proporcional à deformação da célula de carga devido ao esforço provocado pela aplicação do peso da amostra.

A Figura 30 ilustra os efeitos das forças de apoio e deflexão do prato da balança, bem como as regiões de maior e menor sensibilidade, observado de acordo com a diferença de potencial elétrico nos terminais da célula de carga. A região central apresentou um valor de sensibilidade intermediária, satisfatória, na média, para o desempenho da pesagem.

A deformação da célula de carga provoca um desequilíbrio nos valores resistivos dos extensômetros da ponte de Wheatstone, apresentando, em seus terminais de saída, uma variação da diferença de potencial. Essa diferença de potencial é nula, inicialmente, quando a célula de carga não está submetida a esforços.

A tensão de saída é proporcional à tensão de alimentação. Como essa célula de carga está alimentada com 10 V de tensão contínua, quando estiver submetida a 98N (capacidade máxima, para o modelo), apresentará, nos terminais de saída, uma tensão máxima de 20 mV (Alfa Instrumentos, 2005).

A Figura 30 apresenta o efeito causado ao prato da balança, no que diz respeito à sensibilidade para a medida, caso a localização do produto sobre a bandeja venha a interferir na resposta, relativamente à distribuição de carga. A região mais próxima dos apoios fixos resultou em menor sensibilidade, ao passo que ao aproximar do apoio sobre a célula de carga, a sensibilidade aumentará.

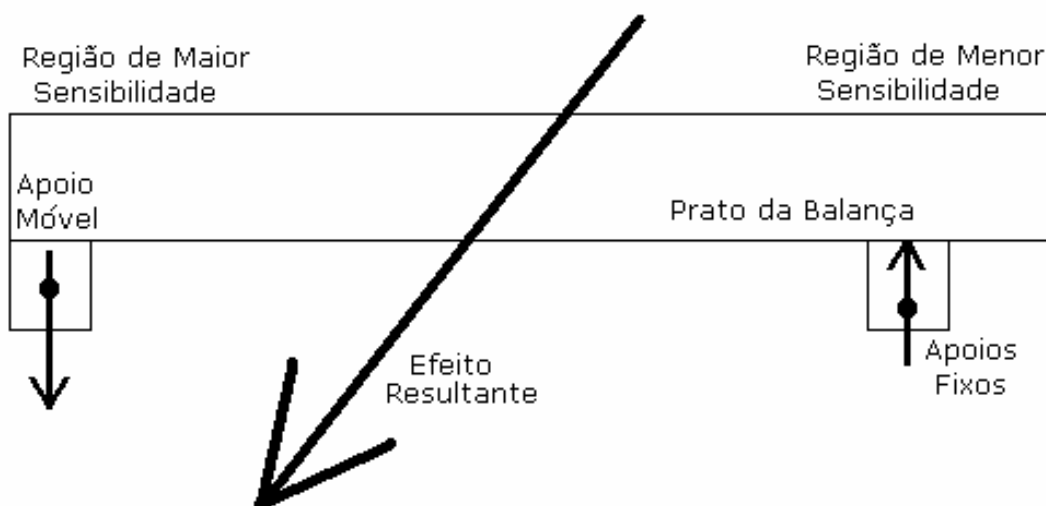


Figura 30 - Efeitos das forças de apoio e deflexão do prato da balança e regiões de maior ou menor sensibilidade

Devido à faixa para leitura com o CAD para  $V_{sens}$  do DS2438, utilizado para endereçar a célula de carga operando como monitor de corrente, ser de  $-250\text{mV}$  a  $250\text{mV}$ , a amplificação do sinal de saída da célula de carga tornou-se necessária, porque, para a célula escolhida, a faixa de medição, durante os testes preliminares, forneceu variações de valores do sinal de saída na faixa de décimos de mV.

A Figura 31 contém o diagrama em blocos do sistema de pesagem utilizado nos testes preliminares.

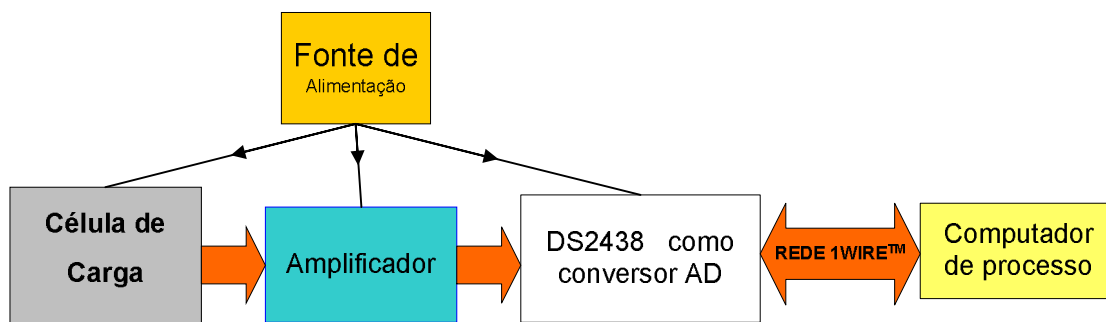


Figura 31 - Diagrama em bloco do sistema elétrico de pesagem.

Observando o comportamento da célula de carga, modelo GL 10, obteve-se uma tensão de saída no amplificador de sinal com variação de, aproximadamente, 20mV por 98 N.

No processo de secagem em camada fina de uma amostra de grãos com peso igual a 9,8 N (1 kgf), espera-se uma redução máxima de peso em torno de 1,96N (0,2 kgf). A variação de tensão para essa variação de peso é cerca de 4 mV. Esse registro demonstrou a necessidade de aumentar o ganho do amplificador para que fosse expandida a escala de leitura, para melhorar a precisão das medidas. Para esta finalidade, foi implementado um amplificador diferencial de três estágios, baseado em amplificador operacional, como mostrado na Figura 32.

Os terminais da entrada diferencial foram conectados aos terminais de saída da célula de carga e os terminais de saída amplificada foram conectados à entrada de tensão Vsens do DS2438.

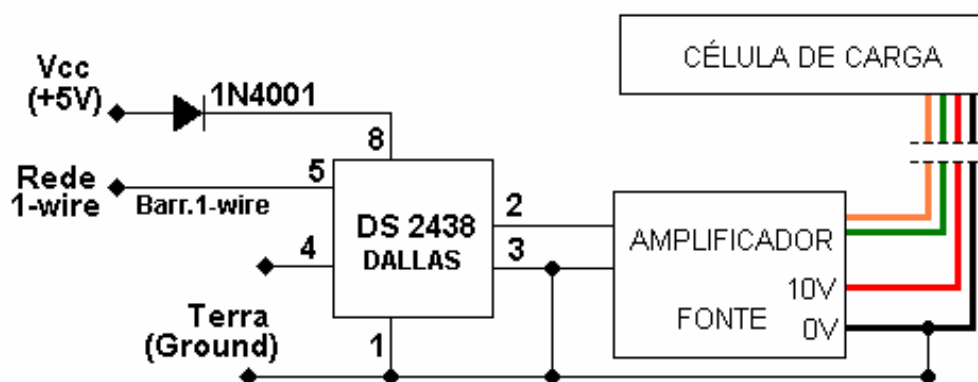
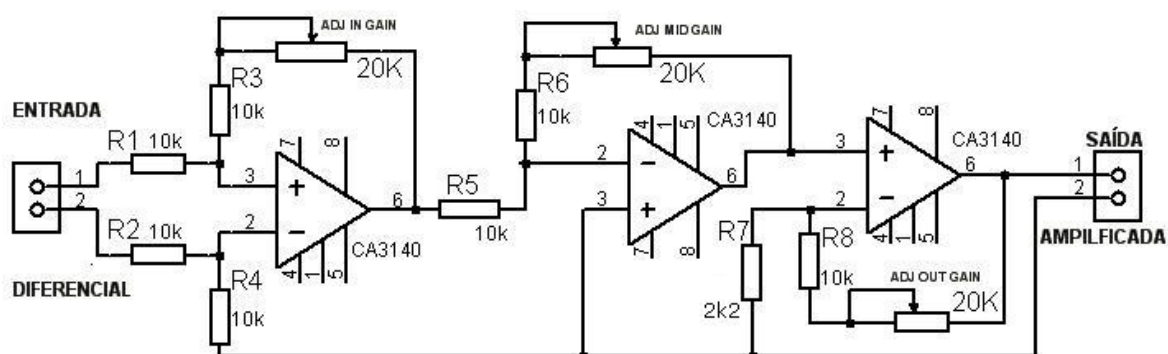


Figura 32- Amplificador conectado aos terminais do DS2438..

A Figura 33 representa o esquema do circuito amplificador de instrumentação de três estágios, com CA3140, usado para amplificar o sinal de saída da célula de carga.

A Figura 34 mostra esse circuito depois de montado.



Obs.: Os pinos 4 e 7 de cada CI CA3140 recebem -12Vcc e +12Vcc, respectivamente.

Figura 33 - Amplificador de Instrumentação com CA3140 usado para amplificar o sinal de saída da célula de carga.

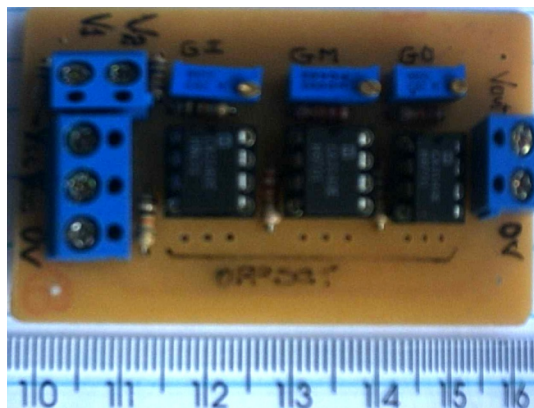


Figura 34 - Circuito do amplificador diferencial de 3 estágios com CA3140, com ganhos ajustáveis.

#### 4.2 – Sistema de Medição de Temperatura

A temperatura do ar de secagem foi medida por meio de sensores de temperatura do tipo DS1820, integrado a um conversor analógico-digital DS2438 que foi utilizado para endereçar a célula de carga do sistema de pesagem. A Temperatura foi controlada dentro de um valor pré-estabelecido, com variação máxima de  $\pm 1$  °C, por meio de um sistema usando controlador do tipo liga-desliga.

#### 4.3 – Determinação do Teor de Água do Grão e da Curva de Secagem

O teor inicial de água do produto foi determinado pelo método oficial de estufa.

Os teores de água do produto, em um instante  $t$ ,  $U(t)$ , foram determinados com base na equação de conservação de massa:

$$m_i(1 - U_i) = m_{i+1}(1 - U_{i+1}) \quad (9)$$

Em que:

$m_i$  = Massa do produto no instante  $t_i$ , kg;

$m_{i+1}$  = Massa do produto no instante  $t_{i+1}$ , kg;

$U_i$  = Teor de água do produto no instante  $t_i$ , decimal, b.u.;

$U_{i+1}$  = Teor de água do produto no instante  $t_{i+1}$ , decimal, b.u..

A massa de produto, em qualquer instante  $t$ , foi determinada por meio de uma curva de calibração, que correlaciona a massa com a tensão de

saída da célula de carga, por meio de uma função linear de primeiro grau, ajustada previamente por regressão linear simples.

A tensão de saída da célula de carga foi sempre conhecida, pois era registrada a cada instante pelo programa computacional.

O teor inicial de água e a massa inicial ( $t = 0$ ) do produto foram determinados previamente e serviam de condição para iniciar o processo de conversão da tensão medida na saída da célula de carga para massa. Conhecendo-se as massas, determinam-se os teores de água para cada instante.

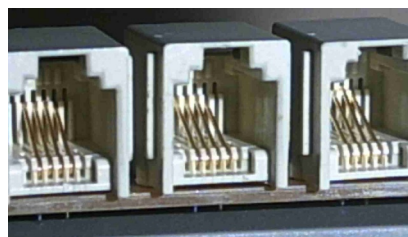
Para ajustar a curva de secagem utilizou-se o modelo de Page (Equação 7). Para calcular os valores da razão de umidade,  $R_U$ , utilizaram-se os valores de teores de água calculados utilizando a Equação 9 e o teor de água de equilíbrio estimado pela equação de Henderson modificada (Equação 8).

#### 4.4 - Construção da Rede

Para facilitar o processo de conexão de dispositivos 1-Wire™ ao sistema, optou-se por usar conectores RJ-11 macho e fêmea de 4 ou 6 vias (Figura 36). O cabo usado foi do tipo telefônico padrão DIN 24 AWG de 4 vias.



(a)



(b)

Figura 35 - (a) Conector RJ-11 macho e (b) conectores RJ-11 fêmea

A Figura 37 mostra um sistema de *hub* e conexões utilizadas na construção da rede.

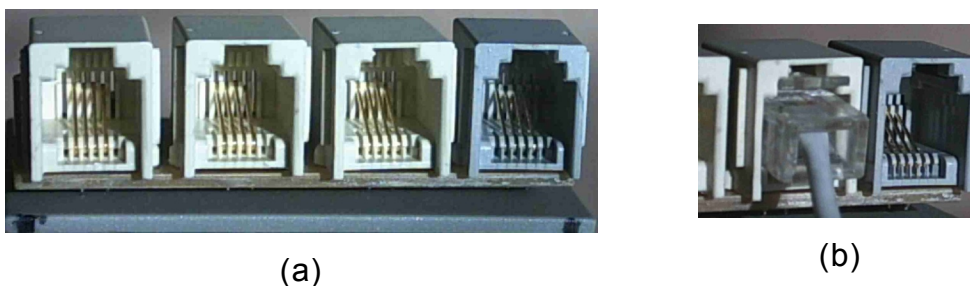


Figura 36 - (a) Hub com 4 RJ-11 fêmea e (b) conexão de rede RJ-11

Na construção do cabeamento, usou-se como base a configuração de rede compatível com a configuração do conector de saída RJ-11, do adaptador DS1411 fabricado pela empresa Dallas Semiconductors. A Figura 37 ilustra a codificação dos condutores utilizada neste trabalho.

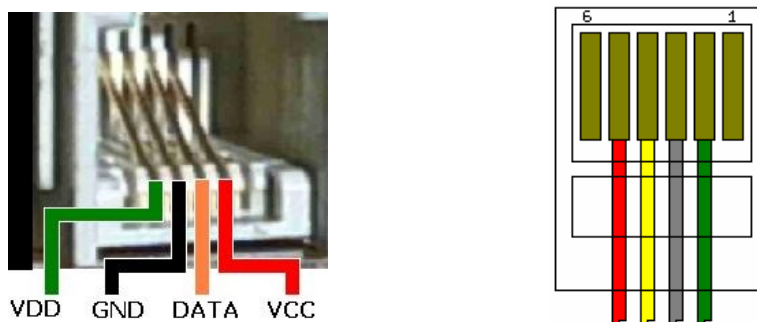


Figura 37 - Conectores RJ-11 fêmea e macho, codificados de acordo com a rede 1-Wire™ utilizada no projeto.

Quadro 11 - Codificação de pinos usada para configuração dos conectores RJ-11 utilizados na rede 1-Wire™

<b>Pinos</b>	<b>Cor do condutor</b>	<b>Função do condutor</b>
2	Vermelho	Alimentação externa (+ 5 V)
3	Amarelo ou Laranja	Linha de dados 1-Wire™
4	Cinza ou Preto	GND ou terra da rede e das fontes (0 V)
5	Verde	Alimentação externa para outros dispositivos(Vcc)

A rede de dados foi distribuída de forma a disponibilizar aos dispositivos, pontos de conexão a ela, o mais próximo possível dos pontos de atuação.

Para tal, foram colocados ao longo da rede, dois pontos de interconexão, chamados de *HUB 1-WIRE*, proporcionando os engates rápidos entre os conectores macho e fêmea RJ-11, fazendo com que a conexão à rede 1-Wire™ seja feita de forma muito prática.

A Figura 38 contém o diagrama esquemático da rede 1-Wire™, com os dispositivos e conexões.

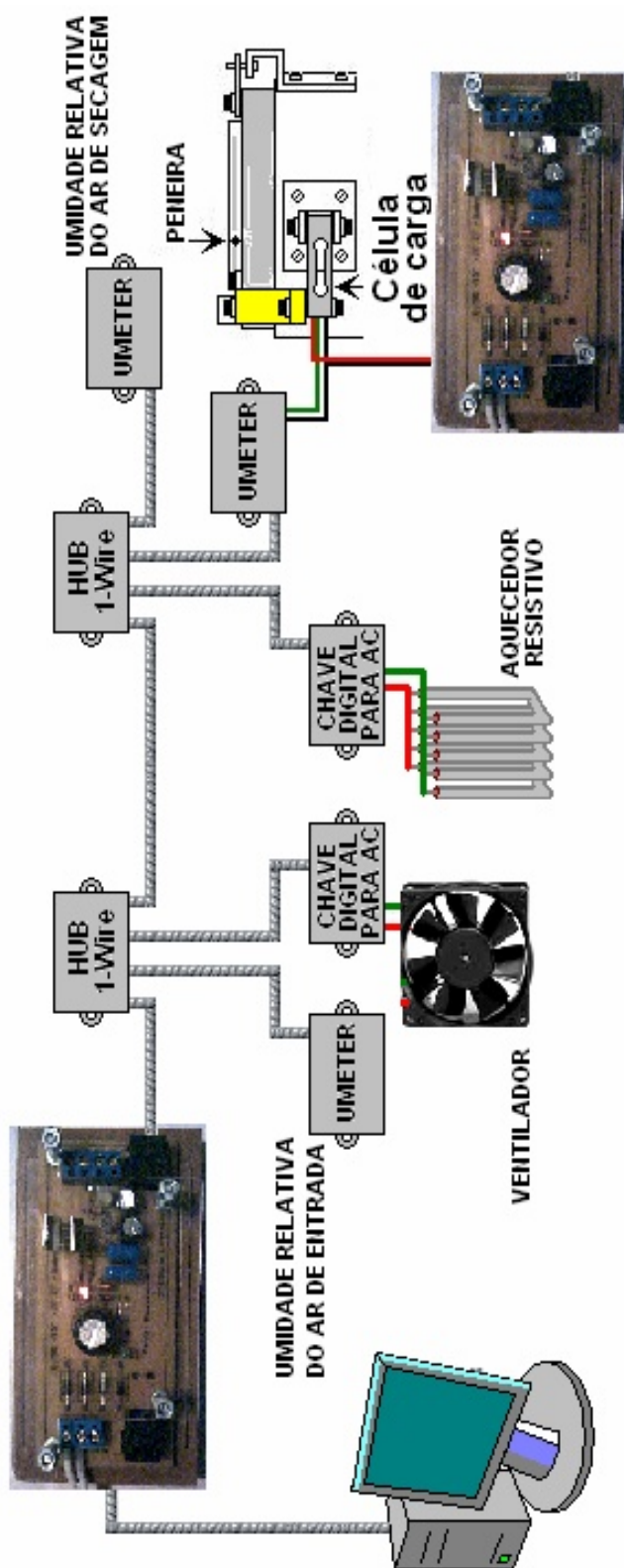


Figura 38 - Diagrama esquemático da Rede 1-Wire™, com os dispositivos e conexões.

#### 4.5 - Interface entre a Rede 1-Wire™ e o Computador

A ligação do barramento 1-Wire™ a um computador (mestre), por meio de sua porta serial, feita utilizando-se circuitos integrados projetados pela empresa Dallas Semiconductor para esse fim.

A Figura 39 representa o circuito de interface entre a porta serial do computador e o barramento 1-Wire™, destacando-se o CI DS2480, que é o responsável principal pela conversão do protocolo 1-Wire™ para o protocolo RS232, utilizado pela porta serial do computador.

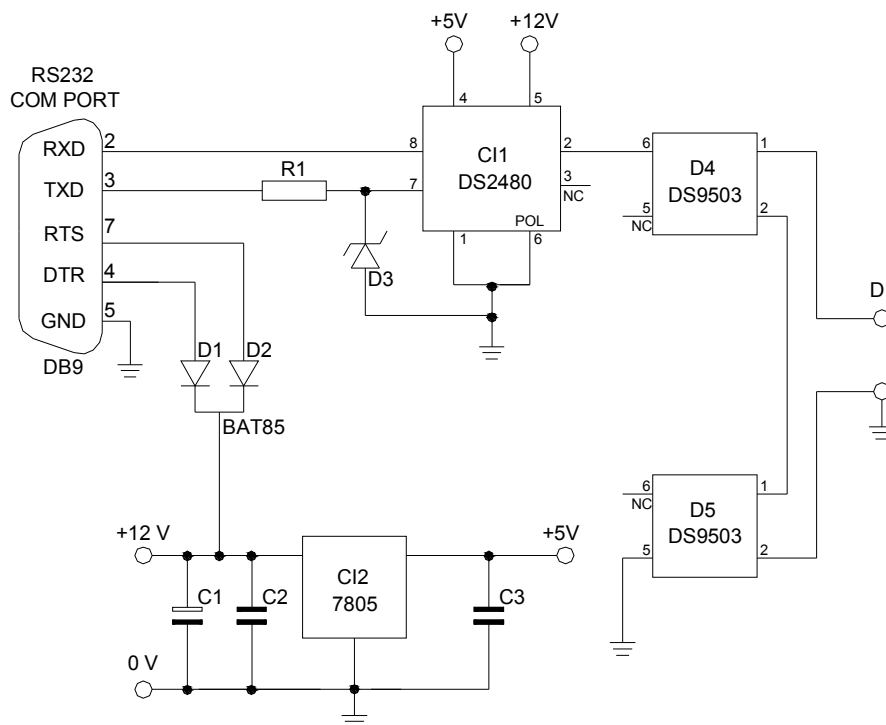


Figura 39 - Esquema do circuito da interface 1-Wire™ e o computador.

Esse circuito se comunica por meio das linhas RxD e TxD da porta serial do computador. Segundo o protocolo de comunicação RS232, os níveis lógicos altos nas linhas da porta serial devem ser representados por uma amplitude de -12V e os níveis baixos por +12V, enquanto o protocolo série para os microprocessadores do computador define amplitudes de +5V e 0V, respectivamente.

Nota-se que, se o pino 6 do CI1 (polaridade) estiver ligado ao fio de terra, os sinais recebidos são invertidos no interior do circuito integrado. A rede R1-D3 garante que os sinais aplicados no pino 7 do CI1 possuam uma amplitude de 0V a 4,7V.

Os circuitos integrados D4 e D5 (DS9503) protegem o circuito de interface contra descargas eletrostáticas, provenientes do barramento, por meio de diodos *zeners* ultra-rápidos, com tensão de descarga da ordem de 7,5V. Nesses diodos, os resistores em série, da ordem de  $0,5\Omega$ , provocam um efeito desprezível durante a comunicação normal. Entretanto, apresentam uma grande impedância se ocorrer uma descarga eletrostática no barramento. Assim, a corrente da descarga é curto-circuitada pelo diodo *zener* e não atinge o pino 2 do CI1.

A tensão de alimentação é obtida na porta serial do computador pelas linhas DTR e RTS e, em circunstâncias normais, fornecem a tensão de 5V estabilizada pelo CI2, regulador de tensão LM 7805. Quando uma dessas linhas está em nível alto, em princípio superior a +8V, na entrada do regulador (CI2), existe tensão suficiente para ele fornecer +5V estabilizado.

A interface entre o computador e os condutores que interligam os dispositivos da série 1-Wire™ também pode ser realizada por meio de um adaptador universal (DS9097U-009), também da série 1-Wire™. Este adaptador apresenta uma entrada (DB-9) para conexão na porta serial do computador e uma entrada (RJ-11) para os condutores da rede. A alimentação do DS9097U-009 deriva da fonte interna do computador a partir da porta serial. O circuito integrado DS2480B, inserido no interior do adaptador, realiza a conversão da porta serial do computador para a rede 1-Wire™. É no DS2480B que está localizado o circuito de polarização do sistema 1-Wire™ (DALLAS SEMICONDUCTOR, set.-2005).

#### **4.6 – Alimentação da Rede e dos Dispositivos 1-Wire™**

Foram utilizadas duas fontes de alimentação de corrente contínua. A primeira foi usada para fornecer +5V à rede 1-Wire™. Foi projetada visando interação com o sistema, recebendo o sinal vindo do adaptador DS1411, conectado à porta serial do computador mestre, gerenciador da rede 1-Wire™,

adicionando o sinal de +5Vcc ao cabo de 3 fios, ao condutor de alimentação, conforme mostrado na Figura 40.

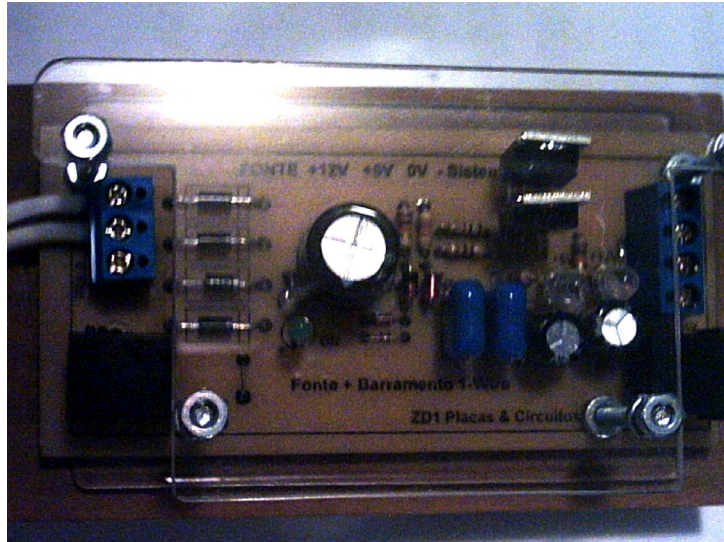


Figura 40 - Fonte de Alimentação com os conectores RJ-11 para adaptar à rede 1-Wire™.

A segunda fonte foi usada para alimentação da célula de carga com tensão regulada de 10V e para alimentação simétrica (-12V +12V) ao amplificador do sinal de saída da ponte da célula (Figura 41).

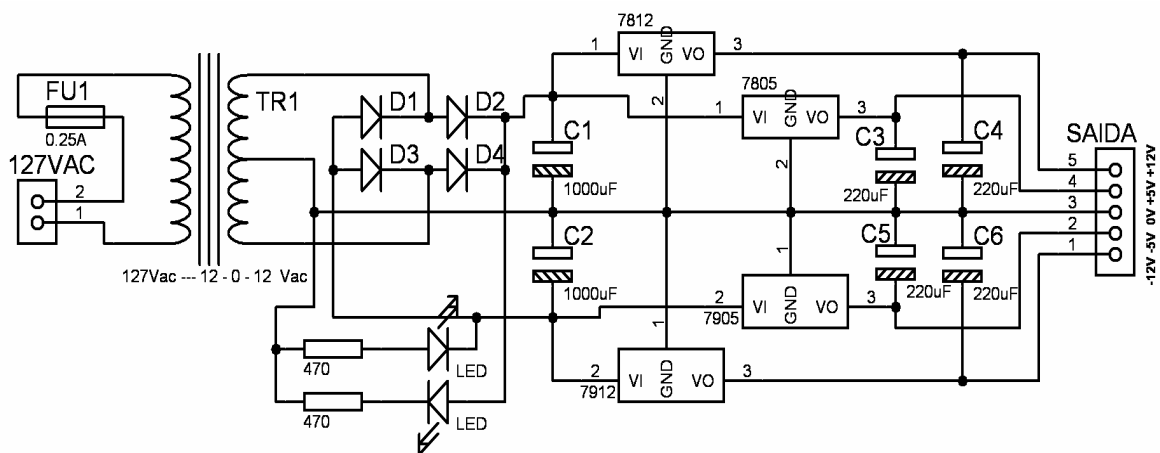


Figura 41 - Circuito da fonte estabilizada simétrica usada para alimentação dos circuitos do experimento.

#### **4.7 – Programa Computacional**

Foi desenvolvido um programa computacional para 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.

O programa computacional e suas sub-rotinas são apresentados como resultados na forma de fluxogramas, haja vista a complexidade dos códigos de programação.

## 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

Um sistema de controle foi projetado com base em dispositivos eletrônicos endereçáveis e na rede 1-Wire™. Um programa computacional foi desenvolvido para gerenciar todo o sistema, realizar aquisição de dados em tempo real e executar ações de controle em todo o sistema de secagem.

### 5.1 – Sistema de Controle

#### 5.1.1 – Rede 1-Wire™

A Figura 42 representa o resultado final da rede 1-Wire™, com todos os seus dispositivos e componentes, conectada ao computador, que atue como dispositivo mestre, que gerencia e comanda todo o sistema de controle com base em estratégias implementados em um programa computacional desenvolvido especialmente para este fim.

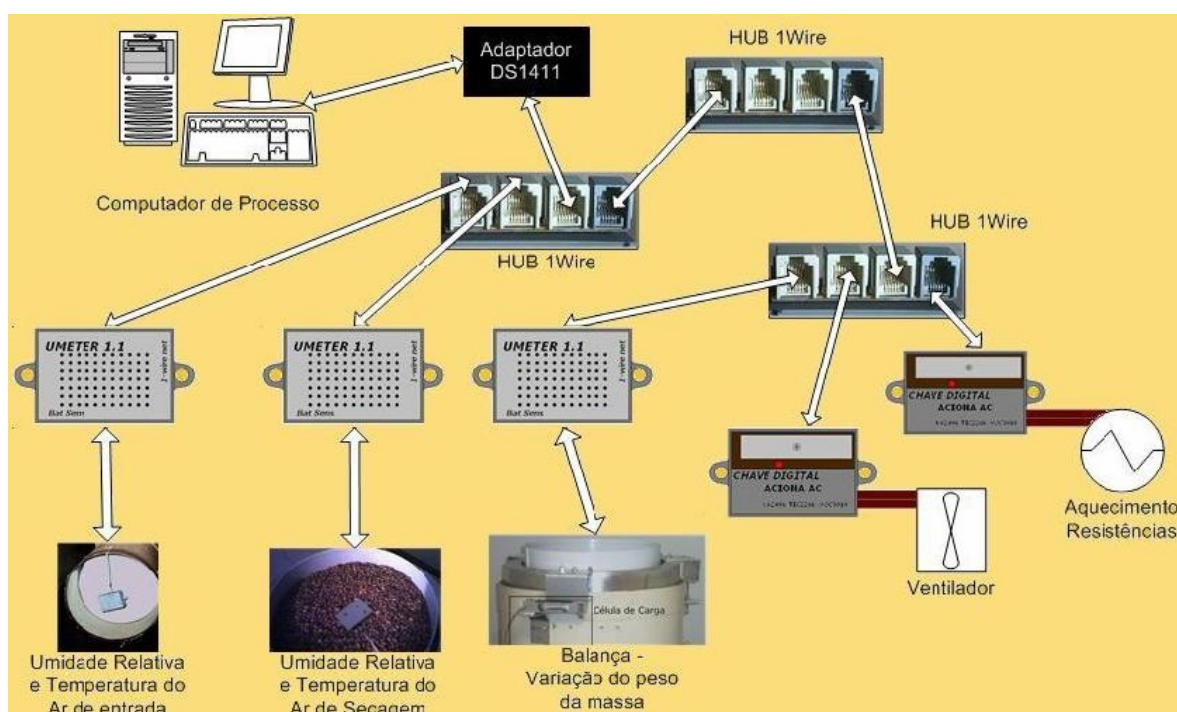


Figura 42 - Diagrama do sistema de controle de secagem de grãos em camada fina.

Pode-se observar na Figura 42 a disposição dos componentes na rede e o modo como eles se interagem, caracterizando a facilidade de comunicação entre o dispositivo mestre e os escravos.

A rede funcionou dentro da expectativa, ou seja, possibilitou a troca de dados entre o computador mestre os dispositivos 1-Wire™ escravos, sem interferências tão significativas que resultassem na perda total dos dados. Por operar em curta distância, em ambientes com poucas fontes emissoras de ondas eletromagnéticas, não foram detectadas interferências que promovessem erros relevantes à comunicação de dados.

Uma grande proteção quanto a interferências foi promovida pelo próprio protocolo 1-Wire™, que estabelece temporizações de poucos microssegundos, em nível lógico baixo, ou 0, para os bits 0 e 1, e deixando a linha em nível lógico alto, ou 1, quando estiver em repouso.

Quando aparecerem interferências devido a perturbações eletromagnéticas, elas poderão ser absorvidas pela linha, devido às características do protocolo 1-Wire™, por manter o barramento, na maior parte do tempo, em nível lógico alto.

### **5.1.2 - Conexões em Hubs 1-Wire™ e Cabeamento**

O sistema de conectores usando terminais RJ-11 mostrou-se mais eficiente durante a implementação e montagem da rede, uma vez que operou no processo de engate rápido, protegido mecanicamente contra curtos circuitos.

A montagem dos cabos obriga a utilização de ferramentas específicas para fixação dos conectores nos cabos.

Assim, foi experimentado e aprovado o sistema de engate rápido por meio de par de conectores RJ-11 macho-fêmea, para promover derivações e expansões da rede e conexões de dispositivos, com o sistema ligado (conexão a quente).

Esse tipo de conector elimina o risco de curto circuito entre os condutores devido às características de sua construção em baias e contatos em forma fendas.

A introdução de dispositivos de conexão, chamados de HUBs 1-Wire (Figura 43), nos pontos ou nós de derivação, possibilitaram a conexão de

fios dentro de conectores RJ-11 fêmea com os conectores RJ-11 macho do cabeamento, com boa eficiência.

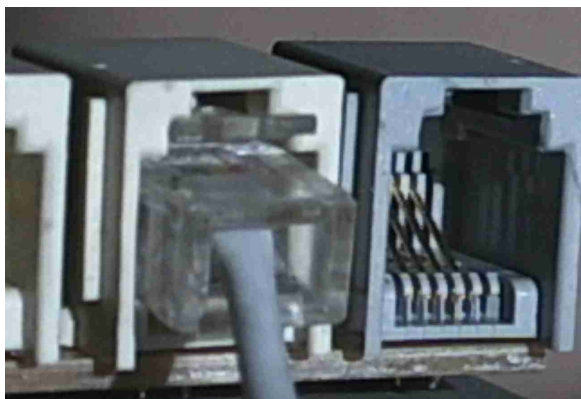


Figura 43 - Engate entre os conectores RJ-11 macho e fêmea em um HUB 1-Wire.

### 5.1.3 – Chave Digital ACIONA AC

Para acionamento das cargas em corrente alternada, foi desenvolvida uma chave digital chamada, neste trabalho, de CHAVE DIGITAL ACIONAAC<sup>®</sup>.

Neste trabalho, as cargas em corrente alternada que devem ser acionadas são o motor do ventilador e o sistema de aquecimento do ar de secagem.

As chaves ACIONAAC<sup>®</sup> apresentaram desempenho muito bom, tanto para acionamentos a 127 V quanto para acionamentos a 220 V, tendo limite de corrente, de acordo com o modelo de semicondutor utilizado.

Durante os testes sempre ocorreu um tempo de resposta entre 0,25s e 0,5s, desde o instante em que o comando era fornecido pelo programa até o efetivo acionamento dos circuitos do motor do ventilador e do aquecedor à base de resistências elétricas, tanto para acionamento quanto para desacionamento.

Esse tempo de atraso pode ser devido ao fato de que essa interface é uma interface gráfica, operando em um sistema operacional Windows que, para comandar a comunicação serial com a rede 1-Wire<sup>™</sup>, necessita da

troca de protocolos e, com isso, aumenta o tempo esperado de 100 a 250 $\mu$ s para até 0,5 s.

Como os dispositivos acionados, o motor do ventilador e o sistema de resistência de aquecimento de ar, demandam pouca corrente, os dispositivos semicondutores trabalham dentro de uma faixa de temperatura de operação bem confortável (abaixo dos 30°C), não apresentando aquecimento em excesso.

Os tempos de acionamento e de desacionamento não são requisitos fundamentais e nem críticos para o processo. Assim, as chaves ACIONAAC<sup>®</sup> podem operar em acionamento de dispositivos em sistemas de secagem de grãos.

#### 5.1.4 – Sistema de Pesagem

O sistema de pesagem (balança) foi montado em uma configuração de três apoios, sendo dois deles do tipo apoio simples e o terceiro um apoio fixo sobre uma célula de carga modelo GL10 da Alfa Instrumentos, com extensômetros resistivos.

Essa configuração de três apoios define uma variação de sensibilidade, cujo valor torna crescente da região dos apoios fixos para a região do apoio sobre a célula de carga (Figura 44).

Pôde-se verificar uma sensível variação, para um peso de 19,6N (2kgf), estático, do tipo usado em balança comercial de dois pratos.

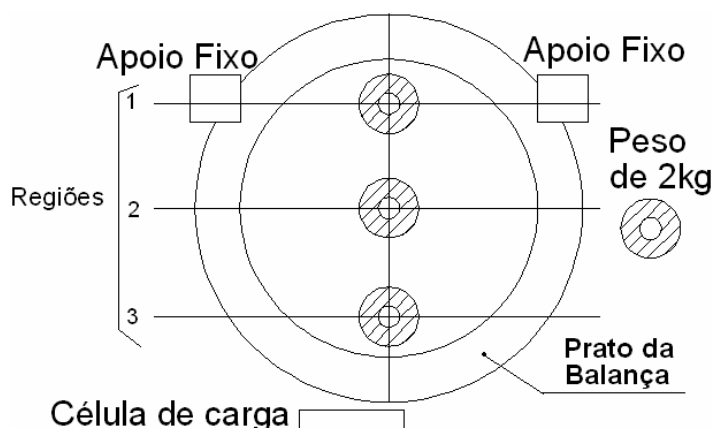


Figura 44 - Posicionamento do peso sobre o prato da balança para verificar a influência da posição no resultado da pesagem

Foi observada uma baixa sensibilidade, na região 1, a mais distante do apoio com célula de carga. Na região 2, a mais central, foi observada maior sensibilidade. Na região 3, a mais próxima à célula de carga, foi observada excelente sensibilidade.

O Quadro 12 apresenta os valores de tensão na saída do amplificador para cada região.

Quadro 12 - Valores de tensão na saída do amplificador para um peso padrão de balança de 19,6N (2kgf) concentrado em três regiões do prato do sistema de pesagem

<b>Região de Pesagem</b>	<b>Saída do amplificador Tensão em (mV)</b>
1 - Próximo ao apoio fixo	114,4
2 - Na região central	145,6
3 - Próximo ao apoio da célula de carga	175,6

Com essa variação, observou-se que o resultado obtido para uma amostra de grãos espalhada homoganeamente, em camada de aproximadamente 3 cm de espessura, foi satisfatório, desde que se considere uma distribuição média, operando com a resultante do conjunto de cargas (Figura 45).

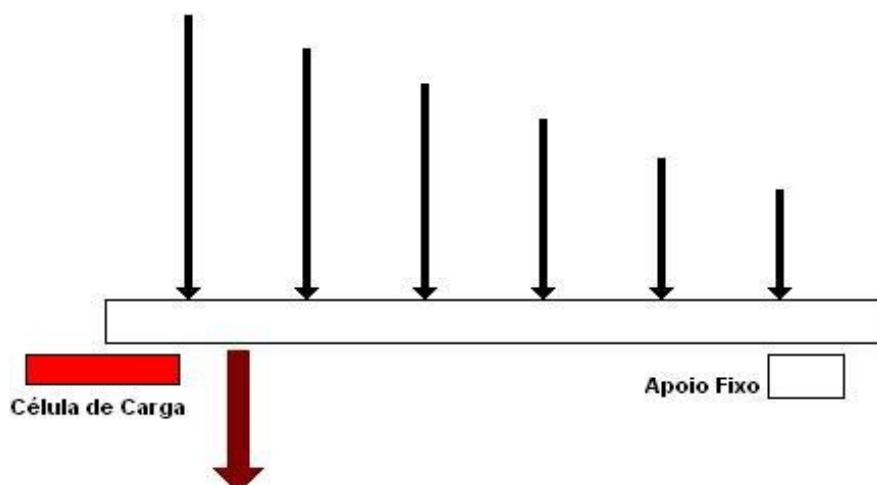


Figura 45 - Diagrama de sensibilidade - Influência de uma carga fixa nas diversas regiões do prato do sistema de pesagem.

A célula de carga foi montada, inicialmente, em contato direto com o prato da balança. Com o aquecimento do fluxo de ar que passava pela balança, a célula de carga aqueceu-se, o que poderia introduzir erros, necessitando compensações de temperatura. Ao colocar uma pastilha de isolante térmico, entre o apoio do prato da balança e o corpo da célula de carga, sua temperatura permaneceu próxima da temperatura ambiente, desobrigando, inicialmente a utilização da compensação de temperatura.

A célula de carga respondeu perfeitamente aos estímulos de esforços a ela impostos, mantendo-se dentro das expectativas, isto é, de acordo como o especificado pelo fabricante para as condições de teste, com apoio sobre a extremidade, submetida a esforços de tração ou compressão.

As leituras de tensão realizadas na entrada do conversor analógico digital (CAD) apresentaram valores equivalentes aos valores de tensão medidos utilizando um voltímetro digital, simultaneamente. Desta forma, comprovou-se a fidelidade das medidas proporcionadas pelo CAD DS2438.

### 5.1.5 – Curva de Calibração do Sistema de Pesagem

Vários testes preliminares foram realizados para calibração da célula de carga, com o secador operando com fluxos de ar a diferentes temperaturas.

Estes testes demonstraram que os valores fornecidos como sinal de tensão de saída para esse modelo de célula de carga de 98N (10Kgf) eram muito pequenos, se comparados com a faixa de -250mV a 250mV, percebida pela a entrada do conversor analógico-digital (CAD) DS2438.

Por esta razão, novos ajustes de ganho do amplificador de instrumentação, usado para amplificação desse sinal da tensão de saída, foram realizados.

Outra postura tomada foi utilizar uma massa de grãos secos de até 2,5 kg, para levantamento da curva da balança, melhorando a resolução e a sensibilidade do sinal de saída da célula de carga, permitindo leituras de tensão, com maior precisão. A mesma variação percentual de massas diferentes apresenta maior número de divisões para as massas maiores. Por isso, os experimentos que seriam realizados com massas próximas a 1kg, optou-se por massas próximas a 2kg.

Para verificar a influência da temperatura e do fluxo de ar sobre a curva de calibração da célula de carga, foram realizados testes com temperaturas do ar de secagem de 60 °C e 80 °C e com e sem ventilação. Com a carga sobre a bandeja de secagem, ao ligar a ventilação, o conjunto da balança foi empurrado para cima, deturpando as medições pela célula de carga.

O Quadro 13 apresenta os resultados de tensão na saída da célula de carga, em função da massa colocada na bandeja de pesagem, bem como os valores da massa estimada pela equação de regressão ajustada aos dados experimentais, os resíduos e o erro relativo, operando a uma temperatura de 60°C e fluxo de  $2,65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ . Este valor de fluxo de ar está acima dos valores recomendados para secagem de grãos, sugeridos na faixa de 0,25 a  $0,50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ .

A equação 10 foi ajustada aos dados experimentais com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,972.

$$y = 72,783 x - 7283,891, \quad 105 \leq x \leq 127 \text{ mV} \quad (10)$$

Em que:

$y$  = Massa do produto em g;

$x$  = Tensão em mV.

Observa-se uma discrepância aparentemente significativa entre os valores estimados e os valores reais para uma massa de 500g, por ter apresentado um erro relativo em torno de 27%. Esta discrepância, ainda que aparentemente significativa, ocorreu em apenas um ponto, correspondente a uma massa de 500g, que é praticamente impossível de ser atingida, durante o processo de secagem, a partir de uma amostra de 2kg de grãos úmidos. Esta equação não pode ser extrapolada, pois não forneceria valores com boa consistência para a realidade das medições.

Quadro 13 - Valores médios de tensão na saída da célula de carga com fluxo de ar aquecido a 60 °C em função da massa colocada na bandeja de pesagem

Tensão (mV)	Massa Real (g)	Massa Estimada (g)	Resíduo (g)	Erro Relativo (%)
105,1	500	365,60	134,40	26,88
110,5	700	758,63	-58,63	-8,38
116,9	1100	1224,44	-124,44	-11,31
119,1	1300	1384,56	-84,56	-6,50
120,8	1500	1508,30	-8,30	-0,55
123,4	1700	1697,53	2,47	0,15
126,1	1900	1894,05	5,95	0,31
127,1	2100	1966,83	133,17	6,34

A Figura 46 mostra os valores estimados (linha contínua) e os experimentais (pontos) de massa em função da tensão na saída da célula de carga.

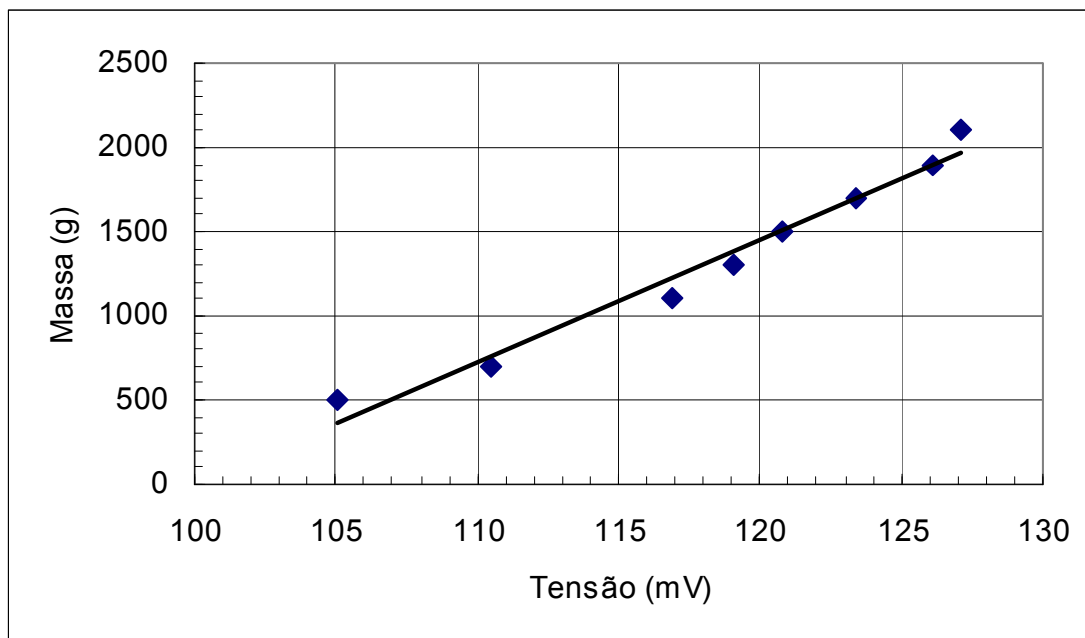


Figura 46- Valores estimados (linha contínua) e experimentais (pontos) de massa em função da tensão na saída da célula de carga, para temperatura de 60°C.

A Figura 47 mostra a curva de correspondência entre os valores observados de massa e os valores estimados usando a Equação 10. Observa-se alta correlação entre os valores estimados e os valores reais, evidenciado pelo alto coeficiente de determinação,  $R^2$ , da equação linear de primeiro grau ajustada.

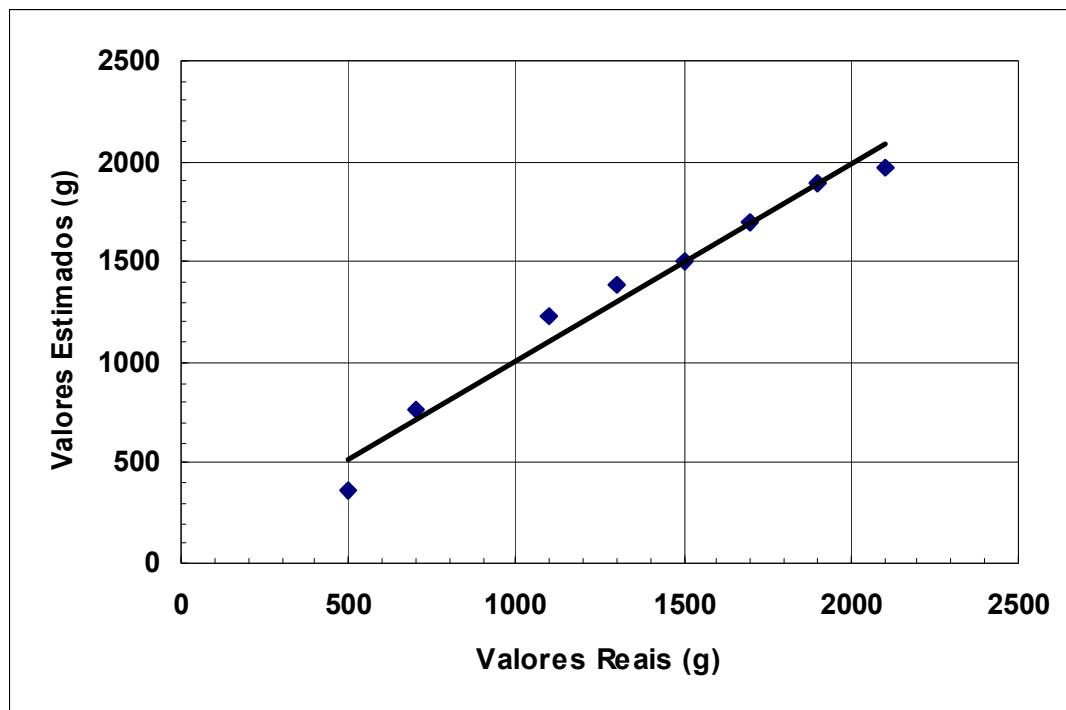


Figura 47 - Curva de correspondência entre os valores estimados de massa e os valores reais para temperatura de 60°C.

Para se adequar aos valores recomendados pela literatura, o fluxo de ar de secagem foi ajustado para  $0,27 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ . Então foram realizados mais dois testes para calibração da célula de carga, sendo um com fluxo de ar e o outro sem fluxo.

O Quadro 14 apresenta os resultados de tensão na saída da célula de carga, com fluxo de ar ligado (forçando o prato da bandeja para cima), em função da massa colocada na bandeja de pesagem, bem como os valores da massa estimada pela equação de regressão ajustada aos dados experimentais, os resíduos e o erro relativo, para temperatura de 80°C. O fluxo de ar passante pela massa de grãos favoreceu a diminuição da deformação da célula de carga.

A equação ajustada aos dados experimentais é representada pela Equação 11, com um coeficiente de determinação,  $R^2$ , de 0,989.

$$y = 33,409x - 649,75, \quad 34 \leq x \leq 92 \text{ mV} \quad (11)$$

Em que:

y = Massa do produto, g;

x = Tensão, mV.

A Figura 48 mostra os valores estimados (linha contínua) e os experimentais (pontos) de massa em função da tensão na saída da célula de carga.

Quadro 14 - Valores médios de tensão na saída da célula de carga com fluxo de ar aquecido a 80 °C em função da massa colocada na bandeja de pesagem

Tensão (mV)	Massa Real (g)	Massa Estimada (g)	Resíduo (g)	Erro Relativo (%)
34,11	500	490,02	-9,98	-2,00
41,95	700	751,95	51,95	7,42
45,61	900	874,22	-25,78	-2,86
54,32	1100	1165,22	65,22	5,93
56,35	1300	1233,04	-66,96	-5,15
60,27	1500	1364,00	-136,00	-9,07
73,40	1700	1802,66	102,66	6,04
78,58	1900	1975,72	75,72	3,99
83,62	2100	2144,10	44,10	2,10
88,84	2300	2318,50	18,50	0,80
92,48	2500	2440,10	-59,90	-2,40
92,48	2500	2440,10	-59,90	-2,40

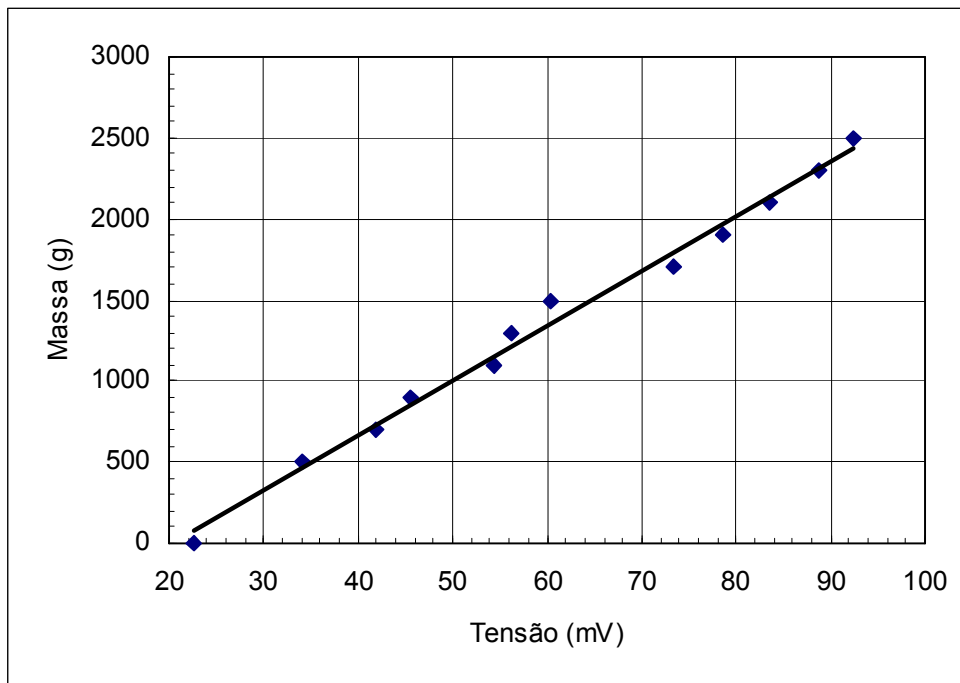


Figura 48- Valores estimados (linha contínua) e experimentais (pontos) de massa em função da tensão na saída da célula de carga, para temperatura de 80°C.

A Figura 49 mostra a curva de correspondência entre os valores observados de massa e os valores estimados usando a Equação 11. Observa-se alta correlação entre os valores estimados e os valores reais, evidenciado pelo alto coeficiente de determinação,  $R^2$ , da equação linear de primeiro grau ajustada.

Observa-se uma discrepância entre os valores estimados e os reais para uma massa de 1500 g, que apresentou um erro relativo em torno de 9 %. Esta discrepância ocorreu em apenas um ponto, correspondente a uma massa de 1500 g, que não deve afetar a curva de secagem significativamente, haja vista que dificilmente será atingida por uma amostra de 2 kg de grãos úmido depois de seco. Pode-se observar também que esta equação não pode ser extrapolada, pois forneceria valores inconsistentes com a realidade.

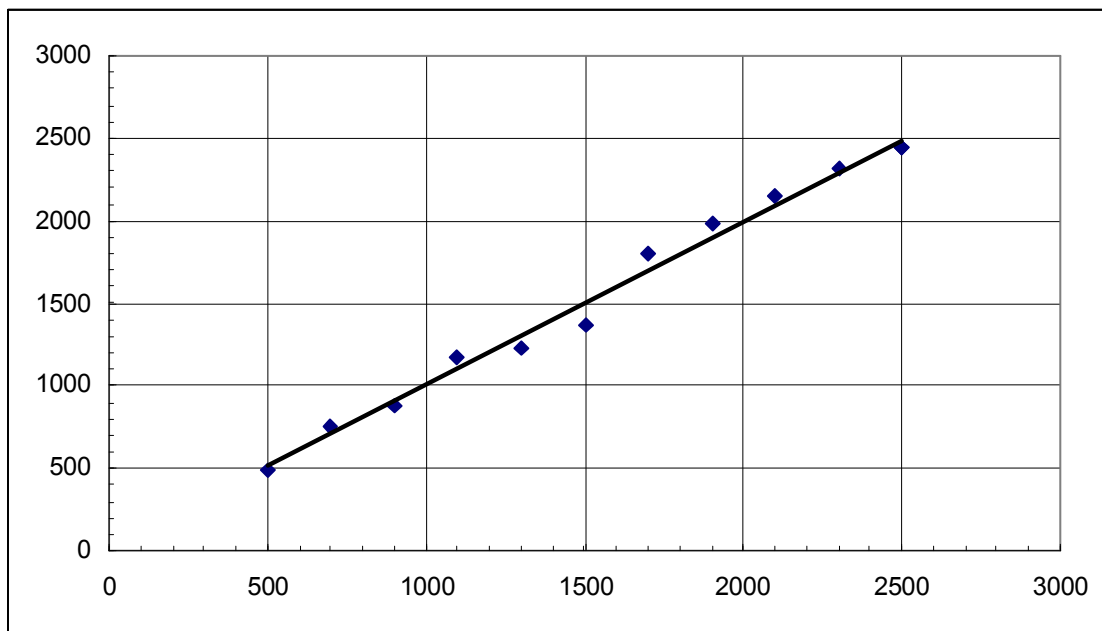


Figura 49 - Curva de correspondência entre os valores estimados de massa e os valores reais para temperatura de 80°C..

Para verificar o efeito do fluxo de ar sobre o sistema de pesagem, repetiu-se o teste anterior sem a presença de fluxo.

O Quadro 15 apresenta os resultados de tensão na saída da célula de carga, sem a presença de fluxo de ar, em função da massa colocada na bandeja de pesagem, bem como os valores da massa estimada pela equação de regressão ajustada aos dados experimentais, os resíduos e o erro relativo.

A equação ajustada aos dados experimentais é representada pela Equação 12, com um coeficiente de determinação,  $R^2$ , de 0,996.

$$y = 33,35x - 813,04, \quad 38 \leq x \leq 96 \text{ mV} \quad (12)$$

Em que:

- y = Massa do produto, g;
- x = Tensão, mV.

Quadro 15 - Valores médios de tensão na saída da célula de carga sem fluxo de ar, em função da massa colocada na bandeja de pesagem

Tensão (mV)	Massa Real (g)	Massa Estimada (g)	Resíduo (g)	Erro Relativo (%)
38,30	472,81	464,27	-8,545	-1,807
50,50	872,81	871,14	-1,670	-0,192
62,45	1272,81	1269,67	-3,140	-0,247
74,65	1672,81	1676,54	3,730	0,223
88,95	2072,81	2153,44	80,630	3,890
96,40	2472,81	2401,90	-70,910	-2,868

A Figura 50 mostra os valores estimados (linha contínua) e os experimentais (pontos) de massa em função da tensão na saída da célula de carga.

A Figura 51 mostra a curva de correspondência entre os valores observados de massa e os valores estimados usando a Equação 12. Observa-se alta correlação entre os valores estimados e os valores reais, evidenciado pelo alto coeficiente de determinação,  $R^2$ , da equação linear de primeiro grau ajustada.

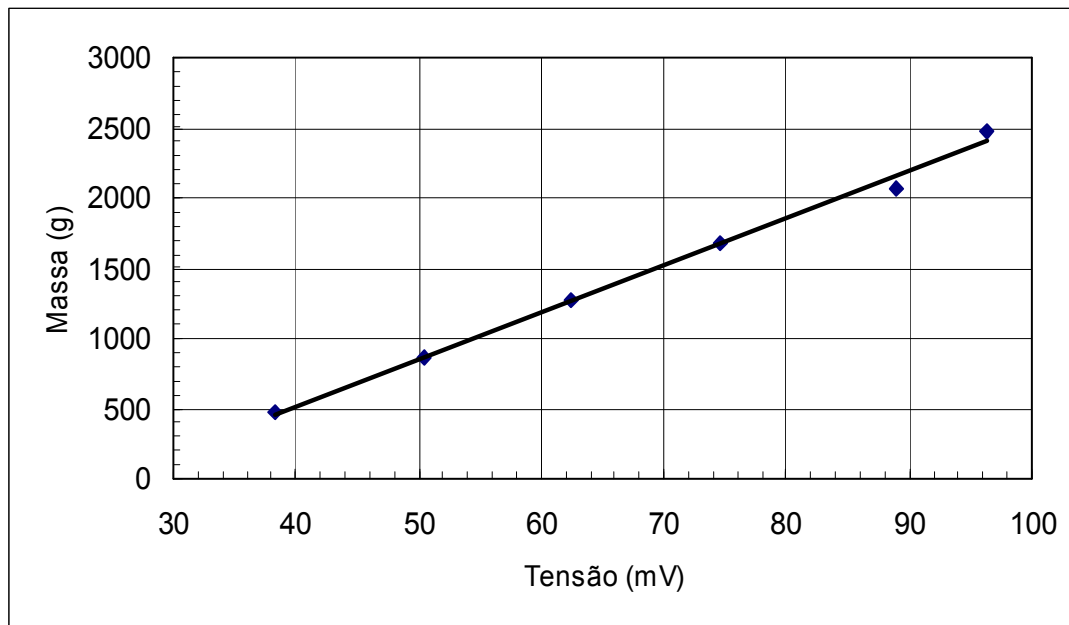


Figura 50- Valores estimados (linha contínua) e experimentais (pontos) de massa em função da tensão na saída da célula de carga, sem a presença de fluxo de ar.

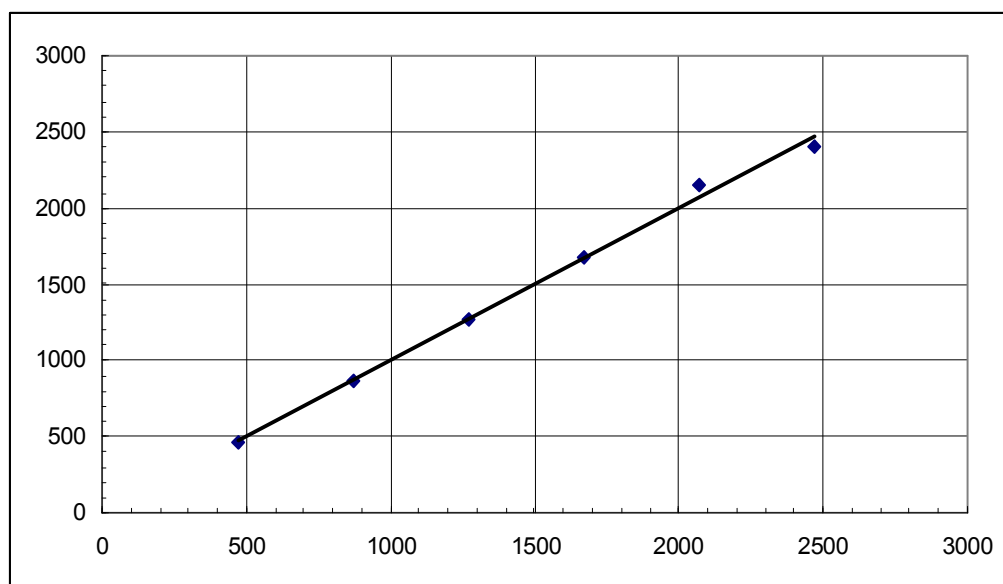


Figura 51 - Curva de correspondência entre os valores estimados de massa e os valores reais sem fluxo de ar.

## **5.2 – Medição de Temperatura e Umidade Relativa usando os Circuitos DS2438**

A validação dos dados de temperatura e umidade relativa foi realizada por PINTO(2005), que demonstrou que o sensor de temperatura integrado ao DS2438 apresenta boa precisão e as medições de umidade relativa utilizando o sensor capacitivo HIH-3610 em conjunto com o DS2438 apresenta precisão aceitável para o experimento, com erro relativo médio de 0,3%, com desvio de 5%, eliminado após filtragem dos dados e ajustes das leituras.

No Quadro 16 apresenta-se a comparação entre os valores de temperatura medidos com o DS2438 e um termômetro de referência.

No Quadro 17 apresenta-se a comparação entre os valores de umidade relativa medidos com o sensor HIH-3610/DS2438 e um psicrômetro de referência.

Observa-se que as medidas de temperatura apresentaram valores bastante precisos, com erro máximo de 2,56%, perfeitamente aceitável neste caso (PINTO, 2005).

Para a Medição da umidade pelo DS2438, em conjunto com o sensor de umidade relativa HIH-3610 de baixo consumo de energia, apareceram variações e perdas momentâneas de leitura, quando operando em temperaturas superiores a 65°C. Entretanto, as leituras prosseguiram dentro de uma faixa, de tal forma que podem ser compensadas pela equação de ajuste, fornecida pelo fabricante do sensor (HONEYWELL), não comprometendo a exatidão das leituras (PINTO, 2005).

Quadro 16 - Comparação entre valores de temperatura medidos usando um termômetro de referência e o termômetro interno do DS2438

Termômetro Padrão (°C)	Sensor do DS2438 (°C)	Erro Relativo (%)
19,5	20,0	2,56
21,5	21,6	0,47
33,5	33,1	-1,19
35,5	35,7	0,56
41,5	41,2	-0,72
47,5	47,5	0,00
51,5	51,7	0,39
57,5	57,5	0,00
59,5	59,6	0,17

Quadro 17 - Comparação entre valores de umidade relativo medidos usando um psicrômetro de referência e HIH-3610/DS2438 (UMETER)

Psicrômetro Padrão (%)	HIH-3610/DS2438 (%)	Erro Relativo (%)
65	61,75	-5,00
64	60,80	-5,00
66	62,70	-5,00
63	59,85	-5,00
62	58,90	-5,00
61	57,90	-5,08
61	57,85	-5,16
62	58,90	-5,00
61	57,90	-5,08

É interessante observar que o erro relativo nas medidas do HIH-3610/DS2438, em relação ao psicrômetro de referência utilizado neste caso, permaneceu praticamente constante em torno 5%. Observa-se, ainda, que

os valores de umidade relativa foram sempre subestimados pelo HIH-3610/DS2438. Todavia, deve-se salientar que o tempo de resposta do HIH-3610/DS2438 é menor do que o do psicrômetro padrão, e que um erro de 5 % é insignificante neste caso.

### **5.3 – Programa Computacional**

A concepção do programa computacional foi idealizada com base na premissa de que a amostra de grãos deveria ser seca até atingir o teor de umidade de equilíbrio.

Como, normalmente os grãos não são secos até atingir o equilíbrio, devido ao longo tempo de secagem necessário para que ocorra esta condição, principalmente em temperatura baixa, o programa apresenta a opção que permite realizar o processo de secagem até um teor de água pré-definido pelo usuário.

Para controlar a temperatura de secagem, o sistema determina a temperatura do fluxo de ar imediatamente abaixo da bandeja de secagem e, de acordo com a comparação desse valor com o valor ajustado, aciona ou desaciona o sistema de aquecimento do ar, mantendo a temperatura de secagem, praticamente constante.

Para realização da pesagem da amostra com precisão adequada, a pesagem foi realizada com o ventilador desligado, conforme descrito:

- (1) O programa desliga o motor;
- (2) Espera 5 segundos;
- (3) Dispara a rotina de coleta e armazenagem dos dados (50 medições instantâneas), o que demora cerca de 100 ms, podendo ser considerado medição em tempo real;
- (4) Religa o motor.

Este procedimento elimina a necessidade de filtros e ajustes das curvas obtidas a partir dos valores medidos.

O programa apresenta ainda uma estimativa da quantidade de água (umidade) 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.

O projeto do programa gerenciador do sistema está apresentado na forma de fluxogramas, nas Figuras 52, 53, 54 e 55.

A Figura 56 mostra a interface humano-máquina, desenvolvida para este programa.

Observando-se os fluxogramas e a interface humano-máquina, verifica-se a facilidade de utilização do programa, que o torna viável de poder ser utilizado por qualquer técnico de laboratório com o mínimo de treinamento.

### Fluxograma de Verificação Inicial do Processo de Secagem

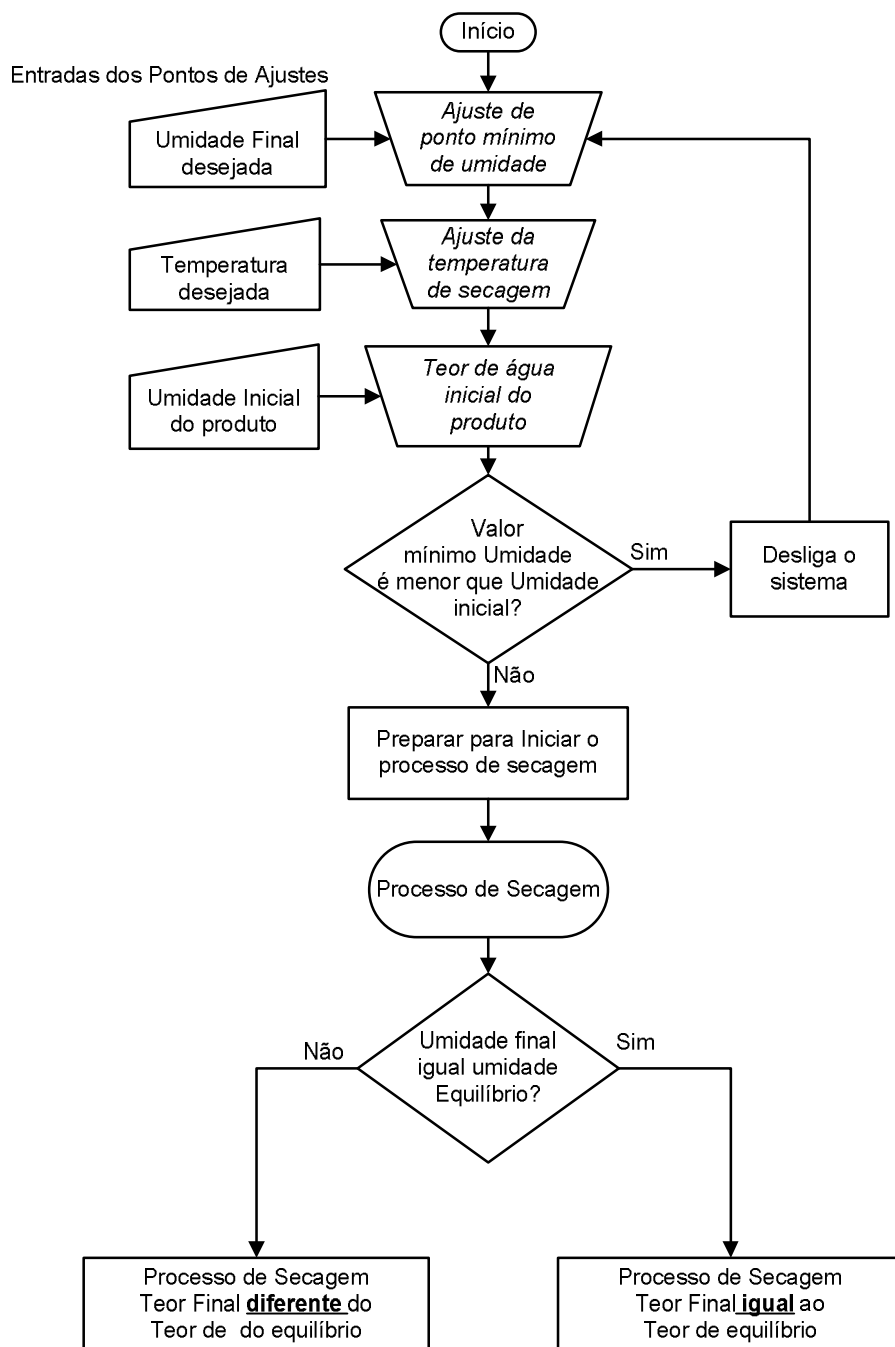


Figura 52 - Fluxograma da rotina inicial do programa.

**Fluxograma de Início do Processo de Secagem**  
**Teor Final Igual ou Diferente do Teor de Equilíbrio**

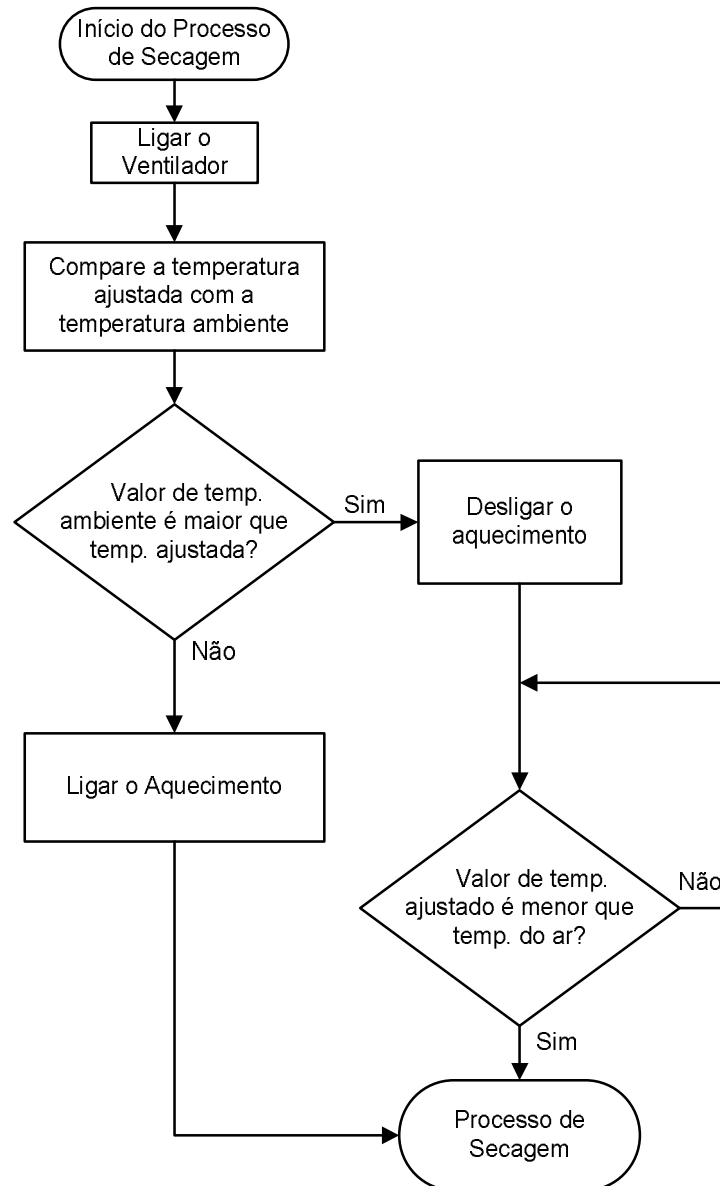


Figura 53 - Fluxograma da rotina de seleção do teor final de água do processo.

### Fluxograma de Processo de Secagem

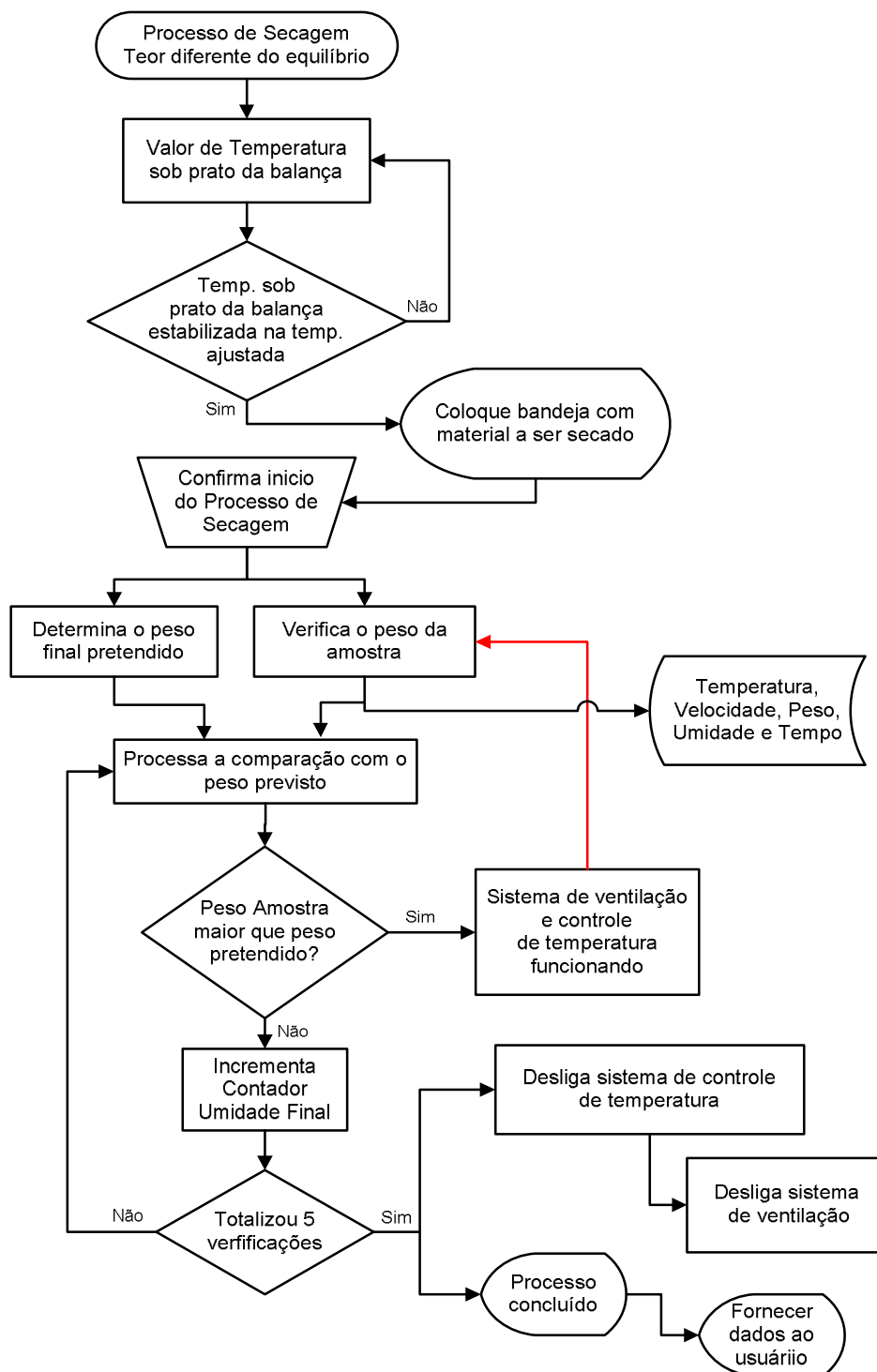


Figura 54 - Fluxograma da rotina de procedimento para atingir o teor de água diferente da umidade de equilíbrio.

**Fluxograma de Processo de Secagem**  
**Teor de umidade final igual que teor de umidade de equilíbrio**

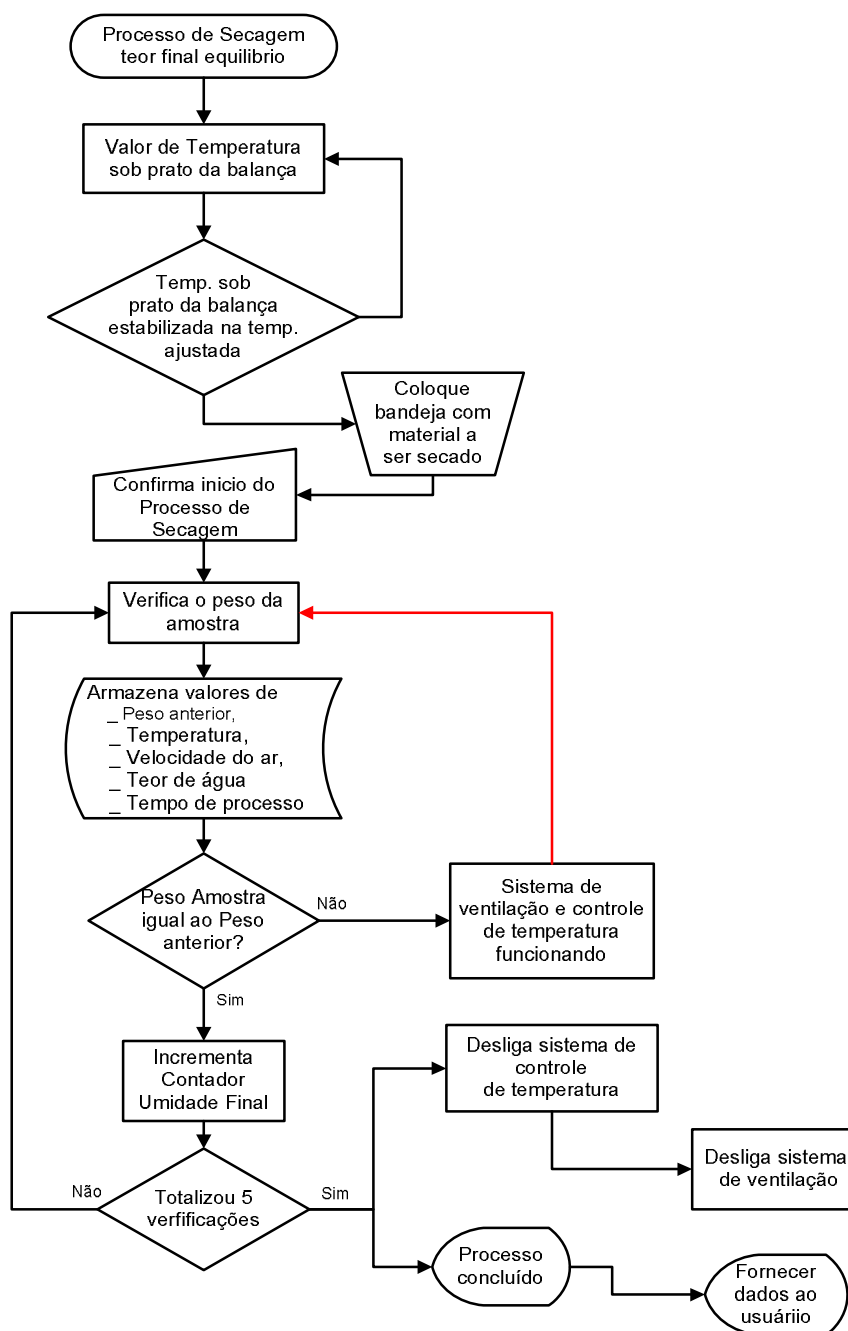


Figura 55 - Fluxograma da rotina de procedimento para atingir o teor de água de equilíbrio.

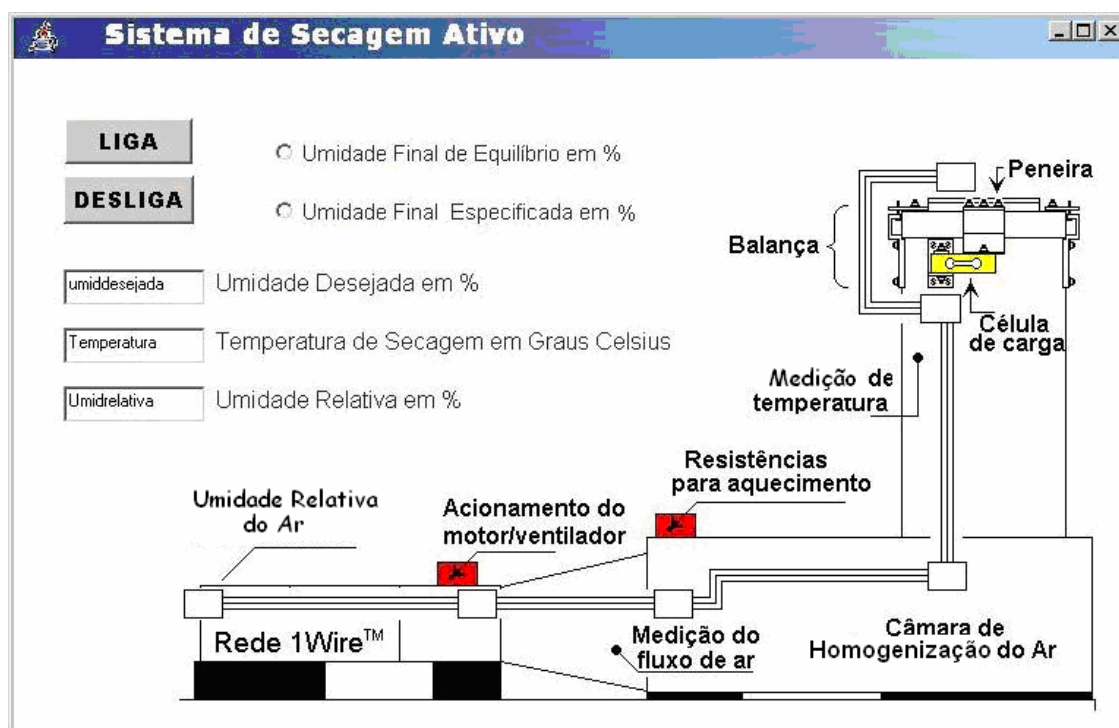


Figura 56 - Interface humano – máquina.

#### 5.4 – Teste do Sistema de Controle e Validação do Programa Computacional

Para testar o sistema de controle e validar o programa computacional, foram realizados alguns testes de secagem de milho com diferentes valores de teor inicial de água (22 e 26 % b.u.) e temperaturas de secagem (40, 60 e 80°C). Este milho foi colhido na área de plantio do Departamento de Zootecnia da U.F.V., despalhado e debulhado manualmente, ficando armazenado em câmara fria no o de Laboratório de Pré-processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola da U.F.V, até instantes antes de ser processado.

Neste trabalho, apresentou-se, a seguir, os resultados de secagem para uma temperatura de 80°C e teor inicial de água de 26 % b.u. O fluxo de ar foi mantido, aproximadamente constante, em  $0,27 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ .

O modelo de Page (Equação 7) foi ajustado aos dados experimentais por meio de regressão linear, utilizando as seguintes transformações:

$$Y = \ln[-\ln(R_u)] \quad (13)$$

$$X = \ln(t) \quad (14)$$

$$A = \ln(k) \quad (15)$$

$$B = N \quad (16)$$

$$Y = A + B X \quad (17)$$

O modelo de regressão que melhor se ajustou aos dados experimentais é descrito pela Equação 18.

$$Y = -3,242 + 0,5955 X \quad R^2 = 0,9653 \quad (18)$$

Portanto, a transformação inversa do modelo linearizado da Equação 18 reproduz a equação original de Page para este caso:

$$R_u = \exp(-0,039086 t^{0,5955}) \quad (19)$$

O Quadro 16 apresenta os resultados observados de razão de umidade para uma temperatura do ar de secagem de 80 °C.

Observa-se no Quadro 16 que o erro relativo máximo entre os dados observados e os estimados foi de 12,44 %, sendo que a maioria dos valores de erros observados encontra-se dentro de uma faixa aceitável para este tipo de experimento.

A Figura 57 mostra os dados observados e os calculados pela Equação 18 e a Figura 58 mostra os dados de razão de umidade observados e os calculados pela Equação 19 (modelo de Page).

Analisando os dados do Quadro 18 e as Figuras 57 e 58, pode-se observar que a qualidade do ajuste do modelo de Page aos dados experimentais de razão de umidade foi razoável para este teste. As discrepâncias encontradas são devidas, possivelmente, à presença de fungos no produto, que já apresentava sinais de deterioração. Todavia, o objetivo principal deste trabalho foi demonstrar o funcionamento do sistema de controle e pesagem automática das amostras. Este objetivo foi

perfeitamente atingido, mostrando que o sistema de controle e pesagem funciona perfeitamente (item 5.1.4).

Quadro 18 - Razão de umidade experimental e estimada pelo modelo de Page, para um teor inicial de água de 26% b.u., umidade relativa do ar de 5,5 %, teor de umidade de equilíbrio de 2,4 % b.u. e temperatura de 80 °C

Tempo (min.)	RU Experimental (adimensional)	X	Y	RU Estimada (adimensional)	Erro Relativo (%)
0	1,0000			1,0000	0,00
2	0,9580	0,73397	-3,14979	0,9413	-1,75
4	0,9122	1,39872	-2,38653	0,9140	0,20
6	0,8671	1,81374	-1,94800	0,8913	2,78
8	0,8507	2,10616	-1,82236	0,8720	2,50
10	0,8450	2,31418	-1,78097	0,8564	1,35
15	0,7890	2,72020	-1,43987	0,8208	4,03
19	0,7699	2,96183	-1,34123	0,7961	3,40
34	0,7314	3,52243	-1,16208	0,7273	-0,56
48	0,7018	3,87950	-1,03812	0,6744	-3,90
63	0,6851	4,14208	-0,97218	0,6310	-7,90
77	0,6593	4,34055	-0,87582	0,5955	-9,68
87	0,6533	4,46629	-0,85386	0,5720	-12,44
98	0,6026	4,58718	-0,68033	0,5486	-8,96
110	0,5489	4,70471	-0,51115	0,5253	-4,31
120	0,4880	4,79068	-0,33206	0,5078	4,06
130	0,4509	4,86484	-0,22738	0,4925	9,24
143	0,4398	4,96121	-0,19670	0,4723	7,40
151	0,4133	5,01960	-0,12388	0,4600	11,28
160	0,4127	5,07403	-0,12206	0,4483	8,64
167	0,4070	5,11809	-0,10664	0,4389	7,82
176	0,4219	5,17039	-0,14724	0,4276	1,36
178	0,4252	5,18281	-0,15637	0,4249	-0,06

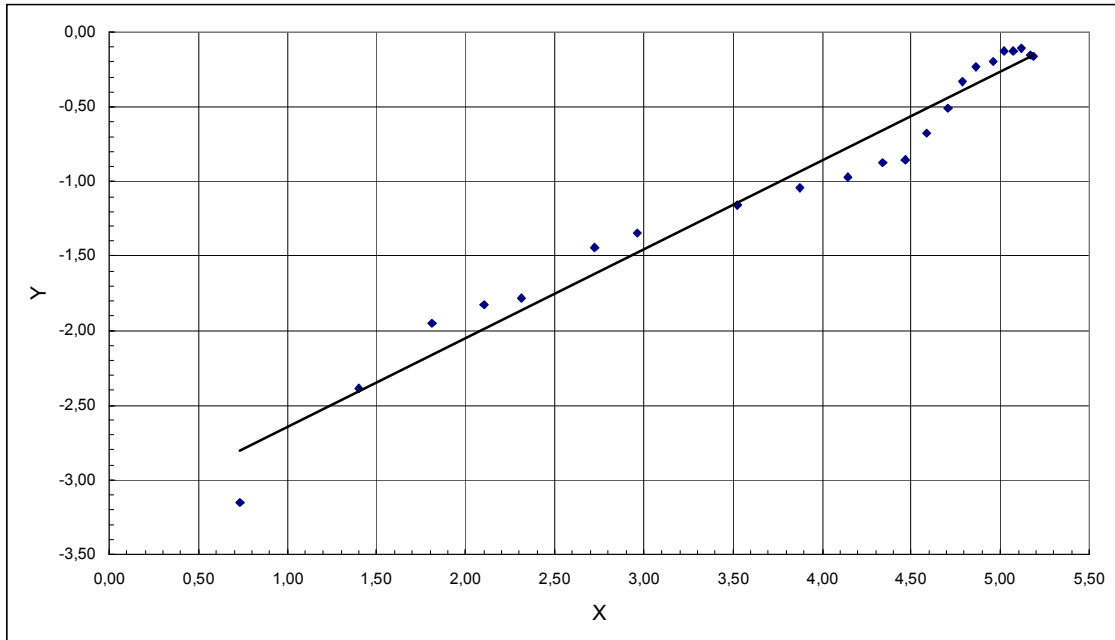


Figura 57 - Dados experimentais e estimados pela equação transformada.

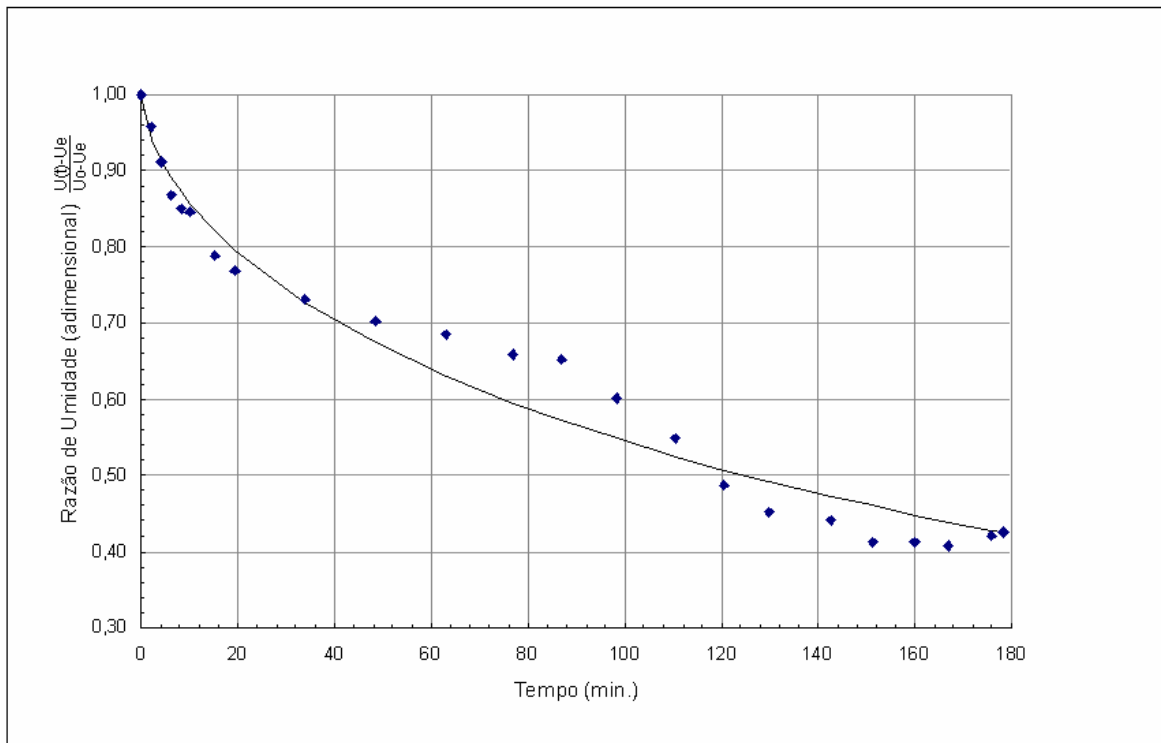


Figura 58 - Dados experimentais e estimados pela equação de Page.

## 6- RESUMO E CONCLUSÕES

Pôde-se apresentar uma solução inicial para o problema da retirada da amostra do secador, durante o processo de secagem, a fim de que fizesse aferição do peso da amostra, evitando a interrupção do processo.

Com base nas ocorrências durante o desenvolvimento do dispositivo e de seu programa computacional usados no experimento, durante a aplicação dos testes e nos resultados obtidos durante a operação do sistema, pôde-se fazer algumas observações:

1. É necessário testar o equipamento com diversos produtos agrícolas para adequar o sistema a eles. As curvas de secagem devem ser estudadas para validar o dispositivo para que seja usado de forma sistemática, em atividades laboratoriais.
2. O sistema de apoio do prato da balança, usando uma única célula de carga, provocou uma menor sensibilidade em algumas regiões. Com isto, amostras de grãos com pesos menores de 500g não apresentaram uma boa resolução, uma vez que não ocupavam toda a superfície do prato da balança, com uma camada homogênea.
3. A operação da rede de comunicação de dados com alta confiabilidade garantiu, em um ambiente naturalmente hostil para transmissão de dados por fios metálicos, uma tranqüila troca de dados e comandos para as partes do sistema (sem interferências).
4. A rede 1-Wire<sup>TM</sup> permitiu a aquisição de dados em tempo real por meio de vários DS2438 (conversores A/D, sensores de temperatura) e também os comandos de acionamento das chaves com DS2406 (IDE escravos), ligados ao computador mestre.

5. Os circuitos DS2438 dos conversores A/D se comportaram muito bem para medição da umidade relativa, temperatura e medição da massa das amostras, fornecendo valores bem próximos dos valores apresentados em equipamentos (psicrômetro, voltímetro e balança) usados como referência.
6. Os circuitos DS2406 usados nas chaves digitais comportaram dentro das expectativas, interpretando os comandos perfeitamente, para as operações de liga e desliga do ventilador e do sistema de aquecimento com resistências.
7. O programa computacional foi baseado em bibliotecas e rotinas disponibilizadas pela *Dallas Semiconductor*, via rede mundial de computadores, Internet. Estas rotinas contribuíram para a aquisição de dados com segurança e confiabilidade, pois sendo acionadas por poucos comandos, as rotinas de teste para transmissão, decodificação e leitura final do dado, puderam ser usadas com grande agilidade.
8. Com os testes realizados, foi possível apresentar, na tela principal do programa computacional, as leituras de seis grandezas em três instrumentos bem como as situações de operação das duas chaves de modo contínuo, em tempo real.
9. A partir dos resultados obtidos e analisando as possibilidades de utilização do sistema em diferentes situações, observou-se que a rede de comunicação a três fios, com protocolo 1-Wire™ apresentou desempenho bastante satisfatório, isento de interferências e de perdas de informações significativa, uma vez que as leituras foram realizadas de forma contínua.
10. A utilização eficiente de conversores A/D (CAD), 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.

Assim, ao final das atividades, pôde-se chegara as seguintes conclusões:

1. O sistema de pesagem automática de amostras em um secador de grãos em camada fina funcionou durante testes de secagem de grãos de milho e feijão. O registro automático da variação do peso da massa de grãos foi realizado pelo sistema e, ao final de cada processo, possibilitou a geração dos relatórios.

2. O sistema de controle inteligente para secagem de grãos em camada fina, usando a aquisição de dados em tempo real, com dispositivos eletrônicos endereçáveis da série 1-Wire<sup>TM</sup> foi desenvolvido e, diante dois resultados obtidos, testado, pois propiciou o controle do processo de secagem da amostra de acordo com os valores previamente ajustados para o processo.

## 7- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Implantação do sistema usando baterias automotivas é uma sugestão que fica para futuros trabalhos.

A maior interação desse sistema desenvolvido com outros sistemas para comunicação a maior distância, usando a transmissão de dados via ondas de rádio, tendo como base protocolos de comunicação *comercialmente* mais usados (TCP/IP, ETHERNET, etc.).

Desenvolvimento de um sistema de pesagem com um número maior de células de carga, para melhorar a sensibilidade do prato da balança.

Adequação de controles de velocidade de motor para, automaticamente, regular o fluxo e a vazão do ar.

## 8- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, P. A. O. **Introdução à Extensometria Elétrica de Resistência - Notas de aula** - DEEF - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - 1999

AWTREY, D. **Transmitting Data and Power over a One Wire Bar. Sensors Magazine**, February 1997.

<http://www.sensorsmag.com/articles0297/onewire/main.shtml>.

AWTREY, D. **Power over the 1-Wire Net. Sensors Magazine**, May 2004.

<http://www.sensorsmag.com/articles/0504/44/main.shtml>

AWTREY, D. **1-Wire Addressable Digital Instruments for Environmental Monitoring. Sensors, Magazine**,

2002. <http://www.sensorsmag.com/articles0297/onewire/main.shtml>

AWTREY, D. **1-Wire Humidity Sensor. Sensors Magazine**, August 2000.

<http://www.sensorsmag.com/articles0297/onewire/main.shtml>.

AWTREY, D. **A 1-Wire Rain Gauge. Sensors Magazine**, December 1999.

<http://www.sensorsmag.com/articles0297/onewire/main.shtml>.

AWTREY, D. **The 1-Wire Weather Station. Sensors Magazine**, June 1998.

<http://www.sensorsmag.com/articles0297/onewire/main.shtml>.

BUTLER, W. **Integrated Optical Sensing of Changing Environmental Illumination. Sensors Magazine**, June 1999.

<http://www.sensorsmag.com/articles0297/onewire/main.shtml>.

DALLAS Semiconductor. **DS2406 Dual Addressable Switch Plus 1kbit Memory. Datasheet**. Acessado setembro de 2005. <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/DS2406.pdf>

DALLAS Semiconductor. **DS2438 Dual Addressable Switch Plus 1kbit Memory. Datasheet**. Acessado setembro de 2005. <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/DS2438.pdf>

DALLAS Semiconductor. **DS2480 Dual Addressable Switch Plus 1kbit Memory. Datasheet.** Acessado setembro de 2005. <http://pdfserv.maxim-ic.com/en/ds/DS2480.pdf>

LOPES, D.C. **Programação de Sistemas com base em dispositivos da série 1-Wire™**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2005. (Trabalho final, Doutorado em Engenharia Agrícola).

MARTINS, J.H. **Thin-Layer Drying Rates of Corn Hybrids Related to Performance of High-Speed, High Temperature Batch Dryer.** Purdue University, Department of Agricultural Engineering, West Lafayette, IN, USA, 1988, Tese de Ph. D.

MARTINS, J.H., MONTEIRO, P.M.B., Mota, A.M.M.N., Oliveira Filho, D. **Temperature and Humidity Measurement based on 1-Wire™ Technology.** 5th Portuguese Conference on Automatic Control – CONTROLO 2002, Aveiro, Portugal, 2002.

MONTEIRO, P.M.B. **Tecnologia 1-Wire™ Aplicada ao Controle em Tempo Real de Sistemas de Aeração de Grãos.** Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2002a, 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, 2002b.

MOTA, A.M.M. **Sistemas de Aquisição de Dados e Controle Baseado no Barramento 1-Wire™.** Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal, 2001.

PINTO, P.R. **Instrumentos Digitais Endereçáveis com Base na Tecnologia 1-Wire™** Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2005. (Trabalho final, Mestrado em Engenharia Agrícola).

STEIDLE NETO, A. J. N. **Avaliação do Sistema 1-Wire™ para Aquisição de Dados de Temperatura em Instalações Agrícolas.** Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003. Tese de mestrado

THOMAZINI, Daniel e ALBUQUERQUE, Pedro Urbano Braga – **Sensores Industriais – Fundamentos e Aplicações** – Editora Érica Ltda – São Paulo, SP 2005.

THOMPSON, T.L. **Predicted Performance and Optimal Design of Convection Grain Dryers**. Purdue University, Department of Agricultural Engineering, West Lafayette, IN, USA, 1988, Tese de Ph. D.

## Apêndice 1 – CARACTERÍSTICAS DE UMA CÉLULA DE CARGA

### I. Ponte de Wheatstone

#### I.1. Configuração básica

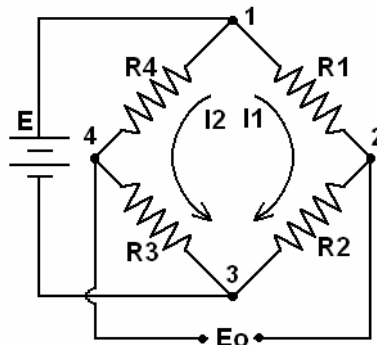


FIGURA 1– Configuração básica da ponte de Wheatstone

Em que:

$E$  é a alimentação da ponte, excitação, em V;

$R_i$  é a resistência elétrica, por exemplo, extensômetros elétrico strain gauge - com  $R=350 \Omega$ ;

$E_o$  é a saída da ponte, sinal de saída, em V.

#### I.2. Ponte equilibrada

De acordo com a primeira lei de Ohm, a diferença de potencial entre os bornes 1 e 2 é dada por:

$$E_1 = R_1 I_1$$

Sendo  $E_1 = E$ , a corrente  $I_1$  será dada por:

$$I_1 = \frac{E}{R_1 + R_2}$$

Da mesma forma,  $I_2$  será dada por

$$I_2 = \frac{E}{R_3 + R_4}$$

Resultando nas seguintes equações:

$$E_{12} = \frac{R_1 \cdot E}{R_1 + R_2} \quad \text{e} \quad E_{14} = \frac{R_4 \cdot E}{R_3 + R_4}$$

Deduzindo  $E_{24}$  teremos:  $E_{24} = E_{12} - E_{14}$

Assim: 
$$E_{24} = \frac{R_1 \cdot E}{R_1 + R_2} - \frac{R_4 \cdot E}{R_3 + R_4}$$

$$E_0 = E_{24} = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot E$$

Para o caso da ponte equilibrada,  $E_0=0$ . Isto resulta:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (9)$$

Substituindo  $R_1$  por um extensômetro elétrico com resistência inicial conhecida, ligado nos bornes 1 e 2, como na figura 36, o valor da resistência  $R_g$  do extensômetro elétrico pode ser determinado em função dos demais resistores:

$$R_1 = R_2 \cdot \frac{R_4}{R_3} \quad (10)$$

A variação da resistência elétrica  $R_g$  está relacionada com a deformação específica pela razão entre a resistência elétrica específica do circuito  $\Delta R / R$  e a constante característica do extensômetro  $K$ , dada por:

$$\varepsilon = \frac{1}{K} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (11)$$

Em que:

$K$  é o constante característica do extensômetro, que normalmente vem especificada nas embalagens dos extensômetros, também denominada de gauge factor (F).

A maioria dos condicionadores de extensômetros elétricos não apresenta a variação da resistência em Ohms, mas sim em valores de deformação específica  $\varepsilon$ , em m/m.

### I.3. Considerações sobre o comprimento do fio e a variação de temperatura

Na investigação experimental, os extensômetros são colados em peças estruturais que ficam afastadas dos condicionadores de extensometria.

Dependendo da distância entre o sensor e o condicionador, o sinal emitido pelo sensor, proporcional à deformação da peça, pode ser significativamente atenuado ou sofrer perturbações, tal como ruído ambiente, que introduzem erros na medida da grandeza de interesse. Dessa forma, para minimizar esses efeitos deletérios, inerentes da extensometria, deve-se levar em conta o aumento da resistência elétrica do circuito (do braço da ponte), devido o comprimento do fio e a variação da temperatura. As resistências dos fios de ligação, de comprimentos  $L_1$  e  $L_2$ , como mostrado na figura 39, são considerados no circuito pela equação:

$$\frac{R_g + R_{L1} + R_{L2} + \frac{\Delta R_{L1}}{\Delta T} + \frac{\Delta R_{L2}}{\Delta T}}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} \quad (12)$$

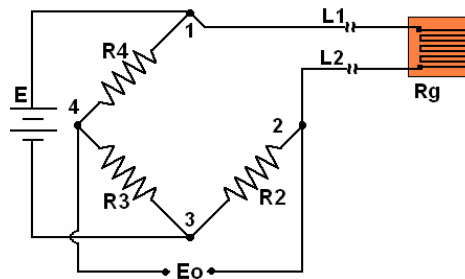


FIGURA 2 – Configuração da ponte de Wheatstone com extensômetro elétrico ( $R_g$ ) ligado com 2 fios. (1/4 de ponte com 2 fios)

Os erros, nas leituras das deformações, devidos ao comprimento do fio e variação da temperatura ao longo do comprimento do fio podem ser minimizadas com o emprego da ponte com 3 fios (1/4 de ponte com 3 fios).

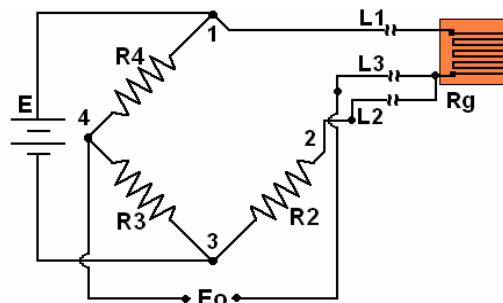


FIGURA 3 - Ponte de Wheatstone com extensômetro elétrico ( $R_g$ ) e fio compensador ( $L_2$ ) com mesmo comprimento de  $L_1$ , (1/4 de ponte, com 3 fios)

As resistências dos fios de ligação, de comprimentos L1 e L2 , como mostrado na figura 2.3, são considerados no circuito pela equação seguinte:

$$\frac{R_g + R_{L1} + \frac{\Delta R_{L1}}{\Delta T}}{R_g + R_{L2} + \frac{\Delta R_{L2}}{\Delta T}} = \frac{R_4}{R_3} \quad (13)$$

#### I.4. Ponte com leitura variável

Com a melhoria dos condicionadores de extensometria a medida de deformações pode ser feita por meio de condicionadores com indicação digital, que permitem as medidas de mais de um canal de extensometria, por comutação. Neste caso a ponte passa a ser excitada com tensão constante, E, e a medida da deformação resulta da diferença de potencial entre os bornes 2 e 4 da ponte, figura 38, dada por E<sub>0</sub>, equação (14).

$$E_0 = \left( \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) \cdot E \quad (14)$$

#### I.5. Calibração de uma ponte com Strain Gauge

##### I.5.1. Resistor de calibração (Shunt cal)

Para uma verificação imediata da instrumentação as deformações específicas podem ser simuladas pelo emprego de resistores em paralelo ao extensômetro elétrico, denominados de resistores de calibração (shunt cal). Recomenda-se que estes resistores sejam resistores de precisão.

##### Exemplo - Shunt cal

Considerando o arranjo da figura 41, tem-se:

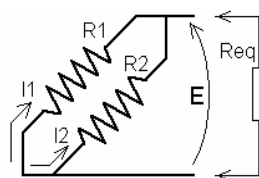


FIGURA 4 - Resistores em paralelo

$$I_1 = \frac{E}{R_1} \quad I_2 = \frac{E}{R_2} \quad I = I_1 + I_2 = E \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = E \cdot \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2} \right)$$

$$R_{eq} = \left( \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \right) \quad (15)$$

Acoplado o resistor de calibração ao strain gauge, como um dos ramos da ponte de Wheatstone:

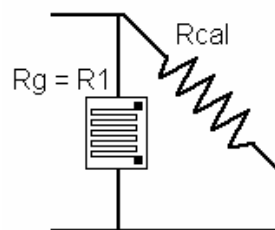


FIGURA 5 - Resistência de Calibração em paralelo com a resistência do Extensômetro (Strain Gauge)

Em que:

R1 equivale à resistência do Strain Gauge Rg. Em paralelo com ela aparece a resistência de calibração Rcal.

$$\varepsilon = \frac{1}{K} \cdot \frac{\Delta R}{R} \quad (16)$$

Aplicando o Rcal em um braço da ponte de Wheatstone, figura 38, tem-se:

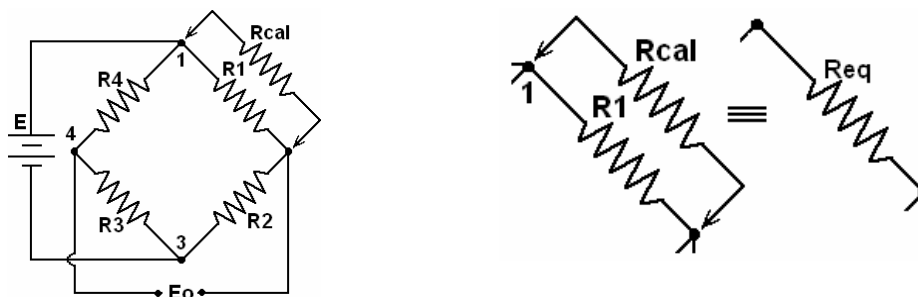


FIGURA 6 - Resistor de calibração

Verifica-se da FIGURA 6 que o valor da resistência equivalente é sempre menor que o da menor resistência em paralelo, a variação (resistência equivalente) no braço da ponte correspondente a uma deformação específica de compressão dada por:

$$\Delta R = R_f - R_g = \left( \frac{R_g \cdot R_{cal}}{R_g + R_{cal}} \right) - R_g \rightarrow \frac{\Delta R}{R_g} = \left( \frac{R_{cal}}{R_g + R_{cal}} \right) - 1$$

$$\frac{\Delta R}{R_g} = K \cdot \varepsilon = \frac{R_{cal} - R_g - R_{cal}}{R_g + R_{cal}} = \frac{-R_g}{R_g + R_{cal}} \rightarrow$$

$$K = \frac{1}{\varepsilon} \cdot \frac{-R_g}{R_g + R_{cal}} \quad (17)$$

Em que:

K é característica do extensômetro elétrico fornecida pelo fabricante;

Rg é valor da resistência do “strain gauge”;

Rcal é valor do resistor de calibração.

Para o caso de verificação do desempenho da instrumentação, o valor de Rcal pode ser determinado em função de uma deformação específica a ser simulada:

$$K \cdot \varepsilon = -\frac{R_g}{R_g + R_{cal}} \rightarrow K \cdot \varepsilon \cdot R_g + K \cdot \varepsilon \cdot R_{cal} = -R_g$$

$$R_{cal} = -R_g \cdot \left( 1 + \frac{1}{K \cdot \varepsilon} \right) \quad (18)$$

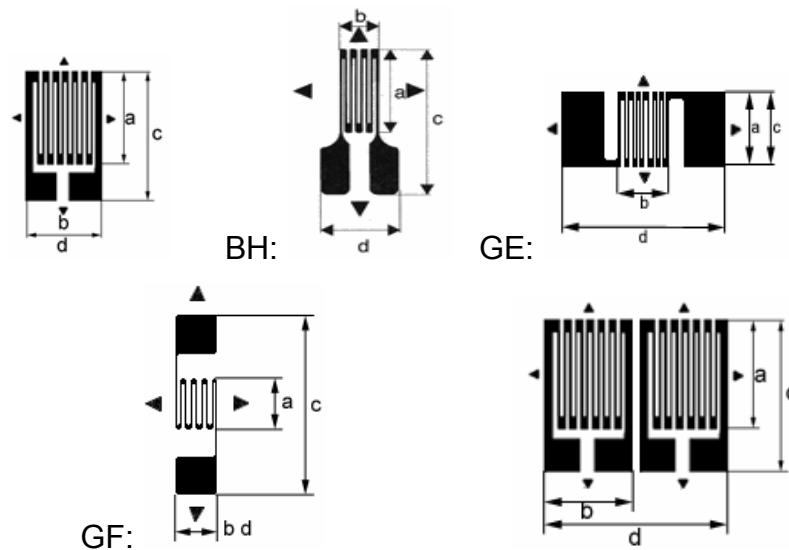
## I.6. Tipos de Extensômetros

### I.6.1. Extensômetros coláveis de resistência elétrica (strain gauges)

Eles são agrupados em famílias, conforme sua forma e finalidade.

- Modelos Unidirecionais Simples - Formas Tradicionais

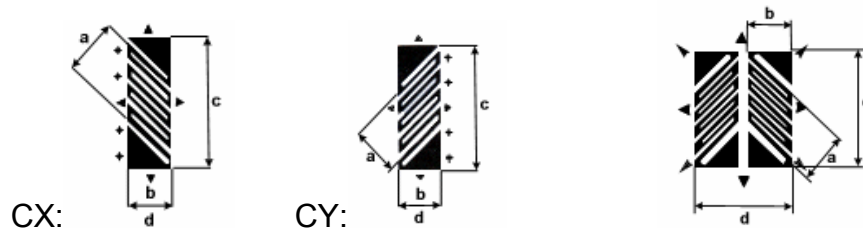
\*\* Compensações de Temperatura Disponíveis:



### Extensômetros resistivos coláveis

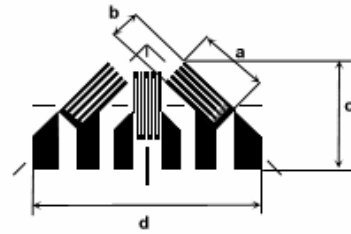
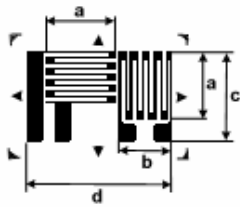
- Modelos Unidirecionais a 45°

- Modelos Espinhas de Peixe



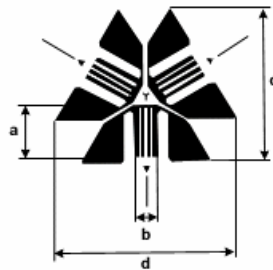
- Modelos Roseta Dupla a 90°

- Modelos Roseta Tripla a 90°



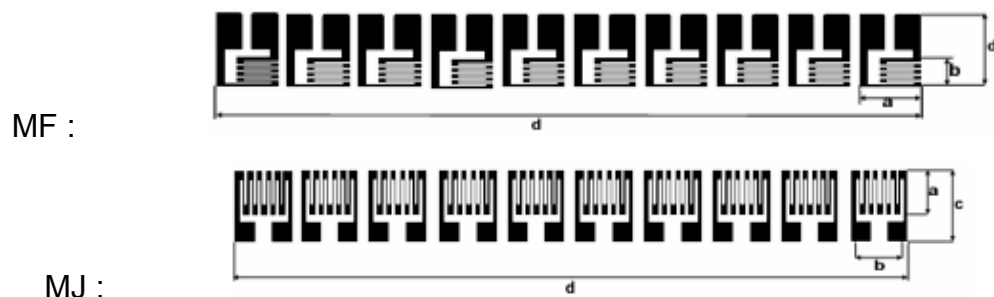
Extensômetros resistivos coláveis colocados angularmente

- Modelos Roseta Tripla a 120°



Extensômetro resistivo colável composto de forma radial

- Modelos para Determinação de Gradientes de Tensão



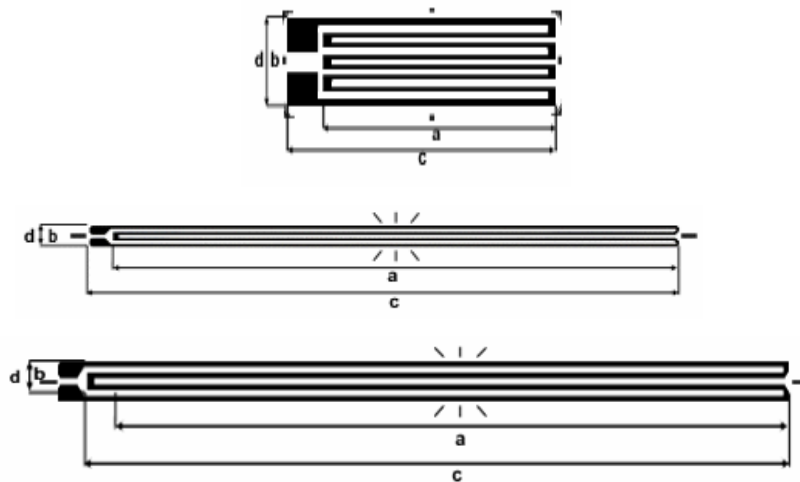
Extensômetros resistivos coláveis composto em forma de gradiente

- Modelos para a Determinação de Tensões Internas
  - Modelos Diafragma



Extensômetros resistivos coláveis composto para aplicação específica

- Modelos para Aplicações em Concreto



Extensômetros resistivos coláveis para aplicação em concreto

### I.7. A célula de carga utilizada

Como visto, as células de carga usam strain gauges montados em configuração de ponte de Wheatstone. Em repouso, a tensão de saída nos seus terminais será nula.

A medida em que ocorrem deformações, esta tensão vai sofrendo variações proporcionais aos esforços e deformações. As ligações de alimentação da célula de carga e dos terminais de saída definem tensões de saída em função da tensão de alimentação e das deformações a que estiver submetida à célula de carga.

### I.7 .1. Célula de Carga Empregada

O modelo de célula de carga a ser usado é uma do tipo tração compressão com capacidade para 5 Kgf ou 10 kgf. Dois modelos, muito empregados em balanças comerciais, obtidos de sucatas de balança foram disponibilizados:

#### \_ Modelo GL - Alfa instrumentos

Á Célula de Carga modelo GL Alfa Instrumentos é insensível a esforços laterais e momentos torsores portanto indicada para utilização onde a direção da aplicação da carga não passa pelo eixo do corpo da célula. Fabricada em alumínio anodizado de alta resistência, possui uma baixa altura que permite soluções de design mais econômicas, para balanças de supermercado e de farmácias. É protegida contra umidade, respingos e insetos por camada de resina especial envolvendo toda a fiação e os Strain-gauges.



Aplicações:

Balanças comerciais de  
balcão

Contadoras

Verificadoras

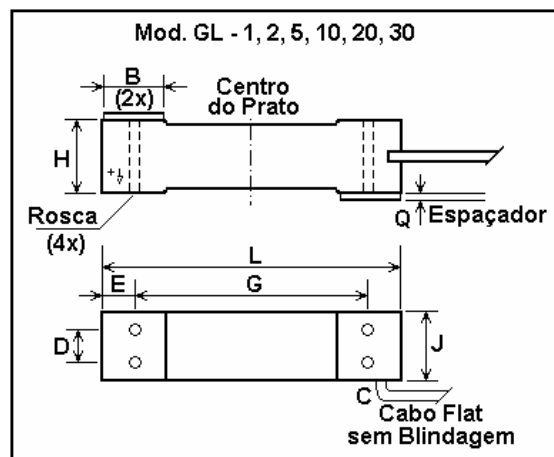
Embaladoras

Ensacadeiras leves

FIGURA 7 – Célula de carga Modelo GL - Alfa instrumentos para 10 kg

**Tabela 1 - Especificações da Célula de carga Modelo GL :**

Capacidade Nominal kg	1,2,5,10,20,30
Material	Alumínio anodizado
Sensibilidade mV/V	2 +/- 10%
Erro combinado % saída nominal	<0,03
Creep à capacidade nominal % saída nominal	20 min:<0,03 8hs:<0,05
Zero inicial % saída nominal	+/- 1
Temperatura de trabalho útil 0 C	-5 a +60
Temperatura de trabalho compensada 0 C	0 a +50
Erro excentricidade conforme OIML	>3000 div.
Efeito da temperatura ppm/ o C da saída nominal	No zero: <30 Na calibração: <10
Máx.sobrecarga s/ alterações % capacidade nominal	150
Sobrecarga de ruptura % capacidade nominal	300
Excitação VCC ou VCA	máxima: 15 recom.: 10
Resistência elétrica entrada - ohms	405 +/-10
Resistência elétrica saída - ohms	350 +/-1
Resistência de isolamento (50 VCC máx.) megaohms	>5000
Deflexão máxima mm a capacidade nominal	<1
Grau de proteção (IEC 529)	IP67
Plataforma máxima mm	200 X 200 270 X 270



(mm)

modelo	B	C(mm)	D	E	F	G	H	J	L	P	Q	Rosca	Torque (kgm)
GL - 5, 10, 20, 30	25	0.5	15	6	--	106	24	30	130	--	3	M6x1	1.67

FIGURA 8 –Dimensões de Célula de carga Modelo GL - Alfa instrumentos para 5, 10, 20, 30, 50 kg

## **Apêndice 2 - INCERTEZAS EM MEDIÇÕES ANALÍTICAS**

### **Introdução:**

Os conceitos contemplam os casos mais comuns e tem como principais bases as duas referências clássicas em Cálculos de Incertezas:

- Guia EURACHEM / CITAC - Determinando a Incerteza na Medição Analítica
- GUM - Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement)

### **Porque calcular a incerteza de uma medição analítica?**

Seguem para suas reflexões alguns motivos:

Os resultados analíticos não são perfeitos;

O termo “Incerteza de medição” é utilizado para expressar este desvio em relação à perfeição;

Os resultados devem ser adaptados às necessidades pois uma grande exatidão tem um custo;

Muitas análises são realizadas para verificar se limites não são ultrapassados; se não se conhece a incerteza da medição analítica, as tomadas de decisão podem ficar totalmente errôneas, por exemplo, nos campos:

econômico (aceitabilidade de um produto);

legal;

da saúde;

A comparabilidade de resultados só é possível se for conhecida a incerteza da medição analítica, indispensável nesta era de globalização.

### **Definições**

Seguem apenas as definições as mais importantes dentro do contexto da determinação de incerteza de medição. Todas as definições seguintes constam do VIM (Vocabulário Internacional de Metrologia) :

**Ajuste** (de um instrumento de medição)

Operação destinada a fazer com que um instrumento de medição tenha desempenho compatível com o seu uso.

**Calibração**

Conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um instrumento de medição ou sistema de medição ou valores representados por uma medida materializada ou um material de referência, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões.

**Correção**

Valor adicionado algebricamente ao resultado não corrigido de uma medição para compensar um erro sistemático.

**Desvio padrão experimental**

Para uma série de "n" medições de um mesmo mensurando, a grandeza "s" que caracteriza a dispersão dos resultados é dada pela fórmula:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

, em que:  $x_i$  representa o resultado da "iésima" medição e  $\bar{x}$  representa a média aritmética dos "n" resultados considerados.

**Erro aleatório**

Resultado de uma medição menos a média que resultaria de um infinito número de medições do mesmo mensurando efetuadas sob condições de repetitividade.

**Erro relativo**

Erro da medição dividido por um valor verdadeiro do objeto da medição.

**Erro sistemático**

Média que resultaria de um infinito número de medições do mesmo mensurando, efetuadas sob condições de repetitividade, menos o valor verdadeiro do mensurando.

**Grandeza de influência**

Grandeza que não é o mensurando, mas que afeta o resultado da medição deste.

**Incerteza de medição**

Parâmetro, associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentadamente atribuídos a um mensurando.

**Mensurando**

Objeto da medição. Grandeza específica submetida à medição.

**Repetitividade** (de resultados de medições)

Grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando efetuadas sob as mesmas condições de medição.

**Reprodutibilidade** (dos resultados de medição)

Grau de concordância entre os resultados das medições de um mesmo mensurando efetuadas sob condições variadas de medição.

**Especificar o mensurando :**

Declarar o que está sendo medido, se for o caso mostrando a equação ou equações sucessivas entre o mensurando e as grandezas de entrada, passando por todas as fases intermediárias tais como preparação de solução padrão ou de trabalho, diluição e/ou padronização desta solução, etc.:

§ acompanhando e respeitando as informações do(s) procedimento(s) que descrevem o método analítico;

§ mostrando claramente as unidades utilizadas na(s) relação(ões), o que acaba constituindo uma forma de verificar esta(s) equação(ões).

**Identificar as fontes de incerteza :****1 - Elaborar uma lista extensa de fontes de incerteza :**

- sem, nesta etapa, se preocupar com a sua quantificação;
- iniciando, se houver, com a equação básica utilizada para o cálculo do mensurando, e acrescentando parâmetros que não aparecem explicitamente na equação do mensurando como, por exemplo :

- o Amostragem ;
- o Preparação da amostra ;
- o Materiais de referência ;
- o Calibração de instrumentos ;
- o Dados do fabricante do instrumento :

§ Linearidade;

§ Circuito eletrônico;

§ Compensação de temperatura;

§ Medição de temperatura;

§ Diferença de altitude;

§ Umidade;

§ Calibração;

§ Resolução.

**2. Montar as ramificações principais do diagrama de Ishikawa :**

Utilizar o diagrama de Ishikawa para representar graficamente estas fontes de incerteza. Os termos da equação formarão algumas das ramificações principais do diagrama, ao qual serão acrescentadas eventuais ramificações correspondendo a, por exemplo, alguns dados de incerteza referentes aos parâmetros listados acima.

**3. Acrescentar qualquer outro fator ao diagrama, considerando cada etapa do método :**

Evoluir em direção às extremidades das ramificações a partir dos efeitos principais.

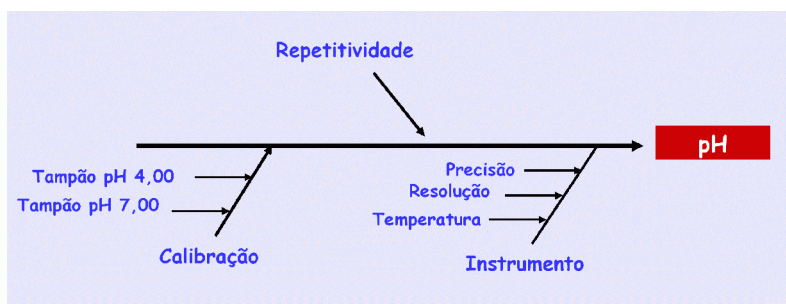
Para cada ramificação, acrescentar fatores contributivos até os efeitos se tornarem desprezíveis.

#### **4. Resolver as duplicações e reorganizar o diagrama :**

A resolução destas duplicações (exatamente o mesmo efeito encontrado duas ou mais vezes no diagrama) deve ser muito criteriosa pois, nesta etapa, um profundo conhecimento da técnica analítica pode ser necessária. As duplicações são resolvidas principalmente de 3 maneiras diferentes:

- a) Os efeitos se anulam (por exemplo, alguma tendência de uma balança que se repete e se anula quando de duas pesagens sucessivas para chegar a uma diferença de peso) : reorganizar o diagrama, eliminando estes efeitos;
- b) Os efeitos são independentes entre si quanto à influência sobre o mensurando : os efeitos permanecem, cada um com sua individualidade;
- c) Existe uma interdependência entre os efeitos : analisar como reagrupá-los, eliminando a duplicidade ao reorganizar o diagrama.

## 5. Exemplo de diagrama de ISHIKAWA :



### Quantificar os componentes de incerteza :

#### Tipos de componentes de incerteza :

Os componentes de incerteza são de 2 tipos:

**Tipo A** São aqueles que são avaliados através de uma série de medições repetidas, utilizando métodos estatísticos.

**Tipo B** São aqueles que são avaliados através de outros meios que não a análise estatística de séries de observações.

#### Obedecer ao roteiro seguinte:

- 1) Quantificar o componente de incerteza TIPO A por um estudo de repetitividade aplicado na determinação do mensurando;
- 2) Quantificar os componentes TIPO B e, se necessário, outros componentes de tipo A.

### 1. Quantificação do componente de incerteza tipo A por estudo de repetitividade aplicado na determinação do mensurando

A repetitividade constituirá uma das ramificações do diagrama de Ishikawa

#### 1.1 Um estudo de repetitividade deverá comportar no mínimo 10 medições em condições de repetitividade que incluem :

- § Mesmo procedimento de medição;
- § Mesmo observador;
- § Mesmo instrumento de medição, utilizado nas mesmas condições;
- § Mesmo local;

§ Repetição em curto período de tempo.

### 1.2. Escolha do valor da medição para o estudo de repetitividade e para a calibração

Para aprimorar o valor da incerteza, quando do estudo de repetitividade e quando da calibração, o mensurando deverá ser escolhido de tal maneira que o valor medido seja o mais próximo possível da faixa de trabalho ou numa média das faixas nos ensaios normalmente realizados.

Caso seja encontrado em um ensaio um valor significativamente diferente daquele escolhido para a repetitividade e para a calibração, deverá ser feita uma análise crítica para verificar a eventual conseqüência de tal diferença, frente às incertezas normalmente encontradas e às especificações do mensurando.

### 1.3. Cálculo da média aritmética ou média dos valores lidos individuais observados:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j$$

onde:  $n$  é o número de valores lidos;

$q_j$  são os valores individuais observados;

### 1.4. Cálculo do desvio-padrão experimental:

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2}$$

onde:  $q_j$  são os valores individuais observados;

$\bar{q}$  é a média de valores individuais observados;

$n$  é o número de valores observados.

O desvio-padrão experimental caracteriza a variabilidade dos valores  $q_j$  observados ou, mais especificamente, sua dispersão em torno da média.

### 1.5. Cálculo do desvio-padrão experimental da média, ou seja da incerteza padrão associada à média:

$$u(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}}$$

Esta corresponde à incerteza do tipo A.

### 2. Quantificação do componente da incerteza do tipo B

Avalia-se as incertezas padrão associadas aos parâmetros individuais de entrada.

Segue como calcular esta incerteza padrão a partir dos parâmetros das três mais importantes funções de distribuição e a indicação das circunstâncias nas quais cada uma deve ser usada.

Estas três funções de distribuição são as seguintes :

#### § **Distribuição normal** quando:

- Trata-se de um levantamento estatístico

Neste caso,

$$u = s$$

Onde: s é o desvio-padrão

- É dada uma incerteza sob a forma de um desvio-padrão

Teremos também :

$$u = s$$

- É dada uma incerteza sob a forma de um intervalo  $x \pm c$  com 95% (ou outro percentual) de confiança

Neste caso,

$$u = \frac{c}{2}$$

- para 95% de confiança :

□ para 99,7% de confiança:

$$u = \frac{c}{3}$$

§ **Distribuição retangular** para a grande maioria dos casos, particularmente quando um certificado ou outra especificação apresenta limites  $(x \pm a)$  sem especificar um nível de confiança e sem se ter conhecimento do formato da distribuição. Neste caso,

$$u = \frac{a}{\sqrt{3}}$$

§ **Distribuição triangular** caso for conhecido que os valores próximos de  $x$  são mais prováveis do que próximos dos limites, por exemplo quando de um erro de leitura de um instrumento analógico onde o ponteiro acaba ficando mais perto de uma divisão do que da outra.

$$u = \frac{a}{\sqrt{6}}$$

**Observação** - Antes da combinação comentada no passo seguinte, todas as contribuições de incerteza devem ser expressas como incertezas padrão, isto é, desvios-padrão conforme as regras acima.

### Calcular a incerteza combinada :

A incerteza padrão combinada  $u_c(y)$  é a raiz quadrada positiva da variância combinada  $u_c^2(y)$ , que é dada, se os parâmetros  $x_1, x_2, \dots$  forem independentes por :

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial y}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i), \text{ sendo que } y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \text{ e } \frac{\partial y}{\partial x_i} = c_i.$$

$c_i$  é denominado o coeficiente de sensibilidade e descreve como o valor de  $y$  varia com as mudanças nos parâmetros  $x_1, x_2, \text{etc...}$

Basicamente há 3 maneiras de calcular a incerteza combinada :

- Método por cálculo de derivadas;
- Método por combinação de incertezas absolutas e relativas;
- Método por simulação.

### 1 - Método por cálculo de derivadas

É o mais clássico dos métodos, digamos o mais elegante em termos matemáticos. Ele consiste em aplicar a expressão mostrada acima :

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial y}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)$$

Porém, este método apresenta, em alguns casos, uma grande dificuldade quando a expressão acima é complexa ou é praticamente impossível de ser calculada.

### 2 - Método por combinação de incertezas absolutas e relativas

Freqüentemente, as expressões para combinar as incertezas reduzem-se a formas muito mais simples com as duas regras abaixo :

- Para os modelos que incluem apenas uma soma ou diferença de grandezas, por exemplo  $y = ax_1 + bx_2 + \dots$ , a incerteza padrão combinada  $u_c(y)$  é dada por :

$$u_c(y) = \sqrt{u_{x1}^2 + u_{x2}^2 + \dots + u_{xN}^2}$$

, ou seja, uma soma quadrática de desvios-padrão absolutos. Explicando de uma outra forma, quando a incerteza sobre um parâmetro é expressa diretamente em termos do seu efeito sobre  $y$ , o coeficiente de sensibilidade

$$\frac{\partial y}{\partial x_i} = c_i.$$

é igual a 1,0.

- Para os modelos que incluem apenas um produto ou quociente, por

$$y = \frac{ax_1 \times bx_2}{cx_3 \times \dots \times zx_N}$$

exemplo  $y = \frac{ax_1 \times bx_2}{cx_3 \times \dots \times zx_N}$ , a incerteza padrão combinada  $u_c(y)$  é dada por :

$$u_c(y) = y \sqrt{\left(\frac{u_{x1}}{x_1}\right)^2 + \left(\frac{u_{x2}}{x_2}\right)^2 + \left(\frac{u_{x3}}{x_3}\right)^2 + \dots + \left(\frac{u_{xN}}{x_N}\right)^2}$$
 onde  $\left(\frac{u_{xN}}{x_N}\right)$  etc... são as incertezas nos parâmetros, expressas como desvios-padrão relativos.

□ Para fins de combinação dos componentes de incerteza, é mais conveniente decompor o modelo matemático original em expressões consistindo unicamente de operações cobertas por uma das regras acima. Por exemplo, a

expressão  $\frac{(ax_1 + bx_2)}{(cx_3 + dx_4)}$  deve ser decomposta em dois elementos  $(ax_1 + bx_2)$  e  $(cx_3 + dx_4)$ .

As incertezas intermediárias para cada um desses elementos podem então ser calculadas usando a primeira regra acima.

Elas são combinadas usando a segunda regra para chegar à incerteza padrão combinada.

### 3 - Método por simulação

Este método permite calcular a incerteza combinada sem nenhum cálculo de derivada e de uma maneira simples e pode ser utilizado desde que  $y=f(x_i)$  seja linear em relação a  $x_i$  ou que  $u(x_i)$  seja pequeno em relação a  $x_i$ .

É aconselhável utilizar uma planilha tipo Excel :

	A	B	C	D	E
1		$u_{x1}$	$u_{x2}$	$u_{x3}$	$u_{x4}$
2					
3	$x_1$	$X_1=x_1 + u_{x1}$	$x_1$	$x_1$	$x_1$
4	$x_2$	$x_2$	$X_2=x_2 + u_{x2}$	$x_2$	$x_2$
5	$x_3$	$x_3$	$x_3$	$X_3=x_3 + u_{x3}$	$x_3$
6	$x_4$	$x_4$	$x_4$	$x_4$	$X_4=x_4 + u_{x4}$
7					
8	$y=f(x_1,x_2,...)$	$y_1=f(X_1,x_2,...)$	$y_2=f(x_1,X_2,...)$	$y_3=f(...,X_3,x_4)$	$y_4=f(...,x_3,X_4)$
9		$\Delta y_1= y_1-y $	$\Delta y_2= y_2-y $	$\Delta y_3= y_3-y $	$\Delta y_4= y_4-y $
10	$(u_y)^2$	$(\Delta y_1)^2$	$(\Delta y_2)^2$	$(\Delta y_3)^2$	$(\Delta y_4)^2$
11	$u_y$				
12					

Sendo  $y=f(x_1,x_2,...)$ , pode-se calcular a incerteza combinada a partir das incertezas-padrão  $u_{x_n}$ . Na planilha exemplo acima, temos 4 componentes :  $x_1$  a  $x_4$ .

1) Na linha 1, coloca-se as incertezas-padrão, respectivamente nas colunas B,C,D e E

2) Nas células A3 a E6, coloca-se os valores seguintes :

- \_ Na linha 3 :  $x_1$ , com a exceção da célula B3 onde coloca-se  $X_1=(x_1 + u_{x1})$
  - \_ Na linha 4 :  $x_2$ , com a exceção da célula C4 onde coloca-se  $X_2=(x_2 + u_{x2})$
  - \_ Na linha 5 :  $x_3$ , com a exceção da célula D5 onde coloca-se  $X_3=(x_3 + u_{x3})$
  - \_ Na linha 6 :  $x_4$ , com a exceção da célula E6 onde coloca-se  $X_4=(x_4 + u_{x4})$
- 3) Nas células A8 a E8, coloca-se a fórmula representando o cálculo de  $y=f(x_1,x_2,\dots)$
- 4) Nas células B9 a E9, calcula-se  $x_n$  referente aos valores absolutos das diferenças entre  $y_n$  e  $y$ .
- 5) Nas células B10 a E10, calcula-se  $(x_n)^2$ .

$$(\Delta y)^2 = \sum_1^n (\Delta x_n)^2$$

- 6) Na célula A10, calcula-se  $(\Delta y)^2 = \sum_1^n (\Delta x_n)^2$ , sendo que, neste exemplo,  $n=4$ .
- 7) Finalmente, na célula A11, calcula-se a incerteza combinada

$$(\Delta y) = \sqrt{\sum_1^4 (\Delta x_n)^2}$$

Ao utilizar este método de simulação, é recomendável antes de aplicá-lo na rotina de um cálculo de incerteza combinada, verificar o seu resultado, comparando-o com o método matemático ou com o método de combinação de incertezas absolutas e relativas. Diferenças podem surgir e precisam ser avaliadas.

Observação : estas regras de propagação das incertezas descritas acima aplicam-se tanto a incertezas de tipo A quanto aos componentes de incerteza de tipo B.

### Calcular a incerteza expandida :

Esta fase corresponde, conforme equação abaixo, em multiplicar a incerteza padrão combinada pelo fator de abrangência  $k$  escolhido a fim de obter uma incerteza expandida. A incerteza expandida fornece um intervalo que abrange uma grande fração da distribuição de valores que podem razoavelmente ser atribuídos ao mensurando.

Ao adotar o nível de confiança de 95,45 % ( $\approx 95\%$ ),  $k$  será igual a 2 para quase todos os fins.

Porém , quando o número de graus de liberdade for pequeno, este valor de  $k$  deverá ser calculado, devido ao valor  $k=2$ , nestes casos, ser insuficiente.

Isto acontece na prática quando a contribuição dos componentes de tipo A é significativa em relação à incerteza combinada.

### 1. Calcular o grau de liberdade efetivo

Para calcular o grau de liberdade efetivo, que é o número de graus de liberdade associado à incerteza padrão combinada, utiliza-se a equação de Welch-Satterthwaite :

$$u_{eff} = \frac{(uc)^4}{\sum_{i=1}^n \frac{(u_i)^4}{u_i}}$$

onde:

- $n$  = nº de medições efetuadas;
- $\nu_i$  = nº do grau de liberdade de cada uma das fontes de incerteza de tipo A e B;
- $u_i$  = incerteza padrão de cada uma das fontes de incerteza de tipo A e B;
- $uc$  = incerteza combinada.

**Observação 1:**  $\nu_i$  será igual a  $(n - 1)$ ,  $n$  sendo o número de valores observados.

**Observação 2:** Quando não podemos saber o nº de medições realizadas para a obtenção de determinada incerteza padrão, o grau de liberdade será:  $\nu_i = \infty$ .

### 2. Determinação do fator de abrangência

Para atingir um certo nível de confiança, a incerteza padrão combinada ( $uc$ ) que corresponde apenas a um desvio- padrão, deve ser multiplicada por um coeficiente numérico, o coeficiente de Student, denominado fator de abrangência.

Conforme já mencionado acima, ao adotar o nível de confiança de 95,45 % ( $\approx 95\%$ ),  $k$  será igual a 2 para quase todos os fins.

Porém , quando o número de graus de liberdade for pequeno, este valor de  $k$  deverá ser calculado, devido ao valor  $k=2$ , nestes casos, ser insuficiente.

**Tabela de Student para 95,45 % de confiança :**

ueff	t95(u)	ueff	t95(u)	ueff	t95(u)
1	13,97	10	2,28	35	2,07
2	4,53	12	2,23	40	2,06
3	3,31	14	2,20	45	2,06
4	2,87	16	2,17	50	2,05
5	2,65	18	2,15	60	2,04
6	2,52	20	2,13	80	2,03
7	2,43	25	2,11	100	2,02
8	2,37	30	2,09	>100	2,00

Por esta tabela, o grau de liberdade efetivo ueff leva diretamente ao valor de t95(u) ou ainda  $k_{95}$ .

Para calcular a incerteza expandida, multiplica-se a incerteza combinada pelo fator k :

$$U = k_{95} \cdot u_c$$

onde:

$k_{95}$  = fator de abrangência de nível de confiança de 95 %.

$u_c$  é a incerteza combinada

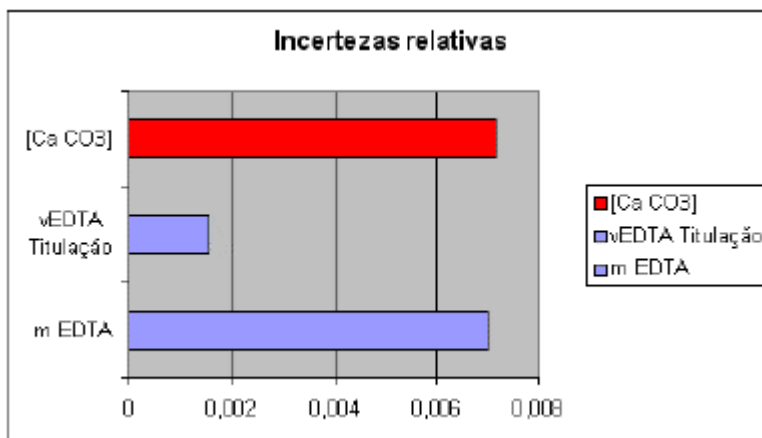
#### **Apresentação dos resultados :**

$$\bar{q} \pm u$$

Acrescentar a observação de que a incerteza expandida relatada é baseada em uma incerteza padrão combinada multiplicada por um fator de abrangência correspondendo a um nível de confiança de 95 %.

#### **Realizar a análise de contribuições :**

Se julgar pertinente, por exemplo em caso de incerteza combinada (e conseqüentemente expandida) bastante significativa, realizar uma análise de contribuições de incerteza (comparação entre os componentes), baseada em gráficos retratando estas contribuições, por exemplo :



Nesta análise, serão analisadas sucessivamente as contribuições as mais significativas até estas se tornarem desprezíveis

### Regras de arredondamento :

Há basicamente duas regras possíveis de serem adotadas:

1) a mais encontrada em normas (incluindo a NBR 5891 – 1977 - Regras de arredondamento na numeração decimal):

- quando o algarismo imediatamente seguinte ao último algarismo a ser conservado é inferior a 5, este último algarismo a ser conservado permanece sem modificação;
- quando o algarismo imediatamente seguinte ao último algarismo a ser conservado é superior a 5 ou, sendo 5, é seguido de, no mínimo, um algarismo diferente de zero, este último algarismo a ser conservado é aumentado de 1 unidade;
- quando o algarismo imediatamente seguinte ao último algarismo a ser conservado é igual a 5 seguido de zeros, este último algarismo a ser conservado é arredondado para o número par mais próximo. Conseqüentemente, o último algarismo a ser conservado :
  - i. se for ímpar, aumenta uma unidade;
  - ii. se for par, permanece sem modificação.

2) a mais simples, talvez a mais lógica :

- quando o algarismo imediatamente seguinte ao último algarismo a ser conservado é inferior a 5, este último algarismo a ser conservado permanece sem modificação;
- quando o algarismo imediatamente seguinte ao último algarismo a ser conservado é igual ou superior a 5, este último algarismo a ser conservado é aumentado de 1 unidade.