**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Sistema de aquisição de dados utilizando telemetria: aplicação
em secador solar de produtos agrícolas**

Luciano Roberto da Silveira

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre
em Ciências. Área de concentração: Física do Ambiente
Agrícola

**Piracicaba
2011**

Luciano Roberto da Silveira
Bacharel em Ciências dos Alimentos

**Sistema de aquisição de dados utilizando telemetria: aplicação em secador
solar de produtos agrícolas**

Orientador:
Prof. Dr. **SERGIO OLIVEIRA MORAES**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Física do
Ambiente Agrícola

**Piracicaba
2011**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Silveira, Luciano Roberto da

Sistema de aquisição de dados utilizando telemetria: aplicação em secador solar de produtos agrícolas / Luciano Roberto da Silveira. - - Piracicaba, 2011.
106 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2011.

1. Energia solar 2. Secadores 3. Sistema de aquisição de dados 4. Produtos agrícolas 5. Telemetria I. Título

CDD 631.56
M827s

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

*Aos meus pais, Diogenon e Luiza, pelo amor,
paciência, dedicação e motivação; a quem devo, abaixo
de Deus, a minha existência.*

*Aos meus irmãos, Luiz Ricardo e Viviane, que
estiveram sempre presentes em todas as jornadas.*

*Ao meu sobrinho Pedro Henrique, o mais novo membro
da família.*

*Com amor, **DEDICO***

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo entendimento e equilíbrio em todos os momentos.

A Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", pela oportunidade da realização do mestrado e pela estrutura disponibilizada.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro oferecido para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Sergio Oliveira Moraes, pelos ensinamentos, orientação, paciência, amizade e dedicação que sempre demonstrou durante este processo, acompanhando de perto as atividades desenvolvidas e dando liberdade de criação; bem como apoio nos momentos difíceis.

À Prof.^a Marta Helena Fillet Spoto, do Departamento de Agroindústria, Alimentos e Nutrição da ESALQ/USP, pela atenção dispensada a este trabalho e por disponibilizar o espaço para instalação do sistema desenvolvido. À equipe de apoio técnico do mesmo departamento, pelo auxílio na instalação do secador solar em campo e instalações elétricas.

A Antonio Pires de Camargo, pela amizade e inestimável contribuição prestada durante todo o desenvolvimento do circuito eletrônico. Pela dedicação e conhecimentos compartilhados nesse produtivo trabalho em equipe, dando condições para que o resultado se tornasse muito mais robusto. A ele e a nosso amigo Marinaldo, pelas várias sugestões durante o projeto e pelos momentos de descontração. Agradeço também à toda sua equipe de apoio do departamento, incluindo funcionários, alunos e estagiários, por terem contribuído na consecução deste trabalho.

Ao amigo Jorge Alexandre Wiendl, pela troca de idéias em todas as etapas do trabalho; bem como sua participação substancial no desenvolvimento do *software* de aquisição de dados, outro trabalho em equipe que aumentou a robustez do projeto. A ele e ao Eduardo Bonilha, pelas muitas dicas de programação e de ferramentas, bem como pelos momentos de descontração e bom-humor.

Aos amigos de sala Neilo, Marcelo e Dirceu, pela ajuda e agradável convivência. A eles e a todos os amigos, professores e funcionários do departamento, pela convivência, troca de experiências, e por formarem um ambiente de camaradagem e bom-humor.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP pelo conhecimento transmitido, bem como troca de idéias e sugestões.

A Alexsandro Brito e Jaedson Mota pela amizade duradoura e pelos desafios compartilhados durante a execução de seus trabalhos, lançando as sementes para muitas das idéias aqui desenvolvidas. A eles também sou grato pelo apoio e incentivo nos momentos difíceis.

Aos amigos Marcos Alex e Jorge Wiendl, por terem me apresentado a ferramenta $\text{\LaTeX}$, utilizada na edição deste documento e possibilitando uma qualidade tipográfica peculiar.

A Iberê Spadoto, colega de turma da escola de música e programador, pelas dicas de envio de *SMS* via *software*, utilizando *Web services*, que possibilitou a implementação de um interessante sistema de alerta.

Ao amigo Fábio Koga, graduando em Ciências dos Alimentos, pela ajuda com a preparação dos sensores e instalação do circuito no secador em campo, bem como sua dedicação no teste operacional com tomate cereja e a manutenção do secador solar.

Aos secretários do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP, Fernando Novello, Angela Derigi e Francisco Dias, pela competência e paciência que muito facilitaram o meu caminho.

A todos os que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho se tornasse cada vez melhor.

“Não é o crítico que importa, nem aquele que mostra como o homem forte tropeça, ou onde o realizador das proezas poderia ter feito melhor. Todo o crédito pertence ao homem que está de fato na arena; cuja face está arruinada pela poeira e pelo suor e pelo sangue; aquele que luta com valentia; aquele que erra e tenta de novo e de novo; aquele que conhece o grande entusiasmo, a grande devoção e se consome em uma causa justa; aquele que ao menos conhece, ao fim, o triunfo de sua realização, e aquele que na pior das hipóteses, se falhar, ao menos falhará agindo excepcionalmente, de modo que seu lugar não seja nunca junto àquelas almas frias e tímidas que não conhecem nem vitória nem derrota. ”

Teddy Roosevelt, presidente americano, aos franceses
em Sorbonne, Paris, em 23 de abril de 1910

SUMÁRIO

RESUMO	13
ABSTRACT	15
LISTA DE FIGURAS	17
LISTA DE TABELAS	21
1 INTRODUÇÃO	23
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 A secagem como método de conservação de alimentos	25
2.1.1 Métodos de secagem e a secagem solar	27
2.1.2 Limitações da secagem solar	28
2.2 Secadores solares	28
2.2.1 Constituição dos secadores solares	29
2.2.2 Classificação de secadores solares	29
2.3 Secador solar de convecção natural misto	32
2.4 Conceitos do processo de secagem	33
2.4.1 Conteúdo de água	33
2.4.2 Água nos alimentos	34
2.4.3 Atividade de água	35
2.4.4 Estabilidade de alimentos e atividade de água	38
2.4.5 Isotermas de sorção	38
2.4.6 O processo de secagem	40
2.5 Sistema de aquisição de dados	44
2.5.1 Sensores	45
2.5.2 Condicionamento de sinal	45
2.5.3 Processamento de sinal e <i>software</i>	46
2.5.3.1 Conversão analógico-digital	47
2.5.3.2 <i>Software</i> de aquisição de dados	47
2.5.4 Apresentação dos dados	48
2.6 Acurácia e erro nas medições	48
2.7 Telemetria por radiofrequência	49

2.8	Protocolo ZigBee	50
2.9	Especificações de alguns componentes	51
2.9.1	Amplificadores operacionais <i>rail-to-rail</i>	51
2.9.2	Sensor de temperatura LM35	51
2.9.3	Sensor de umidade relativa HIH-4000	52
2.9.4	Módulo XBee TM ZB	53
2.9.5	Microcontrolador PIC18F4550	54
3	MATERIAL E MÉTODOS	57
3.1	Projeto e construção do secador solar de convecção natural misto	57
3.2	Teste operacional do secador solar	61
3.3	Desenvolvimento do sistema de aquisição de dados (SAD)	62
3.3.1	Protótipo do <i>hardware</i> do transmissor	62
3.3.1.1	Circuito analógico	62
3.3.1.2	Circuito digital	65
3.3.1.3	Montagem em caixa selada	66
3.3.2	<i>Software</i> embarcado	67
3.3.3	Protótipo do <i>hardware</i> do receptor	69
3.3.4	Desenvolvimento do <i>software</i> para aquisição de dados	71
3.4	Testes preliminares do SAD	72
3.5	Instalação do SAD em campo	72
3.6	Teste do SAD em campo	75
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
4.1	Avaliação do secador solar	77
4.2	Testes preliminares do SAD	78
4.2.1	Verificação do cartão SD	79
4.2.2	Sensores de temperatura	82
4.3	<i>Software</i> de aquisição de dados	85
4.4	Testes do SAD em campo	89
5	CONCLUSÕES	95
5.1	Secador solar de convecção natural misto	95

	11
5.2 Sistema de aquisição de dados utilizando telemetria	95
REFERÊNCIAS	97
APÊNDICES	103

RESUMO

Sistema de aquisição de dados utilizando telemetria: aplicação em secador solar de produtos agrícolas

A secagem para conservação de produtos agrícolas e alimentícios é feita geralmente com emprego de eletricidade ou combustível fóssil, que incrementa o custo do produto final. Dessa forma, faz-se necessário o desenvolvimento de sistemas que utilizam energia renovável, como a solar, de modo a reduzir custos sem prejuízo na qualidade do produto. Assim, um secador solar de convecção natural misto foi projetado e construído, bem como um sistema de aquisição de dados (SAD) utilizando telemetria, para monitorar temperatura e umidade relativa, ambas do ar, no interior do secador. Para o projeto do secador pesquisou-se na literatura diversos modelos já estudados, a fim de reunir idéias para definição de um modelo particular. Após construído, um teste operacional foi realizado no secador, utilizando tomate cereja. O SAD foi construído em três partes: o transmissor com os sensores, protegido em caixa selada e afixado ao secador solar; o receptor, acoplado a um PC em local abrigado e cerca de 60 m distante do secador; e o *software* de aquisição de dados no PC. Os sensores foram fixados em três pontos diferentes do secador e protegidos com pedaços de tubo de PVC. O transmissor permite visualização instantânea de dados num LCD, gravação em cartão de memória SD e transmissão via RF para o receptor/PC. O *software* no PC é um aplicativo *web*, permitindo acesso externo e apresentando os dados em forma de gráficos, tabela ou ilustração, além de possuir um sistema de alerta via *SMS* para temperatura. Em testes de campo, o SAD apresentou bom funcionamento. Houve pouca perda de dados na transmissão, devido a veículos no caminho do sinal RF, e os sensores responderam corretamente às variações do ambiente. O secador apresentou boa resistência às intempéries, e o teste com tomate cereja mostrou que está operacional.

Palavras-chave: Secador solar; Energia renovável; Telemetria; Aquisição de dados

ABSTRACT

Telemetry data acquisition system: application in solar dryer of agricultural products

Drying for preservation of agricultural and food products is usually done with the use of electricity or fossil fuel, increasing the cost of the final product. Therefore, it is necessary to develop systems that use renewable energy such as solar, to reduce costs without impairing the quality of the product. Thus, a mixed-mode natural-circulation solar-energy dryer and a telemetry data acquisition system (DAS) to log air temperature and air relative humidity inside the dryer were designed and built. For the dryer design, in the literature several models already studied were investigated in order to gather ideas for defining a particular model. Once built, an operational test was conducted in the dryer, using cherry tomatoes. The DAS was built in three parts: the transmitter with the sensors, protected in a weather-resistant enclosure and fixed in the solar dryer; the receiver, coupled to a PC in a sheltered place; and the PC software data acquisition. The sensors were put at three different points in the dryer and fixed with PVC pipe pieces. The transmitter allows data instant viewing on an LCD, SD card logging and RF transmission to the receiver/PC. The PC software is a web application, allowing external access and presenting the data in graph, table or illustration, in addition to having an alert system to temperature by SMS. In field tests, the DAS was worked well. There was little data loss in transmission due to vehicles in the RF signal path, and sensors correctly responded to the changing environment. The dryer had good weather resistance, and the test with cherry tomatoes showed that it is operational.

Keywords: Solar dryer; Renewable energy; Telemetry; Data acquisition system

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos secadores solares (EKECHUKWU; NORTON, 1999) . . .	30
Figura 2 - Exemplos de secadores solares de convecção natural	31
Figura 3 - Princípio de funcionamento – secador solar misto	33
Figura 4 - Atividade de água e sua relação com a deterioração química e microbiana. Adaptado de Labuza et al. (1972)	39
Figura 5 - Típica isoterma de sorção mostrando a histerese. Adaptado de Labuza (1968)	40
Figura 6 - Conteúdo de água como função do tempo de secagem	41
Figura 7 - Curva de taxa de secagem sob condições de secagem constantes. Adaptado de Mujumdar (1997)	42
Figura 8 - Estrutura geral de um SAD (BENTLEY, 2005)	44
Figura 9 - Circuito integrado sensor de temperatura LM35, com encapsulamento TO-92	52
Figura 10 - Sensor HIH-4000, com diferentes configurações de espaçamento entre ter- minais	52
Figura 11 - Modelos de XBee TM ZB com diversas opções de antena	54
Figura 12 - Microcontrolador PIC18F4550 com encapsulamento do tipo PDIP	56
Figura 13 - Modelos diversos de secador solar misto encontrados na literatura	59
Figura 14 - Alguns dos esboços preliminares para o projeto do secador solar	60
Figura 15 - Vista em perspectiva de dois secadores solares, projetados com diferentes suportes para a chaminé	60
Figura 16 - Diagrama de blocos do SAD	63
Figura 17 - Montagem do circuito analógico	64
Figura 18 - Montagem do circuito digital	67
Figura 19 - Conjunto transmissor do SAD	68
Figura 20 - Fluxograma do <i>software</i> embarcado	70
Figura 21 - Fluxograma do <i>software</i> para aquisição de dados, parte 1/2	73
Figura 22 - Fluxograma do <i>software</i> para aquisição de dados, parte 2/2	74
Figura 23 - Pedacos de tubo de PVC preparados para proteção dos sensores	75
Figura 24 - Local onde foi instalado o PC com o receptor, para recepção dos dados à distância	76

Figura 25 - Secador solar em campo	77
Figura 26 - Teste operacional utilizando tomate cereja	78
Figura 27 - Gráficos de temperatura e umidade relativa do ar, obtidos durante o teste de bancada	80
Figura 28 - Aparato para manter um dos sensores aquecido, durante teste de bancada	81
Figura 29 - Curvas dos 3 sensores de umidade relativa, submetidos às mesmas condições, durante um teste de bancada	81
Figura 30 - Nomes de arquivos gravados no cartão SD pelo <i>software</i> embarcado, com cadeia de caracteres formada por data e hora de criação	81
Figura 31 - Conteúdo de um arquivo gravado no cartão SD	82
Figura 32 - Comportamento dos sensores de temperatura em teste de bancada	82
Figura 33 - Comportamento do sensor 3 após substituição do cabo	83
Figura 34 - Circuito R-C recomendado pelo fabricante (NATIONAL SEMICONDUCTOR, 2000)	83
Figura 35 - Comportamento do sensor 3 após colocar circuito R-C	84
Figura 36 - Comportamento do sensor 1 após substituir R no sensor 3	84
Figura 37 - Elemento sensor de temperatura com circuito R-C, feito de forma compacta	85
Figura 38 - Curvas de temperatura após colocar o circuito R-C nos 3 sensores	85
Figura 39 - Página para ativar a gravação dos dados recebidos via RF	86
Figura 40 - Visualização dos gráficos dos 6 sensores	87
Figura 41 - Gráfico em uma página HTML5	87
Figura 42 - Visualização da tabela contendo todos os dados acumulados	88
Figura 43 - Dados instantâneos indicados no secador solar	88
Figura 44 - Página para interromper o monitoramento e organizar os dados	89
Figura 45 - Arquivo mostrando perda de dados ou dados corrompidos, durante a re- cepção do sinal RF num teste em campo	90
Figura 46 - Variação diária da temperatura do ar de entrada, ar do coletor e ar da cabine	91
Figura 47 - Variação diária da umidade relativa do ar de entrada, ar do coletor e ar da cabine	91

Figura 48 -Variação diária da temperatura do ar de secagem, ar da chaminé e ar ambiente (EKECHUKWU; NORTON, 1997)	92
Figura 49 -Variação diária da umidade relativa do ar de secagem, ar da chaminé e ar ambiente (EKECHUKWU; NORTON, 1997)	92

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos módulos XBee TM ZB S2 e XBee-PRO TM ZB S2B (DIGI INC., 2011b)	55
---	----

1 INTRODUÇÃO

A preservação de alimentos é uma preocupação antiga do homem, que precisou desenvolver tecnologias para aumentar a vida-de-prateleira dos produtos, a fim de reduzir as perdas e combater a fome e a má nutrição, especialmente nas áreas com elevado índice de crescimento demográfico (CHITARRA; CHITARRA, 2005). Várias soluções foram encontradas ao longo do tempo, porém ainda hoje a perda de alimentos continua sendo um problema a ser resolvido em muitos lugares, por razões diversas.

No Brasil, bem como em outros países em desenvolvimento, a perda de alimentos é maior na pós-colheita, onde os índices podem alcançar valores da ordem de 30% ou mais da produção. Algumas razões para isso são o uso de tecnologias inadequadas de armazenamento e a falta de recursos humanos qualificados. Essas perdas são especialmente relacionadas com produtos altamente perecíveis, como as frutas e hortaliças, as quais não apenas são uma boa fonte de carboidratos, mas também um excelente suprimento de vitaminas e minerais (CHITARRA; CHITARRA, 2005).

A produção de frutas e hortaliças em nosso país ocorre principalmente em áreas de médio e pequeno porte, onde são comuns as perdas por conservação inadequada e preços incompatíveis de comercialização. Isso se agrava durante os “picos” de safra, onde os preços tendem a cair com o crescimento da oferta, prejudicando os fornecedores e produtores (INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS - ITAL, 2010). Assim, a conservação pós-colheita é um importante fator de contribuição para redução das perdas e aumento da rentabilidade do produtor, sobretudo na entressafra, aumentando dessa forma o suprimento de alimentos.

Dentre os vários métodos de conservação, a secagem é um dos mais antigos, e consiste basicamente na remoção da maior parte da água do tecido vegetal, o que prolonga consideravelmente a vida útil desses produtos. Além disso, com a retirada de água, o produto diminui em massa e volume, facilitando desse modo o transporte, embalagem e estocagem. Para o caso das frutas e hortaliças, a secagem pode ser utilizada de forma a conservar os excedentes de produção durante a safra, bem como agregar valor a esses produtos, que poderão ser comercializados nessa forma processada por um período maior.

Geralmente a operação de secagem emprega equipamentos que utilizam como

energia a eletricidade ou o gás. A energia solar na secagem de alimentos possibilita a diminuição do custo de processamento, uma vez que há abundância dessa forma de energia em nosso país durante quase todo o ano. Porém, para a secagem de certos tipos de alimento, ela ainda tem sido pouco utilizada, principalmente pela falta de conhecimento das condições de secagem, como a temperatura e a umidade, o que pode afetar a qualidade do produto final.

Nos últimos anos, contudo, a eletrônica e a computação têm mostrado um grande avanço, dando ferramentas para criação de sistemas versáteis em vários tipos de aplicações, como aquisição de dados e controle de processos industriais, monitoramento de condições ambientais, medições em geral, etc. Dessa forma, é possível construir sistemas de aquisição de dados adaptado especificamente à necessidade. Em secadores solares, um sistema de aquisição de dados faz-se importante para a monitoração de parâmetros como temperatura e umidade relativa do ar em seu interior, instruindo o produtor sobre as condições de secagem e auxiliando-o a realizar o manejo adequado do secador.

Utilizando um sistema de aquisição de dados adaptado a um secador solar, pode-se obter produtos de qualidade e com o mínimo custo de processamento, agregando valor, reduzindo perdas, aumentando a rentabilidade do pequeno produtor e o suprimento desse produto para o mercado consumidor.

Assim sendo, a proposta do trabalho foi o desenvolvimento, com tecnologia própria e a partir de literatura disponível na área, de um sistema de aquisição de dados utilizando telemetria, para um secador solar de produtos agrícolas. Esse equipamento visa servir como uma ferramenta para instruir o produtor sobre as condições de secagem, além de alertá-lo sobre alguma eventualidade que possa colocar em risco a qualidade dos produtos durante o processo de secagem. Mais especificamente, o trabalho teve como finalidades:

- ✓ Projeto e construção de um secador solar para produtos agrícolas;
- ✓ Projeto e construção de um sistema de aquisição de dados que utiliza telemetria, para monitorar umidade relativa e temperatura, ambas do ar, no interior do secador;
- ✓ Implementação de um mecanismo de alerta via *SMS*, para notificar o produtor no caso da temperatura exceder um valor predefinido;
- ✓ Avaliação do desempenho do sistema completo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os assuntos apresentados a seguir encontram-se divididos basicamente em três partes. Primeiramente é feita uma exposição sobre a secagem como método de conservação de alimentos, bem como o secador solar e seu funcionamento. Depois, são apresentados conceitos e ideias concernentes ao processo de secagem, necessários para uma melhor compreensão do problema a ser solucionado. Finalmente, será mostrada a estrutura e o funcionamento de um sistema de aquisição de dados, noções sobre telemetria via radiofrequência, bem como especificações de alguns componentes eletrônicos importantes para o desenvolvimento do trabalho.

2.1 A secagem como método de conservação de alimentos

Os processos de conservação de alimentos têm como objetivo comum estender sua vida de prateleira, permitindo a estocagem e distribuição. A primeira e mais danosa limitação da vida de prateleira é a atividade de microrganismos (KAREL, 1975b). O ambiente propício ao desenvolvimento e crescimento destes é criado pela água, um componente inerente aos alimentos (SPOTO, 2006). Por essa razão, vários métodos de conservação, como a secagem, são projetados para evitar a deterioração causada por microrganismos, reduzindo a disponibilidade de água. Além do crescimento microbiano, processos químicos e físicos podem ocorrer no alimento durante sua estocagem, os quais prejudicam sua qualidade. O controle da água disponível também afeta a taxa desses processos e pode contribuir para a conservação do alimento por mais tempo (KAREL, 1975b).

A secagem é provavelmente o mais antigo método de conservação de alimentos. Por muitos séculos, foi a única forma de prolongar a vida de prateleira de frutas e hortaliças, ao lado da salga para carnes e peixes (BARBANTI et al., 1994 apud EL-AOUAR, 2005). Sua origem é desconhecida, mas muitas de suas práticas têm atravessado gerações até os dias de hoje, e em alguns casos formam a base dos modernos processos de manufatura de alimentos. Tâmaras, figos, damascos e uvas secos ao sol já eram muito apreciados pelos habitantes aborígenes da bacia do mediterrâneo e Oriente Médio, assim como o mel selvagem, outra iguaria importante. A persistência do homem em procurar por coisas comestíveis certamente torna incontáveis as invenções e descobertas menores, que por tentativa e erro

gradualmente ampliaram a lista dos tradicionais métodos de processar alimentos. Acredita-se que o “chuño”, preparado a partir de batatas nativas nas montanhas andinas, pode ter sido inventado há 2.000 ou 3.000 anos, e é possivelmente o primeiro produto alimentício já processado pelo homem para estocagem durante os escassos meses de inverno e primavera. Afirma-se que a preservação doméstica de frutas, hortaliças e cogumelos por secagem teria sido comum em muitas culturas primitivas (VAN ARSDEL; COPLEY, 1963).

Além de estender a vida de prateleira, a secagem pode ser feita para alcançar um ou mais dos seguintes objetivos: obter a forma física desejável; obter cor, sabor ou textura desejável; reduzir o volume ou peso para o transporte; ou conseguir novos produtos que de outra forma não seria possível (MUJUMDAR, 1997).

De maneira geral, o processo de secagem consiste na remoção de água de um dado produto até uma concentração final, tal que seja assegurada a estabilidade microbiana, química e física durante a estocagem. A água é removida por vaporização, por meio do fornecimento de energia térmica ao material (LEWICKI; JAKUBCZYK, 2004).

No processo de secagem, o problema chave é a perda de qualidade dos materiais biológicos (i.e. gêneros alimentícios), pois estes são termicamente sensíveis, impondo restrições à operação de secagem. A qualidade pode ser considerada em termos de atributos sensoriais (e.g. sabor, textura, cor). Se por exemplo a cor não for aceitável ao consumidor, o produto será rejeitado, sem levar em conta o sabor ou a textura. Além disso, otimizar a interação entre qualidade do produto e eficiência da utilização de energia é um desafio inevitável. Ademais, o uso mínimo de energia nem sempre é a solução ótima, devido às condições de custo do capital (BENALI; AMAZOUZ, 2006).

Assim, o principal objetivo de qualquer operação de secagem é a obtenção de um produto seco com a qualidade desejada a um mínimo custo e máximo rendimento, e a otimização constante desses fatores. Durante a secagem, o produto é submetido a diversas mudanças químicas, físicas e biológicas. A garantia da qualidade está em fazer com que essas mudanças resultem num produto final com as especificações desejadas (CHUA et al., 2001). Para tal, deve ser levado em conta todo o processo de manufatura do produto. Desde a matéria-prima, produto intermediário, até características e especificações do produto final precisam estar claramente definidos (VEGA-MERCADO; GÓNGORA-NIETO; BARBOSA-

CÁNOVAS, 2001).

2.1.1 Métodos de secagem e a secagem solar

Existem dois métodos de secagem: a natural, feita pelo sol ou vento; e a artificial, que necessita de fornecimento de energia diferente da solar (PARK; YADO; BROD, 2001). A secagem natural pode ser feita de duas formas: ao ar livre, que é utilizada desde os tempos antigos, chamada de *secagem ao sol*; ou com o uso de um equipamento, o secador solar, chamada nesse caso de *secagem solar*. O secador solar é usado para coletar a radiação do sol, com o propósito de mobilizar a energia radiativa para aplicação na secagem (SHARMA; CHEN; LAN, 2009).

Nos países em desenvolvimento, a secagem ao sol (ao ar livre) é com frequência o único método comercialmente viável para secagem de produtos agrícolas, devido à energia requerida estar prontamente disponível no local (radiação solar) e aos baixos custos de funcionamento (praticamente apenas mão-de-obra). Apesar de muito usada, a secagem ao sol apresenta algumas limitações: grande perda de produto decorrente de secagem inadequada, infestação por fungos e insetos, invasão por pássaros e roedores e danos devido às condições do tempo (EKECHUKWU; NORTON, 1999; IMRE, 2006).

A secagem solar apresenta várias vantagens sobre a tradicional secagem ao sol, dentre as quais podemos citar (EKECHUKWU; NORTON, 1999; IMRE, 2006):

- ✓ Requer uma área de terra menor para secar a mesma quantidade de produto que seria secado ao ar livre;
- ✓ A produção é relativamente maior e de qualidade, pois a infestação por fungos, insetos e roedores no produto durante a secagem é dificultada;
- ✓ O período de secagem é mais curto quando comparado com a secagem ao ar livre, o que permite um maior rendimento;
- ✓ O produto fica protegido da chuva;
- ✓ Comercialmente viável, i.e. possui custo de capital e de manutenção relativamente baixo, devido ao uso de materiais e mão-de-obra disponíveis no próprio local.

A secagem artificial é a que faz uso de secador convencional e é uma tecnologia relativamente recente. A fonte de energia é a eletricidade ou combustível fóssil, o que

incrementa o custo do produto final. Uma das aplicações é a secagem de produtos que requerem exposição curta ao ar de secagem, o que é conseguido com temperaturas mais altas (EKECHUKWU; NORTON, 1999; SHARMA; CHEN; LAN, 2009).

Segundo Ratti e Mujumdar (1997), o secador que utiliza energia solar, onde for possível seu emprego, geralmente proporciona a técnica de secagem mais custo-eficiente.

2.1.2 Limitações da secagem solar

Apesar das vantagens do uso da energia solar na secagem, há muitas dificuldades a serem superadas. Um problema básico é a natureza periódica da radiação solar; e mesmo estes períodos podem apresentar certas dificuldades, pois a intensidade da radiação incidente é uma função do tempo. Outro problema é causado pela baixa densidade de energia da radiação solar. Esses problemas requerem meios para sua solução, como: armazenagem de energia térmica, fonte de energia auxiliar, sistema de controle e coletores solares extensos. Assim, os custos de investimento podem ser consideráveis, e a energia solar na secagem só é economicamente viável se a finalidade puder ser combinada com as características da radiação solar. Uma baixa densidade de fluxo de energia de radiação solar implica que ela é particularmente apropriada em processos de secagem com baixa demanda de energia (IMRE, 2006).

2.2 Secadores solares

A fim de se obter os benefícios da energia gratuita e renovável provida pelo sol, muitos esforços têm sido feitos nos últimos anos no desenvolvimento de secadores solares para conservação de produtos agrícolas e florestais (IMRE, 2006). O objetivo de um secador é fornecer ao produto uma quantidade de energia térmica maior do que a disponível em condições ambientes, elevando de forma suficiente a pressão de vapor da água contida no produto; além de reduzir significativamente a umidade relativa do ar de secagem (EKECHUKWU; NORTON, 1999).

2.2.1 Constituição dos secadores solares

Segundo Imre (2006), os secadores solares apresentam as seguintes partes principais:

- ✓ Espaço de secagem, onde o material a ser secado é colocado e onde a secagem toma lugar;
- ✓ Coletor para converter a radiação solar em energia térmica;
- ✓ Fonte de energia auxiliar (opcional);
- ✓ Equipamento de transferência de energia térmica, para transferir energia térmica ao ar de secagem ou ao material;
- ✓ Meios para manter o ar de secagem em movimento;
- ✓ Unidade de armazenagem de energia térmica (opcional);
- ✓ Equipamento para controle e aquisição de dados (opcional);
- ✓ Ductos, tubos e outros aparatos.

2.2.2 Classificação de secadores solares

Vários são os critérios que podem ser utilizados na classificação de secadores solares, e essa classificação pode variar ligeiramente, dependendo do autor, como pode ser visto em Brenndorfer et al. (1985); Ekechukwu e Norton (1999); Imre (2006) e Sharma, Chen e Lan (2009). Segundo Ekechukwu e Norton (1999), os sistemas de secagem solar podem ser classificados primariamente de acordo com dois critérios: o modo pelo qual é gerado o fluxo de ar de secagem e a maneira pela qual a energia solar é utilizada. Em termos mais amplos, eles podem ser classificados pelo primeiro critério, em dois grupos principais (EKECHUKWU; NORTON, 1999; IMRE, 2006):

- ✓ Sistemas de secagem solar passivos (convencionalmente chamados de secadores solares de convecção natural); e
- ✓ Sistemas de secagem solar ativos (secadores solares de convecção parcialmente forçada, que utilizam uma ventoinha para fazer o ar passar pelo produto; também chamados de secadores solares híbridos).

Esses, por sua vez, podem ser subdivididos em três tipos de secadores solares, que variam de acordo com o arranjo físico dos componentes do sistema e o modo como a energia solar é utilizada: *integral ou direto*; *distribuído ou indireto*; e *misto*. Nessa classificação, o processo de aquecimento do produto pode envolver sua exposição direta à radiação solar; a passagem de ar pré aquecido através do produto; ou uma combinação de ambos, respectivamente (EKECHUKWU; NORTON, 1999).

As principais características dos diversos tipos de secadores solares são ilustrados na figura 1.

Figura 1 - Classificação dos secadores solares (EKECHUKWU; NORTON, 1999)

No secador do tipo integral ou direto, o produto é colocado em uma cabine de secagem com cobertura de material transparente, conferindo a isolamento necessária para o processo de secagem. A exposição direta à radiação solar realça a cor apropriada de maturação de frutos verdes por permitir, durante a desidratação, a decomposição de clorofila residual nos tecidos (EKECHUKWU; NORTON, 1997). Em tâmaras, a exposição à luz do sol é essencial para o desenvolvimento da cor requerida no produto seco; e em café arábica, o período de exposição à luz do sol é fator determinante para a formação de todo o sabor no grão torrado (BRENNDORFER et al., 1985).

Em secadores solares indiretos ou distribuídos, o produto é colocado em bandejas ou prateleiras perfuradas dentro de uma cabine de secagem opaca, e aquecido por circulação de ar quente proveniente do coletor solar. Devido ao fato da radiação solar não incidir diretamente no produto, a caramelização e dano por aquecimento localizado não ocorrem (EKECHUKWU; NORTON, 1997). Esses secadores também são recomendados para o caso de algumas frutas e hortaliças cujo conteúdo de ácido ascórbico do produto seco é consideravelmente reduzido pela exposição à luz do sol, e para retenção de cor em alguns produtos altamente pigmentados que são extremamente afetados pela exposição direta ao sol (BRENNDORFER et al., 1985).

Exemplos de secadores solares de convecção natural direto e indireto podem ser vistos na figura 2.

(a) Direto

(b) Indireto

Figura 2 - Exemplos de secadores solares de convecção natural

2.3 Secador solar de convecção natural misto

O secador solar misto combina as características de dois tipos de secadores: o direto e o indireto. Alguns trabalhos, como Zaman e Bala (1989) e Simate (2003) comparam esses tipos de secadores, sugerindo que o do tipo misto é o que apresenta melhor desempenho em termos de taxa de secagem e custo. Um modelo simples desse secador, como o descrito por Tripathy e Kumar (2009), consiste de um coletor solar plano conectado em série com uma câmara de secagem, como no tipo indireto. Um coletor é composto geralmente por uma placa metálica pintada de preto fosco, de modo a aumentar sua capacidade de absorção, coberta por uma placa de plástico ou vidro transparentes. Esta mesma cobertura encontra-se também na câmara de secagem, no caso do secador misto. Na câmara, o produto a ser secado é colocado numa bandeja de tela, como nos outros secadores.

O princípio de funcionamento do secador solar misto é mostrado na Figura 3. Uma parte da radiação solar incidente na cobertura de vidro é refletida de volta para a atmosfera e outra parte (cerca de 90%) é transmitida para dentro do secador. Parte dessa radiação transmitida é refletida pela superfície do produto, da câmara e da placa absorvedora, e outra parte é absorvida por essas superfícies. Devido à absorção da radiação solar, a temperatura do produto, da câmara e da placa absorvedora aumenta e começam a emitir radiação de comprimento de onda longo, cuja saída para a atmosfera é impedida pelas coberturas de vidro. Dessa forma, a temperatura do sistema fica mais alta, visto que a cobertura de vidro também reduz as perdas convectivas de energia térmica para o ambiente. Todavia, perdas convectivas e por evaporação ocorrem dentro da cabine a partir do produto aquecido. A água é retirada para fora do secador pelo ar que, após passar pelo coletor, entra pelo extremo inferior da cabine e escapa por outra abertura na parte de cima, como mostrado na Figura 3 (HINRICHS; KLEINBACH, 2003; SHARMA; CHEN; LAN, 2009).

De modo evidente, o posicionamento do secador, se feito de forma fixa, deve estar voltado para o norte geográfico, no caso de localidades situadas no hemisfério sul; pois a trajetória aparente do sol se dá de leste para oeste e assim o secador pode receber a maior parte da radiação diária. Quanto à inclinação do coletor solar, deve ser de tal forma que os raios de sol incidam o mais próximo da normal em relação ao plano do coletor. Dessa maneira, a inclinação do coletor em relação ao plano horizontal deve ser de 0° no verão (onde

Figura 3 - Princípio de funcionamento – secador solar misto

a radiação solar tende a incidir de forma perpendicular); na primavera e outono, a inclinação deve ter o mesmo valor da latitude local; e no inverno (trajetória solar diária mais inclinada para o norte) a inclinação segundo o ângulo da latitude local acrescido de aproximadamente 10° visa aumentar o rendimento do sistema no solstício de inverno (UNIVERSIDADE DO SOL, 2005).

Mujumdar (1997) afirma que um dos fatores mais importantes a ser considerado no projeto e operação de secadores de produtos biológicos é a sensibilidade ao calor, inerente aos alimentos. Sendo assim, é essencial assegurar que o material não irá exceder sua temperatura máxima permissível. Uma tabela contendo essas temperaturas, bem como o conteúdo de água inicial e final para alguns produtos pode ser encontrada em Fudholi et al. (2010).

2.4 Conceitos do processo de secagem

2.4.1 Conteúdo de água

Um dos parâmetros importantes do produto a ser seco é o seu conteúdo de água. O conteúdo de água é definido como a razão entre a quantidade de água no alimento

e a quantidade de sólidos, e é expresso como:

$$U = \frac{m - m_s}{m_s} \quad (1)$$

onde m é a massa total da amostra, m_s é a massa de sólidos secos, e U é o conteúdo de água expresso como *massa de água/massa de sólidos secos* (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996; LIBARDI, 2005).

O conteúdo de água total pode ser determinado por método gravimétrico. Considerando apenas a água que deixa a amostra, a porcentagem de água pode ser estimada pesando-se essa amostra e depois a secando até uma massa constante. No caso de alimento, é necessário um cuidado especial para evitar o endurecimento da superfície ou desintegração da amostra, de modo a não afetar os resultados. Estufas a vácuo são utilizadas na maior parte das determinações de conteúdo de água (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996).

2.4.2 Água nos alimentos

Não é o conteúdo de água que nos dá ideia de sua disponibilidade aos agentes deteriorantes, mas sim a sua condição no alimento. Muitas vezes um alimento com conteúdo de água de 30% tem menos água disponível que um alimento com 12%. Isso vai depender das condições em que a água está ligada aos componentes dos alimentos (FONSECA; CANTARELLI, 1984). Assim, é evidente que o conhecimento das propriedades e distribuição da água contida num alimento é mais importante do que simplesmente o conhecimento da quantidade total de água (BOBBIO; BOBBIO, 2001).

Com base no exposto, conclui-se que há pelo menos dois tipos de água num alimento: a *água livre* ou *não ligada* e a *água combinada* ou *ligada*. A *água livre* é definida como a água contida num alimento que se comporta como água pura. É fracamente ligada ao substrato, e funciona como solvente, permitindo o crescimento de microrganismos e reações químicas. Essa água é removida durante o período de velocidade constante da secagem, quando a natureza do alimento não tem grande efeito no processo. Já o termo *água combinada* é definido como a água que apresenta uma baixa pressão de vapor, baixa mobilidade, e

um ponto de congelamento extremamente reduzido quando comparado com a água pura. É fortemente ligada ao substrato e mais difícil de ser eliminada. Por não ser utilizável como solvente, não permite o desenvolvimento microbiano e retarda as reações químicas. As moléculas da água combinada têm propriedades cinéticas e termodinâmicas diferentes quando comparadas às moléculas de água livre (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996; BOBBIO; BOBBIO, 2001).

2.4.3 Atividade de água

O termo *atividade de água* foi introduzido na década de 50 para descrever o estado da água em produtos alimentícios, e é um fator chave no crescimento microbiano, produção de toxinas, e reações enzimáticas e não enzimáticas (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996).

A atividade de água é derivada dos princípios fundamentais da termodinâmica e físico-química. Indica a relação entre a água contida num alimento e a umidade relativa de equilíbrio da atmosfera circundante (VAN DEN BERG; BRUIN, 1981 apud BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996). A energia livre de Gibbs de um sistema ideal é definida como (LIBARDI, 2005):

$$G = E + PV - TS \quad (2)$$

onde S é a entropia, E é a energia interna do sistema, T é a temperatura absoluta, P é a pressão e V é o volume. A Equação (2) pode ser expressa numa forma diferencial para um sistema composto de várias substâncias, em função de T , P e n_i (moles de uma substância particular) como (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996):

$$dG = VdP - SdT + \sum \left(\frac{\partial G}{\partial n_i} \right)_{T,P,n_j} dn_i \quad (3)$$

onde $(\partial G / \partial n_i)_{T,P,n_j}$ é a energia livre de Gibbs molar parcial ou potencial químico da substância i (μ_i):

$$\mu_i = G_i = (\partial G / \partial n_i)_{T,P,n_j} \quad (4)$$

Dessa forma, o potencial químico representa a variação da energia livre do sistema com a variação do número de moles da substância i , e indica a tendência de escape dessa substância (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996; LIBARDI, 2005).

A equação (4) pode ser diferenciada em relação à P e escrita como (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996):

$$\left(\frac{\partial \mu}{\partial P}\right)_T = \frac{\partial}{\partial P} \left(\frac{\partial G}{\partial n_i}\right)_{T,P} = \frac{\partial}{\partial n_i} \left(\frac{\partial G}{\partial P}\right)_T = \left(\frac{\partial V}{\partial n_i}\right)_{T,P} = \bar{V}_i \quad (5)$$

onde $\bar{V}_i$ é o volume molar parcial considerando a equação dos gases ideais. Combinando as equações (4) e (5), o potencial químico pode ser expresso como:

$$d\mu_i = RT d(\ln P_i) \quad (6)$$

ou

$$\mu_i = \mu_i^o + RT \ln \left(\frac{P_i}{P_i^o}\right) \quad (7)$$

A equação (6) pode ser escrita para gases reais como:

$$d\mu_i = RT d(\ln f_i) \quad (8)$$

ou depois da integração como:

$$\mu_i = \mu_i^o + RT \ln \left(\frac{f_i}{f_i^o}\right) \quad (9)$$

onde μ_i^o ($J mol^{-1}$) e f_i^o são o potencial químico e a fugacidade (ou tendência de escape) da substância i no seu estado padrão. A atividade de uma substância pode ser expressa como:

$$a_i = \frac{f_i}{f_i^o} \quad (10)$$

então, a equação (9) se torna:

$$\mu_i = \mu_i^o + RT \ln(a_i) \quad (11)$$

na equação (10), em tratando-se de água, o subscrito é designado para a substância:

$$a_w = \frac{f_w}{f_w^o} \quad (12)$$

onde a_w é a atividade da água, ou tendência de escape da água no sistema dividido pela tendência de escape da água pura, sem raio de curvatura. Para fins práticos, como nas condições encontradas nos alimentos, a fugacidade é muito próxima da pressão de vapor ($f \approx P$), dessa forma (FONTANA JR., 2000):

$$a_w = \frac{f_w}{f_w^o} \approx \frac{P_w}{P_w^o} \quad (13)$$

O equilíbrio é obtido no sistema quando μ_i é o mesmo em qualquer região do sistema. O equilíbrio entre as fases líquida e de vapor implica que μ_i seja o mesmo em ambas as fases. Esse é o fato que permite a determinação da atividade de água de uma amostra pela medição da umidade relativa de equilíbrio da fase de vapor (FONTANA JR., 2000).

A atividade de água é definida como a relação entre a pressão de vapor de água em um dado material (P_w), e a pressão de vapor da água pura (P_w^o), à mesma temperatura. Quando o vapor e a temperatura de equilíbrio são obtidos, a atividade de água da amostra é igual à umidade relativa do ar circundante a essa amostra em um compartimento fechado. Multiplicando-se a atividade de água por 100, obtemos a umidade relativa de equilíbrio (URE) em porcentagem. Dessa forma (FONTANA JR., 2000; KAREL, 1975b):

$$a_w = \frac{P_w}{P_w^o} = \frac{URE(\%)}{100} \quad (14)$$

A atividade de água é a medida do estado de energia da água em um sistema. Existem vários fatores que a controlam, podendo ser agrupados em duas grandes categorias: efeito osmótico (referente às interações entre a água e os solutos, e a presença de uma

membrana semipermeável) e mátrico (concernente ao efeito de forças capilares) (FONTANA JR., 2000; BOBBIO; BOBBIO, 2001). Dessa forma, a água mostra-se “ligada” por forças de intensidades diferentes. A atividade de água é muitas vezes definida como teor de água “livre”, “não ligada” ou “disponível” num sistema. Embora esses termos sejam mais fáceis de conceituar, não são adequados para definir todos os aspectos do conceito de atividade de água (FONTANA JR., 2000).

2.4.4 Estabilidade de alimentos e atividade de água

O valor da atividade de água da água pura é 1, que é o valor máximo. Em alimentos com atividade de água acima de 0,90 formam-se soluções diluídas com componentes do alimento, que servirão de substrato para o crescimento microbiano. Nessa diluição, as reações químicas e enzimáticas têm sua velocidade diminuída pela baixa concentração dos reagentes. Entre 0,40 e 0,80 as reações químicas e enzimáticas tornam-se mais rápidas devido ao aumento das concentrações dos reagentes. Com um valor próximo de 0,60 haverá pequena ou nenhuma atividade microbiana. Em regiões abaixo de 0,30 encontra-se a zona de *absorção primária*, onde a água encontra-se fortemente ligada, fazendo a velocidade das reações tenderem a zero (exceto a oxidação de lipídios, que se torna consideravelmente mais rápida) e impedindo o desenvolvimento de microrganismos. Essas relações entre atividade de água e deterioração microbiana e química são resumidas na Figura 4, onde todos os fatores relacionados à estabilidade dos alimentos são mostrados (BOBBIO; BOBBIO, 2001).

2.4.5 Isotermas de sorção

O conteúdo de água de um material sólido, em equilíbrio com o ar a uma dada umidade relativa e temperatura, é chamado de *conteúdo de água de equilíbrio* (CAE) (MUJUMDAR, 1997). O CAE também pode ser entendido como o conteúdo de água correspondente à atividade de água do material para uma dada temperatura.

O conhecimento do CAE é importante no processamento e estocagem de alimentos. Na operação de secagem, o CAE é o conteúdo de água final, que o produto pode atingir se o processo for conduzido por um longo período de tempo (PARK; BIN; BROD, 2001).

Figura 4 - Atividade de água e sua relação com a deterioração química e microbiana. Adaptado de Labuza et al. (1972)

Uma representação gráfica do CAE do material *versus* umidade relativa do ar (ou atividade de água do material), para uma dada temperatura, é chamada *isoterma de sorção* (MUJUMDAR, 1997; LABUZA, 1968).

A isoterma de sorção pode ser obtida em uma de duas direções. Uma isoterma de *adsorção* é obtida pela exposição de um produto seco a um ambiente de umidade relativa crescente, medindo-se o ganho de massa devido à água. A isoterma de *dessorção* é encontrada colocando-se o material inicialmente úmido sob as mesmas umidades relativas, mas nesse caso medindo-se a perda de massa (LABUZA, 1968). Evidentemente, este último é de interesse no processo de secagem.

Como podemos observar na Figura 5, para um mesmo produto, há uma diferença entre as isotermas de sorção. A essa diferença dá-se o nome de *histerese* (LABUZA, 1968).

Com o objetivo de prever o comportamento das isotermas, muitos autores propuseram modelos de ajuste de isotermas de sorção. Esses modelos são úteis para conhecer

Figura 5 - Típica isoterma de sorção mostrando a histerese. Adaptado de Labuza (1968)

as características dos produtos. Em sua maioria são modelos empíricos. Maiores detalhes sobre os mais usuais podem ser encontrados nas referências do artigo de Park, Bin e Brod (2001).

2.4.6 O processo de secagem

Van Arsdel e Copley (1963) afirmaram ser importante compreender o mecanismo do processo de secagem para o projeto de equipamento próprio e garantia da qualidade de produtos alimentícios.

A secagem é a operação na qual a atividade de água de um alimento é diminuída pela remoção da maior parte da água normalmente presente, pela sua vaporização (KAREL, 1975a). Para tal, é necessário que haja fornecimento de energia térmica para o material a ser seco, e também deve haver um sorvedor de água para remover o vapor formado a partir da superfície desse material (PARK; YADO; BROD, 2001).

Quando o produto é colocado no secador, ocorre uma transferência de energia térmica da fonte à maior temperatura para o material contendo água, acompanhada da evaporação dessa água, devido à diferença de temperatura (ambiente mais quente que o material). A diferença de pressão parcial de vapor d'água entre o ambiente (ar quente) e a superfície do produto fará com que haja transferência de massa (água) do produto para o ar,

e dessa forma o vapor será arrastado do material. Para o caso de água livre, a energia envolvida no processo é correspondente ao calor latente de vaporização; e no caso de água ligada, a energia necessária para sua evaporação é maior (PARK; YADO; BROD, 2001). Esses processos são freqüentemente acompanhados por reações químicas ou bioquímicas e mudanças de fase, como transição vítrea e cristalização, associadas ao encolhimento do material. Algumas dessas mudanças podem ser desejáveis e outras indesejáveis, dependendo do produto a ser obtido. Em alguns casos, o pré-tratamento da matéria prima pode ser necessário antes da secagem (MUJUMDAR, 1997).

É na superfície do material que ocorre a evaporação da água durante a secagem, a qual foi transportada do interior do mesmo. Os mecanismos mais importantes desse transporte são: difusão líquida, difusão de vapor e fluxo de líquido e de vapor (PARK; YADO; BROD, 2001).

Considere a secagem sob condições constantes, de um material contendo água. Para a maioria dos materiais, uma curva de conteúdo de água *versus* tempo será como a da Figura 6 (AGUIRRE; GASPARINO FILHO, 2002). Nessa figura, podemos distinguir três

Figura 6 - Conteúdo de água como função do tempo de secagem

períodos, que são as divisões do processo de secagem baseado na transferência de energia térmica e de massa (água). No caso mais geral, depois de um período inicial de ajuste (AB), o conteúdo de água, X , decresce linearmente com o tempo, t , após o início da evaporação (BC). Esse período é seguido por um decréscimo não linear de X com t (CD) até que, depois

de algum tempo, o material alcança seu conteúdo de água de equilíbrio, X^* , e o processo termina. Em termos de conteúdo de água livre, definido como (MUJUMDAR, 1997):

$$X_L = (X - X^*)$$

a taxa de secagem cai para zero quando $X_L = 0$.

A taxa de secagem, N , é definida como:

$$N = -\frac{m_s}{A} \frac{dX}{dt} \quad \text{ou} \quad N = -\frac{m_s}{A} \frac{dX_L}{dt}$$

sob condições de secagem constantes. Onde N ($kg \ m^{-2} \ h^{-1}$) é a taxa de evaporação da água, A é a área de evaporação (que pode ser diferente da área de transferência de energia térmica) e m_s é a massa de sólidos secos. Se A não é conhecida, então a taxa de secagem pode ser expressa em kg de água evaporada por h. Uma curva de N versus X (ou X_L) é chamada de curva de taxa de secagem (Figura 7), e é o resultado da diferenciação da curva da Figura 6 (tomando em cada instante, a tangente no ponto). Essa curva é sempre obtida

Figura 7 - Curva de taxa de secagem sob condições de secagem constantes. Adaptado de Mujumdar (1997)

sob condições constantes de secagem. Contudo, num secador real, o produto é exposto a condições de secagem variáveis, como diferentes temperaturas e umidades. Dessa forma, é necessário desenvolver uma metodologia para interpolar ou extrapolar os dados de taxa de

secagem que estão limitados numa faixa de condições de operação (MUJUMDAR, 1997).

Na Figura 7 ficam mais evidentes os períodos da operação de secagem, separados pelos pontos de quebra na curva.

O intervalo de tempo correspondente ao segmento AB, como visto anteriormente, representa o início da secagem, e é corresponde ao *período de estado transitório*, onde a temperatura do produto e a pressão de vapor da água elevam-se de forma gradativa. Essas elevações têm prosseguimento até o ponto em que a transferência de energia térmica seja equivalente à transferência de massa (ponto B) (AGUIRRE; GASPARINO FILHO, 2002; PARK; YADO; BROD, 2001). Os pontos A' e A representam um material quente e frio, respectivamente. O período entre os pontos A (ou A') e B é geralmente curto, e é muitas vezes ignorado na análise do tempo de secagem (BARBOSA-CÁNOVAS; VEGA-MERCADO, 1996).

O trecho BC corresponde ao *período de taxa constante*. A água evaporada é a água livre. Esse período é totalmente governado pelas taxas de transferência de massa e energia térmica (que são equivalentes), e continua enquanto o suprimento de água interno é suficiente para manter um filme de água livre na superfície de evaporação (superfície saturada). O período termina quando essa condição não mais se aplica. A taxa de secagem nesse período é independente do material que é secado. Vale ressaltar que muitos produtos alimentícios não dispõem desse período, pois as taxas internas de transferência de massa e energia térmica determinam a taxa com que a água se torna disponível na superfície (MUJUMDAR, 1997).

No trecho CD temos o *período de taxa decrescente*. O período se inicia quando a taxa N começa a cair, em $X = X_c$ (conteúdo de água crítico), quando a água não pode mais migrar para a superfície a uma taxa constante, devido a limitações de transporte interno. Sob essas condições, a superfície de secagem torna-se, de início, parcialmente insaturada, e então completamente insaturada (MUJUMDAR, 1997). Dessa forma, a transferência de massa é reduzida, mas a transferência de energia térmica não é compensada por aquela. Assim, a temperatura do produto aumenta até atingir a temperatura do ar de secagem. Quando a água contida no produto atinge o equilíbrio (X^*) em relação à umidade do ar de secagem, o processo termina. Esse período é quase sempre o único observado para a secagem de produtos

agrícolas e alimentícios (PARK; YADO; BROD, 2001).

Alguns materiais podem manifestar um conteúdo de água crítico em mais de um ponto, em que a curva de taxa de secagem mostra uma nítida mudança de forma. Isso está associado a mudanças nos mecanismos de secagem devido a mudanças estruturais ou químicas. Além disso, X_c não é uma propriedade física do material. É um ponto empírico, que vai depender inclusive das condições operacionais de secagem (MUJUMDAR, 1997).

Vários pesquisadores propuseram numerosas teorias e múltiplas fórmulas empíricas para prever a taxa de secagem, sendo que a *Teoria difusional* e a *Teoria capilar* são as mais básicas. Maiores detalhes dessas teorias podem ser encontrados nas referências citadas nesta seção.

2.5 Sistema de aquisição de dados

Aquisição de dados é um processo pelo qual uma grandeza física do ambiente é transformada em sinais elétricos, os quais são medidos e convertidos em um formato digital para processamento, análise e armazenamento por um computador (PARK; MACKAY, 2003).

A fim de avaliar o desempenho de sistemas de energias renováveis em operação, muitos sistemas de aquisição de dados (SAD) têm sido desenvolvidos, e são amplamente utilizados na coleta e processamento desses dados (BENGHANEM, 2010). Exemplos dessa aplicação são os SADs utilizados para avaliar o desempenho de secadores solares, como podemos encontrar em Ekechukwu e Norton (1997) e Montero et al. (2010).

Os SADs são formados por vários elementos ou blocos. É possível identificar quatro tipos de elementos, embora em um dado sistema um tipo de elemento possa estar ausente ou possa ocorrer mais de uma vez (figura 8). A seguir, passamos a descrever cada um desses blocos.

Figura 8 - Estrutura geral de um SAD (BENTLEY, 2005)

2.5.1 Sensores

A aquisição de dados começa com uma grandeza física a ser medida. Essa grandeza física pode ser a temperatura de um quarto, a intensidade de uma fonte luminosa, a umidade relativa do ar em uma câmara, etc. Um sensor é um dispositivo que converte uma variável física em um sinal elétrico mensurável, tal como voltagem ou corrente. Sensores são sinônimos de transdutores em um SAD (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009). A escolha dos sensores é parte fundamental da definição de um sistema de aquisição de dados porque será diretamente responsável pela sua eficiência e precisão (BRAGA, 2008).

Como exemplo de sensores, podemos citar os termopares, termorresistências, termistores e circuitos integrados sensores, responsáveis por medições de temperatura; e os sensores de umidade relativa capacitivo, que medem a umidade relativa do ar.

2.5.2 Condicionamento de sinal

De uma maneira geral, os elementos de condicionamento de sinal convertem a saída dos sensores em uma forma adequada para processamento posterior (BENTLEY, 2005). Essa etapa é essencial para um SAD efetivo, pois alguns sensores geram sinais que são muito difíceis ou arriscados de se medir diretamente para processamento digital. Por exemplo, quando lidando com altas voltagens, ruídos, sinais extremamente altos ou baixos, ou medida de sinais simultâneos. Esse condicionamento maximiza a acurácia de um sistema, permite que os sensores operem de forma apropriada e garante a segurança (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009). Algumas das principais tarefas desempenhadas pela etapa de condicionamento de sinal são (PARK; MACKAY, 2003):

- ✓ Filtragem
- ✓ Amplificação
- ✓ Linearização
- ✓ Isolação

A função de um filtro é remover partes indesejáveis de um sinal, como ruídos; ou extrair partes de interesse, como componentes situados em uma certa faixa de frequência. Existem dois tipos de filtros: *analógicos* e *digitais*. Um filtro analógico utiliza um circuito

eletrônico analógico (constituído de componentes como resistores, capacitores e amplificadores operacionais) para produzir o efeito de filtragem requerido. Já um filtro digital faz uso de um processador digital para executar cálculos numéricos em valores amostrados do sinal (ROBIN, 2002). Desse modo, quando um filtro digital é implementado, ele se localiza no bloco de processamento de sinal.

Se o sinal de saída do sensor é muito baixo, ele tem que ser amplificado, de modo a aumentar sua resolução. A resolução máxima é obtida amplificando-se o sinal de entrada tal que a máxima voltagem de saída se iguale à faixa de entrada do conversor analógico-digital (ADC), contido na etapa de processamento de sinal (PARK; MACKAY, 2003). O LM35 é um exemplo de sensor que requer amplificação, já que a voltagem de saída é da ordem de mV.

A linearização é necessária quando os sensores produzem sinais de voltagem que não são linearmente relacionados com a medição da grandeza física. Tal como a filtragem, pode ser realizada por meio de condicionamento de sinal via *hardware*, ou por *software*, na etapa de processamento de sinal. Os termopares são um exemplo clássico de sensor que requer linearização (PARK; MACKAY, 2003).

A isolamento deve ser utilizada para eliminar tensões de modo comum com valores suficientemente elevados para causar dano ao sistema de aquisição. Isolamento através de transformadores, acopladores ópticos ou amplificadores isolados são os meios mais comuns empregados para proteger os sistemas de aquisição de dados (BRAGA, 2008).

2.5.3 Processamento de sinal e *software*

A saída do condicionamento de sinal geralmente está na forma de uma voltagem d.c., corrente d.c. ou voltagem a.c. de frequência variável. Para determinar o valor da variável medida inicialmente (e.g. temperatura de um termopar), é preciso que sejam efetuados alguns cálculos utilizando esse sinal de saída. Esses cálculos fazem referência ao *processamento de sinal* e são geralmente realizados na forma *digital*, com uso de um *computador* ou *microcontrolador*, e de um *software* (BENTLEY, 2005).

2.5.3.1 Conversão analógico-digital

O *conversor analógico-digital* ou, como é mais comumente conhecido, ADC (*Analog/Digital Converter*), é o elemento responsável por traduzir o sinal elétrico (tensão) da saída do circuito condicionador em uma representação numérica (número digital) compatível com o processamento digital posterior. Para a escolha do conversor, algumas condições devem ser observadas: o conversor deve suportar o nível máximo do sinal a ser digitalizado, e a taxa de variação do sinal deve ser compatível com a taxa de amostragem do conversor (BRAGA, 2008).

Um ADC faz a quantização de um sinal amostrado tomando o valor inteiro mais próximo, em uma lista de valores finitos espaçados uniformemente. Essa regra dá à *função de transferência* de entrada analógica e saída digital a forma de uma "escada". A *resolução* de um ADC é a menor variação de tensão detectável, i.e., a que corresponde a um degrau da escada. É comum referir-se à resolução de um ADC pelo número de *bits* binário ou dígitos decimais que são produzidos. Por exemplo, *10 bits* significa que o ADC pode determinar uma parte em 2^{10} (=1024), e representa 1024 degraus ou possíveis valores de saída. (LOEWENSTEIN, 1999).

2.5.3.2 Software de aquisição de dados

O equipamento de aquisição de dados não funciona sem *software*, pois é o *software* rodando no computador ou microcontrolador que transforma o sistema em um completo sistema de aquisição, análise, visualização e controle (PARK; MACKAY, 2003).

O processamento por um computador pode ser executado sobre um sistema operacional de uso geral, como o Windows ou Linux, ou, para sistemas que necessitam maior confiabilidade, precisão e comportamento determinístico, sistemas operacionais de tempo real (*Real-Time Operating Systems* ou RTOS). Em ambos os casos são usados *softwares* desenvolvidos especificamente para a aplicação, através de linguagens de programação genéricas, como C, C++, Visual Basic, Delphi, etc.; ou através de linguagens voltadas para esse tipo de utilização, como LabVIEW da National Instruments, ou VEE da Agilent Technologies (BRAGA, 2008).

No caso de microcontroladores (que também podem ser usados em conjunto

com um computador), são programados em linguagem *assembly*. Programas escritos nessa linguagem possuem velocidade de execução maior e requerem menos memória do que aqueles escritos em outras linguagens. Porém, a programação é muito mais difícil e muito mais sujeita a erros, além de não ser portátil entre diferentes tipos de processadores. Já as linguagens de alto nível (como C ou BASIC) independem do processador, e usam um *compilador* para traduzir todo o programa de alto nível em um código *assembly* para um dado processador. Requerem mais memória e tomam um tempo maior de execução; contudo, os programas são mais fáceis de escrever e corrigir (BENTLEY, 2005).

2.5.4 Apresentação dos dados

A apresentação dos dados é o elemento final no SAD, e sua função é comunicar o valor medido da variável para um observador humano. É importante que o valor medido seja apresentado de forma tão simples e clara quanto possível, pois caso haja dificuldade na leitura ou entendimento, o processo fica comprometido (BENTLEY, 2005).

Os elementos de apresentação de dados atualmente em uso podem ser classificados em *displays* ou *mostradores* (que podem ser analógicos ou digitais), e *registradores/impressoras*. Se os valores medidos não precisarem ser gravados de forma permanente, os mostradores podem ser utilizados. Como exemplo, podemos citar o mostrador de cristal líquido (*Liquid crystal display* ou LCD) e o tubo de raios catódicos (*Cathode ray tube* ou CRT), também conhecido por *monitor* (BENTLEY, 2005).

2.6 Acurácia e erro nas medições

Em qualquer medição particular haverá algum erro devido a fontes de erros *sistemáticos* (*viés*) e *aleatórios* (*ruído*). O erro total em cada valor observado numa medição resulta da combinação desses dois tipos de erros.

A *acurácia* ou *exatidão* de um instrumento é definida como a diferença entre o *valor verdadeiro* da variável física e o *valor medido* indicado pelo instrumento. Normalmente, o valor verdadeiro é definido com referência a algum padrão estabelecido. A acurácia dá ideia do erro sistemático associado à realização da medida. Há uma variedade de fatores que podem resultar num erro sistemático, como: alterações na calibração dos sensores; mudança

na variável física devido ao próprio processo de medição; modificação pelo caminho do sinal, como resistência ou atenuação; etc. (HANSMAN JR., 1999).

O erro aleatório é muitas vezes mencionado como *ruído*, que é definido como um sinal que não carrega informação útil. Se uma medição com erro aleatório é repetida várias vezes, ela irá apresentar uma *distribuição normal*. No centro da distribuição normal encontra-se o valor verdadeiro (considerando-se que não existam erros sistemáticos), de modo que a média dará uma boa estimativa desse valor. A *precisão* de uma medição é quantificada pelo desvio padrão da distribuição (σ) (HANSMAN JR., 1999).

Em qualquer estágio do processo de medição pode ser introduzido um erro aleatório, e sua fonte pode ser interna ou externa. Como exemplo de fonte interna de ruído temos o movimento aleatório de elétrons induzido por temperatura em resistores e semicondutores, provocando uma voltagem aleatória correspondente. As fontes externas podem ser, dentre outras: a própria repetição das medições; ruídos do ambiente na medição; interferência de linhas de distribuição e geradores; interferência de transmissores de radiofrequência; etc. (BENTLEY, 2005; HANSMAN JR., 1999).

2.7 Telemetria por radiofrequência

Há alguns anos, a palavra *telemetria* referia-se apenas à operação com o telêmetro (também chamado distanciômetro), instrumento óptico usado para medir a distância entre o observador (telemetrista) e um ponto inacessível. Com o avanço tecnológico, o termo *telemetria* passou a ser usado também como uma maneira de medição à distância (ROZAS, 2004). Assim, a *telemetria* é o processo que consiste na coleta de informações em algum local remoto e a transmissão dos dados a um local conveniente para serem examinados e gravados (LOZANO-NIETO, 1999).

Os sistemas de telemetria são encontrados em várias aplicações em que há algum tipo de medição à distância, e pode ser feito por diferentes métodos: óptico, mecânico, hidráulico, elétrico, etc., sendo a telemetria baseada em sinais elétricos a mais comum. O método elétrico é classificado de acordo com o canal de transmissão empregado, que pode ser com fio ou sem fio (*wireless*, ou por radiofrequência). Este tem sido amplamente usado por permitir a transmissão de informação a longas distâncias, sendo ideal em aplicações em que

a área da medição não é normalmente acessível (LOZANO-NIETO, 1999; ROZAS, 2004).

A telemetria *wireless* tem sido usada por muitos anos, por meio de dispositivos que são geralmente baseados em modelos proprietários, operando em bandas de rádio licenciadas ou livres de licença. Nos últimos anos, contudo, a tecnologia *wireless* tem passado por um rápido desenvolvimento, levando ao surgimento de novos padrões para sistemas de telemetria. Como exemplo, temos o uso do protocolo padrão para rede em malha, chamado ZigBeeTM(¹) (NORRIS, 2005). Além disso, tem se tornado cada vez mais frequente a telemetria via modem celular, com o uso da infra-estrutura de comunicação celular via redes GSM/GPRS e CDMA (ROZAS, 2004).

2.8 Protocolo ZigBee

Estabelecida em 2002, a Aliança ZigBee é uma associação aberta e sem fins lucrativos, composta por diversas empresas, universidades e agências governamentais ao redor do mundo. Uma de suas missões é proporcionar padrões globais abertos novos e de baixo consumo para rede *wireless*, focados em aplicações de monitoramento, controle e sensores (ZIGBEE ALLIANCE, 2011b). Atualmente oferecem duas especificações para sistemas de rede: ZigBee e ZigBee RF4CE (ZIGBEE ALLIANCE, 2011a).

O ZigBee tem como base a especificação 802.15.4, que é um padrão para comunicação *wireless* lançado pela IEEE (*Institute for Electrical and Electronics Engineers*) em 2003. A especificação é um protocolo de radiofrequência baseado em pacotes, destinado a dispositivos de baixo custo que operam com baterias (DIGI INC., 2011c).

A primeira versão da especificação do padrão ZigBee foi lançada no final de 2004 (ZIGBEE ALLIANCE, 2011c), sendo a versão ZigBee 2007 a mais recente. A especificação ZigBee aprimora o padrão IEEE 802.15.4, adicionando camadas de rede, segurança e uma aplicação *framework*. Algumas características do ZigBee incluem (ZIGBEE ALLIANCE, 2011d):

- ✓ Operação global na frequência de 2,4GHz de acordo com o IEEE 802.15.5;
- ✓ Operação regional em 915MHz (Americas) e 868MHz (Europa);

¹ZigBee é marca registrada da ZigBee Alliance. O identificador de marca registrada será suprimido no restante do documento

- ✓ Incorpora mecanismos de economia de energia elétrica para todas as classes de dispositivos;
- ✓ Baixo custo de implementação, comparado com outras tecnologias *wireless* ou soluções com fio;
- ✓ Utiliza o padrão industrial *Advanced Encryption Standard* (AES-128) como esquema de segurança.

2.9 Especificações de alguns componentes

2.9.1 Amplificadores operacionais *rail-to-rail*

O amplificador operacional (AmpOp) é um componente usado na etapa de condicionamento de sinal, no circuito do SAD. Os AmpOps convencionais, como o 741 ou o 3140, quando colocados para funcionar em toda a sua faixa dinâmica de tensões de saída, não atingem os valores máximos correspondentes à alimentação. Dizemos nesse caso que o AmpOp não possui uma excursão da tensão de saída *rail-to-rail*. Porém, se o AmpOp for alimentar circuitos lógicos, ADCs ou outras aplicações críticas, é preciso que o sinal de saída excursione entre os valores da linha de alimentação, i.e., deve ir de linha a linha ou *rail-to-rail*. Existem vários fabricantes que produzem AmpOps com essas características (BRAGA, 2009).

2.9.2 Sensor de temperatura LM35

O circuito integrado sensor de temperatura, a exemplo do LM35, possui a vantagem de fazer a voltagem de saída variar linearmente com a temperatura, além de ser de baixo custo (OMEGA ENGINEERING, 1992). Isso dispensa a etapa de linearização vista anteriormente. O LM35 é fabricado pela National Semiconductor Corp., e suas principais características são:

- ✓ É calibrado diretamente em ° Celsius;
- ✓ Não necessita de calibração no circuito;
- ✓ Fator de escala linear de +10,0mV/°C;
- ✓ $\pm 1/4$ °C de acurácia (a +25 °C), e $\pm 3/4$ (−55 a +150 °C);

- ✓ Faixa máxima de operação de -55 a $+150^{\circ}\text{C}$;
- ✓ Adequado para aplicações remotas;
- ✓ Opera entre 4 a 30 volts;
- ✓ Baixo consumo de corrente: menos de $60\mu\text{A}$.

A série LM35 é apresentada em vários tipos de encapsulamento, sendo o TO-92 o mais comum (figura 9). Mais informações sobre esse sensor podem ser encontradas em National Semiconductor (2000).

Figura 9 - Circuito integrado sensor de temperatura LM35, com encapsulamento TO-92

2.9.3 Sensor de umidade relativa H1H-4000

A série H1H-4000 é fabricada pela Honeywell Inc., sendo que as informações a seguir foram consultadas em Honeywell (2008).

Disponível em duas configurações de espaçamento entre terminais (figura 10), esse sensor de umidade relativa (*Relative Humidity*, RH) é um elemento sensor capacitivo de polímero termoestável, com condicionador de sinal integrado *on-chip*. A estrutura multicamada do elemento sensor provê uma excelente resistência a molhamento, poeira, sujeira, óleos e produtos químicos comuns do ambiente. A entrada direta para um controlador ou outro dispositivo é possibilitada pela saída de voltagem linear *versus* % RH do sensor.

Figura 10 - Sensor H1H-4000, com diferentes configurações de espaçamento entre terminais

Sua alimentação pode ser feita entre 4,0V (mínimo) e 5,8V (máximo) e possui baixo consumo de corrente, no máximo $500\mu\text{A}$. Assim, é ideal para baixo consumo em sistemas que operam com bateria. O sensor fornece uma acurácia de $\pm 3,5\%$ RH em uma faixa nominal de 100% RH sem condensação, a 25°C e alimentação de 5V. Opera na faixa de temperatura entre -40 a 85°C .

A tensão de saída do sensor (V_{out}) pode ser calculada pela seguinte equação de calibração:

$$V_{out} = V_s(0,0062 RH + 0,16) \quad (15)$$

onde V_s é a tensão de alimentação do sensor. Essa equação trata-se de uma equação típica para os sensores da série, a 25°C . Os sensores também podem ser adquiridos com os dados de calibração individuais, fornecidos pelo fabricante em uma cópia impressa.

Uma forma de melhorar a acurácia, conforme exija a aplicação, é usar a equação com compensação de temperatura:

$$RH_{verdadeira} = \frac{RH}{1,0546 - 0,00216 T} \quad (16)$$

onde T é a temperatura em $^\circ\text{C}$.

2.9.4 Módulo XBee™ ZB

O módulo XBee™ ZB é fabricado pela Digi Inc., e consiste num módulo transceptor RF embarcado compatível com o padrão ZigBee. Algumas de suas características são (DIGI INC., 2010):

- ✓ De fácil utilização, já vem com toda a pilha do protocolo ZigBee programada;
- ✓ Nenhuma configuração é necessária para comunicações RF de operação simples;
- ✓ Modos de comando API (interface de programação) e AT (comandos em modo texto) para configuração dos parâmetros do módulo;
- ✓ Suporta ADC (conversão analógico-digital) e entrada/saída digital;
- ✓ Conta com um extenso conjunto de comandos;
- ✓ Diminuto tamanho físico.

A interface entre um módulo XBeeTM e um computador ou microcontrolador é feita através de comunicação serial assíncrona (UART). O módulo pode operar em modo transparente (por *default*) ou de comando. Quando em modo transparente, estabelece a comunicação via rede; e quando em modo de comando (API ou AT), é possível configurar o módulo (DIGI INC., 2010).

O módulo XBeeTM ZB é fabricado em diversos modelos, de acordo com a potência de transmissão do sinal de RF, sensibilidade de recepção, alcance, tipo de antena, entre outras características. Como exemplo, temos o XBeeTM ZB S2 (o de menor custo) e o XBee-PROTM ZB S2B (de maior alcance), ambos com diversas opções de antena (figura 11) (DIGI INC., 2011b; DIGI INC., 2011a). A Tabela 1 mostra as características dos dois tipos.

Figura 11 - Modelos de XBeeTM ZB com diversas opções de antena

2.9.5 Microcontrolador PIC18F4550

Um microcontrolador (μC) pode ser entendido como um computador completo num único *chip*, pois é um sistema que inclui todos os componentes necessários para ser designado como tal. Esses componentes, em sua configuração mínima, consistem num microprocessador, memória de programa, memória de dados e dispositivo de entrada/saída. Alguns sistemas também incluem ADCs, contadores, temporizadores, entre outros componentes. Os μC s também são designados *controladores embarcados*, uma vez que a maior parte deles são embutidos (ou embarcados) nos dispositivos que serão controlados (IBRAHIM, 2008; PARALLAX INC., 1997).

O microprocessador do μC é formado por uma unidade central de processamento (CPU) e uma unidade de controle (CU). A CPU é o cerne do μC , onde são executadas todas as operações lógicas e aritméticas. A CU controla as operações internas do micropro-

Tabela 1 - Características dos módulos XBeeTM ZB S2 e XBee-PROTM ZB S2B (DIGI INC., 2011b)

<i>Características</i>	<i>XBeeTM ZB S2</i>	<i>XBee-PROTM ZB S2B</i>
Frequência de operação	2,4 GHz	
Taxa de transmissão	250 Kbps	
Alcance em áreas internas ou urbanas	40 m	90 m
Alcance em linha de visão (em campo aberto)	120 m	1500 m
Potência de saída	2 mW (+3 dBm)	60 mW (+18 dBm)
Sensibilidade do receptor	-96 dBm	-102 dBm
Taxa de transmissão serial	1200 bps - 1 Mbps	
Entradas ADC	4 entradas ADC de 10 bits	
Entradas/Saídas digitais	10	
Opções de antena	Antena Chip, Antena Fio, U.FL, RPSMA	Antena embarcada PCB, Antena Fio, U.FL, RPSMA
Temperatura e umidade relativa de operação	-40 °C a +85 °C, 0-95% umidade rel. sem condensação	
Tensão de alimentação	2,1 - 3,6VDC	2,7 - 3,6VDC
Corrente (transmissão)	35 mA / 45 mA @ 3,3VDC	205 mA
Corrente (recepção)	38 mA / 40 mA @ 3,3VDC	47 mA

cessador e envia os sinais a outras partes do μC (IBRAHIM, 2008).

A memória é outra parte importante do μC e é classificada em *memória de programa* ou *de dados*. Aquela armazena um programa propriamente dito, e é não volátil, i.e., os dados não são perdidos depois que a alimentação é desligada. Já esta armazena os dados temporários usados num programa, além de ser volátil, i.e., os dados são perdidos com o desligamento da alimentação. Dentre as diversas tecnologias existentes, destacam-se a memória RAM, EEPROM e *Flash* EEPROM. A memória RAM é volátil, e geralmente armazena variáveis de um programa. A EEPROM é não volátil, geralmente lenta, e pode ser apagada e reprogramada. É usada para armazenar informações de configuração, valores máximos e mínimos, etc. A *Flash* EEPROM, uma versão da memória EEPROM, é não volátil e muito rápida. É usada para armazenar programas, que podem ser sobrescritos (IBRAHIM, 2008; BENTLEY, 2005).

Os μC s da série PIC, fabricados pela Microchip Technology Inc., são velhos conhecidos, muito usados por engenheiros e entusiastas há anos. Isso se traduz na produção de uma ampla documentação baseada nesse μC , como livros, artigos, tutoriais, fóruns de

discussão, etc. A grande documentação minimiza as dificuldades nos projetos, especialmente para iniciantes, através dos muitos exemplos de aplicações que podem ser encontrados.

O PIC18F4550, relativamente novo, é um μ C indicado para aplicações de alto desempenho, baixo consumo e conectividade. Possui diferentes opções de encapsulamento, sendo o PDIP o ideal para facilitar a soldagem e montagem manuais (figura 12). Suas principais características incluem (MICROCHIP TECHNOLOGY INC., 2009):

- ✓ Memória *Flash* de programa com 32k *bytes*;
- ✓ 2k *bytes* de RAM;
- ✓ 256 *bytes* de EEPROM;
- ✓ 35 pinos de I/O com dreno de corrente na ordem de 20 mA;
- ✓ 13 canais ADCs de 10 *bits*;
- ✓ 4 *timers*, sendo 1 de 8 *bits*, 3 de 16 *bits*;
- ✓ Dois canais CCP (1 CCP e 1 ECCP) (Capture, Compare and PWM);
- ✓ Equipado com protocolos de comunicação aprimorados, como EUSART, SPI, I²C™, USB, etc.
- ✓ Pode trabalhar com doze opções diferentes de oscilador, operando numa frequência de até 48 MHz;
- ✓ Com tecnologia *nanoWatt*, ideal para baixo consumo de energia;
- ✓ Temperatura de operação entre -40°C a $+85^{\circ}\text{C}$;
- ✓ Tensão de alimentação de 2V a 5,5V;
- ✓ Encapsulamento PDIP de 40 pinos.

Figura 12 - Microcontrolador PIC18F4550 com encapsulamento do tipo PDIP

3 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado em quatro etapas:

- ✓ Projeto e construção de um secador solar de convecção natural misto, para ser usado como objeto de estudo deste trabalho e em trabalhos futuros; bem como escolha do local mais adequado, seguido de um teste operacional.
- ✓ Desenvolvimento do *hardware* e *software* embarcado do sistema de aquisição de dados (SAD), seguido de testes de funcionamento.
- ✓ Desenvolvimento do *software* de aquisição de dados em um computador *desktop*, implementado de modo a permitir o acesso via *web*, com sistema de alerta.
- ✓ Instalação do SAD no secador solar e testes gerais de funcionamento.

3.1 Projeto e construção do secador solar de convecção natural misto

O objetivo na construção do secador foi a obtenção de um modelo que fosse funcional, i.e., que pudesse ser usado na prática, para a secagem de produtos agrícolas, com o uso da radiação solar local. Isso significa que o secador deveria ter um desempenho satisfatório. Além disso, deveria ser portátil para o fácil deslocamento, em caso de necessidade de mudança de local. Contudo, o projeto não poderia demandar muito tempo, uma vez que o objetivo principal do trabalho era o desenvolvimento do SAD. Dessa forma, não foi feito um dimensionamento matemático de coletor solar para máxima eficiência, mas as dimensões foram estimadas por modelos de secadores encontrados na literatura. Visando mais simplicidade, o secador não foi dimensionado para secar produtos em escala industrial, mas para ser um protótipo de testes, para secagem de produtos em quantidades pequenas.

Durante o desenvolvimento do projeto, foi executada a seguinte sequência lógica, dentro dos objetivos propostos:

- ✓ Escolha do tipo de secador mais adequado, bem como o material de construção;
- ✓ Pesquisa bibliográfica de diferentes modelos e suas características;
- ✓ Desenho de vários croquis, com adequação das dimensões, escolha de acessórios e definição de modelos diferentes;

- ✓ Escolha do modelo definitivo para projeto em ambiente CAD 3D, e elaboração do projeto executivo.
- ✓ Envio do projeto executivo para fabricação do secador.

O tipo de secador solar escolhido foi o misto, de convecção natural. Essa escolha foi baseada em alguns trabalhos comparativos supracitados, que apontam o secador misto como o de melhor desempenho. A escolha da convecção natural, i.e., sem uso de ventoinha para melhorar a circulação do ar de secagem, visou maior simplicidade no projeto, na construção e na manutenção futura. Definiu-se o aço inox como material de construção principal, tendo em vista maior facilidade de higienização e durabilidade.

Após a escolha do tipo, passou-se então a pesquisar na literatura diferentes modelos de secador solar de convecção natural misto, bem como de coletores solares. A pesquisa foi necessária para conhecer os diversos modelos já desenvolvidos, e assim reunir elementos para elaboração de um modelo particular. Alguns dos mais relevantes encontram-se na Figura 13. Com base nesses modelos, foram desenvolvidas algumas ideias e desenhados os croquis com possíveis configurações para o projeto (figura 14). A partir desses croquis, dois secadores solares foram projetados em CAD 3D para escolha (figura 15). Esses modelos possuem poucas diferenças entre si, e o definido para fabricação foi o da Figura 15(b), por ter o topo da cabine de secagem em forma de rampa inteira. Considerou-se que essa característica poderia impedir que possível formação de água de condensação durante a madrugada respingasse no produto a ser secado.

Escolhido o modelo definitivo, foi feito um projeto executivo detalhado, para instruir o fabricante com o máximo de informações. Isso é importante para aproximar tanto quanto possível o resultado esperado da ideia original. Esse projeto foi encaminhado para execução por um serralheiro. Uma vista em perspectiva do secador com suas principais dimensões é mostrada no APÊNDICE A.

As dimensões do coletor solar e da base da cabine de secagem foram baseadas no secador de Tripathy e Kumar (2009) (figura 13), com o coletor um pouco maior em altura para colocação opcional de brita. A base do coletor foi feita com material reciclado, e pintado de preto. Determinou-se a altura da cabine de secagem de modo a acomodar três bandejas perfuradas, espaçadas entre si.

Tripathy e Kumar (2009), p. 215

Ayensu (1997), p. 123

Dissa et al. (2009), p. 1002

Exell (1980) apud Ekechukwu e Norton (1999), p. 635

Ayensu e Asiedu-Bondzie (1986) apud Ekechukwu e Norton (1999), p. 636

Simate (2003), p. 439

Figura 13 - Modelos diversos de secador solar misto encontrados na literatura

Figura 14 - Alguns dos esboços preliminares para o projeto do secador solar

Figura 15 - Vista em perspectiva de dois secadores solares, projetados com diferentes suportes para a chaminé

Tomando como base alguns trabalhos, a exemplo do secador de Ayensu (1997) (figura 13), foi adicionada uma chaminé no topo da cabine de secagem. Essa chaminé foi confeccionada em aço galvanizado e pintada de preto, a fim de obter-se temperaturas mais elevadas e com isso o aumento do fluxo de ar no secador por convecção.

A inclinação do coletor solar e da cobertura de vidro da cabine foi estimada de modo a aumentar o rendimento do secador no inverno. Como visto anteriormente, essa inclinação deve ser segundo o ângulo da latitude local acrescido de aproximadamente 10° . A latitude do local onde estaria o secador, na cidade de Piracicaba, é de aproximadamente $22^\circ 42'$, ficando a inclinação do coletor com $32^\circ 42'$. Porém foi projetado com $32^\circ 20'$ pela praticidade de construção.

Após construído, o secador foi instalado de modo a ficar com a entrada de luz na direção norte, a fim de otimizar a quantidade de radiação solar coletada. Foi colocada uma tela mosquiteiro na abertura frontal do coletor solar e no topo da chaminé, para evitar entrada de insetos.

3.2 Teste operacional do secador solar

Para o teste operacional foi utilizado tomate cereja. Os tomates foram conservados sob congelamento até o dia dos procedimentos. Além da conservação, o congelamento tem a função de lesar a casca do tomate, a fim de facilitar a saída de água durante a desidratação. Após serem descongelados, os tomates foram pesados e passaram por uma desidratação osmótica, através de imersão em solução osmótica de NaCl e sacarose (açúcar comum). Inúmeros trabalhos reportam que na secagem de tomate precedida de desidratação osmótica há menor redução de seu valor nutritivo. Além disso, esse pré-tratamento favorece a secagem, evita contaminação e melhora as características sensoriais no produto final. Assim, foram utilizados para o procedimento:

- ✓ 2560 g de tomate cereja;
- ✓ 256 g de açúcar;
- ✓ 64 g de NaCl;
- ✓ 1000 mL de água.

Os tomates permaneceram na solução por cerca de 40 minutos, à temperatura ambiente. Após a drenagem, os tomates pesavam 2153g. Foram distribuídos nas três bandejas do secador solar, e deixados até completar a secagem.

3.3 Desenvolvimento do sistema de aquisição de dados (SAD)

O SAD foi subdividido em três subsistemas: o transmissor, montado em uma caixa selada e afixado ao secador solar em campo aberto; o receptor, acoplado ao computador em local abrigado; e o *software* de aquisição de dados no computador (figura 16). É importante observar que, embora denominados aqui de transmissor e receptor, e terem sido programados para tal, ambos os circuitos podem ser programados para desempenhar as duas funções. Isso vai depender se o sistema em que estiverem sendo empregados necessitar, além de aquisição de dados, de algum tipo de controle à distância. Outra observação é que o circuito do transmissor proposto, por si só, já é um SAD completo e funciona de modo independente do restante do sistema. A cada etapa concluída do SAD foram sendo feitos testes de funcionamento, tanto para as sub-rotinas de *software* quanto para os blocos de *hardware*, a fim de garantir o funcionamento do conjunto completo.

3.3.1 Protótipo do *hardware* do transmissor

Com o objetivo de minimizar os erros nas medições, bem como facilitar futuras manutenções, o circuito transmissor do SAD foi separado em dois blocos, e feitos em placas de circuito impresso (PCI) separadas: *circuito analógico* e *circuito digital*. Além disso, tomou-se o cuidado de separar a alimentação para os dois circuitos, a fim de aumentar a segurança e evitar que um circuito interferisse no outro. Desse modo, foi empregado um regulador de tensão para cada um. A seguir, são apresentados mais detalhes desses dois blocos.

3.3.1.1 Circuito analógico

O circuito analógico desse protótipo constitui-se do conjunto de sensores, cabos e módulo amplificador (condicionamento de sinal).

Os sensores utilizados foram o HIH-4000, para umidade relativa do ar; e o LM35, para temperatura do ar; sendo três unidades de cada. Ambos os sensores foram

Figura 16 - Diagrama de blocos do SAD

escolhidos por possuírem saída linear (dispensam a etapa de linearização), e dispensarem calibração. Essas características permitem economia de tempo no desenvolvimento do circuito e do *software*. Além disso, apresentam baixo custo e boa acurácia e precisão para o objetivo proposto. Os mesmos sensores foram utilizados em Cocota Júnior (2006) e Silveira et al. (2009).

Os LM35 foram acoplados com a configuração básica ao circuito, i.e., registra apenas a faixa de valores positivos de temperatura, fornecendo uma saída de $0\text{mV} + 10,0\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ (NATIONAL SEMICONDUCTOR, 2000). Dessa forma, e como visto anteriormente, o LM35 necessita de amplificação, de modo a aumentar a resolução dos valores

medidos. Para isso, foi necessário um módulo amplificador, onde foi usado como base um amplificador operacional *rail-to-rail*. O ganho de tensão para o amplificador foi calculado de modo a obter uma leitura máxima de temperatura de 100 °C, uma vez que é improvável que a temperatura no interior do secador solar atinja esse valor. Como a faixa de entrada da etapa seguinte (ADC) é de 0V a 5V, a temperatura de 100 °C deve corresponder a 5V na saída do amplificador. Então temos:

$$\frac{10,0mV}{^{\circ}C} \cdot 100^{\circ}C = 1000mV = 1V; \quad 1V \cdot Ganho = 5V$$

Assim, o módulo amplificador foi projetado para fornecer um ganho de tensão de 5.

Os HIH-4000 não passam por uma etapa de amplificação, uma vez que as saídas já estão na faixa de 0V a 5V. Dessa forma, os terminais de saída desses sensores foram ligados diretamente ao ADC do microcontrolador.

O circuito foi confeccionado de forma artesanal, em placa de circuito impresso de 5 x 9 cm (figura 17(a)). O desenho das trilhas foi feito em *software* específico para tal, e posteriormente transferido para a placa de fenolite cobreada. Seguiu-se então a corrosão do cobre em cloreto férrico, perfuração e soldagem dos componentes (figura 17(b)). Foi aplicada uma camada de verniz sobre as trilhas, para impedir a oxidação do cobre exposto.

(a) Placa de circuito impresso

(b) Circuito montado

Figura 17 - Montagem do circuito analógico

Os sensores foram ligados ao circuito por meio de cabos blindados, para proteção contra interferências externas. Os cabos foram fixados na PCI por meio de conectores do tipo Molex KKTM de três vias.

3.3.1.2 Circuito digital

O processamento do sinal do circuito analógico é feito no circuito digital. Este circuito é constituído de cinco partes: microcontrolador, relógio de tempo real, cartão de memória, LCD e transceptor RF.

O microcontrolador usado foi o PIC18F4550 detalhado anteriormente, e é encarregado de gerir todas as tarefas associadas ao transmissor, através do *software* embarcado. Assim, pode ser considerado como o "cérebro" desse circuito.

Tanto a alimentação do circuito digital quanto do analógico é feita através de um regulador de tensão ajustável, um para cada circuito, sendo ajustados para 5Vcc. O terra de ambos os circuitos são interligados. A alimentação para esses reguladores, por sua vez, vem de uma fonte de alimentação de 12Vcc. Inicialmente, o sistema foi projetado para usar uma bateria de 12V/7,2Ah. Após alguns testes, foi constatado que o consumo do circuito é da ordem de 95mA (a duração da bateria seria de 75h)². Assim, haveria necessidade de se usar um controlador de carga e placa solar, para manter a carga da bateria. No entanto, como havia um ramal de alimentação de 127V próximo ao local onde ficaria o secador solar, optou-se pelo uso de fonte de 12Vcc no lugar da bateria. Isso simplifica a alimentação, economizando tempo, tanto de projeto como de futuras manutenções. A desvantagem do uso de fontes são possíveis quedas na rede elétrica, podendo gerar lacunas durante o tempo de medição. Porém, essas não são muito críticas para os objetivos deste projeto.

Além dos valores medidos das variáveis físicas em questão, os registros do SAD precisavam trazer a informação do instante em que cada medição foi feita (data e hora). Esse foi o motivo do uso de um relógio de tempo real (*real-time clock*, ou RTC) no circuito. Foi usado o DS1307, com o circuito de operação típico (MAXIM INTEGRATED PRODUCTS, 2008), ligado ao PIC18F4550 através de comunicação serial. O circuito é alimentado com bateria tipo botão de 3V, de modo que o relógio continua em funcionamento mesmo com o desligamento do transmissor.

Como o protótipo do transmissor ainda passaria por testes, foi adicionado um circuito para gravação de dados em cartão de memória SD. O objetivo de gravar as medições

²É importante notar que o circuito não foi otimizado para consumo mínimo, por questões práticas, apesar dos componentes utilizados permitirem isso.

em cartão de memória foi possibilitar a recuperação de dados em caso de perda na recepção à distância. Essa possível perda poderia ser ocasionada por barreiras extensas no caminho, como veículos; ou algum problema na recepção, como queda de energia, falha no *software*, ou mesmo intervenção de curiosos. No circuito, utilizou-se um cartão SD padrão, com espaço para gravação de 1GB. O cartão foi formatado com sistema de arquivos FAT32. A alimentação é feita por um regulador de tensão de 3,3V, que por sua vez é alimentado pelo regulador de 5V do próprio circuito digital.

A fim de possibilitar a leitura dos dados localmente, sem a necessidade de um computador com receptor, utilizou-se um LCD para apresentação dos valores instantâneos de medição. O LCD utilizado é do tipo caractere, e possui 20 colunas x 4 linhas.

A comunicação sem fio entre o transmissor e o receptor é feita por dois módulos XBee™ ZB S2, especificado anteriormente; um para cada circuito, sendo que o circuito receptor será discutido mais adiante. Os módulos são alimentados com 3,3V, e antes de serem fixados aos circuitos, é necessário configurá-los. A configuração de cada módulo foi feita em um computador com o auxílio da aplicação X-CTU, uma aplicação para comunicação serial UART disponível *on-line* através do site da Digi Inc. A interface entre o módulo e o computador, para essa configuração, foi feita com um circuito integrado MAX232.

A placa de circuito impresso foi projetada em *software* específico, medindo 10 x 12 cm. No projeto, tomou-se o cuidado em dispor os elementos de modo a otimizar o espaço disponível, bem como fazer uma blindagem do circuito com utilização de um plano de terra. Como houve necessidade de utilização de trilhas em dupla face, o que dificultaria a confecção artesanal, o projeto da placa foi enviado para fabricação por uma empresa especializada. Dessa forma, foi possível a obtenção de uma placa mais robusta, de fibra de vidro, com máscara de solda, legenda de componentes e conectores estanhados (figura 18(a)). Todos os componentes foram soldados cuidadosamente, utilizando-se uma estação de solda. A Figura 18(b) mostra o circuito digital completo montado.

3.3.1.3 Montagem em caixa selada

A placa do circuito analógico, do circuito digital, o LCD e a fonte de alimentação foram afixados no interior de uma caixa selada, a fim de proteger o circuito das

Figura 18 - Montagem do circuito digital

intempéries. O leiaute foi planejado de forma a facilitar a visualização do LCD e a passagem dos cabos dos sensores. Embora tenha sido reservado espaço para uma bateria, que havia sido fixada no local, mais tarde ela foi retirada e substituída por uma fonte, pelos motivos expostos anteriormente. Na abertura inferior da caixa foi colocado um *cap* perfurado no centro, para passagem dos cabos. O espaço entre os cabos dos sensores e o orifício do *cap* foi selado com massa para calafetar, para impedir entrada de insetos. O aspecto final do conjunto completo do transmissor pode ser visto na Figura 19.

3.3.2 *Software embarcado*

O gerenciamento das tarefas executadas pelo transmissor do SAD é feita pelo *software* gravado no microcontrolador, representando dessa forma parte fundamental no sistema. O *software* embarcado foi elaborado de modo a tornar o bloco transmissor um completo SAD, executando todas as tarefas básicas para monitoração e armazenagem de dados. As tarefas definidas foram as seguintes:

- ✓ Leitura periódica do sinal de cada sensor;
- ✓ Exibição dos valores medidos no LCD;
- ✓ Cálculo da média das leituras digitais amostradas;
- ✓ Envio periódico das médias calculadas, juntamente com data e hora, para gravação no

Figura 19 - Conjunto transmissor do SAD

cartão de memória e para transmissão via RF.

Os algoritmos desenvolvidos no trabalho, tanto para o *software* embarcado no μC quanto para o *software* de aquisição de dados no computador, são apresentados em forma de fluxogramas, que utiliza símbolos geométricos para estabelecer a sequencia de operações a serem executadas. Essas simbologias são consagradas, e uma relação das utilizadas no trabalho é apresentada no APÊNDICE B.

Na Figura 20 é mostrado o fluxograma do *software* embarcado. Primeiramente, é exibido um texto introdutório no LCD, e um arquivo novo é criado no cartão SD para gravação dos dados. Em seguida, é feita a leitura do sinal de cada um dos 6 sensores durante 60s, a um intervalo de 6s por sensor, totalizando 10 leituras por unidade. A cada leitura, o valor digital é armazenado em uma nova posição de um vetor 10 x 6 ($ADC[,]$), além de ser convertido em um valor de temperatura ou umidade relativa pela respectiva equação de calibração ($f_{canal}()$) e então ser exibido no LCD. Após os 60s de leitura, é calculada a média dos valores amostrados, para cada sensor (esse cálculo pode ser entendido como um filtro digital simples). Esses dados, juntamente com a data e hora de sua criação (verificadas no RTC), são gravados em uma nova linha do arquivo no cartão SD e também enviados para

o módulo XBeeTM para transmissão via RF. Após isso, a sequência se repete com início de nova amostragem, até que o circuito seja desligado.

A equação para o LM35 foi determinada com base em seu fator de escala linear (10,0mV/°C) e no ganho do amplificador (*Ganho*). Assim temos:

$$Temp(^{\circ}C) = \frac{V_{out}(V) \cdot 100}{Ganho} \quad (17)$$

A voltagem de saída do amplificador (V_{out}) é determinada como segue:

$$V_{out} = \frac{ADC \cdot V_{ref}}{1024} \quad (18)$$

onde ADC é o valor digital (variável) retornado pelo ADC, e V_{ref} a voltagem de referência (constante) do ADC. Como o ADC é de 10 bits, i.e., retorna valores de 0 a 1023, temos 1024 divisões. A voltagem de referência usada foi de 5V.

Para os sensores HHH-4000 foram utilizadas as equações de calibração individuais, fornecidas pelo fabricante. Essas equações apresentam a seguinte forma:

$$RH(\%) = \frac{V_{out} - V_{offset}}{\alpha} \quad (19)$$

onde RH é a umidade relativa; V_{out} é a voltagem de saída do sensor, determinada pela Equação 18; V_{offset} sua voltagem a 0% RH; e α a inclinação da curva de calibração.

3.3.3 Protótipo do *hardware* do receptor

O circuito receptor tem a finalidade de receber os pacotes de dados via RF do transmissor, e enviá-los para um computador para processamento. O circuito é simples, constando de um módulo XBeeTM ZB S2, um CI MAX232, regulador de tensão, plugue para fonte de alimentação e conector DB9 de comunicação serial. O MAX232 faz a comunicação serial entre o XBeeTM e o computador (figura 16 da página 63).

Assim como a placa do circuito analógico do transmissor, a placa de circuito impresso do receptor foi feita de forma artesanal, seguindo-se exatamente o mesmo procedimento. A placa foi fixada numa caixa plástica, que foi perfurada para fixação do plugue e do

Figura 20 - Fluxograma do *software* embarcado

conector DB9. Esse protótipo foi conectado num computador com cabo serial, e alimentado com uma fonte de 12Vcc.

3.3.4 Desenvolvimento do *software* para aquisição de dados

O *software* para aquisição de dados no computador é essencial no SAD proposto, tornando-o um completo sistema de monitoramento de dados à distância, com acesso *web*. Para a implementação do *software* foram utilizadas apenas ferramentas computacionais de acesso livre e multiplataforma. As linguagens de programação empregadas foram o ANSI C (compilador GCC), PHP e HTML. Visando maior simplicidade no desenvolvimento, foram integradas ao *software* certas ferramentas de uso consagrado, as quais realizam tarefas específicas. Faz parte dessa integração o *gnuplot* e o *ImageMagick*, para a geração dos gráficos e edição dinâmica de imagens, respectivamente. Toda a implementação foi feita sob o sistema operacional *Linux*, na distribuição *Debian squeeze*, em um computador *desktop*.

Para o *software* de aquisição de dados foram definidas basicamente as seguintes tarefas:

- ✓ Comunicação serial com o *hardware* receptor, para recepção dos dados enviados via RF pelo transmissor e armazenagem para consulta (tanto local quanto pela *web*);
- ✓ Envio de alerta SMS no caso da temperatura de qualquer um dos três sensores exceder um valor pré-determinado pelo operador;
- ✓ Exibição de gráficos das leituras dos seis sensores, atualizados a cada minuto;
- ✓ Apresentação de todos os dados numa tabela formatada, atualizada a cada minuto;
- ✓ Visualização dos valores instantâneos (por minuto), de cada sensor, numa figura 3D do secador solar;
- ✓ Meios para iniciar e interromper a recepção dos dados, bem como para organizar os dados armazenados para consulta posterior.

O algoritmo desenvolvido é apresentado em forma de fluxograma nas Figuras 21 e 22. A interface com o usuário é feita através de páginas em PHP. Na página principal optou-se por um simples menu com opções diferentes para visualização dos dados. Para ativar e desativar a gravação dos dados foram criadas duas páginas, que podem ser acessadas apenas via URL. Isso foi uma medida simples para evitar o acesso por usuários não autorizados, uma

vez que não foi implementado um sistema com senha. Para o envio de *SMS*, foi utilizado um *Web service SMS* gratuito. A sub-rotina *Liga* (figura 22) foi escrita em C e efetua as tarefas mais básicas. Os demais detalhes de funcionamento do *software* são mostrados no fluxograma.

3.4 Testes preliminares do SAD

Concluída a construção do SAD, foram feitos testes de bancada, a fim de corrigir possíveis problemas que surgissem, antes de sua instalação no campo. Para tal, o bloco transmissor e o receptor com o PC foram colocados numa mesma sala, numa distância não mais de 50 cm entre ambos, para avaliação da transmissão dos dados, do desempenho dos sensores, da gravação de dados no cartão SD e do *software* de aquisição de dados. Os sensores foram numerados com etiquetas, conforme sua ordem de ligação nos canais do ADC e sua referência no *software* embarcado.

A transmissão de dados foi avaliada verificando-se a regularidade na recepção dos pacotes. Para verificar o desempenho dos sensores e o funcionamento ininterrupto, o SAD foi deixado ligado cerca de 33 horas. Durante as primeiras 14 horas, a sala permaneceu fechada e com o ar condicionado ligado, a fim de se registrar as alterações esperadas de umidade relativa e temperatura. Depois, desligou-se o ar condicionado para que a temperatura voltasse ao normal. Enquanto isso, um dos sensores de temperatura foi aquecido entre 40 e 55°C. Os dados foram registrados, e os gráficos obtidos no PC foram comparados.

Posteriormente, uma modificação foi feita no bloco transmissor, com a substituição do cabo de um dos LM35 por outro de comprimento maior, para que o sensor pudesse ser fixado no local previsto do secador solar. O comprimento do novo cabo é de 2,27 m, cerca de 70 cm maior que os demais. Novos testes foram feitos através de leitura dos valores medidos no LCD, para verificar possível alteração.

3.5 Instalação do SAD em campo

Depois dos testes preliminares, modificações e devidas correções, o SAD foi considerado acabado e pronto para instalação em campo. O transmissor foi instalado no secador solar. Para isso, a caixa selada foi afixada em um dos suportes do secador, com uso

Figura 21 - Fluxograma do *software* para aquisição de dados, parte 1/2

Figura 22 - Fluxograma do *software* para aquisição de dados, parte 2/2

de abraçadeiras e borracha de pneumático de bicicleta para uma melhor fixação. Os sensores foram fixados em três pontos: na entrada do coletor solar, entre o coletor e a entrada da cabine de secagem, e no topo da cabine. Em cada ponto foi colocado um LM35 e um HIH-4000. Para isso, foram feitos furos na base do coletor solar, com auxílio de furadeira, para passagem dos respectivos cabos. Cada par de sensores foi inserido em pedaços de tubo de PVC para que as leituras das variáveis fossem feitas na sombra, além de servir como proteção contra intempéries (figura 23). Esses pedaços de tubo foram revestidos com papel alumínio para evitar seu aquecimento excessivo durante o dia. Os cabos foram fortemente fixados nos pedaços de tubo através de sua passagem forçada pelos orifícios, com auxílio de pequenas folhas de borracha e sem uso de cola, a fim de permitir fácil manutenção.

Figura 23 - Pedaços de tubo de PVC preparados para proteção dos sensores

O computador com o *software* de aquisição de dados, juntamente com o circuito receptor, foram colocados num local abrigado (figura 24), a cerca de 60 m do secador solar. O receptor foi colocado próximo à janela, como pode ser visto na figura, de modo que em linha reta não houvessem barreiras entre o transmissor e o receptor. O computador foi conectado a um roteador *wireless* instalado no local.

3.6 Teste do SAD em campo

Findada a instalação, foram feitos vários testes visando possíveis correções, além de avaliar o desempenho do SAD em seu local definitivo. Verificaram-se então a recepção

Figura 24 - Local onde foi instalado o PC com o receptor, para recepção dos dados à distância

de dados em diferentes condições, o desempenho dos sensores no local, o funcionamento do *software* de aquisição de dados e do sistema de alerta. Por questões de tempo necessário para implementação do servidor, não foi testado, no presente trabalho, o acesso *web* para o *software* desenvolvido. Porém, o *software* foi testado no *localhost*, com o uso de diferentes navegadores. Para avaliar a integridade na recepção dos dados à distância, os dados registrados no PC foram comparados com os dados no cartão SD.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Avaliação do secador solar

O secador solar construído aproximou-se bastante do projeto original (figura 25), e os testes iniciais mostraram-se bastante satisfatórios. Ficando em campo aberto durante um ano até o presente, apresentou boa tolerância às intempéries, resistindo a fortes chuvas e rajadas de vento. Em dias chuvosos, porém, ocorria entrada de água na cabine de secagem, o que poderia comprometer o produto quando o secador estivesse em uso. Assim, as frestas do secador foram vedadas com silicone, massa para calafetar ou fita de espuma para vedação, conforme o caso.

Figura 25 - Secador solar em campo

Foram feitas algumas medições preliminares de temperatura do ar no secador, usando-se um termômetro infravermelho e um de mercúrio. Constatou-se que a temperatura no interior da câmara de secagem, em dias de sol e durante a tarde, era elevada em cerca de 10 °C em relação à temperatura externa.

O teste operacional feito com tomate cereja mostrou-se aceitável. Os tomates

ficaram cerca de dez dias no secador, até a obtenção de um produto seco de textura e sabor característicos (figura 26). A massa do produto seco era da ordem de 400g. Vale salientar que o teste foi feito no inverno, e durante o período de secagem houveram dias chuvosos, reduzindo a intensidade da radiação solar incidente. Uma medida que poderia contribuir para redução do tempo de secagem é o uso de meios para armazenagem de energia térmica, como a colocação de uma camada de brita no coletor solar. Combinado a isso, pode-se melhorar a isolamento do secador, com fixação de material isolante em suas paredes.

Figura 26 - Teste operacional utilizando tomate cereja

É importante observar que numa análise acurada seriam necessários mais testes, como: desidratação do tomate em soluções osmóticas com diferentes concentrações, ajuste de curvas de cinética de secagem, análises químicas (como umidade, acidez titulável, °Brix, etc.) análise sensorial, etc. Porém, para os objetivos deste trabalho, considerou-se suficiente o teste efetuado.

4.2 Testes preliminares do SAD

O teste inicial do SAD completo montado na bancada mostrou bom funcionamento da rede sem fio, entre o módulo transmissor e receptor, sem nenhuma perda de pacotes de dados. A cada minuto, o *software* do PC registrava os valores de forma ininterrupta. Ao final de 33 horas de funcionamento, o SAD foi desligado. Os dados obtidos são apresentados na Figura 27. Nessa figura, temos os gráficos dos 3 sensores de umidade relativa e dos 3

sensores de temperatura. Nota-se que durante as primeiras 14 horas, como o esperado, após queda brusca da temperatura e umidade relativa (RH), seguiu-se uma queda lenta da temperatura e elevação da RH. A característica de zigue-zague desse trecho da curva resulta do funcionamento intermitente do equipamento de ar condicionado, que se utiliza desse artifício para manter a temperatura no valor pré programado. A partir das 8h do dia 17, com o desligamento do ar condicionado e abertura da sala, as medidas dessas duas variáveis se elevaram. Os picos de temperatura observados nos gráficos foram provocados de forma proposital. No gráfico (figura 27(b)) a elevação da curva foi provocada mantendo-se o sensor aquecido, com o aparato da Figura 28.

Ainda na Figura 27 podemos observar a semelhança entre as curvas de RH. Uma vez que os sensores foram submetidos às mesmas condições, isso indica que a acurácia dos sensores de RH estão muito próximas. O mesmo ocorre com os sensores de temperatura, avaliando-se trechos definidos.

Uma representação mais acurada da distância entre os valores medidos de RH pode ser vista na Figura 29, que mostra a curva de cada sensor num mesmo gráfico. Os dados foram coletados em outro teste de bancada e com praticamente as mesmas condições para os sensores. Gráficos comparativos de temperatura serão discutidos adiante.

Os testes iniciais efetuados mostraram que o SAD respondeu corretamente às variações do ambiente.

4.2.1 Verificação do cartão SD

Exemplos de nomes de arquivos gerados e gravados no cartão SD são mostrados na Figura 30, e na Figura 31 podemos ver o conteúdo de um desses arquivos. Na primeira coluna encontra-se o número da leitura, seguida das colunas de data, hora e a média dos valores digitais amostrados de cada sensor. A escolha por manter os valores brutos é a flexibilidade, caso haja necessidade de recuperação dos dados, em utilizar equações de calibração diferentes. Nesse caso, a conversão dos valores pode ser feita por uma simples rotina em AWK, por exemplo, e os dados visualizados no *software* de aquisição de dados.

Durante testes subsequentes com o SAD, o cartão SD parou de gravar novos arquivos por motivo desconhecido, após ter gravado 167 arquivos. Após formatação rápida

(a) Umidade relativa 1

(b) Temperatura 1

(c) Umidade relativa 2

(d) Temperatura 2

(e) Umidade relativa 3

(f) Temperatura 3

Figura 27 - Gráficos de temperatura e umidade relativa do ar, obtidos durante o teste de bancada do cartão, a gravação funcionou normalmente. Falhas de gravação acontecem provavelmente porque não foi implementado meios para encerrar a rotina de gravação e desmontar o cartão

Figura 28 - Aparato para manter um dos sensores aquecido, durante teste de bancada

Figura 29 - Curvas dos 3 sensores de umidade relativa, submetidos às mesmas condições, durante um teste de bancada

```
REG_010411_160227.txt
REG_010411_161804.txt
REG_010611_085255.txt
REG_030311_101534.txt
REG_100511_160625.txt
REG_300511_195722.txt
REG_310311_155128.txt
REG_310311_165721.txt
REG_310511_085148.txt
```

Figura 30 - Nomes de arquivos gravados no cartão SD pelo *software* embarcado, com cadeia de caracteres formada por data e hora de criação

SD antes do desligamento do circuito. Dessa forma, há possibilidade do circuito ser desligado durante uma gravação, mesmo que rápida, provocando falhas no processo. Todavia, como o SAD proposto faz uso de telemetria, a correção do problema não foi feita no presente trabalho, já que eventuais falhas de gravação no cartão não são críticas.

#N._Leitura	Data	Hora	Umid_1	Umid_2	Umid_3	Temp_1	Temp_2	Temp_3
1	25/05/11	10:38:03	0521.8	0524.6	0519.4	0206.9	0211.9	0251.9
2	25/05/11	10:39:13	0520.5	0523.1	0519.5	0206.9	0211.5	0229.5
3	25/05/11	10:40:23	0524.5	0526.1	0522.7	0207.0	0212.5	0181.4
4	25/05/11	10:41:33	0525.9	0526.7	0523.2	0207.0	0211.2	0252.1
5	25/05/11	10:42:43	0523.0	0525.1	0521.2	0207.4	0210.2	0263.4
6	25/05/11	10:43:53	0520.7	0523.9	0520.5	0207.4	0210.2	0194.6
7	25/05/11	10:45:03	0522.9	0525.1	0523.3	0207.4	0209.6	0264.3
8	25/05/11	10:46:13	0523.0	0526.1	0524.1	0207.3	0209.0	0197.4
9	25/05/11	10:47:23	0524.5	0527.5	0521.5	0207.0	0208.9	0226.2
10	25/05/11	10:48:33	0523.6	0526.2	0522.4	0207.2	0208.9	0198.0
11	25/05/11	10:49:43	0522.6	0527.6	0524.0	0206.9	0208.5	0238.2
12	25/05/11	10:50:53	0523.2	0527.0	0521.0	0206.7	0208.5	0259.9
13	25/05/11	10:52:02	0521.5	0526.1	0522.2	0207.0	0209.0	0239.7
14	25/05/11	10:53:12	0520.0	0525.6	0520.8	0207.2	0209.1	0211.6
15	25/05/11	10:54:22	0520.2	0524.0	0519.9	0207.2	0209.2	0205.4
...								

Figura 31 - Conteúdo de um arquivo gravado no cartão SD

4.2.2 Sensores de temperatura

Como visto anteriormente, os sensores de temperatura estavam funcionando de forma esperada, com valores próximos entre si, para as mesmas condições (figura 32). Porém, com a substituição do cabo do sensor 3 por outro maior, seus valores medidos começaram a variar grandemente, conforme pode ser visto na Figura 33.

Figura 32 - Comportamento dos sensores de temperatura em teste de bancada

Visando encontrar a fonte do problema, foi feita uma pesquisa em fóruns de discussão e na documentação do sensor. Assim, de acordo com National Semiconductor

Figura 33 - Comportamento do sensor 3 após substituição do cabo

(2000), o LM35 possui uma habilidade limitada para dirigir cargas capacitivas elevadas, tolerando até 50 pF sem precauções especiais. Para aumentar a tolerância da capacitância, é recomendado um circuito R-C (resistor-capacitor) (figura 34), com valores típicos de 75Ω e 0.2 ou 1μF, respectivamente.

Figura 34 - Circuito R-C recomendado pelo fabricante (NATIONAL SEMICONDUCTOR, 2000)

Inicialmente foi testado um circuito R-C com 100Ω e 1μF, por estarem os componentes prontamente disponíveis. O resultado é mostrado na Figura 35, onde o sensor 3 torna a ficar estável. Os picos observados na curva do sensor foram provocados para avaliar o tempo de resposta.

Após o primeiro teste, efetuou-se a substituição do resistor de 100Ω por outro de 82Ω para verificar se haveria alguma alteração, uma vez que esse valor se aproxima mais do valor típico sugerido pelo fabricante. O resultado na Figura 36 mostra que curiosamente houve alteração no sensor 1.

Feitos os testes, partiu-se para a adaptação de um circuito R-C de 100Ω e

Figura 35 - Comportamento do sensor 3 após colocar circuito R-C

Figura 36 - Comportamento do sensor 1 após substituir R no sensor 3

$1\mu\text{F}$ para cada um dos 3 sensores de temperatura, a fim de eliminar possíveis diferenças. O circuito adaptado no sensor não poderia afetar o tamanho físico do conjunto todo, pois todos os componentes deveriam passar pelo orifício do pedaço de tudo de PVC para ficarem protegidos. Assim, foram usados capacitores de tântalo e pequenos resistores, que foram soldados de modo a economizar espaço. O aspecto final é mostrado na Figura 37.

Com os 3 sensores modificados, os valores de leitura entre eles ficaram mais próximos e mais estáveis, para as mesmas condições, conforme pode ser visto na Figura 38.

Figura 37 - Elemento sensor de temperatura com circuito R-C, feito de forma compacta

Figura 38 - Curvas de temperatura após colocar o circuito R-C nos 3 sensores

4.3 Software de aquisição de dados

O *software* de aquisição de dados no PC possui uma interface amigável, facilitando sua utilização por um operador sem experiência prévia. Por tratar-se de uma aplicação *web*, é possível seu acesso de qualquer local onde haja uma conexão com a Internet, bastando para isso que o servidor esteja ligado e conectado. Como dito anteriormente, a aplicação foi testada no PC servidor, em *localhost*, bastando apenas instalar e configurar a rede para ficar disponível externamente. No teste da aplicação foram utilizados navegadores diferentes, tanto em modo gráfico (*Mozilla Firefox*, *Google Chrome* e *Internet Explorer*) quanto em modo texto (*Lynx* e *W3M*), apresentando bons resultados.

Para que a monitoração dos dados à distância seja iniciada, após ligar o transmissor e o PC/receptor, é necessário ativar essa monitoração na página *web* correspondente,

através de um navegador (figura 39). O acesso a essa página é feito via URL, e nela é solicitado o valor da temperatura crítica para envio de alerta *SMS*. Enquanto os dados estiverem sendo monitorados, caso o valor de alguma temperatura ultrapasse o informado, o sistema enviará um alerta *SMS* para o número de celular pré definido no programa. O serviço gratuito de *SMS* utilizado envia a maior parte das mensagens; porém um *Web service SMS* pago pode apresentar maior confiabilidade.

Figura 39 - Página para ativar a gravação dos dados recebidos via RF

Conforme os valores medidos são registrados, o *software* permite sua visualização em forma de gráficos, tabela ou valores instantâneos. A página contendo os gráficos gerados é mostrada na Figura 40. São gerados 6 gráficos, semelhantes aos da Figura 27 da página 80, podendo ser visualizados deslocando-se a barra de rolagem. Cada gráfico possui um *hyperlink* para visualização em um formato maior em nova janela.

O gráfico ampliado (em formato .jpg), por sua vez, possui *hyperlink* para um gráfico em uma página em HTML5. Essa versão do HTML possui recursos mais dinâmicos, sendo possível uso de *zoom* para ampliar parte do gráfico, ou verificar valores numéricos através de cliques (figura 41).

A opção para visualização em tabela formatada (figura 42) é útil para visualização dos valores instantâneos de cada leitura, bem como dos valores acumulados.

Outra forma de visualização de dados instantâneos (a cada minuto) é feita com o auxílio de um modelo 3D do secador solar, onde cada valor medido é exibido no local correspondente do sensor que efetua a medição (figura 43).

Para encerrar o monitoramento, há uma página específica, acessada da mesma forma que a página da Figura 39. Essa página (figura 44) permite organizar os dados em

Figura 40 - Visualização dos gráficos dos 6 sensores

Figura 41 - Gráfico em uma página HTML5

diretórios distintos para posterior acesso. É apresentada uma lista dos diretórios criados previamente, e ao entrar com um novo nome na caixa de texto, o diretório é criado e todos os dados movidos para ele. A partir daí, o *software* fica disponível para receber um novo

Sistema Secador Solar - Esalq - USP - Mozilla Firefox

File Edit View History Bookmarks Tools Help

http://localhost/secador/tabela.php

Untitled Document x Sistema Secador Solar - Esalq - USP x

Sistema secador solar

VER DADOS

Como gráficos

Como tabela

Instantâneos

INFORMAÇÕES

Ajuda

Sobre

No. leitura	Data	Hora	Umid rel 1	Umid rel 2	Umid rel 3	Temp 1	Temp 2	Temp 3
13644	12/08/11	13:00:20	23.8	12.6	11.5	35.9	47.1	50.3
13645	12/08/11	13:01:23	23.9	13.1	11.6	35.8	47.0	50.3
13646	12/08/11	13:02:27	23.4	12.9	11.8	35.9	47.0	50.4
13647	12/08/11	13:03:30	22.5	12.6	11.5	36.1	47.1	50.6
13648	12/08/11	13:04:33	21.2	11.8	10.7	36.4	47.5	50.7
13649	12/08/11	13:05:37	21.3	11.9	10.8	36.7	47.6	50.7
13650	12/08/11	13:06:40	21.3	12.0	11.0	36.7	47.6	50.7
13651	12/08/11	13:07:44	21.3	12.0	10.6	36.9	47.6	50.7
13652	12/08/11	13:08:47	20.4	11.7	10.2	36.7	47.4	50.8
13653	12/08/11	13:09:50	20.7	11.8	10.4	36.5	47.3	50.8
13654	12/08/11	13:10:54	21.1	12.3	10.3	36.5	47.1	50.8
13655	12/08/11	13:11:57	21.4	12.3	10.8	36.5	47.2	50.8
13656	12/08/11	13:13:00	21.2	12.1	10.6	36.3	46.9	50.6
13657	12/08/11	13:14:06	22.5	12.8	11.0	36.3	46.9	50.7

Done

Figura 42 - Visualização da tabela contendo todos os dados acumulados

Figura 43 - Dados instantâneos indicados no secador solar

conjunto de dados. É importante observar que após concluída a tarefa pela página, nenhum comando é enviado ao módulo no secador solar, que continua ligado e registrando dados no

cartão SD.

Figura 44 - Página para interromper o monitoramento e organizar os dados

4.4 Testes do SAD em campo

Nos primeiros testes em campo foi verificado se a distância entre o transmissor e o receptor ($\approx 60\text{m}$) afetava a recepção dos pacotes de dados. Nesse tempo, dois veículos estacionaram em frente ao secador, servindo como barreira para o sinal, além do tempo estar chuvoso.

Quando não houveram barreiras, também não houveram perda de pacotes. Com os veículos no caminho, houveram tanto perda de alguns pacotes como outros que chegavam corrompidos. Contudo, o número de pacotes perdidos ou corrompidos não foram consideráveis quando comparados com o total de amostras. Na Figura 45 podem ser vistos alguns trechos de dados coletados onde houveram perda de pacotes ou dados corrompidos, com diferentes formatos. Entre as linhas 1 e 2 por exemplo, perderam-se 3 pacotes; entre 3 e 4, 10 pacotes. A linha 9 apresenta falta de dados; a 19, um dos valores de RH com sinal negativo, e outro com valor incorreto; e assim por diante.

Quando há registros corrompidos no arquivo por alguma razão, não é possível a geração dos gráficos diretamente através do *software web*. No entanto, como esses registros com falha seguem um certo padrão, pode-se facilmente implementar uma rotina de filtragem, a fim de gerar um novo arquivo contendo apenas os registros em formato correto. Assim,

1	5517	07/06/11	17:19:23	106.1	105.9	105.9	18.8	19.2	19.1
	5521	07/06/11	17:23:37	105.6	106.2	105.4	18.7	19.1	19.1
3	5523	07/06/11	17:25:43	106.0	106.9	105.3	18.7	19.1	19.0
	5534	07/06/11	17:37:15	107.5	108.5	107.9	18.5	18.8	18.8
5	5535	07/06/11	17:38:18	106.9	108.0	107.5	18.5	18.9	18.8
	5536	07/06/11	17:39:21	107.4	108.4	107.7	18.5	18.8	18.8
7	...								
	6600	08/06/11	12:15:57	31.7	18.9	17.2	29.3	38.7	38.6
9	381 .5	0300.6	17.8	17.6	34.1	39.8	38.7	38.6	
	6602	08/06/11	12:18:03	31.9	19.6	17.7	29.2	38.7	38.6
11	6603	08/06/11	12:19:06	31.4	19.5	17.7	29.3	38.7	38.7
	383 .1	0302.4	17.9	17.8	34.3	39.8	38.7	38.7	
13	6605	08/06/11	12:21:12	33.0	19.8	18.1	29.3	38.8	38.8
	6606	08/06/11	12:22:15	33.6	20.4	18.8	29.3	39.0	38.8
15	...								
	6639	08/06/11	12:56:55	29.1	17.8	16.4	29.5	39.7	40.4
17	362 .1	0287.4	16.4	18.3	35.8	41.5	39.7	40.4	
	368 .8	0291.6	17.0	18.5	36.0	41.6	39.7	40.4	
19	6643	08/06/11	13:01:06	1020.0	-26.3	36.0	41.6	39.7	40.4
	6646	08/06/11	13:04:15	28.9	18.0	16.5	29.8	40.3	40.2
21	6647	08/06/11	13:05:18	28.7	17.8	16.1	29.5	40.1	40.2
	...								
23	6731	08/06/11	14:33:27	44.8	22.2	34.1	20.8	24.8	34.4
	6732	08/06/11	14:34:30	46.1	23.2	34.9	20.8	24.6	34.0
25	633	08/06/11	14:35:33	46.1	23.7	35.8	20.8	24.5	33.8
	76734	08/06/11	14:36:36	45.0	23.2	35.4	20.8	24.4	33.8
27	6735	08/06/11	14:37:39	46.6	24.0	36.0	20.8	24.2	33.6

Figura 45 - Arquivo mostrando perda de dados ou dados corrompidos, durante a recepção do sinal RF num teste em campo

o arquivo criado pode ser usado para geração de gráficos, sendo que o formato das curvas é afetado caso faltem muitos dados. Nota-se que as falhas ou perdas de registros ocorrerão apenas se houverem barreiras no caminho do sinal RF. Uma outra solução, caso seja frequente o tráfego de veículos no local, é substituir os módulos XBeeTM ZB S2 por outros modelos de maior alcance.

A fim de examinar o desempenho do SAD no secador solar, durante quatro dias consecutivos de sol foi registrada a variação da temperatura e da umidade relativa, ambas para o ar de entrada, ar do coletor solar e ar da cabine de secagem. As medições são feitas, respectivamente, na abertura frontal do coletor solar, entre o coletor e a cabine de secagem, e próximo à chaminé, que são os pontos onde estão localizados os sensores.

No gráfico da Figura 46 são apresentadas as curvas de temperatura do ar. Nota-se que perto das 15h dos dias 13 e 15, as temperaturas chegaram aos 55°C para o ar

da cabine, sendo de 38°C no ar de entrada, i.e., uma elevação de 17°C . Para o ar do coletor no mesmo horário, foi registrado 50°C . À noite, as temperaturas chegaram a 12°C .

Figura 46 - Variação diária da temperatura do ar de entrada, ar do coletor e ar da cabine

Assim como no gráfico de temperatura, as curvas de umidade relativa do ar (figura 47) apresentam as maiores diferenças entre si nos pontos localizados perto das 15h de cada dia. O menor valor registrado para o ar de entrada foi da ordem de 16%; para ar do coletor, 9%; e 8% para o ar da cabine. À noite, os valores chegaram a 100%.

Figura 47 - Variação diária da umidade relativa do ar de entrada, ar do coletor e ar da cabine

Ekechukwu e Norton (1997), estudando um secador solar de convecção natural de grande porte, fizeram uso de um sistema de aquisição de dados com tecnologia disponível

na época. Seus gráficos de temperatura e umidade relativa são muito parecidos com os obtidos pelo SAD desenvolvido, como podemos ver na Figura 48 para temperatura do ar, e na Figura 49 para umidade relativa do ar. A exemplo do trabalho citado, pode-se afirmar que o formato das curvas descritas é típico para o caso estudado, dando indícios de que o SAD aqui desenvolvido avaliou corretamente o objeto de estudo.

Figura 48 - Variação diária da temperatura do ar de secagem, ar da chaminé e ar ambiente (EKECHUKWU; NORTON, 1997)

Figura 49 - Variação diária da umidade relativa do ar de secagem, ar da chaminé e ar ambiente (EKECHUKWU; NORTON, 1997)

Além dos testes descritos, foi feito um último teste para avaliar o funcionamento ininterrupto do SAD por longos períodos. No teste, o SAD foi deixado em funcionamento durante 28 dias, registrando dados tanto no cartão SD como no PC à distância. Durante o

período, os dados foram registrados continuamente, exceto durante uma queda de energia de 16 minutos.

5 CONCLUSÕES

5.1 Secador solar de convecção natural misto

- ✓ Construído com as peças principais em aço inox, mostrou-se bastante resistente às intempéries pelo período de um ano até o momento;
- ✓ Encontra-se operacional, preparado para secagem de produtos agrícolas em dias de sol.

5.2 Sistema de aquisição de dados utilizando telemetria

- ✓ A uma distância de 60 m em campo aberto entre os módulos transmissor e receptor, os dados foram recebidos no PC de forma correta, sem perda de pacotes. Com barreiras extensas (e.g. mais de um veículo) no caminho, há pouca perda de dados, não comprometendo as medições;
- ✓ Os sensores utilizados apresentaram boa acurácia para a aplicação, e responderam corretamente às variações do ambiente;
- ✓ A armazenagem de dados em cartão SD do módulo transmissor mostrou funcionamento satisfatório, necessitando apenas de pequenas correções futuras;
- ✓ O *software* de aquisição de dados no PC permite a visualização dos dados via *web*, em forma de gráficos interativos, tabela ou figura; além de enviar alerta via *SMS* caso algum valor de temperatura ultrapasse o predeterminado;
- ✓ As curvas de temperatura e umidade relativa do secador solar feitas com o equipamento apresentaram a resposta esperada;
- ✓ A monitoração de dados pode ser feita durante longos períodos, sem interrupções; mostrando que o sistema de aquisição de dados apresenta grande estabilidade e confiabilidade.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, J.M.; GASPARINO FILHO, J. **Desidratação de frutas e hortaliças: manual técnico**. Campinas: ITAL, 2002. 205 p.

AYENSU, A. Dehydration of food crops using a solar dryer with convective heat flow. **Solar Energy**, Amsterdam, v. 59, n. 4/6, p. 121-126, 1997.

BARBOSA-CÁNOVAS, G.V.; VEGA-MERCADO, H. **Dehydration of foods**. New York: Chapman & Hall, 1996. 330 p.

BENALI, M.; AMAZOUZ, M. Drying of vegetable starch solutions on inert particles: quality and energy aspects. **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, v. 74, p. 484-489, 2006.

BENTLEY, J.P. **Principles of measurement systems**. 4th ed. Harlow: Pearson Education, 2005. 544 p.

BOBBIO, P.A.; BOBBIO, F.O. **Química do processamento de alimentos**. 3. ed. São Paulo: Varela, 2001. 143 p.

BRAGA, N.C. Aquisição de dados. **Saber Eletrônica**, São Paulo, ano 44, n. 425, jun. 2008. Disponível em: <<http://www.sabereletronica.com.br/secoes/leitura/831>>. Acesso em: 21 out. 2011.

_____. O que significa rail-to-rail (RRO)? **Saber Eletrônica**, São Paulo, n. 442, nov. 2009. Disponível em: <<http://www.sabereletronica.com.br/secoes/leitura/1486>>. Acesso em: 21 out. 2011.

BRENNENDORFER, B.; KENNEDY, L.; OSWIN BATEMAN, C.O.; TRIM, D.S.; MREMA, G.C.; WEREKO-BROBBY, C. **Solar dryers: their role in post-harvest processing**. London: Commonwealth Science Council, 1987. 298 p.

CHITARRA, M.I.F.; CHITARRA, A.B. **Pós-colheita de frutas e hortaliças**. 2. ed. Lavras: UFLA, 2005. 783 p.

CHUA, K.J.; MUJUMDAR, A.S.; HAWLADER, M.N.A.; CHOU, S.K.; HO, J.C. Batch drying of banana pieces - effect of stepwise change in drying air temperature on drying kinetics and product colour. **Food Research International**, Amsterdam, v. 34, p. 721-731, 2001.

COCOTA JÚNIOR, J.A.N. Leitura de temperatura e umidade pelo Logo. **Mecatrônica Fácil**, São Paulo, n. 27, mar./abr. 2006. Disponível em: <http://www.mecatronicafacil.com.br/edicoes/edicoes.asp?comando=027_42&dettaglio=027>. Acesso em: 13 Abril 2007.

DIGI INC. **XBeeTM/RF family features comparison**. Disponível em:

<http://www.digi.com/pdf/chart_xbee_rf_features.pdf>. Acesso em: 06 out. 2011a.

_____. **XBee™/XBee-PRO™ ZB RF modules**. Product Manual. 2010. Disponível em: <http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000976_G.pdf>. Acesso em: 06 out. 2011.

_____. **XBee™ ZB ZigBee RF modules: Specs**. Disponível em: <<http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/zigbee-mesh-module/xbee-zb-module#specs>>. Acesso em: 06 out. 2011b.

_____. **ZigBee wireless standard**. Disponível em: <<http://www.digi.com/technology/rf-articles/wireless-zigbee>>. Acesso em: 03 out. 2011c.

DISSA, A.O.; BATHIEBO, J.; KAMA, S.; SAVADOGO, P.W.; DESMORIEUX, H.; KOULIDIATI, J. Modelling and experimental validation of thin layer indirect solar drying of mango slices. **Renewable Energy**, Amsterdam, v. 34, p. 1000-1008, 2009.

EKECHUKWU, O.V.; NORTON, B. Experimental studies of integral-type natural-circulation solar-energy tropical crop dryers. **Energy Conversion & Management**, Amsterdam, v. 38, p. 1483-1500, 1997.

EKECHUKWU, O.V.; NORTON, B. Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology. **Energy Conversion & Management**, Amsterdam, v. 40, p. 615-655, 1999.

EL-AOUAR, Â.A. **Estudo do processo de secagem de mamão formosa (carica papaya l.) fresco e pré-tratado osmoticamente**. 2005. 241 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2005.

FONSECA, H.; CANTARELLI, P.R. Princípios e métodos gerais de conservação de alimentos: conservação pelo controle da umidade, por preservativos e por radiações; embalagens. In: CAMARGO, R. **Tecnologia dos produtos agropecuários: alimentos**. São Paulo: Nobel, 1984. cap. 6, p. 97-112.

FONTANA JR., A.J. Water activity's role in food safety and quality. In: NSF INTERNATIONAL CONFERENCE ON FOOD SAFETY, 2., 2000, Savannah. **Proceedings...** Washington: Decagon Devices, 2001. 7 p. (Application Note). Disponível em: <<http://web.archive.org/web/20031205011830/http://www.decagon.com/appnotes/aw&safety.pdf>>. Acesso em: 15 set. 2011

FUDHOLI, A.; SOPIAN, K.; RUSLAN, M.H.; ALGHOUL, M.A.; SULAIMAN, M.Y. Review of solar dryers for agricultural and marine products. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 14, n. 1, p. 1-30, 2010.

HANSMAN JR., R.J. Characteristics of instrumentation. In: WEBSTER, J.G. **Measurement**,

instrumentation and sensors handbook. Boca Raton: CRC Press, 1999. chap. 1, p. 24-31.

HINRICHS, R.A.; KLEINBACH, M. **Energia e meio ambiente**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003. 543 p.

HONEYWELL. **HIH-4000 series humidity sensors**. 2008. Disponível em:
<http://sensing.honeywell.com/index.cfm/ci_id/140570/la_id/1/document/1/re_id/0>. Acesso em: 21 nov. 2008.

IBRAHIM, D. **Advanced PIC microcontroller projects in C: from USB to ZIGBEE with the PIC 18F series**. New York: Elsevier, 2008. 560 p.

IMRE, L. Solar drying. In: MUJUMDAR, A.S. (Ed.). **Handbook of industrial drying**. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. chap. 13, p. 308-356.

INSTITUTO DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS. **Apresentação do curso sobre desidratação de frutas e hortaliças**. Disponível em:
<<http://www.ital.sp.gov.br/fruthotec/eventos/desidratacao/apresentacao.html>>. Acesso em: 25 fev. 2010.

KAREL, M. Dehydration of foods. In: FENNEMA, O.R. **Principles of food science, part II: physical principles of food preservation**. New York: Marcel Dekker, 1975a. v. 4, chap. 10, p. 309-357.

_____. Water activity and food preservation. In: FENNEMA, O.R. **Principles of food science, part II: physical principles of food preservation**. New York: Marcel Dekker, 1975b. v. 4, chap. 8, p. 237-263.

LABUZA, T.P. Sorption phenomena in foods. **Food Technology**, Chicago, v. 22, p. 263-266, 1968.

LABUZA, T.P.; McNALLY, L.; GALLAGHER, D.; HAWKES, J.; HURTADO F. Stability of intermediate moisture foods. 1. Lipid oxidation. **Journal of Food Science**, Chicago, v. 37, n. 1, p. 154-159, 1972.

LEWICKI, P.P.; JAKUBCZYK, E. Effect of hot air temperature on mechanical properties of dried apples. **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, v. 64, p. 307-314, 2004.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335 p.

LOEWENSTEIN, E.B. Analog-to-digital converters. In: WEBSTER, J.G. **Measurement, instrumentation and sensors handbook**. Boca Raton: CRC Press, 1999. chap. 85, p. 2199-2219.

LOZANO-NIETO, A. Telemetry. In: WEBSTER, J.G. **Measurement, instrumentation and**

sensors handbook. Boca Raton: CRC Press, 1999. chap. 87, p. 2242-2258.

MADHLOPA, A.; JONES, S.A.; KALENGA SAKA, J.D.A. Solar air heater with composite-absorber systems for food dehydration. **Renewable Energy**, Amsterdam, v. 27, p. 27-37, 2002.

MANZANO, J.A.N.G.; OLIVEIRA, J.F. **Algoritmos: lógica para desenvolvimento de programação**. 8. ed. São Paulo: Érica, 1996. 265 p.

MAXIM INTEGRATED PRODUCTS. **DS1307, 64 x 8, serial, I²C real-time clock**. 2008. Disponível em: <<http://www.maxim-ic.com/datasheet/index.mvp/id/2688>>. Acesso em: 08 ago. 2011.

MICROCHIP TECHNOLOGY INC. **PIC 18F4550 datasheet**. 2009. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39632e.pdf>>. Acesso em: 06 out. 2011.

MONTERO, I.; BLANCO, J.; MIRANDA, T.; ROJAS, S.; CELMA, A.R. Design, construction and performance testing of a solar dryer for agroindustrial by-products. **Energy Conversion and Management**, Amsterdam, v. 51, p. 1510-1521, 2010.

MUJUMDAR, A.S. Drying fundamentals. In: BAKER, C.G.J. **Industrial drying of foods**. London: Blackie Academic & Professional, 1997. chap. 2, p. 07-29.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Introduction to data acquisition**. 2009. Disponível em: <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/3536>>. Acesso em: 25 fev. 2010.

NATIONAL INSTRUMENTS. **When do you need signal conditioning to measure sensors?** 2010. Disponível em: <<http://zone.ni.com/devzone/cda/tut/p/id/10630>>. Acesso em: 25 fev. 2010.

NATIONAL SEMICONDUCTOR. **LM35 precision centigrade temperature sensors**. 2000. Disponível em: <<http://cache.national.com/ds/LM/LM35.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2008.

NORRIS, M. Single-chip ZigBee for indoor mobile telemetry. In: THE IEE SEMINAR ON TELEMETRY & TELEMATICS, 2005, London. **Proceedings...** Disponível em: <<http://digital-library.theiet.org/getabs/servlet/GetabsServlet?prog=normal&id=IEESEM002005011009000010000001&idtype=cvips&gifs=yes&ref=no>>. Acesso em: 21 set. 2011.

OMEGA ENGINEERING. **The temperature handbook**. Stamford, 1992. v. 28, p. Z-11.

PARALLAX INC. **BASIC Stamp programming manual 1.8**. Rocklin, 1997. 454 p.

PARK, J.; MACKAY, S., **Practical data acquisition for instrumentation and control systems**. Oxford: Elsevier, 2003. 425 p.

PARK, K.J.; BIN, A.; BROD, F.P.R. Obtenção das isotermas de sorção e modelagem matemática

para a pêra bartlett (pyrus sp.) com e sem desidratação osmótica. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 21, n. 1, p. 73-77, 2001.

PARK, K.J.; YADO, M.K.M.; BROD, F.P.R. Estudo de secagem de pêra bartlett (pyrus sp.) em fatias. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 21, n. 3, p. 288-292, 2001.

RATTI, C.; MUJUMDAR, A.S. Solar drying of foods: modeling and numerical simulation. **Solar Energy**, Amsterdam, v. 60, n. 3/4, p. 151-157, 1997.

ROBIN, I.A. **Digital filters**: an introduction. 2002. Disponível em:
<<http://www.eetimes.com/design/analog-design/4017964/Digital-Filters-An-Introduction>>.
Acesso em: 23 Ago. 2011.

ROZAS, N. O que é telemetria. **Revista Gás Brasil**, Cotia, ano 2, n. 3, p. 13-15, 2004.

SHARMA, A.; CHEN, C.R.; LAN, N.V. Solar-energy drying systems: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdam, v. 13, n. 6/7, p. 1185-1210, 2009.

SILVEIRA, L.R.; BRITO, A.S.; MOTA, J.C.A.; MORAES, S.O.; LIBARDI, P.L. Sistema de aquisição de dados para equipamento de medida da permeabilidade intrínseca do solo ao ar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 429-436, 2011. Disponível em:
<<http://www.scielo.br/pdf/rbcs/v35n2/v35n2a12.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2011.

SIMATE, I.N. Optimization of mixed-mode and indirect-mode natural convection solar dryers. **Renewable Energy**, Amsterdam, v. 28, p. 435-453, 2003.

SPOTO, M.H.F. Desidratação de frutas e hortaliças. In: OETTERER, M.; REGITANO-D'ARCE, M.A.B.; SPOTO, M.H.F. **Fundamentos de ciência e tecnologia de alimentos**. Barueri: Manole, 2006. cap. 12, p. 565-604.

TRIPATHY, P.P.; KUMAR, S. A methodology for determination of temperature dependent mass transfer coefficients from drying kinetics: Application to solar drying. **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, v. 90, p. 212-218, 2009.

UNIVERSIDADE DO SOL. Fundação Augusto Mazzon. **100 dicas técnicas: aquecedores solares de água**. São Manuel, 2005. 120 p.

VAN ARSDEL, W.B.; COPLEY, M.J. **Food dehydration**. Westport: Avi Pub., 1963. v. 1: Principles, 185 p.

VEGA-MERCADO, H.; GÓNGORA-NIETO, M.M. e BARBOSA-CÁNOVAS, G.V. Advances in dehydration of food. **Journal of Food Engineering**, Amsterdam, v. 49, p. 271-289, 2001.

ZAMAN, M.A.; BALA, B.K. Thin layer solar drying of rough rice. **Solar Energy**, Amsterdam, v. 42, n. 2, p. 167-171, 1989.

ZIGBEE ALLIANCE. **Specifications**. Disponível em:

<<http://www.zigbee.org/Specifications.aspx>>. Acesso em: 03 out. 2011a.

_____. **The Alliance**. Disponível em:

<<http://www.zigbee.org/About/AboutAlliance/TheAlliance.aspx>>. Acesso em: 03 out. 2011b.

_____. **ZigBee in the news archives**. Disponível em:

<<http://www.zigbee.org/News/ZigBeeInTheNews/ZigBeeInTheNewsArchives.aspx>>. Acesso em: 03 out. 2011c.

_____. **ZigBee specification overview**. Disponível em:

<<http://www.zigbee.org/Specifications/ZigBee/Overview.aspx>>. Acesso em: 03 out. 2011d.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Vista em perspectiva do secador solar projetado, com as principais dimensões (unidades em cm)

APÊNDICE B - Simbologias utilizadas (MANZANO; OLIVEIRA, 1996) nos fluxogramas dos algoritmos desenvolvidos

<i>Terminal</i> - Indica o início e/ou fim do fluxo de um programa.
<i>Seta de fluxo de dados</i> - Indica o sentido do fluxo de dados.
<i>Processamento</i> - Indica cálculos (algoritmos) a efetuar, atribuições de valores ou manipulação de dados que tenha um bloco específico.
<i>Entrada e saída de dados</i> - Símbolo em função de um dispositivo qualquer de entrada ou saída de dados, como fornecedor de informações para processamento, gravação e outros.
<i>Decisão</i> - Indica a decisão que deve ser tomada, indicando desvios para outros pontos do fluxo, dependendo do resultado de comparação.
<i>Conector</i> - Utilizado quando é preciso particionar o programa.
<i>Preparação</i> - Para elaboração de uma chave que modificará a execução de um determinado programa.
<i>Teclado</i> - São as informações fornecidas por um computador.
<i>Display</i> - Para informações exibidas por dispositivos visuais, vídeo ou monitor.
<i>Módulo de sub-rotina</i> - Indica a chamada de uma sub-rotina.
Atribuição de um valor a uma variável.
Var ← Início, Fim, Incremento	Dentro de um fluxograma, representa uma estrutura de laços contados <i>para</i> , com o conjunto de instruções <i>para</i> <Variável> <i>de</i> <Início> <i>até</i> <Fim> <i>passo</i> <Incremento> <i>faça</i> <instruções>.