

JOÃO GOMES DA SILVA

**MONITORAÇÃO E CONTROLE DE UMIDADE E
TEMPERATURA EM SECADORES DE MASSAS ALIMENTÍCIAS.**

SÃO CAETANO DO SUL

2009

JOÃO GOMES DA SILVA

**MONITORAÇÃO E CONTROLE DE UMIDADE E
TEMPERATURA EM SECADORES DE MASSAS ALIMENTÍCIAS.**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de
Tecnologia para obtenção do título de Mestre em
Engenharia de Processos Químicos e
Bioquímicos.

Linha de Pesquisa: Análise e Controle de
Processos Químicos.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Alessandra Dutra Coelho

SÃO CAETANO DO SUL

2009

Silva, João Gomes da

Monitoração e Controle de Umidade e Temperatura em Secadores de Massas Alimentícias / João Gomes da Silva – São Caetano do Sul, SP: CEUN-EEM, 2009.

67p.

Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação. Linha de Pesquisa: Análise e Controle de Processos Químicos – Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário de Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul, SP, 2009.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Alessandra Dutra Coelho

1. Secagem 2. Microondas 3. Sistemas Microcontrolados 4. Modelagem I. Silva, João Gomes da Barros, II. Instituto Mauá de Tecnologia. Centro Universitário III. Título

RESUMO

A secagem é uma das etapas do processamento de grande número de produtos, em particular o de massas alimentícias. Ela tem por finalidade retirar parte da água contida nestas massas com a aplicação de calor sob condições controladas para remover, por evaporação a água contida na massa.

O objetivo desse trabalho é propor um sistema composto por sensor com capacidade de executar com precisão a leitura da umidade no interior das massas alimentícias utilizando microondas e sensores de temperatura e umidade relativa baseados em semicondutores integrados. Será construída uma sonda com sensores dotados de tecnologia CMOS para medição de temperatura e umidade relativa do ar de secagem. O sistema de aquisição de dados em tempo real da umidade da massa será empregado para, por meio de simulação, alterar a configuração dos parâmetros utilizados para controlar a umidade relativa e a temperatura do ar de secagem. Posteriormente, este sistema poderá ser instalado em uma planta de secagem para servir de interface através de software de monitoramento com o sistema PLC já utilizados nos secadores.

O propósito deste sistema será garantir a previsibilidade proposta em um modelo matemático desenvolvido para monitoração do fenômeno de secagem de massas alimentícias que tem por finalidade acompanhar o processo produtivo, o consumo de energia e o conteúdo energético das massas produzidas.

Palavras Chaves: Secagem. Microondas. Sistemas Microcontrolados. Modelagem.

ABSTRACT

Drying is one of the stages of processing large number of products, particularly that of pasta. It aims to remove the water contained in these bodies with the application of heat under controlled conditions to remove by evaporation the water contained in the mass.

The aim of this work is to propose a system composed of sensor capable of performing the exact reading of the humidity inside the pasta using microwave sensors and temperature and humidity based on semiconductor integrated. Will be built with a probe equipped with technology CMOS sensors for measuring temperature and relative humidity of the drying air. The data acquisition system in real time the mass of moisture will be used for, by simulation, change the setting of parameters used to control humidity and temperature of the drying air. Subsequently, this system may be installed in a plant for drying to provide a software interface through a monitoring system with the PLC already used in dryers.

The purpose of this system will ensure predictability proposed a mathematical model developed for monitoring the phenomenon of drying pasta that is to monitor the production process, energy consumption and energy content of the mass produced.

Keywords: Drying. Microwave. Microcontroller Systems. Modeling.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

TABELAS

ABREVIATURAS

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	2
1.2 Objetivos Específicos	3
1.3 Justificativas	3
1.4 Organização do Trabalho	3
2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS SENSORES	5
2.1 Processo de Medição por Microondas	5
2.2 Processo de Medição de Umidade Relativa do Ar	9
2.3 Processo de Medição de Temperatura	10
3. PSICROMETRIA	14
3.1 Umidade	14
3.2 Umidade de Saturação	14
3.3 Umidade Relativa	15
3.4 Calor Úmido	15
3.5 Volume Úmido	16
3.6 Entalpia Total	16
3.7 Temperatura de Orvalho	16
3.8 Temperatura de Bulbo Úmido	17
3.8.1 Medida da Temperatura de Bulbo Úmido	17
4. SECAGEM DE MASSAS ALIMENTÍCIAS	19
4.1. Tecnologias de Secagem	19
4.2. Mecanismo de Secagem	21
4.3. Diagramas de Secagem	28
4.4. Medida da Umidade de Massa	29

5. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	32
6. PROJETO DE SONDA PARA SECADORES DE MASSAS ALIMENTÍCIAS	36
6.1 Concepção da Sonda de Leitura de Umidade e Temperatura	36
6.2 Medição de Temperatura e Umidade em Secadores de Massa	37
6.2.1 Sensor SHT75	37
6.2.2 Alimentação do Sensor	38
6.2.3 Comunicação Serial (2-wire)	39
6.2.4 Protocolo de Comunicação	39
6.2.5 Circuito Elétrico	40
6.3 Comunicação Serial	41
6.4 Cabo Utilizado para a Comunicação	44
6.5 Fonte de Alimentação	46
6.6 Microcontrolador	47
6.6.1 Características da CPU e Memórias	47
6.6.2 Periféricos Embutidos	48
6.6.3 Características Especiais	49
6.7 Software de Programação da Sonda de Leitura	50
7. MEDIDOR DE UMIDADE EM SÓLIDOS PARA PROCESSOS CONTÍNUOS	52
8. MODELAGEM MATEMATICA E MONTAGEM DA SONDA DE LEITURA DA TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR	55
8.1 Protótipo da Sonda de Leitura de Temperatura e Umidade Relativa	55
8.1.1 Ensaios Preliminares do Elemento Sensor	56
8.1.2 Desenvolvimento da Modelagem	58
9. CONCLUSÃO	63
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
APENDICE A	67

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Dipolo elétrico da água	5
Figura 2.2 Emissão e recepção de microondas	6
Figura 2.3 Gráfico das Curvas de Resposta em microondas	7
Figura 2.4 Curva mostrando a taxa de variação da resistência de RTDs de diferentes metais	11
Figura 2.5 Curva da resistência de um termistor NTC de 10 kΩ em função da temperatura	12
Figura 4.1 Variação da umidade total da massa com o tempo num processo de secagem	25
Figura 4.3 Linha continua de produção de massa longa	29
Figura 5.1 Estágio pré-secador(3) da linha continua de produção de massa longa	32
Figura 5.2 Sensor SHT75	33
Figura 5.3 Visão geral do circuito proposto	34
Figura 5.4 Sonda Sensora de Umidade por Microondas	35
Figura 5.5 Unidade de Controle Eletrônico da Sonda por Microondas	35
Figura 6.1 Diagrama de blocos da sonda de leitura.	36
Figura 6.2 SHT75 Comparação dimensional.	38
Figura. 6.3 Procedimento para leitura de umidade no SHT75.	39
Figura 6.4 Solicitação e resposta de leitura.	40
Figura 6.5 Comandos para leitura e escrita no registrador.	40
Figura 6.6 Circuito elétrico de ligação do SHT75	41
Figura 6.7 Pinos do conector para cabos de comunicação RS232	44
Figura 6.8 Pinos do conector para cabo simplificado de comunicação RS232	44
Figura 6.9 Pinos do cabo do conversor RS232/422	45
Figura. 6.10 Circuito elétrico do MAX491.	46
Figura. 6.11 Circuito elétrico da fonte de alimentação.	47
Figura 6.12 Pinagem do PIC16F886	49
Figura 6.13 Diagrama de Blocos Simplificado do <i>software</i>	51
Figura 7.1 Conjunto HUMY 2000 Leitor e sonda	53
Figura 7.2 Exemplos de instalação da sonda de microondas.	54
Figura 7.3 Aplicação da Sonda em um ponto crítico de um processo	54
Figura 8.1 Fotografia do protótipo construído da sonda de Leitura.	55
Figura 8.2 Relação entre a temperatura medida pelo sensor empregando a linguagem Basic e a temperatura de controle	57

Figura 8.3 Relação entre a temperatura medida pelo sensor empregando a linguagem C e a temperatura de controle	57
Figura 8.4 Resultado da Simulação de processo pré-secador em duas fases a ser simplificado.	60
Figura 8.5 Resultado da Simulação do processo pré-secador ser simplificado.	62
Figura A.1 Exemplo de tela para controle das sondas.	65

TABELAS

Tabela 2.1 Comparação de características de transdutores de temperatura	10
Tabela 4.1 Difusividade mássica aparente de massas alimentícias em função da temperatura do ar de secagem e do conteúdo de umidade da massa	27
Tabela 4.2 Variação da difusividade mássica aparente de massas alimentícias em função da temperatura de bulbo úmido para um ar a 80°C (Andrieu e Stamatopoulos, 1986)	27
Tabela 6.1 Características do RS422	43
Tabela 6.2 Comparação de padrões seriais	43
Tabela 8.1 Comparativo de Leituras do Sensor SHT75 em teste com estufa	56

QUADROS

Quadro 8.1 Arquivo de comandos “secador.m” do MATLAB para plotagem do gráfico 3D do comportamento do pré-secador.	59
---	----

ABREVIATURAS

ACK	- ACKNOWLEDGE
ADC	- CONVERSOR ANALÓGICO-DIGITAL
CMOS	- COMPLEMENTARY METAL-OXIDE-SEMICONDUCTOR
CPU	- CENTRAL PROCESSING UNIT
RISC	- REDUCED INSTRUCTION SET COMPUTER
CRC	- CYCLIC REDUNDANCY CHECK
DTE	- DATA TERMINAL EQUIPMENT
DCE	- DATA COMMUNICATION EQUIPMENT
EEPROM	- ERASABLE ELECTRICALLY PROGRAMMABLE READ-ONLY MEMORY
EMC	- COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA
E/S	- ENTRADA/SAÍDA
GND	- GROUND
GUI	- GRAPHICAL USER INTERFACE
LED	- LIGHT-EMITTING DIODE
MATLAB	- MATRIX LABORATORY - SOFTWARE
NTC	- NEGATIVE TEMPERATURE COEFFICIENT
OTP	- ONE TIME-PROGRAMMING
PDIP	- PLASTIC DUAL IN-LINE PACKAGE
PC	- PERSONAL COMPUTER
PLC	- PROGRAMMABLE LOGIC CONTROLLER
PTC	- POSITIVE TEMPERATURE COEFFICIENT
RAM	- RANDOM-ACCESS MEMORY
RX	- RECEIVE-IN
SCK	- SERIAL CLOCK
TTL	- TRANSISTOR-TRANSISTOR LOGIC
TX	- TRANSMIT-OUT
VCC	- COMMON-COLECTOR VOLTAGE
VDC	- VOLTS OF DIRECT CURRENT

1. INTRODUÇÃO

A umidade ocorre em quase todas as substâncias podendo afetar as propriedades do material que a contém, como também podendo contribuir para melhorar aspectos críticos de custo e qualidade de produtos.

A determinação da umidade é uma das medidas mais importantes e mais utilizadas na análise de alimentos. No processo de secagem essa determinação é fundamental (PARK E ANTONIO, 2006). A umidade de um alimento está relacionada com sua estabilidade, qualidade e composição, e pode afetar as seguintes características do produto:

- Estocagem: alimentos estocados com alta umidade irão deteriorar mais rapidamente que os que possuem baixa umidade.
- Embalagem: alguns tipos de deterioração podem ocorrer em determinadas embalagens se o alimento apresentar uma umidade excessiva.
- Processamento: a quantidade de água é importante no processamento de vários produtos, como por exemplo, a umidade do trigo na fabricação do pão e de massas.

Existe um grande número de métodos e sensores para se medir a umidade. A escolha do método a ser aplicado vai depender da forma como a água está presente no sólido, da sua natureza, da quantidade relativa de água, da rapidez desejada na determinação, e do equipamento e tecnologia disponível. As determinações de umidade podem ser classificadas em métodos diretos e indiretos. (PARK E ANTONIO, 2006)

Podemos avaliar como os mais utilizados os métodos abaixo:

Método de Estufa: este método direto de determinação da umidade é atual e universalmente utilizado na área de alimentos e está baseado na remoção da água por aquecimento com a posterior pesagem da amostra realizada após o resfriamento desta (PARK E ANTONIO, 2006). Usado também para oferecer uma calibração básica para processos de medição indiretos usados em leituras em tempo real.

Método da impedância elétrica e constante dielétrica; este método indireto utiliza a diferença da constante dielétrica da água comparada com o material que a contém em função destas propriedades elétricas em determinadas condições. (PARK E ANTONIO, 2006)

Método Espectroscópico: este método direto utiliza uma faixa larga próxima do infravermelho do espectro de ondas. Neste método é utilizado um aparelho portátil que permite a obtenção de resultados rápidos de porcentagem de umidade onde todo o processo é controlado por um gerador de funções e balança digital. (PARK E ANTONIO, 2006)

Método indireto de medição da umidade por emissão de microondas: onde as moléculas de água presentes em um corpo submetidas a altas freqüências podem ser colocadas em rotação. Esta rotação molecular ou spin através da tecnologia de microondas é bastante específica no caso da água oferecendo assim um método preciso para medir o conteúdo de água contida em sólidos, granulados, massas e pó. Este método originalmente proposto por (MEYER & SCHILZ, 1980) para cálculo do teor de umidade em produtos granulados utilizando freqüências no intervalo das microondas proporcionou os melhores resultados em termos de exatidão. (BERBET E STENNING, 1998)

1.1 Objetivo

O objetivo deste trabalho é propor um sistema envolvendo sondas de medição com circuitos eletrônicos integrados compostos com sensores inteligentes que incorporam tecnologias no estado da arte e que possibilitem ao processo industrial sua execução de acordo com a modelagem matemática adequada aos processos de secagem de massas alimentícias, especificamente as massas longas. A validação do modelo matemático pode ser realizada a partir da comparação de dados teóricos com dados obtidos em experimentos relatados na literatura, com a finalidade de testar na operação de secagem de massas o conjunto: sensores e modelo matemático, que serão caracterizados na simulação numérica.

1.2 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo proposto, as seguintes tarefas foram realizadas:

Estudo dos princípios que envolvem o ambiente e o processo de secagem de massas na indústria alimentícia.

Pesquisa e identificação de tecnologias para execução de medições de parâmetros para a indústria alimentícia com o mínimo de interferência no processo, mantendo a integridade do produto e com garantida precisão das medições.

Desenvolvimento e montagem de protótipos de sondas de temperatura e umidade relativa do ar incorporando sensores integrados com tecnologia CMOS com adequado grau de confiabilidade e desempenho.

Análise de resultados do modelo matemático em simulação no ambiente do MATLAB e avaliação da sua aplicação em ambiente real.

1.3 Justificativa

A principal justificativa para a realização deste trabalho é o desenvolvimento de sistemas que introduzam nos processos industriais de secagem de massas inovações tecnológicas (sensores, componentes eletrônicos, modelagem matemática e aplicativos de software) que facilitem a preditividade nos processos de fabricação.

1.4 Organização do Trabalho

O capítulo 2 apresenta os princípios de funcionamento dos sensores e os métodos de medição de temperatura, umidade relativa do ar e umidade em corpos sólidos.

No capítulo 3 são discutidos os conceitos da psicrometria.

No capítulo 4 é apresentado o processo de secagem de massas alimentícias.

O capítulo 5 aborda a metodologia usada no desenvolvimento do sistema proposto e as suas principais características.

No capítulo 6 descreve-se a concepção da sonda de leitura de temperatura e umidade relativa do ar que propomos para fazer a medição em cada etapa do secador de alimentos conforme estabelecido pelos resultados do modelo matemático.

No Capítulo 7 descreve-se o medidor de umidade em corpos sólidos que sugerimos utilizar na aplicação de controle dos secadores de massa longa para monitorar a execução do processo de secagem em conformidade com o modelo matemático proposto.

No capítulo 8 descreve-se o desenvolvimento de um algoritmo para simulação numérica baseado no modelo matemático que descreve o processo de secagem das massas e com base nos resultados discute-se a aplicação do conjunto de sensores e do modelo matemático.

No capítulo 9 são apresentadas as conclusões e as propostas para trabalhos futuros.

2. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS SENSORES

Em praticamente todos os ambientes com sistemas de controle e nos processos de aquisição de dados é necessária à medida de alguma grandeza física, como por exemplo, temperatura, umidade, pressão, velocidade e outras. Estas grandezas, em geral, vinculadas a algum fenômeno físico apresentam natureza analógica, pois se tratam de variáveis que assumem valores contínuos e reais em função do tempo, diferentes de sinais digitais descontínuos e expressas segundo uma representação binária. Essas grandezas podem ser obtidas por meio de determinados sensores disponíveis no mercado (MORENO E PENTEADO, 2005).

2.1 Processo de Medição de Umidade por Microondas

As microondas se caracterizam por ondas eletromagnéticas em faixa de freqüência que variam de 300 MHz a 30 GHz. Os sensores por microondas trabalham predominantemente nas faixas de 433,92 MHz e 2,45 GHz.

O princípio deste método de medição por microondas é utilizar a constante dielétrica da água para determinar o valor a ser medido. A constante dielétrica da água é $\epsilon_R = 80$ enquanto outros materiais apresentam $\epsilon_R = 3$ até $\epsilon_R = 8$.

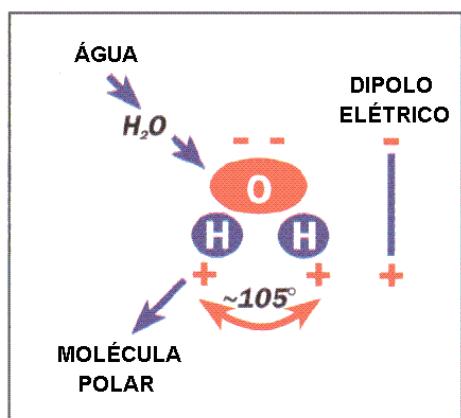


Figura 2.1 Dipolo elétrico da água

Esta técnica está relacionada com o comportamento da molécula de água, quando submetida a um campo elétrico oscilando em alta freqüência. A molécula da água H_2O carregada positivamente com os seus dois átomos de hidrogênio pode ser considerada como um dipolo elétrico (figura 2.1) e, consequentemente, oscilará em um campo alternado.

Associado com as mais recentes técnicas digitais de medição, o sensor por microondas irá detectar e medir a freqüência ressonante do material sob investigação. A ressonância ocorre quando os efeitos rotacionais da molécula de água oferecer resistência mínima à passagem do campo eletromagnético. Tal como acontece com um pendulo, uma pequena entrada de energia, no tempo certo, irá produzir grandes oscilações. A quantidade de água presente tem efeito muito significativo sobre a "freqüência ressonante" e, portanto, proporciona uma excelente base para medir a umidade em corpos sólidos.

Na prática, isto é conseguido por uma potência extremamente baixa de radiação, cerca de cem vezes menor do que a emitida por um telefone celular, transmitida por um ressonador de campo eletromagnético de alta freqüência através de uma membrana cerâmica ou de plástico para o material sob investigação (Figura 2.2). A freqüência de pico ressonante é estabelecida usando técnicas digitais no circuito detector eletrônico.

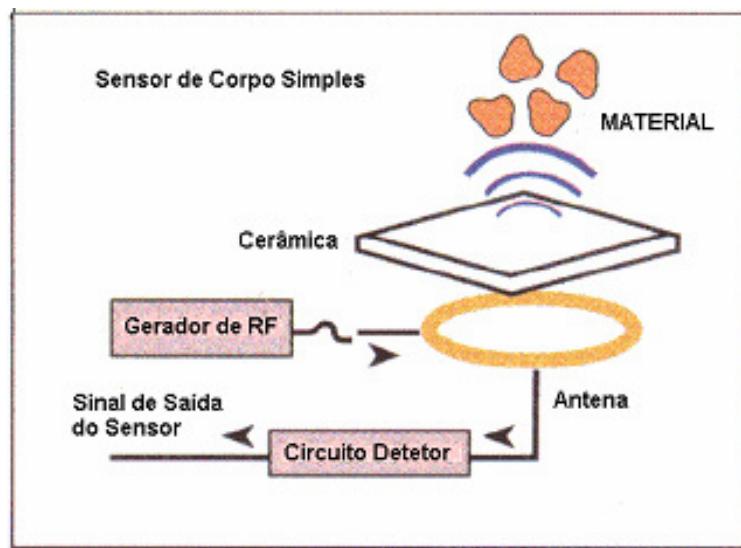


Figura 2.2 Emissão e recepção de microondas

A mudança da amplitude do sinal pode ser medida (figura 2.3), bem como a "banda larga" que em determinadas circunstâncias pode fornecer informações úteis. A seleção de freqüência é importante, pois com uma freqüência maior a medição é mais imune aos efeitos dos outros elementos químicos que possam estar presentes na água, porém com uma menor penetração das microondas no material da medição.

Em virtude de um compromisso na adequação da medição a ser conseguida, freqüências de cerca de 433MHz a 2000MHz parecem ser apropriadas.

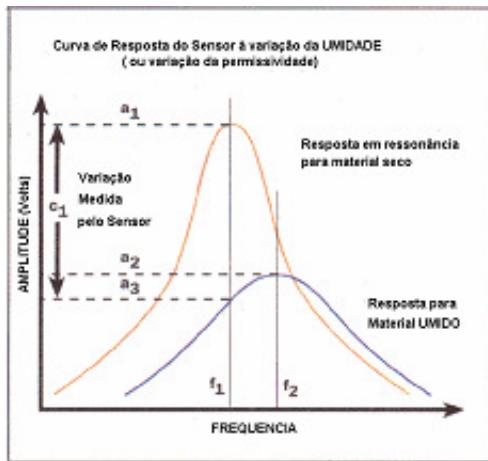


Figura 2.3 Gráfico das Curvas de Resposta em microondas

Ambas as leituras, da energia irradiada e da energia absorvida são medidas e utilizadas para formar um quociente. A utilização do método de medição por este quociente garante a estabilidade em relação aos efeitos das interferências por flutuações de energia, mudanças de temperatura ou o envelhecimento natural dos elementos estruturais. Estas interferências serão sempre compensadas pelo formato da construção do dispositivo de medida, pois estas variações afetarão tanto no numerador quanto no denominador deste quociente.

Considerando a quantidade de massa de material seco em kg, m_d , a quantidade de água presente m_w e o volume V em m^3 a quantidade de umidade percentual M é definida por:

$$M = \frac{m_w}{m_w + m_d} \times 100 \quad (1)$$

A aquametria por microondas é definida por (TRABELSI, KRASZEWSKI E NELSON, 1998) como a área da metrologia que investiga sólidos e líquidos contendo água pela identificação de suas propriedades na interação com ondas eletromagnéticas na faixa de microondas. Essas propriedades serão afetadas por um dos parâmetros de (1) bem como a temperatura.

Para os casos de materiais dielétricos com perdas a propriedade mais significativamente afetada com a variação da umidade é a permissividade dielétrica, nos meios com perda o modelo mais adequado é o da permissividade complexa (SEVERO E SUSIN, 2003):

$$E = E' - jE'' \quad (2)$$

No cálculo, o coeficiente de atenuação α e o coeficiente de propagação da onda eletromagnética β em materiais úmidos são obtidos pela superposição linear dos coeficientes correspondentes a cada componente (modelo linear):

$$\alpha = \sum_i v_i \alpha_i, \quad \beta = \sum_i v_i \beta_i \quad (3)$$

Onde v_i é o conteúdo em volume de i-componentes.

Utilizando as relações definidas como:

$$\alpha = \frac{\pi}{\lambda} \frac{E''}{\sqrt{E'}}, \quad \beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{E'} \quad (4)$$

Onde λ é o comprimento de onda e $E = E' - jE''$ é a constante de permissividade dielétrica. Podemos obter a seguinte expressão para três componentes da mistura (sólido+água+ar):

$$E'' = \frac{E''_w}{\sqrt{E'_w}} W \rho \sqrt{E'} \quad (5)$$

$$\sqrt{E'} = W \rho (\sqrt{E'_w} - 1) + (\sqrt{E'_d} - 1) \frac{\rho}{\rho_d} (1 - W) + 1 \quad (6)$$

Onde W é a umidade no material, ρ é a densidade da umidade no material, $E_w = E'_w - jE''_w$ é a permissividade dielétrica da água, ρ_d é a densidade do material seco, E'_d é a porção real da permissividade relativa do material seco com densidade ρ_d .

2.2 Processo de Medição de Umidade Relativa do Ar

Em geral a umidade relativa do ar pode ser medida através de alterações que ela produz nas características elétricas de componentes inseridos em circuitos apropriados, podendo estes componentes serem do tipo: cristal, resistores ou capacitores (SPINOLA, 2005).

Classicamente a umidade relativa é medida utilizando-se um psicrômetro: aparelho constituído por dois termômetros idênticos. Um dos termômetros trabalha com o bulbo seco e outro trabalha com o bulbo úmido (DOEBELIN, 1990). Segundo Van Wylen e Sonntag (1976), após obter os valores de bulbo seco e úmido, para a determinação da umidade absoluta e relativa do ar a maneira mais conveniente é utilizar diagramas que relacionam as grandezas que determinam as propriedades psicrométricas. Estes diagramas são denominados de carta psicrométrica, são gerados por fabricantes de equipamentos de medição e elaborados segundo uma referência como por exemplo pressão do nível do mar, ou seja, de 760 mmHg.

Outro método é o resistivo que utiliza alumínio revestido por filme de óxido de alumínio. A estrutura desse filme apresenta poros cujo preenchimento por gotículas de vapor de água produz alteração do valor da sua resistência ôhmica (SPINOLA, 2005). Esta variação da resistência elétrica do material pode ser medida através de um circuito em ponte. Entretanto estes sensores resistivos possuem limitações à sua utilização em ambientes onde pode ocorrer a condensação, não trabalhando em níveis de umidade relativa abaixo de 20%. Além disso, não possuem a mesma estabilidade dos sensores tipo capacitivos (SENSIRION, 2005).

O método capacitivo por sua vez baseia-se na alteração das características do dielétrico pela umidade relativa. Utilizando-se como dielétrico um polímero que absorve ou libera água de maneira proporcional à umidade relativa do ambiente este irá apresentar a alteração da sua capacitância que poderá ser medida por um circuito eletrônico, possibilitando determinar o valor da umidade relativa do ambiente (SENSIRION, 2005). Este é o princípio usado pelo sensor SHT75 (SENSIRION, 2005) utilizado neste trabalho.

2.3 Processo de Medição de Temperatura

Medidas de temperatura com exatidão e boa precisão se fazem necessárias em muitos sistemas de instrumentação e controle de processos. Entretanto, devido às respostas não lineares e a baixa amplitude nas saídas dos sensores torna-se necessário o condicionamento dos sinais, seja amplificando ou compensando as não linearidades antes de qualquer outro processamento adicional.

Existe atualmente um grande número de transdutores de temperatura integrados à ADC's de alta resolução para disponibilizar saídas digitais. A linearização e calibração são executadas de forma digital, reduzindo-se o custo e a complexidade na utilização destes circuitos (KESTER, 2004). Outros tipos de sensores de temperatura apresentam função de transferência não linear exigindo circuitos relativamente complexos para compensar estas não linearidades, requerendo resistores de precisão e de calibração manual para proporcionar a exatidão desejada.

Como existem vários métodos para a medição da temperatura torna-se necessário avaliar qual o mais apropriado para cada aplicação. Para tal avaliação a Tabela 2.1 apresenta um comparativo entre os sensores mais adequados aos valores de temperatura no processo de secagem de massas (OMEGA ENGINNERING, 2007).

	Integrado	Termistor
Material	Silício	Óxido de metal
Custo do Sensor	Baixo	Baixo a Moderado
Custo do Circuito	Baixo	Baixo a moderado
Faixa de Medição [°C]	-40 a 125	-40 a 200
Sensibilidade	10 mV / °C	-4% / °C
Estabilidade	Moderada	Moderada

FONTE: Omega Enginnering, 2007.

Tabela 2.1 Comparação de características de transdutores de temperatura

O sensor resistivo (Resistance Temperature Detector – RTD) é bastante difundido, possibilitando medidas de temperatura com grande precisão (STEPHENSON ET AL, 1999).

Os RTDs utilizam metais (platina, níquel e cobre) que apresentam alteração da resistência com a temperatura de acordo com a equação (7) (DOEBELIN, 1990):

$$R = R_0(1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \dots + \alpha_n T^n) \quad (7)$$

Onde R_0 é a resistência a $^{\circ}\text{C}$, α_n é o coeficiente de temperatura $^{\circ}\text{C}^{-1}$ e T ($^{\circ}\text{C}$) é a temperatura à qual o RTD se encontra submetido.

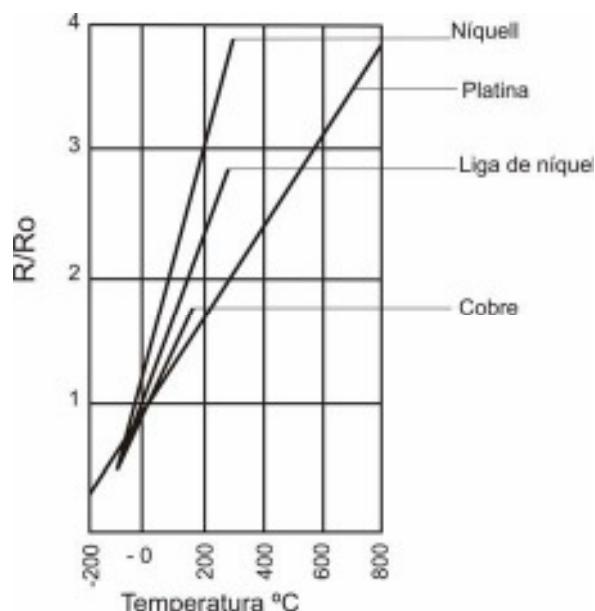


Figura 2.4 Curva mostrando a taxa de variação da resistência de RTDs de diferentes metais em função da temperatura (STEPHENSON ET AL., 1999).

Segundo a equação (7) a resistência elétrica do metal aumenta ou diminui com o aumento ou redução da temperatura, respectivamente. A platina é o metal mais utilizado devido a sua alta estabilidade, ser quimicamente inerte e por trabalhar em temperaturas elevadas. A figura 2.4 compara a taxa de variação da resistência entre os diversos materiais utilizados em RTD em função da temperatura.

O princípio de funcionamento do termopar é baseado nos efeitos Thomson, Peltier e Seebeck (STEPHENSON ET AL., 1999). O termopar consiste de dois metais diferentes unidos e mantidos em temperaturas diferentes. Deve-se então manter uma junção a temperatura conhecida T_r (temperatura de referência) e submeter a outra junção à

temperatura T_t (temperatura de teste). Assim, mede-se o valor da tensão de Seebeck para determinar a temperatura T_t (STEPHENSON ET AL., 1999).

A maior dificuldade na utilização do termopar é a baixa tensão de saída, sendo necessário amplificá-la. Requer compensação da junção fria, porém possui uma maior linearidade quando comparado a outros sensores. Os metais mais comuns usados na fabricação de termopares são (KESTER, 2004): ferro, platina, ródio, tungstênio, cobre, liga de níquel com alumínio, liga de níquel e cromo, liga de cobre e níquel.

Os termopares apresentam baixo custo, possuindo a maior faixa de operação entre os sensores de temperatura (STEPHENSON ET AL., 1999). São freqüentemente utilizados para medir altas temperaturas (até 2300 °C) em ambientes hostis.

Da mesma forma que os RTDs, os termistores são resistores sensíveis às variações na temperatura, possuem baixo custo e são constituídos de materiais semicondutores. Esses materiais têm coeficiente de temperatura positivo (PTC) ou negativo (NTC). O preço de um termistor PTC é cerca de 20% maior que um NTC, justificando a maior utilização dos NTCs. Por outro lado, os PTCs possuem algumas vantagens, tais como maior linearidade e sensibilidade, sendo mais apropriados quando se exige melhor resolução na medição (Valente et al., 2004). A Figura 2.5 mostra a resistência de um termistor NTC de 10 kΩ em função da temperatura. O termistor não é linear, mas pode ser linearizado na faixa de temperatura desejada. No entanto, o termistor apresenta maior sensibilidade quando comparado com os termopares e RTDs (KESTER, 2004).

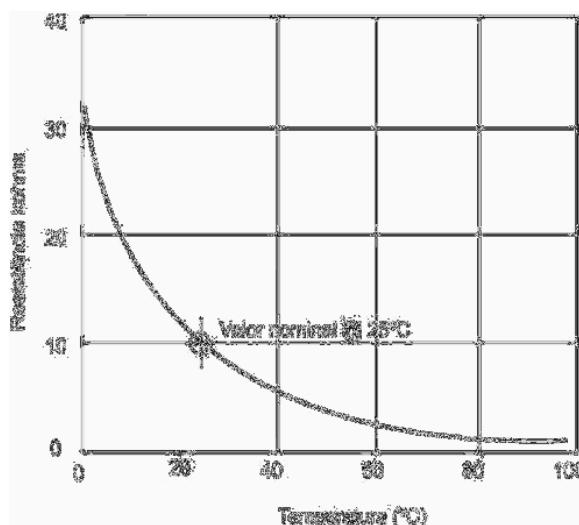


Figura 2.5 – Curva da resistência de um termistor NTC de 10 kΩ em função da temperatura (modificado de Kester, 2004).

Os sensores semicondutores integrados de temperatura são fabricados usando as características de temperatura da junção *pn*. Esses sensores são largamente utilizados para medida de temperatura dentro da faixa de -55 °C a +150 °C (STEPHENSON ET AL., 1999). Isto se deve, principalmente, à pequena dimensão, baixo custo e alta resolução (VALENTE ET AL., 2004). Oferecem alta exatidão e linearidade, amplificando o sinal de saída para faixas mais adequadas (por exemplo, 10m V/ °C) ao seu processamento (KESTER, 2004). Esses sensores são também utilizados para compensação da junção fria em termopares. Os sensores de temperatura SHT75 (SENSIRION, 2005) utilizados neste trabalho enquadram-se nesta categoria.

Geralmente, quando as saídas analógicas dos sensores são processadas por sistemas digitais, há a necessidade de condicionamento do sinal para que os sinais provenientes dos sensores sejam adequados às características do conversor analógico digital (MORENO E PENTEADO, 2005).

Assim, com o emprego de microcontroladores no controle de processos, o valor analógico convertido para digital pode ser manipulado pelo software de controle de acordo com decisões lógicas baseadas em comparações. Pode-se também executar operações matemáticas que definam as funções de controle.

No caso particular da secagem de massas na indústria alimentícia a expressão secagem à alta temperatura é aplicada quando se utiliza temperatura de bulbo seco na faixa de 60 a 90 °C, enquanto que o processo convencional utiliza temperaturas na faixa de 40°C a 55°C.

As vantagens desta tecnologia são: redução de espaço e do tempo de processo com consequentes vantagens econômicas além do melhor controle microbiológico durante a etapa de secagem (ORMENESE ET ALL, 1998).

3. PSICROMETRIA

O primeiro passo para se entender a operação de secagem das massas alimentícias é compreender as propriedades do ar úmido. A psicrometria é um capítulo da termodinâmica que estuda as relações existentes na mistura vapor de água-ar. Neste capítulo pretendemos estudar essas relações com base no trabalho de (LEONHARDT, 1995), para isso chamaremos de A o vapor de água e de B o ar presente na mistura.

3.1 Umidade

A umidade do ar é definida como sendo a massa de vapor de água contida por unidade de massa do ar seco, ou seja:

$$H = \frac{m_A}{m_B} \quad (7)$$

A unidade de massa escolhida para o ar seco geralmente é o quilograma (kg).

Definida dessa forma, se fixarmos a pressão total do sistema, a umidade dependerá apenas da pressão parcial do vapor de água contido na mistura e pode ser calculada através da expressão:

$$H = \frac{18}{29} \cdot \frac{\bar{p}_A}{P - \bar{p}_A} \quad (9)$$

Nesta equação, P representa a pressão total do sistema, que deve ser conhecida e \bar{p}_A a pressão parcial do vapor de água.

3.2 Umidade de Saturação

O ar está saturado quando o vapor de água presente no mesmo está em equilíbrio com a água no estado líquido na temperatura do ar. Nessas condições, a umidade do ar recebe o nome de umidade de saturação e pode ser calculada como segue:

$$H_s = \frac{18}{29} \cdot \frac{p_A}{P - p_A} \quad (10)$$

Nesta equação, p_A representa a pressão de vapor da água na temperatura do ar.

3.3 Umidade Relativa

A umidade relativa do ar é uma medida da saturação da mistura ar-vapor de água. Ela pode ser calculada através da relação:

$$H_r = \frac{\bar{p}_A}{p_A} \cdot 100 \quad (11)$$

Definida dessa forma pode-se dizer que um ar seco possui uma umidade relativa nula, enquanto que uma umidade relativa igual a 100% indica um ar saturado.

3.4 Calor Úmido

Em uma mistura ar-vapor de água, o calor úmido é definido como sendo a quantidade de calor necessária para elevar de 1 °C a unidade de massa de ar seco mais o vapor de água que o acompanha. Definido dessa forma, o calor úmido pode ser calculado como segue:

$$c_u = c_{pB} + Hc_{pA} \quad (12)$$

Nesta equação, c_{pA} representa o calor específico à pressão constante da água (kJ/kg.K); c_{pB} representa o calor específico à pressão constante do ar seco (kJ/kg.K) e H a umidade do ar (kg de água/kg de ar seco).

Desde que nas temperaturas comumente utilizadas o calor específico do ar seja constante e igual a 1,005 kJ/kg.K e o calor específico da água seja igual a 4,187 kJ/kg.K, a equação (12) pode ser escrita como segue:

$$c_u = 1,005 + 4,187H \quad (13)$$

3.5 Volume Úmido

O volume úmido da mistura ar-vapor de água é o volume total ocupado pela unidade de massa de ar seco e pelo vapor de água que o acompanha a uma dada pressão e temperatura. Assim definido, o volume úmido, medido em m^3/kg de ar seco, pode ser calculado pela expressão:

$$v_u = \frac{22,4}{273} \cdot \frac{T}{P} \left(\frac{1}{29} + \frac{H}{18} \right) \quad (14)$$

3.6 Entalpia Total

A entalpia total do sistema ar-vapor de água corresponde à entalpia da unidade de ar seco acrescida da entalpia da umidade que o acompanha. Escolhendo como temperatura de referência t_o e admitindo que nessa temperatura o vapor de água se encontra no estado líquido, a entalpia total da mistura será igual à soma de três parcelas: o calor latente de vaporização da água na temperatura t_o necessário para transformá-la em vapor; o calor sensível que devemos fornecer ao vapor para elevá-lo à temperatura t ; e o calor sensível que devemos fornecer ao ar para elevá-lo à temperatura t . Ou seja:

$$H_T = H\lambda_o + Hc_{pA}(t - t_o) + c_{pB}(t - t_o)$$

Combinando essa última equação com a equação (12), podemos escrever:

$$H_T = H\lambda_o + c_u(t - t_o) \quad (15)$$

Nesta equação, H_T representa a entalpia total (kJ/kg), H a umidade do ar, c_u o calor úmido (kJ/kg.K) e λ_o o calor latente de vaporização da água (kJ/kg) na temperatura de referência t_o .

3.7 Temperatura de Orvalho

A temperatura de orvalho de uma mistura ar-vapor de água corresponde à temperatura na qual o ar fica saturado quando mantemos constante sua umidade. Desde que a

umidade seja mantida constante, a temperatura de orvalho de uma mistura ar-vapor de água é igual à temperatura na qual a pressão de vapor de água é igual à pressão parcial do vapor de água na mistura.

3.8 Temperatura de Bulbo Úmido

A temperatura de bulbo úmido de uma mistura ar-vapor de água corresponde à temperatura que uma pequena massa de água atinge ao ser imersa, adiabaticamente, nessa mistura. Para sistemas ar-vapor de água a temperatura de bulbo úmido pode ser calculada através da equação:

$$t_{bu} = t_{bs} - \frac{\lambda_{t_{bu}}}{c_{u_{t_{bu}}}} (H_{t_{bu}} - H)$$

(16)

Nesta equação, t_{bu} representa a temperatura de bulbo úmido da mistura ar-vapor de água (°C); t_{bs} a temperatura de bulbo seco da mistura ar-vapor de água (°C); $\lambda_{t_{bu}}$ o calor latente de vaporização da água na temperatura de bulbo úmido (°C); $H_{t_{bu}}$ a umidade da mistura ar-vapor de água na temperatura de bulbo úmido (g H₂O/g de material seco) e H a umidade da mistura ar-vapor de água (g H₂O/g de material seco).

3.8.1 Medida da Temperatura de Bulbo Úmido

O psicrômetro é um aparelho que consiste em dois termômetros, fixados sobre um mesmo suporte: um com o seu bulbo seco, chamado de termômetro de bulbo seco, e o outro com o seu bulbo molhado, chamado de termômetro de bulbo molhado. Este último tem esse nome porque seu bulbo é envolvido por um tecido, algodão, ou algo do gênero, embebido em água. Sua temperatura, denominada temperatura de bulbo úmido, é sensivelmente menor do que a do termômetro de bulbo seco, que marca a temperatura ambiente. Essa diferença de temperatura entre os termômetros é o dado fundamental para a avaliação da umidade presente no ar.

A velocidade do ar no psicrômetro influencia a leitura do par psicrométrico. A ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers)

sugere valores mínimos de ventilação a partir de 3,6 m/s para um desempenho satisfatório do psicrômetro.

É do conhecimento comum que, para uma mesma mistura ar-vapor de água, o valor da temperatura do bulbo úmido é maior nos casos de baixa ventilação do que aquele que seria percebido em situações de maior movimentação do ar.

Devido ao fato desta leitura da temperatura de bulbo úmido depender de elementos físicos como o pavio de algodão e reservatório com água, tem-se como resultado um sistema de baixa velocidade de resposta, pois é necessário estar sempre aguardando o equilíbrio térmico da água e da taxa de evaporação no pavio para que a leitura se estabilize. O emprego do psicrômetro mostra que a temperatura da água do reservatório, as condições do pavio (impurezas ou ressecamentos) exercem influência na medida da temperatura de bulbo úmido.

A bibliografia especializada mostra que nos secadores de massa em geral é difícil manter a homogeneidade da umidade em seu interior. Esse fato associado à dificuldade de circulação de ar em algumas partes destes secadores faz com que bruscas variações de umidade relativa sejam observadas. Estas variações dificilmente são percebidas com precisão por um sistema de sensor baseado na medida da temperatura de bulbo úmido.

(MILATOVICH E MONDELLI, 1990) salientam que a medida indireta da umidade com o psicrômetro de bulbo úmido, exige cálculos adicionais para avaliar a umidade e a umidade relativa do ar. Para evitar esse inconveniente os autores recomendam o emprego de sensores de medição da umidade relativa e da temperatura com sondas sensoras por efeito capacitivo ou resistivo.

4. SECAGEM DE MASSA ALIMENTÍCIA

Aqueles que trabalham com a produção de massa alimentícia consideram a operação de secagem crítica, tanto sob o aspecto qualidade, como pelo lado econômico exigindo o controle cuidadoso da temperatura, umidade relativa e volume de ar empregados. A plasticidade do produto na fase inicial quando a umidade é superior a 20%, permite uma secagem mais rápida. Já na secagem final, quando a umidade é reduzida de 18-20% a 11,5-12%, é necessário manter reduzido o gradiente de umidade no interior da massa. Isso faz com que essa última fase seja a mais demorada.

As instalações modernas de processamento de massas alimentícias trabalham com equipamentos cuja capacidade varia de 2500 a 8000 kg/h. Considerando que, para massa longa, o tempo de secagem varia da ordem de 5 a 7 horas, a quantidade de massa presente no interior de um secador justifica a adoção de sistemas de controle que garantam a qualidade final do produto entregue ao consumidor.

Neste capítulo pretendemos discutir, resumidamente, a operação de secagem e apresentar o modelo matemático empregado na previsão dos diagramas de secagem.

4.1 Tecnologias de Secagem

A secagem de massas alimentícias baseia-se em três tecnologias: baixa temperatura, baixa temperatura modificada e tecnologia de alta e altíssima temperatura.

A característica fundamental da tecnologia tradicional a baixa temperatura é baixa temperatura de secagem, geralmente em torno de 50°C. A operação, com um tempo total de 40 horas, é dividida em três fases: 4 horas de pré-secagem; 4 horas de repouso e 32 horas de secagem propriamente dita.

Para essa tecnologia, as características técnicas e mecânicas das instalações tradicionais são de grandes dimensões, principalmente no que diz respeito ao comprimento dos secadores. Em consequência da lentidão do processo de secagem, tais instalações possuem uma baixa produtividade quando comparadas com as mais modernas.

Na secagem tradicional modificada as características fundamentais do processo são praticamente as mesmas do processo tradicional a baixa temperatura. A operação de secagem é conduzida em duas fases: pré-secagem e secagem com alguma modificação no nível de temperatura, que é superior ao tradicional, mas inferior a 60°- 65°C. A eliminação do repouso e a elevação da temperatura permitiram que o tempo de secagem fosse reduzido para 24 horas.

Na tecnologia de alta temperatura, a temperatura de secagem é superior a 65°C, mas inferior a 76°C, e o tempo total, incluindo a pré-secagem, é de 12 a 17 horas, dependendo do tipo e do formato da massa. Com a tecnologia da altíssima temperatura (85 a 90°C) este limite de tempo é muito menor: de 2 a 3 horas para alguns formatos.

Não é possível negar que com a introdução da alta temperatura durante a secagem, a produção de massas alimentícias foi substancialmente modificada, no que diz respeito à tecnologia tradicional, tanto para massas de sêmola de grão duro quanto para massas de farinha de grão macio. Essa mudança ocorreu a partir dos anos 70, melhorando a técnica dos processos produtivos, graças ao projeto de novas máquinas e instalações industriais, em particular com as novas prensas automáticas contínuas. Mas, acima de tudo, foi modificado o processo de secagem com a introdução de altas temperaturas, seja na secagem propriamente dita, seja na pré-secagem. Essa fase, e consequentemente, todo o processo produtivo tornou-se mais rápido do que o processo tradicional.

Os resultados da aplicação da alta temperatura, isto é, acima de 65°C na pré-secagem ou na secagem começaram a ser publicados a partir de 1979. Com base na experiência de diversos autores, efetuadas sobretudo nos últimos 5 anos, é possível afirmar que o emprego de altas e de altíssimas temperaturas na secagem da massa trouxe numerosas inovações e determinaram inúmeras outras vantagens. As principais são:

- possibilidade de usar farinhas de todos os cereais e suas misturas na produção de massas, especialmente no caso de massas cortadas de pequenos formatos;
- grande redução do tempo necessário para a produção, com consequente aumento da velocidade do processo;
- melhoria das qualidades organolépticas e culinárias da massa;

- pasteurização da massa, aumentando sua higiene, particularmente naquelas produzidas com ovos;
- uso do aço inoxidável na fabricação das máquinas e simplificação de sua manutenção;
- introdução do microprocessador para a gestão tecnológica da linha de produção.

Com a secagem em altas e altíssimas temperaturas verifica-se a perda do valor nutricional da massa. Segundo alguns autores perde-se cerca de 15% ou mais da lisina presente na sêmola. Todavia tal perda pode ser considerada admissível se levarmos em conta as demais vantagens obtidas, especialmente se levarmos em consideração o tempo reduzido para se obter um produto com baixo conteúdo de água. Por outro lado, a perda de lisina está diretamente relacionada com o conteúdo de proteína: quanto mais elevado for o conteúdo de proteína mais baixa será a perda de lisina e vice-versa (DEXTER E COL. 1984).

Na altíssima temperatura os diagramas empregados prevêem temperaturas do ar de secagem superiores a 86°C. Nesse caso a temperatura da massa deve ultrapassar a temperatura de 80°C para ser possível inativar o complexo enzimático fenoloxidase e evitar que o aminoácido tirosina se transforme em di-hidro-oxi-difenilalanina.

A massa secada em altas e altíssimas temperaturas se apresenta com uma bela cor amarela. Somente no caso em que o diagrama de secagem da massa esteja errado ela assume uma cor marrom, em consequência da reação não enzimática de Maillard, que é o resultado da interação entre aminoácidos livres e açúcares. Todavia essa reação ocorre somente na presença de uma abundante umidade relativa do ar, com um tempo de exposição ao calor excessivamente longo e quando a massa ainda possui uma alta umidade, fato esse que se verifica muito raramente. Na prática isso depende do controle das condições hidrotérmicas do processo.

4.2 Mecanismos de Secagem

Na secagem de massas alimentícias o mecanismo de transferência de umidade no interior da massa é o mecanismo de difusão. Como demonstrado por (ANDRIEU E

STAMATOPOULOS, 1986), a velocidade de difusão no interior da massa é muito lenta e depende da geometria, da difusividade mássica aparente e do conteúdo de umidade livre da massa. Podemos afirmar que essa baixa velocidade de difusão é responsável pela maioria dos defeitos que ocorrem na secagem de massas alimentícias.

Na pré-secagem o produto ainda se encontra mole e plástico. Caso a velocidade de secagem seja elevada a superfície do material seca rapidamente, endurecendo-o. Como a velocidade de difusão é lenta, o interior do produto permanece mole e plástico. Com o decorrer da operação de secagem a água do interior se difunde para a superfície, secando-o e fazendo com que o interior se contraia mais que a superfície já endurecida. Como resultado aparecem bolhas que no produto final têm a aparência de pontos brancos demonstrando que as condições de secagem foram inadequadas.

Esse tipo de defeito é mais visível nas dobras do espaguete e indica um ar muito seco ou muito quente durante a pré-secagem. Um aumento na umidade relativa geralmente é suficiente para sanar o problema.

Também durante a secagem final é a velocidade de difusão que controla a operação de secagem. O gradiente de umidade entre o interior e a superfície externa não deve ser superior a 1,5% uma vez que nessa fase o produto não é mais plástico e portanto não absorve as pressões criadas por um gradiente de umidade elevado. Gradientes de umidade elevados provocam fissuras no produto final prejudicando sua aparência e fazendo com que se quebrem durante a cocção.

O armazenamento logo após a secagem e anterior à embalagem também pode provocar danos ao produto final devido à baixa velocidade de difusão da umidade no interior do produto até atingir as condições de equilíbrio com o ar externo. Se o espaguete é armazenado em ambientes com baixa umidade relativa podem aparecer defeitos semelhantes aos pontos brancos que ocorrem na pré-secagem.

A umidade de um material pode ser expressa em base úmida ou em base seca. Na prática industrial a umidade é expressa em base úmida. Já nos cálculos de secagem emprega-se a umidade em base seca uma vez que essa base permanece constante

durante todo o processo de secagem. A conversão de uma umidade em outra é simples, como mostram as seguintes expressões:

$$X = \frac{U}{100-U} \quad (17)$$

$$U = \frac{X}{1+X} \cdot 100 \quad (18)$$

Nestas equações, X representa a umidade em base seca, medida em g de água/g de massa seca, e U representa a umidade em base úmida medida em porcentagem de água presente no material.

À umidade que a massa contém dá-se o nome de umidade total. À diferença entre a umidade total e a umidade de equilíbrio da massa dá-se o nome de umidade livre. Assim, se X_T corresponde à umidade total da massa, medida em g de água/g de massa seca, e X_E corresponde à umidade da massa em equilíbrio com a umidade do ar, também medida em g de água/g de massa seca, a umidade livre é dada por:

$$X = X_T - X_E \quad (19)$$

Na secagem de massas alimentícias a umidade que conseguimos eliminar é a umidade livre e não a total. Assim, nos cálculos dos diagramas de secagem é a umidade livre que devemos considerar.

Na secagem de massas alimentícias o calor latente necessário para a vaporização da água é fornecido pelo contato da massa com o ar quente que cede seu calor sensível e sofre um processo de umidificação. Como a água faz parte da estrutura do glúten formada pelas proteínas do trigo, a temperatura da massa atinge uma temperatura intermediária entre a temperatura de bulbo úmido e a temperatura de bulbo seco do ar empregado na secagem.

A velocidade de secagem, definida como sendo a velocidade de transferência de água da massa para o ar por unidade de área do material, depende do conteúdo de umidade livre da massa que está sendo secada. Sob o ponto de vista prático é possível afirmar que a velocidade de secagem é diretamente proporcional ao conteúdo de umidade livre do material, ou seja:

$$R = k(X_T - X_E) \quad (20)$$

Nesta equação, R representa a velocidade de secagem (kg H₂O/h.m²); X_T a umidade total da massa (kg H₂O/kg massa seca); X_E a umidade de equilíbrio (kg H₂O/kg massa seca); e k a constante de proporcionalidade (kg massa seca/h.m²).

Se a variação da umidade da massa com o tempo for conhecida, ver figura 4.1, a velocidade de secagem num instante qualquer do processo de secagem pode ser calculada através da expressão:

$$R = -\frac{W_s}{A} \cdot \frac{dX_T}{d\theta} \quad (21)$$

Nesta equação, W_S representa a massa seca (kg); A a área de secagem (m²) e θ o tempo de secagem (h).

Combinando as equações (20) e (21), tem-se:

$$\frac{dX_T}{d\theta} = -\frac{kA}{W_s}(X_T - X_E) \quad (22)$$

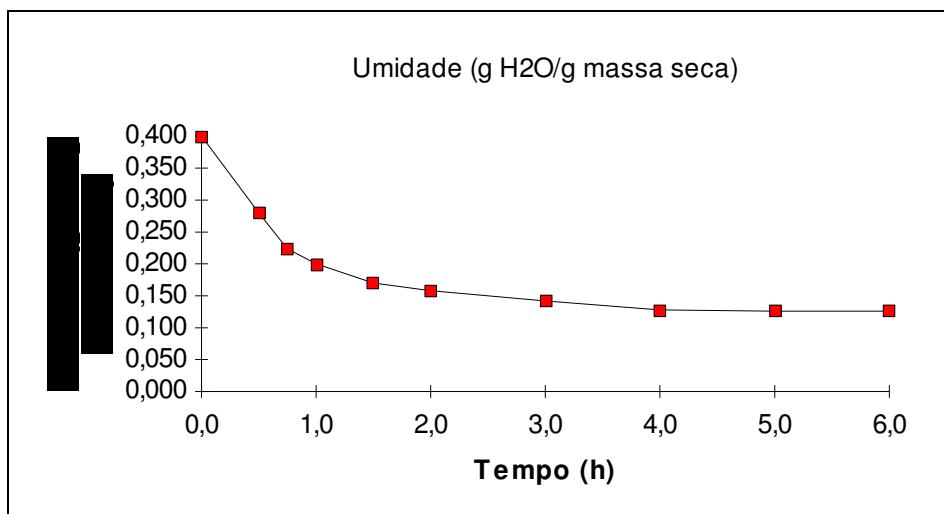


Figura 4.1 - Variação da umidade total da massa com o tempo em um processo de secagem.

(CIACCO E CHANG, 1986) utilizaram a equação (22) para calcular a variação da umidade total de uma massa alimentícia com o tempo durante o processo de secagem.

Admitindo como hipótese que:

- a transferência de massa é unidirecional;
- a densidade da massa seca é constante, não existindo contração de volume;
- a transferência de massa é o processo limitante;
- em um dado intervalo de umidade a difusividade mássica é constante com o conteúdo de umidade; e que,
- a porosidade do meio é macroscopicamente contínua e uniforme;

(ANDRIEU E STAMATOPOULOS, 1986) adotaram o modelo da difusão como válido para a secagem de massas alimentícias, estabelecendo como equação básica a expressão:

$$\frac{dX_T}{d\theta} = -\frac{kD}{r_m^2} (X_T - X_E) \quad (23)$$

Nesta equação, k representa a constante de proporcionalidade que é igual a 2,47 para geometrias semelhantes a uma placa plana infinita e igual a 5,78 para geometrias semelhantes a um cilindro infinito; D representa a difusividade mássica aparente da massa (m^2/h) e r_m representa a dimensão característica da massa (m), que é igual à meia espessura no caso da placa plana infinita e igual ao raio no caso do cilindro infinito.

Comparando as equações (22) e (23) verifica-se que as duas têm a mesma forma, diferindo apenas na definição da constante de proporcionalidade. A equação (23) deixa explícita a influência da difusividade mássica aparente da massa no processo de secagem.

No emprego da equação (23) é necessário conhecer a umidade de equilíbrio. (BOQUET E COL, 1978), analisando as equações utilizadas para representar a curva de equilíbrio, sugerem que a equação de (BRADLEY, 1936) seja empregada para alimentos à base de amido:

$$\ln(1/A_w) = k_1 \cdot k_2^{X_E} \quad (24)$$

Nesta equação, $A_w = (\bar{p}_A / p_A)$ representa a atividade de água; X_E corresponde à umidade de equilíbrio do material medida em gramas de água por grama de massa seca; k_1, k_2 representam constantes que dependem da temperatura.

Adotando a equação (24) como modelo matemático para representar a curva de equilíbrio para massas alimentícias, (LEONHARDT, 1996) propôs que a variação da umidade de equilíbrio de massas alimentícias com a umidade relativa fosse representada pela equação:

$$X_E = \frac{1,09054 - \ln \ln(1/(H_r / 100))}{16,834}$$

(25)

Tomando como verdadeira a equação (23) (ANDRIEU E STAMATOPOULOS, 1986) calcularam a difusividade mássica aparente da massa para várias geometrias e condições de secagem. A tabela 4.1 mostra o valor da difusividade mássica aparente em função da temperatura do ar de secagem e da umidade da massa. A tabela 4.2 mostra a variação da difusividade mássica aparente em função da temperatura de bulbo úmido do ar de secagem e da umidade da massa. Nesta tabela pode-se observar que a temperatura de bulbo úmido e portanto o conteúdo de umidade do ar de secagem não tem influência sobre a difusividade mássica aparente de massas alimentícias. Além desse fato, (ANDRIEU E STAMATOPOULOS, 1986) mostraram ainda que a difusividade mássica aparente de massas alimentícias independe da geometria da massa.

Adotando como válido o modelo de Arrhenius:

$$D = A \exp(-E / RT) \quad (26)$$

Onde:

- A é o fator de freqüência que determina o comportamento da velocidade na origem;

- E é a energia de ativação;
- R é a constante dos gases perfeitos;
- T é a temperatura absoluta.

Temperatura (°C)	Difusividade Mássica Aparente da Massa (m ² /h)		
	X _T ≥ 0,27	0,18 ≤ X _T < 0,27	0,136 ≤ X _T < 0,18
40	0,09x10 ⁻⁶	0,05x10 ⁻⁶	0,03x10 ⁻⁶
50	0,13x10 ⁻⁶	0,07x10 ⁻⁶	0,04x10 ⁻⁶
60	0,15x10 ⁻⁶	0,09x10 ⁻⁶	0,05x10 ⁻⁶
70	0,22x10 ⁻⁶	0,13x10 ⁻⁶	0,09x10 ⁻⁶
80	0,26x10 ⁻⁶	0,15x10 ⁻⁶	0,10x10 ⁻⁶
90	0,32x10 ⁻⁶	0,18x10 ⁻⁶	0,11x10 ⁻⁶

Tabela 4.1 - Difusividade mássica aparente de massas alimentícias em função da temperatura do ar de secagem e do conteúdo de umidade da massa (ANDRIEU E STAMATOPOULOS, 1986).

Temperatura de Bulbo Úmido (°C)	Difusividade Mássica Aparente (m ² /h)		
	X _T ≥ 0,27	0,18 ≤ X _T < 0,27	0,136 ≤ X _T < 0,18
30	0,259x10 ⁻⁶	0,151x10 ⁻⁶	0,101x10 ⁻⁶
40	0,263x10 ⁻⁶	0,158x10 ⁻⁶	0,104x10 ⁻⁶
50	0,263x10 ⁻⁶	0,162x10 ⁻⁶	0,104x10 ⁻⁶
60	0,256x10 ⁻⁶	0,155x10 ⁻⁶	0,027x10 ⁻⁶

Tabela 4.2 - Variação da difusividade mássica aparente de massas alimentícias em função da temperatura de bulbo úmido para um ar a 80°C (ANDRIEU E STAMATOPOULOS, 1986).

(LEONHARDT, 1995) representou a variação da difusividade mássica aparente de massas alimentícias com a temperatura, através das equações:

$$\begin{aligned} X_T \geq 0,27 &\Rightarrow D_{27} = 9,55 \times 10^{-4} \exp(-2897,55 / T) \\ 0,18 \leq X_T < 0,27 &\Rightarrow D_{18} = 6,96 \times 10^{-4} \exp(2980,07 / T) \\ 0,136 \leq X_T < 0,18 &\Rightarrow D_{13} = 8,76 \times 10^{-4} \exp(3211,67 / T) \end{aligned} \quad (27)$$

Nestas equações a difusividade mássica aparente (D) está expressa em m^2/h e a temperatura (T) em K.

4.3 Diagramas de Secagem

Um diagrama de secagem é constituído por três curvas básicas:

- $t_{bs} = f(\theta)$ que correlaciona a temperatura de bulbo seco do ar de secagem com o tempo;
- $H_r = f(\theta)$ que correlaciona a umidade relativa do ar com o tempo;
- $X_T = f(\theta)$ que correlaciona a variação da umidade da massa, medida em $\text{g H}_2\text{O/g massa seca}$, com o tempo de secagem.

Enquanto as duas primeiras estabelecem as condições de secagem, a última relaciona a variação da umidade com o tempo, informando as condições da massa em cada estágio do processo de secagem. O cálculo de um diagrama de secagem pode ser conduzido obedecendo aos seguintes passos:

1. Escolhem-se, com base no secador e na massa que será secada, as condições de secagem, definindo a variação da temperatura de bulbo seco e da umidade relativa do ar com o tempo.
2. Com base nas condições de secagem selecionadas calcula-se a variação do conteúdo de umidade com o tempo empregando o modelo matemático proposto por (ANDRIEU E STAMATOPOULOS, 1986), apresentado no item 4.2.

4.4. Medida da Umidade da Massa.

A figura 4.2 apresenta, de forma esquemática, uma linha completa de produção de massa longa mostrando as várias operações envolvidas, desde a prensa até o silo de produto acabado.

Como se observa, o tamanho dos equipamentos é muito grande. Em uma linha para espaguete, considerando silo para apenas duas horas e meia, o comprimento total da linha é da ordem de 40 m.

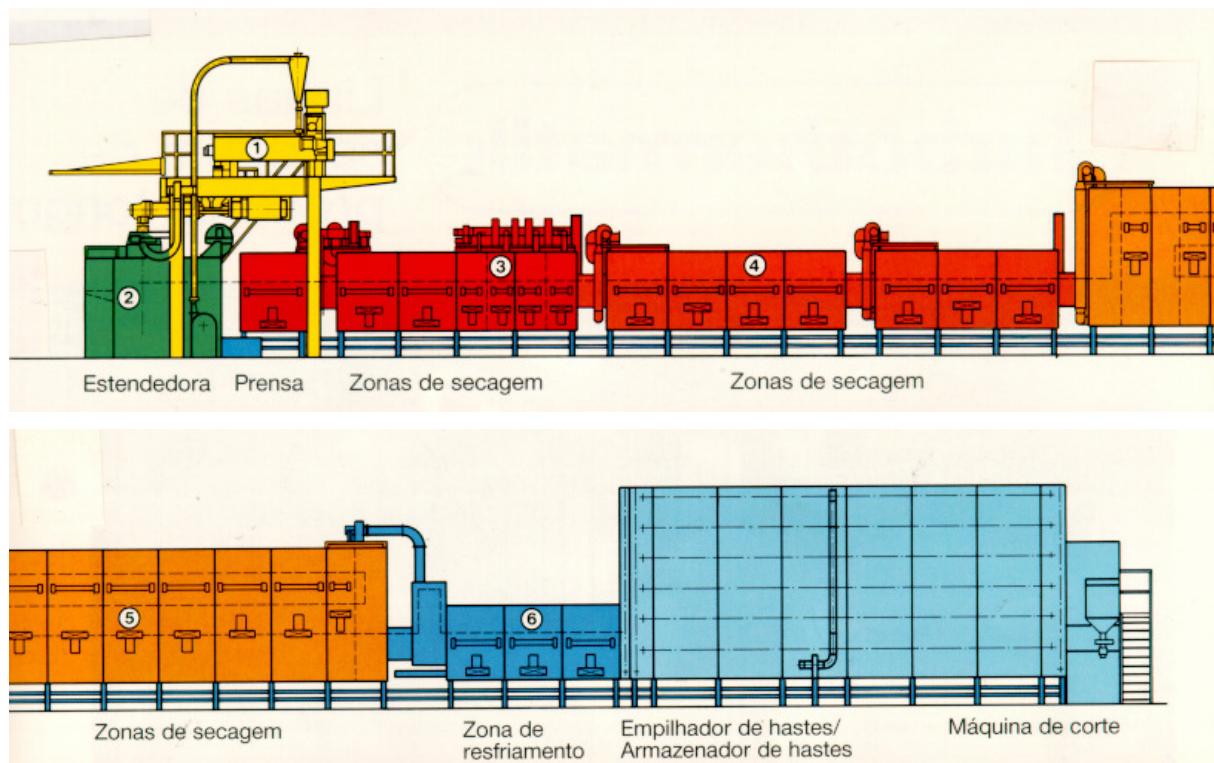


Figura 4.2 – Linha contínua de produção de massa longa.

Controlar as condições do ar no interior do equipamento não é tão simples. Com o propósito de diminuir as incertezas sobre a aplicabilidade de um ou outro método para a medida on-line das variáveis de processo em sistemas industriais, este trabalho estuda a utilização da tecnologia de sensores inteligentes para medição das condições do ar de secagem em cada ponto pré-definido pela modelagem em termos de temperatura e umidade relativa do ar e da medida de umidade por microondas para corpos sólidos em pontos estratégicos do secador.

Por esta técnica de microondas irradiam-se ondas em altas frequências e as moléculas de água podem ser colocadas em rotação. Na água o spin ou rotação molecular obtida pela tecnologia da microonda é bastante específico e oferece um método preciso para se medir o conteúdo de água contido em sólidos, pós, granulados e massas. Devido às características específicas destes materiais, os demais métodos existentes não conseguem oferecer medidas com precisão suficiente.

Na prática a sonda utilizada transmite uma baixa faixa de energia em microondas que é focada e captada por um sistema de antena e utilizam-se circuitos de processamento para medir variações da umidade na massa que a contém em um tempo de irradiação muito curto. Ambos estes fatores: baixa frequência irradiada e tempo curto de exposição conforme constatados em outros estudos não afetam a qualidade da massa alimentícia que está sendo monitorada.

Pela grande extensão dos secadores de massa, para comportar as grandes demandas de volumes de produção, as variáveis de controle do ambiente tais como temperatura, umidade relativa do ar e velocidade da ventilação nos leva à necessidade de métodos cada vez mais ágeis e confiáveis de coleta de informações sobre estas medidas para interação com o sistema de controle PLC (controlador lógico programável) dos equipamentos em geral.

A tecnologia de sensores inteligentes nos oferece o SHT75 um chip multi-sensor para temperatura e umidade relativa. Desenvolvido em processos industriais com tecnologia CMOS e técnicas patenteadas para micro-componentes (CMOSens® technology) que nos assegura alta confiabilidade e excelente estabilidade, tem-se um dispositivo baseado em um polímero sensor de efeito capacitivo para umidade e um semicondutor sensor de temperatura ambos encapsulado em um único componente acessado por leitura digital de 14 bits em modo serial.

Este componente resulta em alta qualidade, tempo de resposta reduzido e imune a interferências externas em termos de ruídos por EMC. Cada componente passa por um processo individual de calibração higrométrica de precisão em câmeras de umidade tendo seus coeficientes de calibração gravados individualmente em seus endereços de

memória OTP. Estes coeficientes são utilizados internamente calibrando os sinais a cada medida.

Por sua capacidade e robustez, na faixa de temperatura de operação de – 40°C a + 123°C pode-se utilizá-los nas leituras das condições de temperatura e umidade de cada etapa que compõe o processo de secagem das massas, permitindo interagir em tempo real com o controle PLC dos equipamentos garantindo as condições previstas no modelo matemático que define o processo de secagem como um todo.

5. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Atualmente, processos industriais, sistemas residenciais e até produtos de consumo como automóveis estão se tornando mais amigáveis e simples de se operar em vista de sistemas de controles que incorporam tecnologias cada vez mais sofisticadas e com custos mais acessíveis. Estes processos e produtos necessitam de sistemas de aquisição de dados com muitos sensores que só se tornam economicamente viáveis se utilizarmos sensores inteligentes integrados, que possam oferecer uma interface inteligente e padronizada.

Das informações obtidas sobre o ambiente a ser monitorado, os secadores de massas alimentícias, as condições dos processos e dos produtos podem ser representadas por uma modelagem matemática que representa o comportamento deste ambiente.

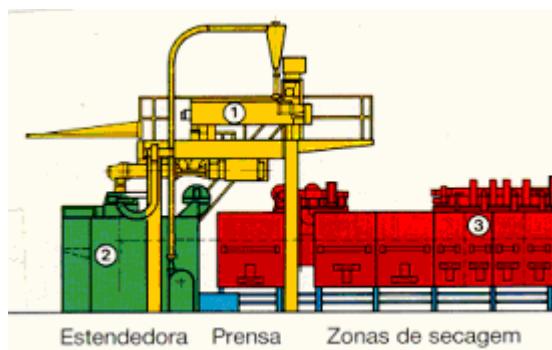


Figura 5.1. Estágio pré-secador (3) da linha contínua de produção de massa longa

A figura 5.1 exibe a planta de três setores de um secador de massa alimentícia a ser monitorado, no estágio (3) temos o pré-secador. Por se tratar de uma etapa extremamente crítica do processo, o trabalho se concentrará em avaliar este estágio onde com elevadas temperaturas e constante ventilação e exaustão do ar se retira a maior parte da água contida na massa. Para este estágio projetamos as sondas de medição de temperatura e umidade relativa do ar para o acompanhamento das leituras em confronto com o proposto na modelagem matemática.

Na galeria de elevação, estágio localizado após o pré-secador deve ser instalada a sonda de medição da umidade por microondas que tem a capacidade de leitura da quantidade da umidade no interior da massa a ser secada.

A metodologia adotada para medição de temperatura e umidade neste trabalho consistiu na definição de esquema elétrico, montagem de placa protótipo para as sondas de temperatura e umidade, testes com os sensores SHT75 de temperatura e umidade relativa do ar e com sensores de umidade por microondas.

Executou-se a montagem da placa protótipo utilizando placas com furação universal, estas são versáteis para qualquer necessidade e possuem dimensões que garantem a portabilidade do produto. A escolha dos componentes foi principalmente baseada em sua disponibilidade comercial, documentação técnica, adequação às necessidades do processo, simplicidade e baixo custo.

Para o processo de secagem de massas alimentícias, empregando modelos matemáticos que tem como objetivo predizer o tempo total e o tempo de cada etapa do processo desenvolveu-se uma arquitetura de sistema e circuitos para o tratamento de sinais de sensores de forma a se adequar ao modelo matemático e ao processo.

Os circuitos de medição da temperatura e da umidade relativa do ar baseiam-se na utilização do SHT75, que por sua simplicidade e integração será interligado um microcontrolador conforme figura 5.2.

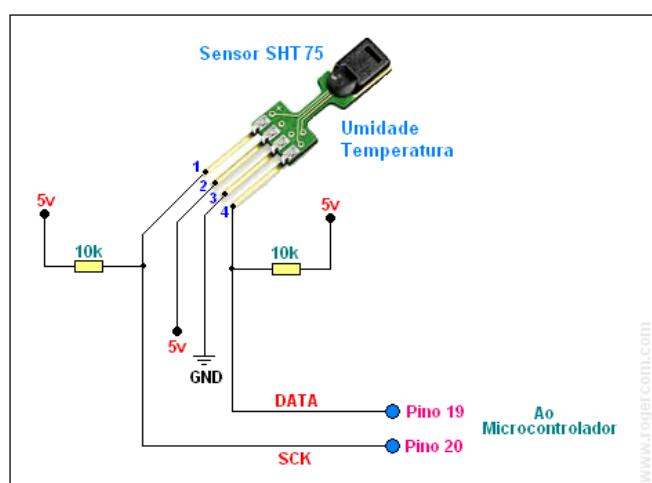


Figura 5.2 Sensor SHT75

A família SHT75 de sensores de umidade e temperatura provê um exemplo de sensores digitais de temperatura usados em redes de sensores sem fio.

O sensor é fabricado pela Sensirion, e provê leituras digitais calibradas por uma interface de dois fios.

Um microcontrolador pode ler dados do sensor enviando um comando “*medir temperatura*” para o sensor pela interface de dois fios. Ao completar a leitura, o sensor envia um sinal de *dados prontos*. O microcontrolador pode, então, ler os dados acompanhados de um código CRC para validação. Depois dessa transmissão, o sensor entra em modo inativo.

Os coeficientes de calibração são programados na memória interna do sensor, e são usados internamente durante as leituras para calibrar os sinais dos sensores.

Dados fornecidos pelo SHT75 podem ser convertidos para valores de temperatura através de uma função linear. Internamente a ele um *registrator de status* provê uma interface de detecção de baixa tensão, configura a resolução da leitura (por exemplo, 8 bits, 16 bits) e controla um coeficiente de compensação de temperatura interior.

O encapsulamento deste sensor para sua imersão no ambiente de secagem das massas alimentícias será composto por uma haste montada a partir de um bastão de teflon vazado e torneado reunindo as condições apropriadas para este ambiente que são: resistência às altas temperaturas a que será submetido e características próprias às necessidades de higiene e assepsia.

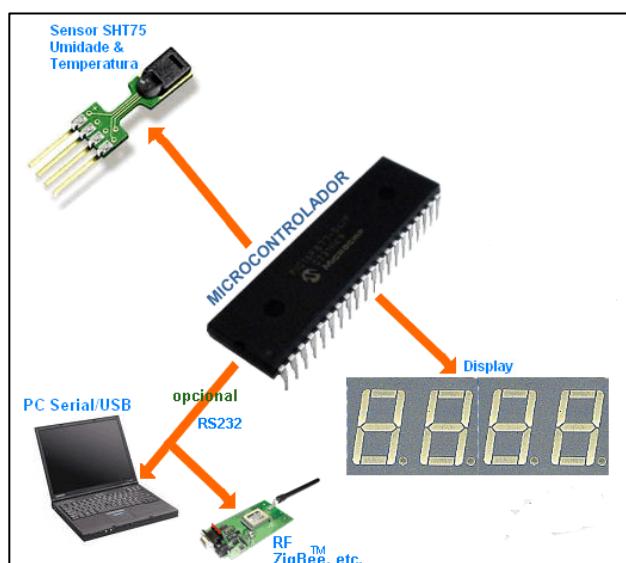
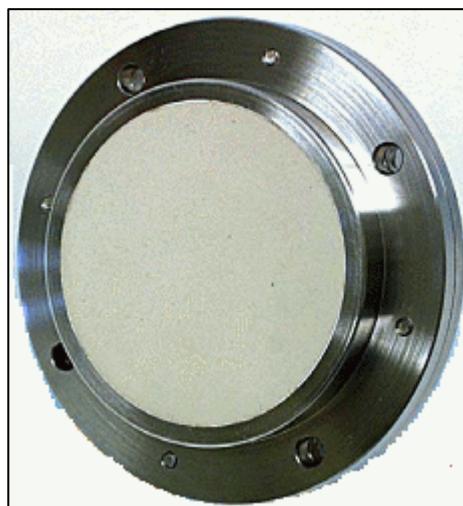


Figura 5.3 Visão geral do circuito proposto

A figura 5.3 apresenta uma visão geral dos componentes envolvidos no circuito e das interfaces do sistema proposto. Este conjunto formará as sondas que serão distribuídas nos vários estágios a serem monitorados em termos de temperatura e umidade relativa do ar conforme a proposição descrita na modelagem matemática do processo. Conforme o secador de massas alimentícias e o tipo de massa a ser secada, serão definidos números diferentes de estágios de controle.

Na composição do sistema também fará parte uma sonda de umidade por microondas, conforme figura 5.4 e 5.5, para monitorar a umidade interna da massa que está passando pelo processo de secagem, com o objetivo de assegurar a eficiência do modelo matemático e do secador. Esta sonda realimentará, com informações em tempo real, o sistema geral de controle pelo modelo matemático proposto.



FONTE: Data sheet Mütec
Figura 5.4 Sonda Sensora de Umidade por Microondas



FONTE: Data sheet Mütec
Figura 5.5 Unidade de Controle Eletrônico da Sonda por Microondas

6. PROJETO DE SONDA PARA SECADORES DE MASSAS ALIMENTÍCIAS

As sondas terão a função de executar as medições das condições do ambiente de secagem em termos de temperatura e umidade relativa do ar em tempo real. Os sinais serão enviados para um computador, este poderá encaminhar as informações para um PLC ou para um software supervisório para que se possa monitorar o real funcionamento dos secadores de massa.

6.1 Concepção da Sonda de Leitura de Umidade e Temperatura

O componente responsável pelo processamento, pelo controle das leituras e pela comunicação de todos os blocos que compõem a sonda de leitura é um microcontrolador da família PIC16F886 da Microchip.

Para compreensão do funcionamento e da construção desta sonda, sua estrutura será apresentada em forma de blocos e cada um dos blocos será estudado em detalhes no decorrer deste trabalho. Abaixo teremos uma breve descrição de cada um dos blocos que compõem o coletor de dados.

A Fig. 6.1 mostra o diagrama de blocos da sonda de leitura.

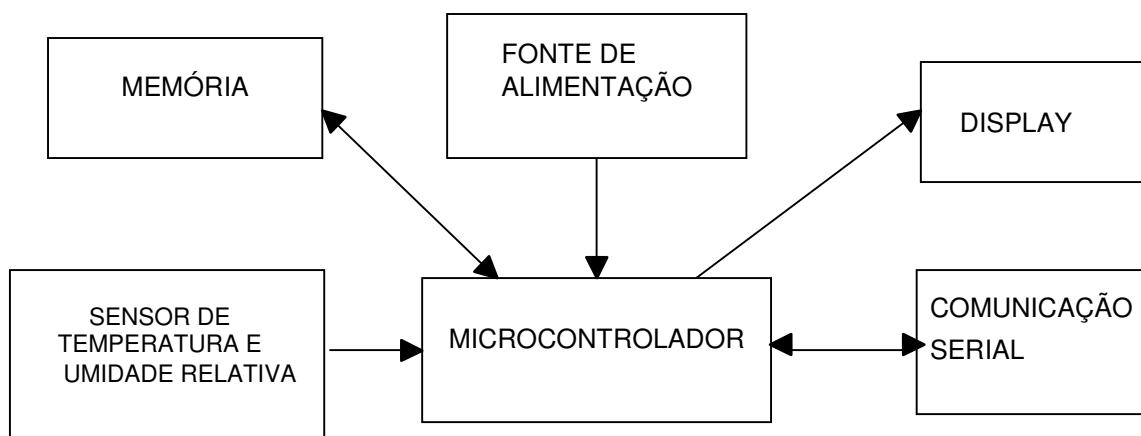


Figura 6.1 – Diagrama de blocos da sonda de leitura.

O sensor SHT75 da Sensirion é responsável pela leitura de temperatura e umidade

relativa do ar do ambiente de secagem onde estará instalada a sonda de leitura, assim as entradas analógicas do microcontrolador ficam livres para monitorar outras grandezas que venham ser necessárias. Caso haja necessidade de monitorar alguma informação no local, o usuário poderá visualizar essas informações em um conjunto display de sete segmentos o qual é o mais apropriado para ambientes fabris por permitir sua visualização à distância.

A comunicação e troca de dados da sonda com um computador serão feitas via padrão EIA-232/422 e, para isso, foi utilizado o circuito integrado MAX 422 da Maxim, que converte o sinal TTL gerado pelo canal serial do microcontrolador em um nível padrão de tensão para o computador. Estes dados poderão trafegar por cabo serial, por modem ZIGBEE e também por rádio modem, os dois últimos meios possibilitam a transmissão sem fios das informações.

Com as funções descritas acima, serão cobertas as necessidades de monitoramento das grandezas temperatura e umidade relativa do ar de secagem, bem como sua análise imediata nos equipamentos secadores de massa nos quais a sonda for instalada.

6.2 Medição de Temperatura e Umidade em Secadores de Massa

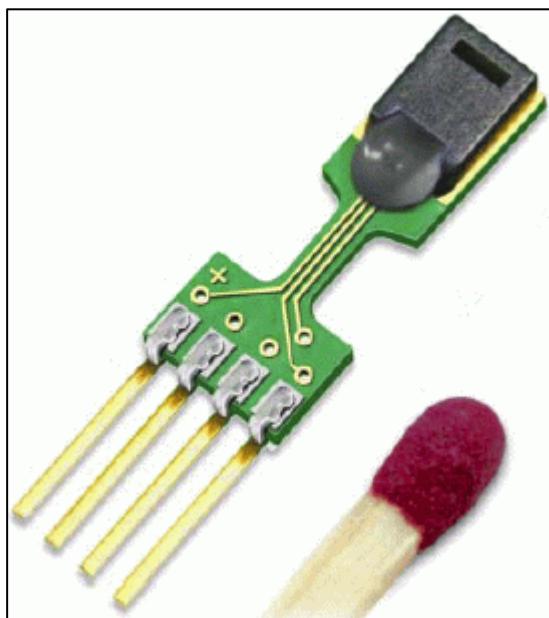
Um dos principais problemas encontrados em secadores de massa em processo contínuo é a temperatura elevada no ambiente que interfere não apenas na leitura mas também na estrutura da maioria dos sensores que possuem uma faixa de operação limitada em termos de temperatura. Por esta condição a sonda de leitura foi dimensionada com o sensor SHT75 da Sensirion que explanaremos a seguir.

6.2.1 Sensor SHT75

Para este trabalho foi escolhido o sensor SHT75 da Sensirion, onde estão presentes os dois sensores necessários. Este componente possui, num único encapsulamento, um sensor de umidade relativa e um sensor de temperatura. Os sensores estão acoplados a um conversor A/D e a leitura dos valores medidos pode ser feita através de um canal de comunicação serial dedicado. Isso resulta em uma ótima qualidade de sinal, uma resposta rápida e oferece uma grande imunidade às

perturbações externas.

A faixa de leitura da temperatura é de -40 a $123,8^{\circ}\text{C}$ com uma resolução de $0,01^{\circ}\text{C}$ e a saída do sinal convertido pode ser de 12 ou 14 bits. Já a umidade relativa pode variar de 0 a 100% com uma resolução de 0,03 e a saída do sinal convertido pode ser de 8 ou 12 bits. A vantagem em se utilizar uma resolução menor do conversor A/D é a de diminuir o tempo entre a solicitação da leitura do sinal e a resposta do sensor que pode ser 11/55/210ms para 8/12/14 bits respectivamente, e este tempo ainda pode variar 15% dependendo da freqüência do cristal interno. A Fig. 6.2 mostra o sensor SHT75 comparando suas dimensões reduzidas.



FONTE: Data sheet Sensirion

Figura 6.2. SHT75 Comparaçāo dimensional.

6.2.2 Alimentação do Sensor

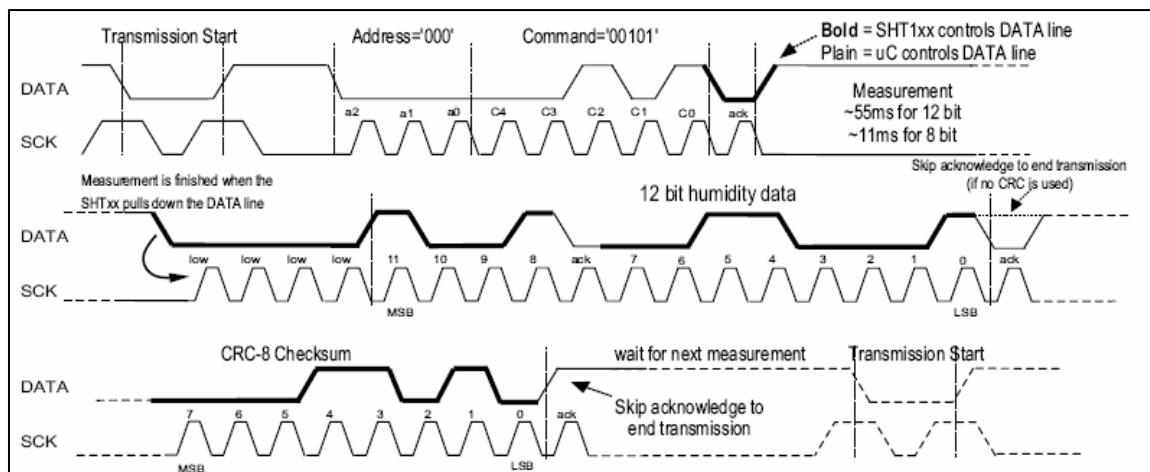
O SHT75 requer uma tensão de alimentação de 2,4 a 5V. Após alimentar o componente é necessário que se aguarde 11ms para que ele inicialize. Neste tempo não devemos enviar nenhum comando ao componente. Os pinos de alimentação são o 1 para GND e o 4 para VCC.

6.2.3 Comunicação Serial (2-WIRE)

A comunicação do SHT75 é serial com duas linhas e é otimizada para um baixo consumo de energia. A função do pino 3, o sinal SCK, é sincronizar a comunicação entre um microcontrolador e o SHT75. Uma vez que é uma interface totalmente estática, não existe requisito de freqüência mínima de *clock*. O pino 2 tem a função de ser o canal de comunicação de dados (*data channel*) que é bidirecional. Ele envia sinais em nível baixo e por isso é necessário colocar um resistor de $10k\Omega$ para VCC para possibilitar nível alto nesse pino.

6.2.4 Protocolo de Comunicação

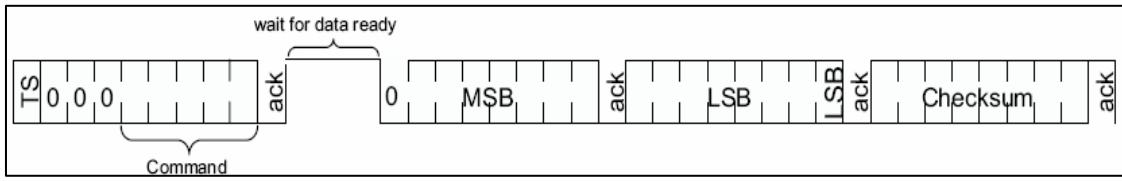
Para iniciar a comunicação entre o SHT75 e o microcontrolador é necessário um pulso de *start* que consiste em colocar o pino 2 (*data*) em nível zero por dois pulsos de *clock*. Feito isso podemos enviar o comando para leitura da temperatura ou da umidade. Na Fig. 6.3 temos um exemplo de como é o procedimento com os sinais nos pinos do SHT75 para a leitura de umidade.



FONTE: Data sheet Sensirion

Figura. 6.3 – Procedimento para leitura de umidade no SHT75.

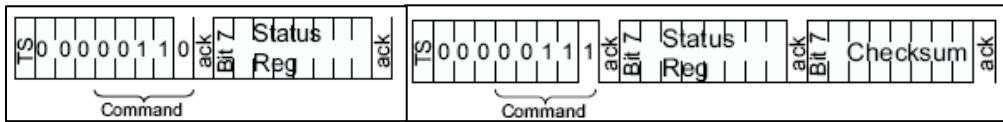
A Fig. 6.4 mostra de forma resumida os comandos de solicitação de leitura e recebimento do pacote com a resposta.



FONTE: Data sheet Sensirion

Figura 6.4 – Solicitação e resposta de leitura.

As leituras dos valores de temperatura e de umidade são padronizadas em 14 e 12 bits, respectivamente. Estes podem ser alterados para 12 e 8 bits, respectivamente. Com isso é possível ter uma redução no tempo de leitura, que depende do número de bits que se deseja na leitura dos dados. Para ler este valor basta enviar um pulso de *start* e na seqüência o comando **00000110**, em seguida será recebido o valor do registrador e o *checksum*. Para alterar a resolução do conversor A/D para 8 bits na leitura do valor de umidade e 12 bits no valor da temperatura, basta enviar um pulso de *start* e na seqüência o comando **00000111** ack **00000001** ack. A Fig. 6.5 mostra as seqüências de leitura e escrita no registrador.



FONTE: Data sheet Sensirion

Figura 6.5 – Comandos para leitura e escrita no registrador.

6.2.5 Circuito Elétrico

Foram usados dois pinos do microcontrolador para a interface com o sensor SHT75. O pino 2 do sensor destinado a trafegar os dados, está ligado no pino RC4 do microcontrolador e o pino 3 do sensor destinado ao *clock*, está ligado ao pino RC2 do microcontrolador. O resistor R5 serve para manter o sinal da linha sempre em nível alto e o capacitor C11 de 100nF é o capacitor de desacoplamento do componente. Os demais pinos do sensor não são utilizados. O circuito da Fig. 6.6 mostra a forma de ligação do sensor SHT75.

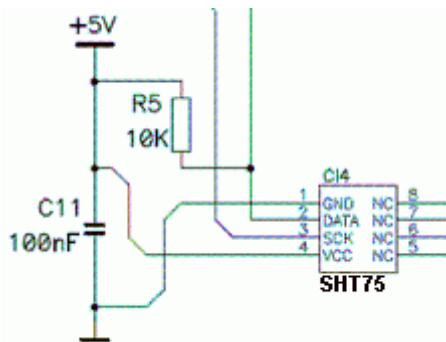


Figura 6.6 – Circuito elétrico de ligação do SHT75.

6.3 Comunicação Serial

Um canal de comunicação é um caminho pelo qual a informação pode trafegar. Ela pode ser definida por uma linha física (fio) que conecta dispositivos de comunicação.

Em comunicação digital, a informação é representada por bits de dados individuais, que podem ser agrupados em mensagens de vários bits. Um byte (conjunto de 8 bits) é um exemplo de uma unidade de mensagem que pode trafegar através de um canal digital de comunicações. Uma coleção de bytes pode ser agrupada em um “frame” ou outra unidade de mensagem de maior nível. Esses múltiplos níveis de agrupamento facilitam o reconhecimento de mensagens e interconexões de dados complexos.

Por não ser prático nem econômico transferir todos os bits de uma mensagem simultaneamente, a mensagem é dividida em partes menores e transmitida seqüencialmente. A transmissão bit-serial converte a mensagem em um bit por vez através de um canal. Cada bit representa uma parte da mensagem. Os bits individuais são então rearranjados no destino para compor a mensagem original. Em geral por um canal irá passar apenas um bit por vez. A transmissão bit-serial é normalmente chamada de transmissão serial, e é o método de comunicação escolhido por diversos periféricos.

O padrão mais utilizado é o RS-232, comumente usado nas portas seriais dos computadores pessoais, (também conhecido por EIA RS-232C ou V.24), que é um

padrão para troca serial de dados binários entre um DTE (terminal de dados, de *Data Terminal Equipment*) e um DCE (comunicador de dados, de *Data Communication Equipment*).

No protocolo de comunicação RS-232, caracteres são enviados um a um como um conjunto de bits. A codificação mais comumente usada é o "start-stop assíncrono" que usa um bit de início, seguido por sete ou oito bits de dados, possivelmente um bit de paridade, e um ou dois bits de parada sendo, então, necessários 10 bits para enviar um único caractere. Tal fato acarreta a necessidade em dividir por um fator de dez a taxa de transmissão para obter a velocidade de transmissão. O padrão define os níveis elétricos correspondentes aos níveis lógicos um e zero, a velocidade de transmissão padrão e os tipos de conectores.

O RS-232 é recomendado para conexões curtas (quinze metros ou menos). Por conta desta limitação optaremos pela utilização da interface RS422. A RS422 é uma interface serial balanceada (utilizando um cabeamento diferenciado) para a transmissão de dados digitais. A vantagem de um sinal equilibrado é a imunidade quanto a ruído.

Ao comunicar-se em taxas de dados elevadas, ou em distâncias longas nos ambientes do mundo real, os métodos "single-ended" são freqüentemente inadequados. A transmissão de dados de diferencial (sinal diferencial balanceado) oferece um desempenho superior na maioria das aplicações. Os sinais diferenciais podem ajudar a anular os efeitos da troca do terra e dos sinais de ruído induzidos que podem aparecer como tensões em uma rede.

O RS422 (diferencial) foi projetado para distâncias maiores e taxas de transferência mais elevadas do que o RS232 (SYSTRONICS). Em sua forma mais simples, um par dos conversores de RS232 a RS422 (e vice-versa) podem ser usados para formar "um cabo de extensão RS232". As taxas de dados até 100K bits/segundo e distâncias até 1220 metros podem ser acomodadas com RS422. Este também é especificado para as aplicações *multi-drop* (um driver é conectado e pode transmitir para até 32 receptores). O dado é codificado como uma tensão diferencial entre os fios. Os fios são nomeados A (negativo) e B (positivo). Quando B > A então a saída será uma marca (1 ou desligado) e quando A > B então é contado como um espaço (0 ou ligado). No geral

uma marca é +1 VDC para a linha A e +4 VDC para a linha B. Um espaço é +1 VDC para a linha B e o +4VDC para a linha A. Na extremidade do transmissor a diferença da tensão não deve ser menos de 1.5 VDC e não exceder 5 VDC. Na extremidade do receptor a diferença da tensão não deve ser menos de 0.2 VDC. O nível de tensão mínimo é -7 VDC e máximo +12 VDC. A seguir a tabela 6.1 mostrando as características do RS422 (SYSTRONICS, 2003):

Máxima Distância /Taxa	1200 metros /max. 100 kbps
Máxima Distância / Taxa	12 metros / 10 Mbps
Resistência Driver de Saída	100 ohm
Resistência receptor entrada	4 kohm min.
Máxima saída atual	150 mA

Tabela 6.1 Características do RS422.

A tabela 6.2 mostra as características entre os padrões mais conhecidos de comunicação serial, onde podemos analisar as vantagens e desvantagens de cada um:

ESPECIFICAÇÕES	RS232	RS422
Modo de operação	SINGLE ENDED	DIFFERENTIAL
Nº total Drivers e Receptores em Uma Linha (Um driver ativo por vez para redes RS485)	1 DRIVER 32 RECV	1 DRIVER 32 RECVR
Máximo comprimento do cabo	15 m.	1219 m.
Taxa Máx de transf.de dados (15m. – 1219m. para RS422/RS485)	20kb/s	10Mb/s- 100Kb/s
Voltagem Max saída do Driver	+/-25V	-0.25V a +6V
Nível de saída do sinal do Driver (Carregado Min.)	Carregado	+/-5V a +/-15V
Nível de saída do sinal do Driver Descarreg. Max)	Descarreg.	+/-25V
Carga Impend. Driver (Ohms)		100
Driver Max.atual em Estado Z Alto	Ligado	N/A
Driver Max.atual em Estado Z Alto	Desligado	+/-6mA a +/-2v
Taxa (Max.)		30V/uS
Faixa de voltagem de entrada do receiver		+/-15V
Sensibilidade entrada receiver		+/-3V
Resistência entrada receiver (Ohms), (1 padrão carregado para RS485)	3k to 7k	4k min.

Tabela 6.2 - Comparaçāo de padrões seriais.

6.4 Cabo Utilizado para a Comunicação

Na figura 6.7 é possível verificar os pinos e seus significados, em um cabo completo para comunicação RS232 com todos os sinais para controle de fluxo disponíveis.

RS 232C – PADRÃO FÍSICO E ELÉTRICO		
Conector DB25 (no caso dos computadores PC, utiliza-se normalmente um DB9, com os principais sinais).		
DB25	DB9	Descrição do Sinal
2	3	Transmit Data – TXD
3	2	Receive Data – RXD
4	7	Request to Send – RTS
5	8	Clear to Send – DTS
6	6	Data Set Ready – DSR
7	5	Signal Ground – GND
8	1	Data Carrier Detect – DCD
15		Transmit Clock – TXCk
17		Receive Clock – RXCk
20	4	Data Terminal Ready – DTR
24		Auxiliary Clock
22	9	Ring Indicator – RI

Figura 6.7 - Pinos do conector para cabos de comunicação RS232

RS 232C – PADRÃO FÍSICO E ELÉTRICO						
Null Modem – Conector simplificado, usado para transferência de dados						
DB25	DB9	Descrição do Sinal		DB25	DB9	Descrição do Sinal
2	3	TXD		2	3	TXD
3	2	RXD		3	2	RXD
4	7	RTS		4	7	RTS
5	8	DTS		5	8	DTS
6	6	DSR		6	6	DSR
7	5	GND		7	5	GND
8	1	DCD		8	1	DCD
15		TXCk		15		TXCk
17		RXCk		17		RXCk
20	4	DTR		20	4	DTR
24				24		
22	9	RI		22	9	RI

Figura 6.8 - Pinos do conector para cabo simplificado de comunicação RS232.

Na figura 6.9 é possível verificar a pinagem utilizada nos conectores do cabo que foi

confeccionado para a comunicação com a sonda. Lembrando que a sonda opera no protocolo RS422 e o PC no protocolo RS232.

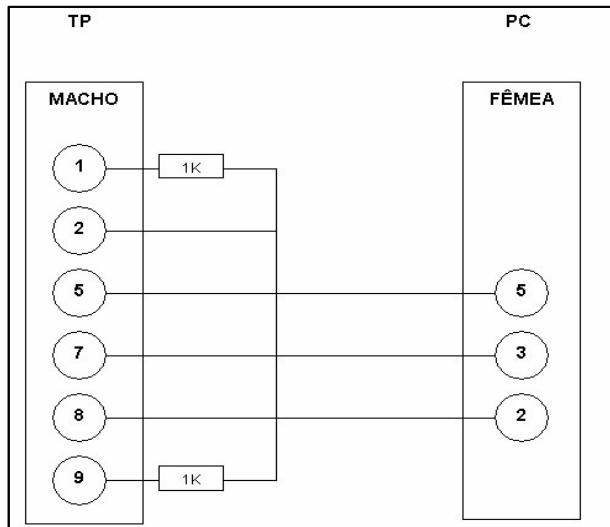


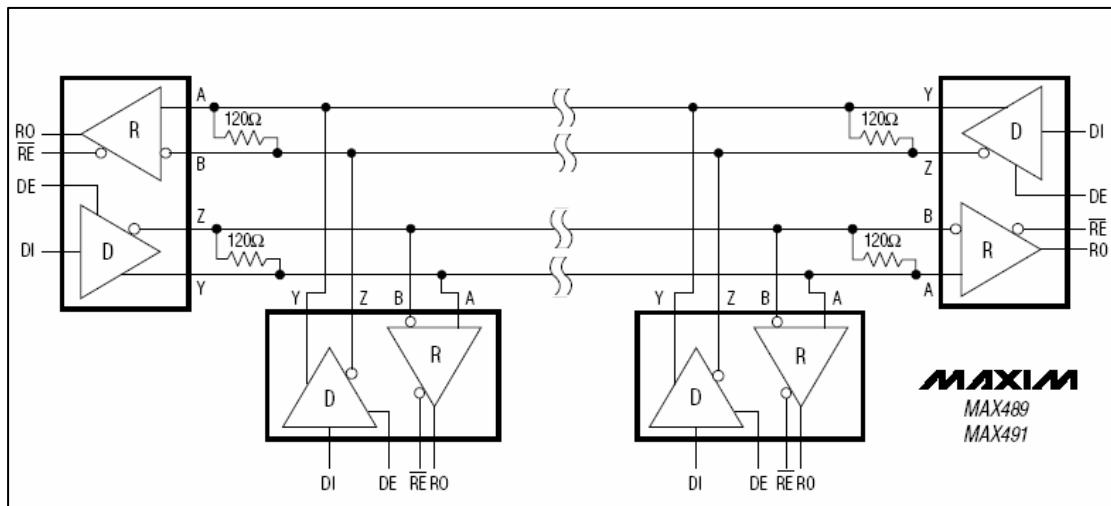
Figura 6.9 - Pinos do cabo do conversor RS232/422.

Os pinos apresentados mostram como o conversor interliga os dois padrões e permite a comunicação entre a sonda e o PC. Os sinais variam de 3 a 15 volts positivos ou negativos, sendo que valores próximos de zero não são sinais válidos. O nível lógico um é definido por ser voltagem negativa, a condição de sinal é chamada marca e tem significado funcional de OFF (desligado). O nível lógico zero é positivo, a condição de sinal é espaço, a função é ON (ligado).

Como o microcontrolador possui um canal de comunicação serial, adotaremos este padrão para troca de dados entre a sonda de leitura e o computador. O canal de comunicação serial do microcontrolador usa padrão TTL e para acoplar o sinal do microcontrolador ao computador utilizaremos o componente MAX491 (Maxim).

A sonda de leitura utiliza os pinos de recepção e transmissão RX+, RX-, TX+, TX- e GND para a comunicação, o que torna a programação do microcontrolador mais simples sem a necessidade de controle do fluxo de dados. A velocidade de comunicação poderá ser configurada como 9600bps, 8 bits de dados, 1 bit de parada e nenhuma paridade.

A Fig. 6.10 mostra a ligação elétrica do componente MAX 491.



FONTE: Data sheet Maxim

Fig. 6.10 – Circuito elétrico do MAX491.

6.5 Fonte de Alimentação

Todo dispositivo eletroeletrônico necessita de uma fonte de alimentação para seu funcionamento. A fonte de alimentação do coletor de dados tem por base uma fonte clássica com regulação linear, composta por capacitores de filtro, capacitores de desacoplamento da fonte e dois circuitos integrados reguladores de tensão com proteção incorporada contra sobre-corrente e sobre-temperatura para cada uma das tensões necessárias ao funcionamento dos componentes da placa do coletor de dados.

Conforme o circuito elétrico da figura 6.11, o diodo D1 tem a função de proteger a entrada da fonte contra a entrada de tensão inversa. O LED LD1 é utilizado para indicar visualmente que o circuito de alimentação está funcionando perfeitamente.

Esta fonte alimenta com segurança os relés e os demais componentes que são utilizados na placa do coletor de dados.

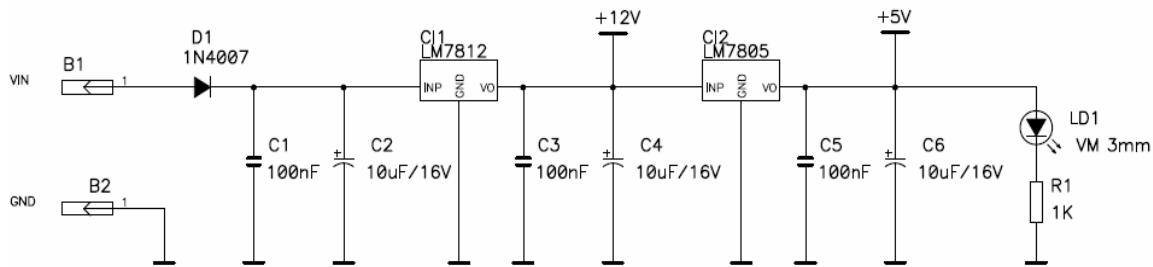


Figura. 6.11 – Circuito elétrico da fonte de alimentação.

6.6 Microcontrolador

Como há uma grande variedade de microcontroladores comercialmente disponíveis na atualidade, não foi realizada uma comparação mais específica entre os diversos tipos existentes. Contudo, foi realizado um estudo para determinar o mais adequado ao projeto levando em conta os seguintes aspectos:

- Baixo custo;
- Baixo consumo de energia;
- Fácil aquisição;
- Possibilidade de utilização de uma linguagem de programação de alto nível e de fácil implementação.

Optou-se pelo microcontrolador PIC16F886, fabricado pela empresa americana *Microchip Technology*, que possui representação no Brasil. Abaixo segue algumas das principais características deste microcontrolador.

6.6.1 Características da CPU e Memórias

A CPU e as memórias possuem as seguintes características:

- CPU RISC com arquitetura Harvard;
- conjunto de apenas 35 instruções;

- instruções executadas em um único ciclo de *clock*, exceto para instrução de desvio;
- otimizado para programação em linguagem de alto nível;
- velocidade de operação de até 20 MHz (ou 200 ns por instrução);
- memória de programa tipo *flash* de 8K com palavras de 14 bits e suporta 100.000 ciclos de escrever/apagar;
- suporta programação *in-circuit*;
- suporta *debug*;
- memória de dados tipo RAM de 368 bytes;
- memória de dados tipo EEPROM de 256 bytes e suporta 1.000.000 de ciclos de escrever/apagar;
- retém dados por período superior a 100 anos.

6.6.2 Periféricos Embutidos

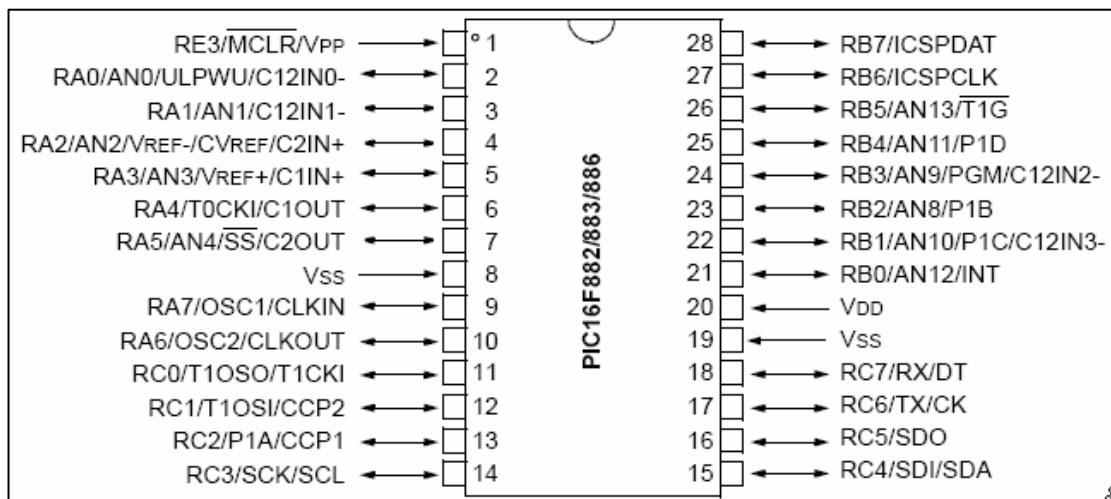
- 28 pinos de entrada ou saída;
- alta corrente entre dreno/fonte 25 mA/25 mA;
- duas interrupções externas programáveis;
- quatro entradas para interrupções para mudança de estado;
- módulo de Capture/Compare/PWM (CCP);
- módulo MSSP suportando SPITM ou I^CTM;
- módulo EUSART;
- onze entradas analógicas de 10 bits;
- dois canais de comparadores analógicos;
- um *timer* de 16 bits;
- dois *timers* de 8 bits.

6.6.3 Características Especiais.

Adicionalmente, o microcontrolador possui as seguintes características:

- Código de proteção programável;
- modo de economia de energia;
- baixo consumo de energia;
- larga faixa de tensão de operação (2,0 V a 5,5V);
- várias opções de osciladores;
- *reset* programável por *brown-out*;
- *watchdog timer*.

A Fig. 6.12 mostra a pinagem do PIC16F886.



FONTE: Data sheet Microchip

Figura 6.12 – Pinagem do PIC16F886

O PIC16F886 é fornecido em diversos tipos de encapsulamento, sendo que neste projeto foi escolhido o encapsulamento PDIP (*Plastic Dual In-line Package*) de 28 pinos devido a maior facilidade de montagem tanto em uma matriz de contato para o desenvolvimento do protótipo, quanto em placa de circuito impresso para a versão final.

6.7 Software de Programação da Sonda de Leitura

O MPLAB é um programa que tem a função de gerenciador, para o desenvolvimento de projetos com a família PIC de microcontroladores. É distribuído gratuitamente pela Microchip, fabricante dos PICs.

O MPLAB integra num único ambiente o editor de programa fonte, o compilador, o simulador e quando conectado às ferramentas da Microchip também integra o gravador do PIC e o emulador.

O Programa fonte, ou simplesmente fonte do programa é uma seqüência em texto, escrita numa linguagem de programação que será convertida em códigos de máquina para ser gravado no PIC. Todo o código desenvolvido para o coletor de dados será em linguagem de alto nível, a linguagem C. O Compilador é o programa que converte o código fonte em códigos de máquina (PEREIRA, 2003). O Simulador é o programa que simula o funcionamento da CPU (PIC), conforme o programa fonte que está sendo desenvolvido.

O projeto no MPLAB é um conjunto de arquivos e informações que comunica ao ambiente integrado qual o PIC está sendo usado, qual a freqüência de *clock*, qual a linguagem de programação utilizada, qual o layout das janelas, etc. É importante lembrar que o MPLAB se integra ao ambiente Windows, permitindo cópia de arquivos de textos de um aplicativo para outro de uma forma bem simplificada.

Utilizaremos neste projeto a versão MPLAB IDE 8.0 e para compilar os comandos da linguagem C utilizaremos o compilador *PCWH Compiler* da CCS versão 4.04. A Fig. 6.13 mostra um Diagrama de Blocos Simplificado do *software* para o Microcontrolador.

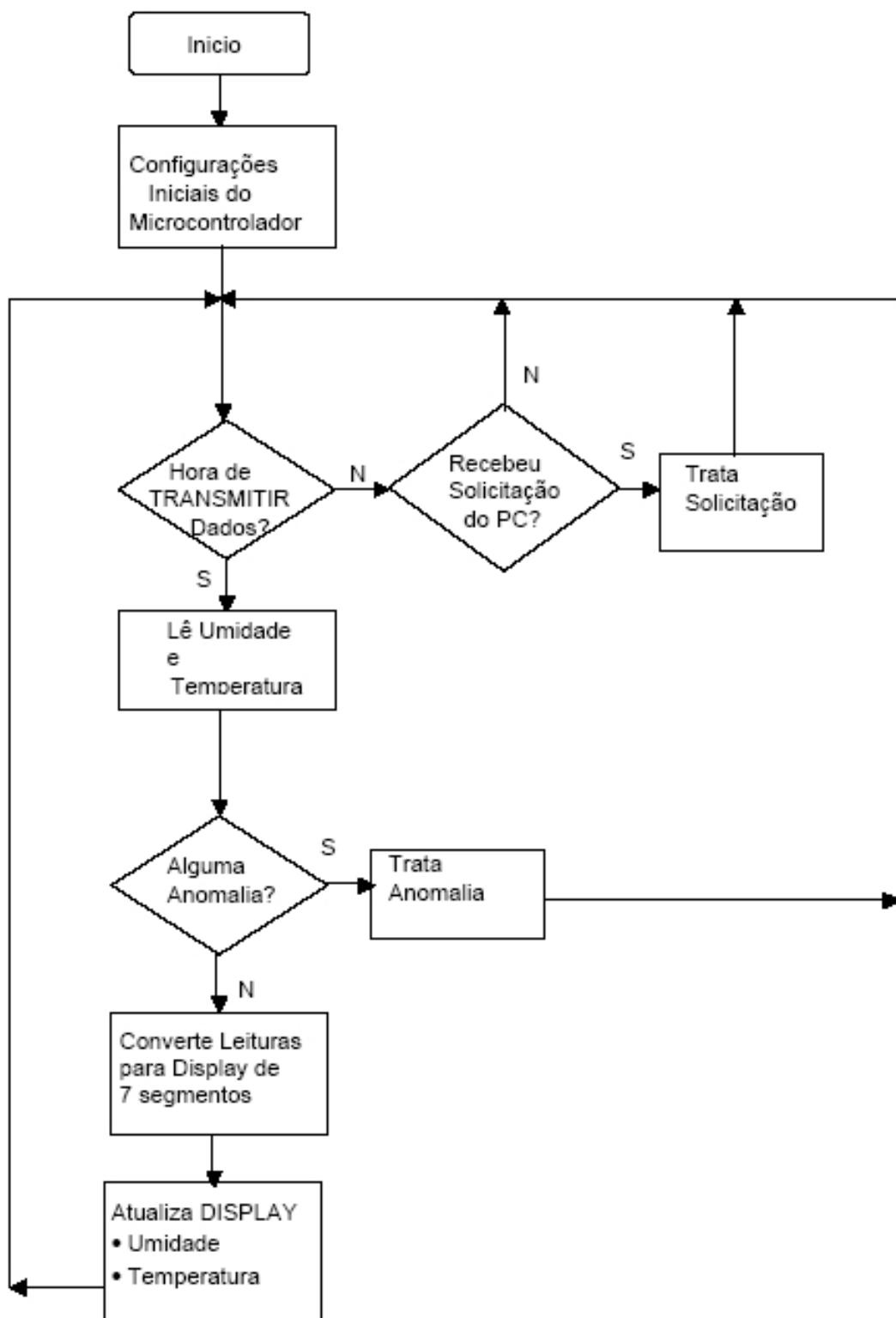


Figura 6.13 Diagrama de Blocos Simplificado do *software*.

7. MEDIDOR DE UMIDADE EM SÓLIDOS PARA PROCESSOS CONTÍNUOS

Neste capítulo será descrito o medidor de umidade por microondas para umidade em corpos sólidos. Este medidor é necessário para garantir a monitoração do processo de secagem com leitura instantânea da umidade resultante. Isto nos permite obter um controle ágil e preciso do funcionamento do estágio da pré-secagem obedecendo a um modelo matemático que nos garante um resultado previsível de acordo com os parâmetros de controle do ambiente de secagem.

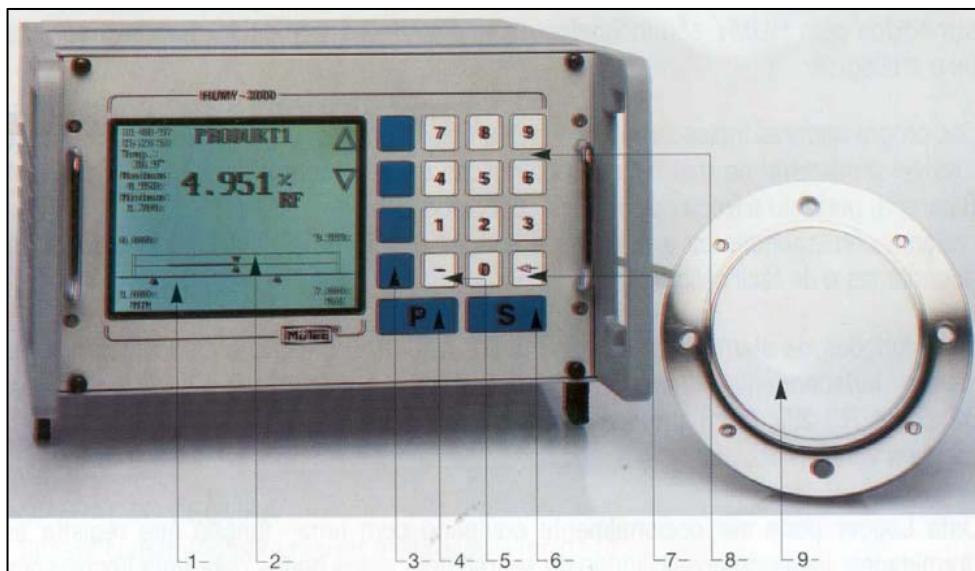
O medidor de umidade HUMY 2000, do fabricante MÜTEC, foi selecionado, por suas características e pela disponibilidade imediata garantida pelo seu representante LeNox no Brasil e por ser projetado para medições “On Line” do teor de água livre em sólidos ou emulsões em Processos Contínuos. Sua aplicação em termos de processos abrange: pós, farináceos, café, açúcar, areias, terras, minérios, cereais, tabaco, massas alimentícias, alimentos semiprocessados, chips, plásticos, cavacos etc.

Adequado para o trabalho em ambientes industriais hostis apresenta características técnicas de fabricação tais como:

- A prova de explosão, norma E Exib IIC T6;
- diversos modos de apoio: tipo montagem em parede, apoio em mesa, gaveta em painéis 19”;
- medição da umidade: mínimo de 0 a 100%, máxima de 0 a 85% com 1,2 ou 3 casas de precisão;
- medição da temperatura: menor campo 0 a 5 °C, campo máximo 0 a 120°C, temperatura máxima na face do sensor versão sonda com acabamento cerâmica;
- fácil manuseio e calibração;
- temperatura de operação: 0 a 120°C sonda e 80°C máximo para módulo eletrônico;
- recursos opcionais: interface serial, datalogger, saídas para impressoras, entradas digitais especiais e capacidade de memória adicional.

O princípio de medição do HUMY 2000 baseia-se em um circuito aberto ressonante. No espectro da microonda mede-se a permeabilidade, amortecimento e absorção da mesma no meio líquido ou sólido. Desta forma, de acordo com os conceitos teóricos apresentados anteriormente no capítulo 2 pode concluir que sua leitura consegue abranger toda a água livre, ou seja, a superficial e a intergranular (capilar).

O circuito da sonda pode ser encapsulado em material inerte (teflon), porém existem versões com revestimento de proteção com superfície de cerâmica ou borracha para serem escolhidas em conformidade com o ambiente ou com o processo que se deseja monitorar. A figura 7.1 apresenta o conjunto leitor e a sonda de microondas.

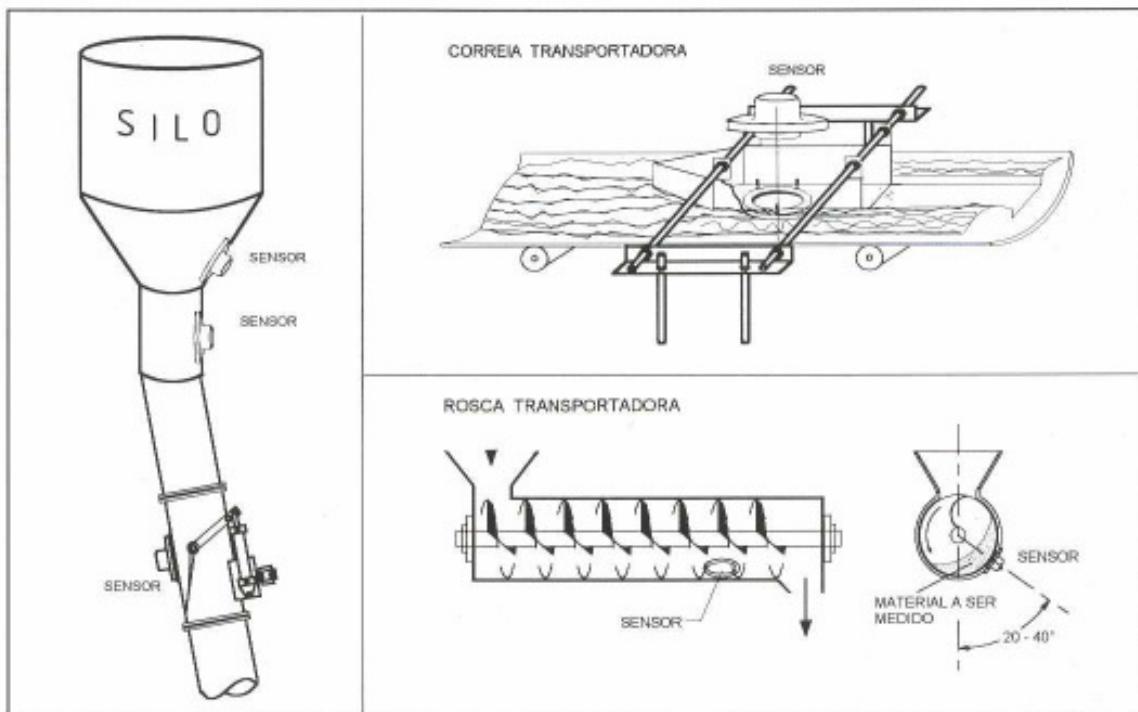


FONTE: Data sheet Mütec

Figura 7.1 Conjunto HUMY 2000 leitor e sonda.

Nesta apresentação pode-se verificar a disponibilidade de um (1) display de cristal líquido, (2) indicadores analógicos com função de arraste, (3 a 8) teclas de entrada de dados e de funções programáveis e (9) sonda sensora de leitura.

Deve ser ressaltado que o medidor pode detectar a umidade em processos fechados, pois a medição pode ser efetuada via paredes não metálicas e pode ser instalado nas mais variadas posições e adaptado às condições do processo a ser monitorado conforme mostra a figura 7.2. A sonda pode ser instalada em pontos críticos de processos de produção tal como exemplifica a figura 7.3.



FONTE: Data sheet MÜTEC

Figura 7.2 Exemplos de instalação da sonda de micro-ondas.



FONTE: Data sheet MÜTEC

Figura 7.3 Aplicação da Sonda em um ponto crítico de um processo

8. MODELAGEM MATEMÁTICA E MONTAGEM DA SONDA DE LEITURA DA TEMPERATURA E UMIDADE RELATIVA DO AR

Conforme descrito no capítulo 4, o secador de massas alimentícias possui uma grande extensão. Para leitura de temperatura e umidade relativa do ar de secagem ao longo deste secador, no capítulo 5 foi proposto um projeto para a sonda de leitura destas grandezas. A seguir será detalhada a construção do protótipo desta sonda.

8.1 Protótipo da Sonda de Leitura de Temperatura e Umidade Relativa

Os elementos que compõem a sonda de leitura de temperatura e umidade relativa do ar foram acomodados de modo compacto e protegidos em uma caixa de alumínio com o formato de 130 mm x 50 mm x 100 mm acoplada a um bastão de teflon de 600 mm de comprimento e 25,4 mm de diâmetro. Esse bastão é vazado para acomodar o elemento sensor SHT75 e funciona como haste para introdução do sensor no interior do secador de massas. A fotografia do dispositivo é apresentada na figura 8.1. Nela se pode observar os displays de exibição das medições realizadas pelo sensor.



Figura 8.1 Fotografia do protótipo construído da sonda de Leitura.

8.1.1 Ensaios preliminares do elemento sensor

Foram desenvolvidas duas versões de software para tratar as leituras realizadas pelo sensor SHT75, um escrito para o compilador Próton que utiliza a linguagem Basic e outro para o CCS que utiliza a linguagem C no processo de compilação.

Para avaliação sobre qual código seria mais eficiente e preciso na operação de leitura e medição foi efetuada uma série de ensaios em uma estufa controlada utilizada pela empresa Sictron no processo de calibração de seus sensores de temperatura e cedida para nossos ensaios. A partir do controle disponível desta estufa (apenas de temperatura) pode-se variar as condições de temperatura no interior da estufa e realizar uma série de medições. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 8.1.

TEMPERATURA DE CONTROLE DA ESTUFA (°C)	SENSOR SHT75 – Firmware Basic		SENSOR SHT75 – Firmware Ling. C	
	TEMPERATURA (°C)	UMIDADE (%)	TEMPERATURA (°C)	UMIDADE (°C)
70,6	66,0	6,0	67,0	8,9
67,9	66,0	6,0	63,5	10,0
67,3	66,5	5,4	66,5	5,4
66,6	65,5	6,5	65,5	6,5
66,3	60,0	6,0	64,2	6,0
60,0	58,0	16,0	57,3	12,4
57,4	55,0	16,0	54,8	13,8
52,6	50,0	16,0	50,2	16,5
49,1	48,0	16,0	47,6	18,5
46,5	45,0	16,0	45,2	18,8
44,7	42,0	25,0	43,5	18,6
43,7	42,0	25,0	42,5	19,5
42,0	40,0	25,0	40,9	21,3
41,1	40,0	25,0	40,1	22,4
40,0	37,0	25,0	39,2	23,7

Tabela 8.1 Comparativo de Leituras do Sensor SHT75 com o controle da estufa.

Os dados da Tabela 8.1 permitem construir os gráficos apresentados nas figuras 8.2 e 8.3. Analisando os resultados apresentados nestes gráficos é possível concluir que o software escrito em linguagem C apresenta valores mais próximos dos fornecidos pela estufa.

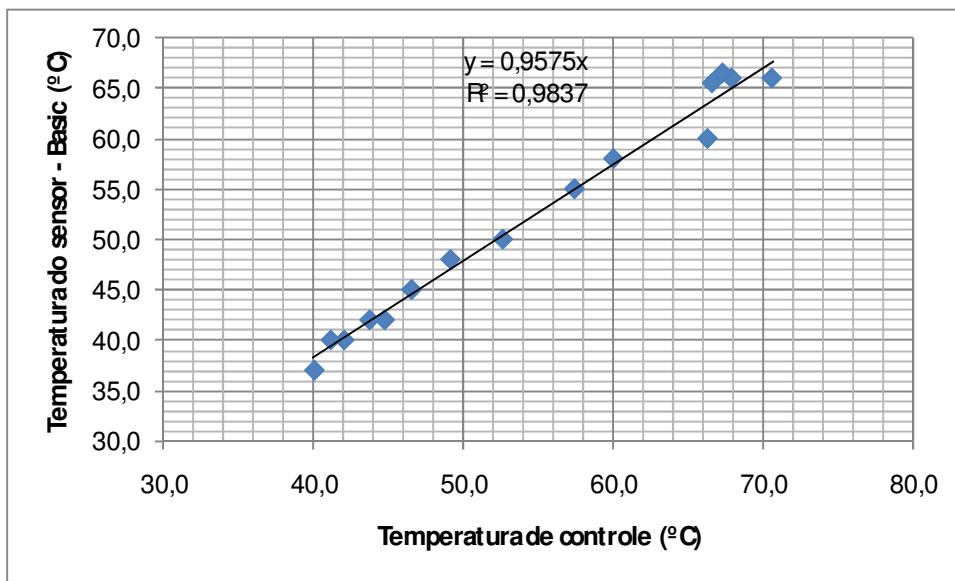


Figura 8.2 – Relação entre a temperatura medida pelo sensor empregando a linguagem Basic e a temperatura de controle.

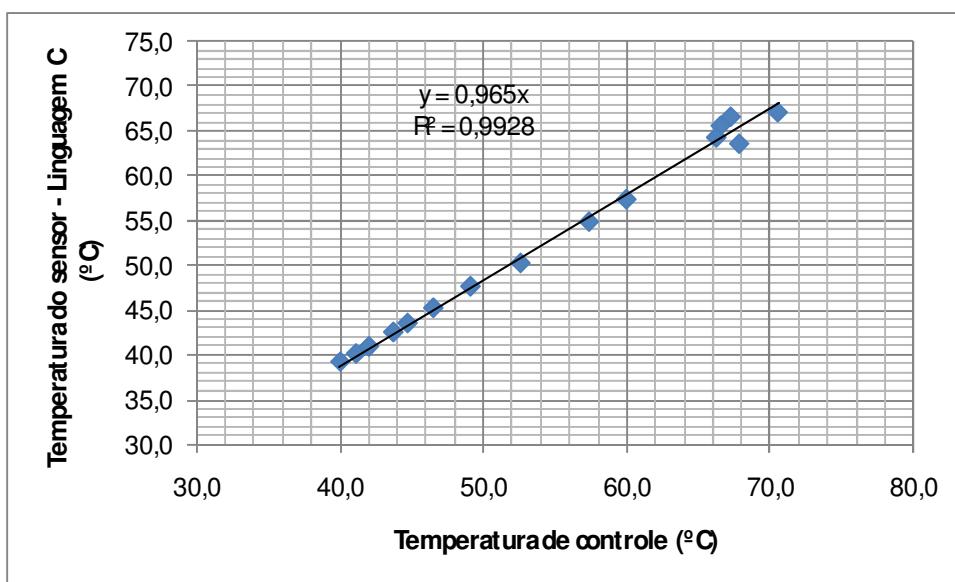


Figura 8.3 – Relação entre a temperatura medida pelo sensor empregando a linguagem C e a temperatura de controle.

A complexidade dos processos de secagem e dos processos de tomada de decisões, associado à fatores econômicos e necessidade de maior velocidade nos resultados, exigem a correta e apropriada modelagem do sistema. Os modelos matemáticos são elaborados para facilitar o entendimento e realçar a previsão dos acontecimentos em torno do fenômeno avaliado.

8.1.2 Desenvolvimento da Modelagem

Modelos matemáticos não são reais; eles são uma representação abstrata de uma determinada realidade. Sua representação é direcionada para um propósito específico ou enfatiza um aspecto em particular. Os elementos participantes da modelagem são selecionados de acordo com o conhecimento do processo o que pode influir na sua margem de variabilidade.

Para modelar o sistema preparou-se o algoritmo executado no ambiente de computação científica MATLAB¹ e apresentado no quadro 8.1. O modelo incorpora as equações 23, 25 e 27 que contemplam os mecanismos de secagem descritos no capítulo 4. Quando solicitado sua execução será gerado o gráfico exibido na Figura 8.4. Esta figura é a representação gráfica do modelo matemático, que apresenta a curva de secagem no estágio pré-secador.

Para testar o modelo matemático foi selecionado o diagrama de secagem proposto por Milatovic e Mondelli (1991), apresentado na Tabela 8.2. As condições propostas por estes autores para a pré-secagem foram introduzidas no algoritmo elaborado no MATLAB e deram como resultado a curva de secagem apresentada na figura 8.4.

O resultado apresentado na figura 8.4 mostra que a massa após a pré-secagem possui uma umidade final de 21,8% em base úmida. Esse teor de umidade é inadequado e exige a presença do Rototherm. No final dessa fase a umidade da massa é corrigida para 18,5%.

¹ Este software foi escolhido em função do conhecimento prévio deste ambiente de programação e do vasto leque de funções que esta ferramenta possui.

```

x = 0:0.0835:1; % define divisão do tempo.
y = x; % define plano.
[X,Y] = meshgrid(x,y); % montar o plano.

tc = 70; % temperatura em graus centígrados

Tk = 273.15+(tc + (X*60)*8/55); % distribuição da temperatura (K) no secador

Hr = 75; % define umidade relativa.

% DEFINIÇÃO DE parâmetros

Uim = 32; % umidade inicial da massa que entra no secador
Ufm = 18.5; % umidade desejada na saída do pré-secador

Uibs = (Uim/100)/(1-(Uim/100)); % converte umidade inicial da massa em base seca.
Ufbs = (Ufm/100)/(1-(Ufm/100)); % converte umidade final em base seca.

W = zeros(12,12);
Z = zeros(12,12);
W(1,1)= Uibs;
n=1;
Ue = (1.072 - log(log(100/Hr)))/16.828; % define Umidade de equilíbrio.

D27 = (9.55e-4)*exp(-2897.55./Tk); % expressão da difusividade para úmida
% de Uf >= 0,27.
D18 = (6.96e-4)*exp(-2980.07./Tk); % expressão da difusividade para úmida
% de 0,18 <= Uf <= 0,27.

while n <= 143;
if (W(n) >= 0.27);
  if Tk(n+1) ~= Tk(n);
    % expressão que define W(n) = Umidade da massa em base seca para Uf >= 0,27
    W(n+1) = Ue + (W(n) - Ue).* exp((-5.78.*D27(n+1))*0.0835)/(9e-4)^2);
  else;
    W(n+1)= W(n);
  end;
end;

if (W(n) < 0.27);
  if Tk(n+1) ~= Tk(n);
    % expressão que define W(n) = Umidade da massa em base seca para Uf >= 0,27
    W(n+1) = Ue + (W(n) - Ue).*exp((-5.78.*D18(n+1))*0.0835)/(9e-4)^2);
  else;
    W(n+1)= W(n);
  end;
end;

Z(n)=100*W(n)/(1+W(n)); %Conversão base seca p/base úmida
n=n+1;
end;

Z(12,12)=100*W(12,12)/(1+W(12,12)); %Conversão base seca p/base úmida
% do ultimo ponto
surf(X,Y,Z);% GRAFICO DE SUPERFICIE
view(150,20); % rotacionar para melhor visualização
title('Diagrama de Secagem de Massa Longa');
xlabel('Tempo(hs)');
zlabel('Umidade da Massa');
%pause;

```

Quadro 8.1 Arquivo de comandos “secador.m” do MATLAB para plotagem do gráfico do comportamento do pré-secador.

Fase	Condições de secagem		Umidade da massa (%)	Tempo (min)
	Temperatura (°C)	Umidade relativa (%)		
Pré-secagem	58	90	32,0	0
	64	90	-	55
Rototherm	74	80	18,5	65
Secagem	68	70	-	335
	42	60	-	575
Estabilização	30	60	11,5	1115

Tabela 8.2 – Diagrama de secagem para massa longa (espaguete com diâmetro de 1,8 mm) proposto por Milatovic e Mondelli (1991).

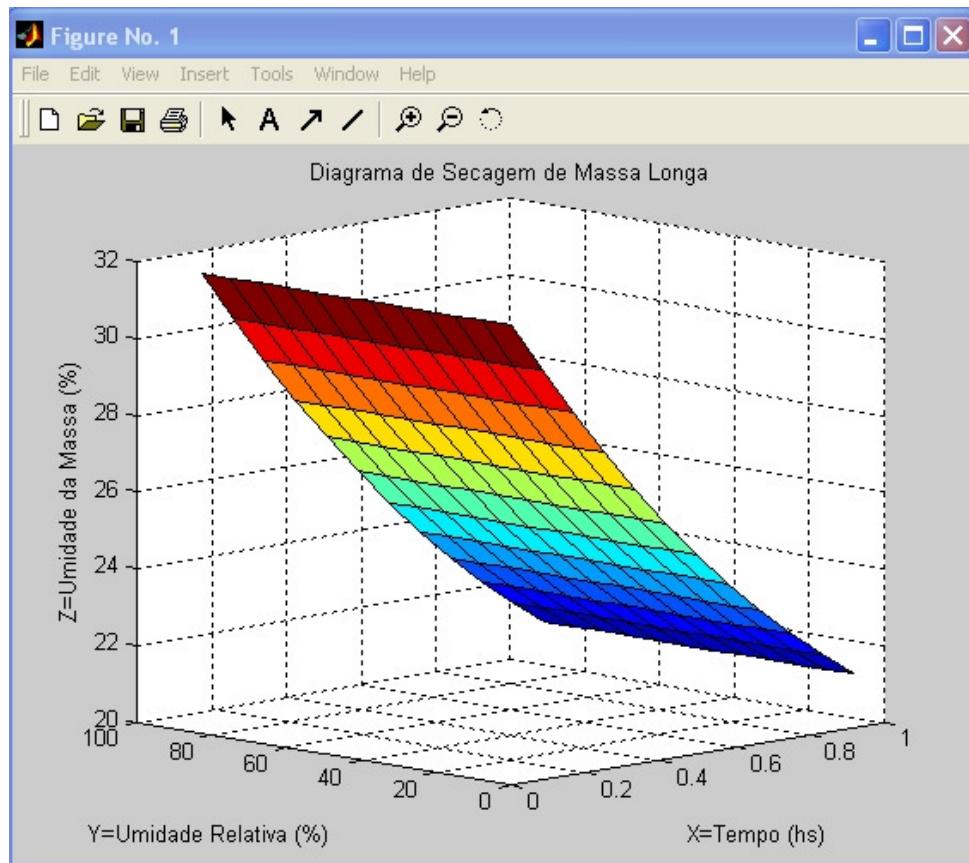


Figura 8.4 Resultado fornecido pelo algoritmo para o diagrama de secagem proposto por Milatovic e Mondelli na fase de pré-secagem.

Considerando que a sonda de microondas tenha lido o valor de 21,8% de umidade para a massa alimentícia e o valor esperado, no final da pré-secagem, deva ser igual a 18,5%, o algoritmo proposto alterou, através de simulação, os valores de umidade e temperatura do ar de tal forma que este valor de umidade da massa seja atingido. Os valores selecionados pelo algoritmo, para cada configuração das três sondas que controlam a pré-secagem, são apresentados na tabela 8.3.

Fase	Condições de secagem		Umidade da Massa (%)	Tempo (min)
	Temperatura (°C)	Umidade relativa (%)		
Pré-secagem	-	-	32,0	0
	70	75	-	24
	74	70	-	36
	78	70	-	48
	-	-	18,5	60

Tabela 8.3 – Valores de temperatura e umidade do ar selecionados pelo algoritmo para as sondas que controlam a pré-secagem.

Empregando as condições de secagem propostas na tabela 8.3, o modelo matemático forneceu a curva de secagem apresentada na figura 8.5.

Analizando o resultado obtido verifica-se que a umidade final é igual a 18,5% e corresponde à umidade ideal para a fase final da pré-secagem. Este resultado mostra ainda, que a fase do Rototherm pode ser eliminada.

Como se depreende do exposto a sonda de microondas associada às sondas de temperatura e umidade permitem agir automaticamente nos parâmetros do processo de secagem, corrigindo a umidade da massa em cada ponto crítico do secador.

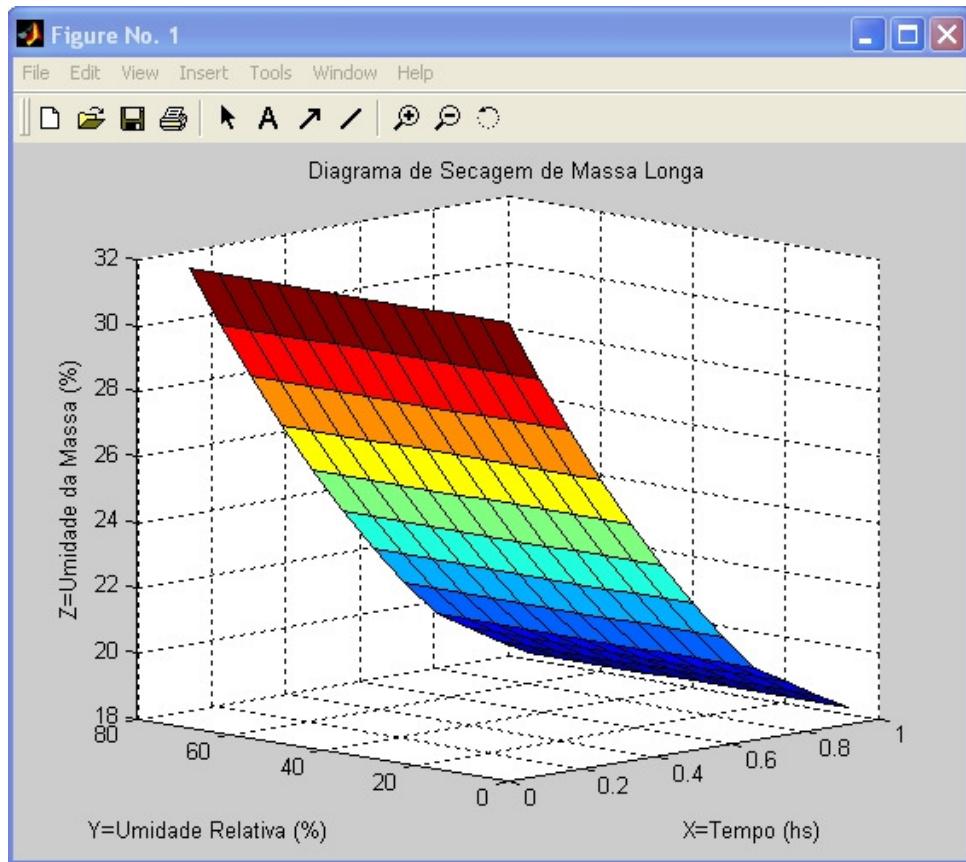


Figura 8.5 - Resultado fornecido pelo algoritmo para o diagrama de secagem proposto na tabela 8.3.

O resultado obtido a partir dessas simulações mostrou que, quando este novo sistema de controle com realimentação em tempo real for implementado, será possível melhorar o controle do processo de secagem permitindo redução do tamanho dos secadores e evitando-se riscos de perda de massa alimentícia durante a operação de secagem.

9. CONCLUSÃO

Determinar as condições ótimas para secagem de massas alimentícias não é um processo simples. O número de variáveis envolvidas requer que se apliquem técnicas de simulação suportadas por modelos matemáticos que manipulem as variáveis mais importantes do processo.

A aplicação de sistemas de medição utilizando microondas baseia-se em vários anos de desenvolvimento e prática experimental na indústria. Experimentos já consagraram o uso desta tecnologia em diversos segmentos desde usinas de concreto à silagem de grãos tais como soja, feijão e trigo; processos de secagem da indústria de fumo e em algumas etapas de processos industriais de alimentos.

É possível a construção de sondas microcontroladas com sensores CMOS, compostos por dispositivos semicondutores, para medida e controle da umidade relativa e temperatura do ambiente de secagem conjugados em um único chip como solução integrada.

Sondas para a medida da umidade da massa associadas a sensores de medida e controle das condições de secagem permitem, com uma modelagem matemática adequada, controlar o comportamento das variáveis que influenciam cada etapa do processo de secagem de massas longas (tipo espaguete).

Para trabalhos futuros, permite-se sugerir:

Na estrutura física do sistema, incluir os resultados de leituras da umidade no interior de corpos sólidos estrategicamente distribuídos para aferir com efetividade os resultados obtidos com a aplicação do modelo matemático a um processo real, suplantando as duas dificuldades primordiais: o custo do equipamento de medição e o acesso a processos reais em plantas industriais.

Nas pesquisas de campo integrar a solução proposta através de interfaces computacionais aos sistemas supervisórios e aos controladores tipo PLC que controlam estes equipamentos em plantas industriais.

Nas rotinas computacionais e do software desenvolver interfaces amigáveis, por exemplo, tipo toolbox para distribuição da solução apresentada facilitando o manuseio de modelos matemáticos e melhorar o entendimento do controle das variáveis do processo.

Ainda nas rotinas computacionais desenvolver conforme exposto no Apêndice A a incorporação de tecnologia sem fio possibilitando implantação destes sistemas mesmo em plantas industriais já existentes com o mínimo de impacto nas instalações atuais.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRIEU, J.; STAMATOPOULOS, A. A.. Durum Wheat Pasta Drying Kinetics. **Lebensmittel Wissenschaft Technologie**, 19(6), 448-456, 1986.

BERBERT,P.A.; STENNING, B. C.. Determinação do teor de umidade de sementes de trigo por meio da medição simultânea de dois parâmetros dielétricos em uma única freqüência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2(3), 329-334, 1998.

BOQUET, R.; CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H.A.. Equations for Fitting Water Sorption Isotherms of Foods. II. Evaluation of Various Two-Parameter Models. **Journal of Food Technology**, 17,319-327, 1978.

BRADLEY, R.S.. Water Sorption of Starchy Foods. **Journal of Chemical Society**, 14, 66, 1936.

CIACCO, C. F.; CHANG, Y. K.. **Massas**: tecnologia e qualidade. Campinas, SP: Ícone, Editora da UNICAMP. 1986, 127 p.

LEONHARDT, G.F. E WESTPHALEN, D.L. . **Windry 1.0**: manual do usuário. São Caetano do Sul . Escolda de Engenharia Mauá. 1995. Apostila.

MAXIM. MAX491. **Datasheet**. Disponível em < www.maxim.com >, último acesso: 10 de maio de 2007.

MICROCHIP. PIC16F886. **Datasheet**. Disponível em < www.microchip.com >,último acesso: 10 de maio de 2007.

MILATOVIC, L.; MONDELLI, G.. **Pasta Technology Today**. Pinerolo. Italy. Chiorotti Editori.1991.349p.

MÜTEC. HUMY2000. **Datasheet** . Disponível em < www.mutec.com >, último acesso: 10 de maio de 2007.

OMEGA ENGINNERING. **Practical Guidelines for Temperature Measurement.** Disponível em <www.omega.com/temperature/>, último acesso: 10 de maio de 2007.

ORDONEZ, E. D. M.; PENTEADO, C. G.; RODRIGUES, A. D. R.. **Microcontroladores e FPGAs** : aplicação em automação. São Paulo. Novatec Editora Ltda, 2005. 384p.

ORMENESE, R. C. S. C.; LEITÃO, R. F. F.; SILVEIRA, N. F. A.; BALDINI, V. L. S.. Influencia da Secagem à alta temperatura nas características das massas com ovos. **Ciencia e Tecnologia de Alimentos.** 1(18), 1998.

PARK, K. J.; ANTONIO, G. C.. **Analise de Materiais Biológicos.** Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. UNICAMP. 2006. Apostila.

PEREIRA, F.. **Microcontroladores PIC** : programação em C. São Paulo. Editora Érica Ltda, 2003. 358p

SENSIRION AG. **SHT 75 Datasheet.** Disponível em <www.sensirion.com>, último acesso: 10 de maio de 2007.

SEVERO, S.L.S.; SUSIN, A.A.. Simulação de campos em transdutor em microfita para aquametria por microondas. **Revista Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal).** Edição Especial, 87-91, 2003.

SPÍNOLA, M. M.. **Transdutores.** São Paulo: EPUSP, (2005), Apostila. In: Oliveira, M. A.. Sistema de ensaio de desempenho de incubadora neonatal. Santa Catarina; UFSC. 2007. Dissertação de Mestrado.

KRASZWESKI, A.W.. **Microwave aquametry – needs and perspectives.** IEEE Transactions on instrumentation and measurements, 5(39), 828-835, 1991. Artigo. In: SEVERO, S.L.S.; SUSIN, A.A.. Simulação de campos em transdutor em microfita para aquametria por microondas. **Revista Ciência & Engenharia (Science & Engineering Journal).** Edição Especial, 87-91, 2003.

APENDICE A

Para reunir as informações das sondas de umidade relativa e do sensor de umidade por microondas poderá ser desenvolvido um sistema para execução no computador PC conforme exemplo da figura A.1. Este poderá ser desenvolvido em Visual Basic, por exemplo, que irá servir de interface entre o sistema de aquisição de dados em tempo real e o sistema PLC existente nos painéis de comando dos secadores de massa alimentícia.



Figura A.1 Exemplo de tela para controle das sondas.

A integração dos circuitos em um sistema de processamento de informação em microcomputadores e com a disponibilização destas informações por meios de comunicação tipo RS232 utilizando cabos ou por sistemas de comunicação sem fio tipo ZIGBEE poderá levar a se atingir o estado da arte em controle de processos industriais para processos de secagem de massas alimentícias.