



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

# SECAGEM DE MACARRÃO ASSISTIDA POR MICROONDAS

## PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por Marcello Nitz da Costa aprovada pela Comissão Julgadora em 11 de agosto de 1999.

Prof. Marcello Nitz  
Autor

Campinas, 11 de agosto de 1999

Prof. Dr. Antonio Marsaioli Jr.  
Orientador

Prof. Dr. Antonio Marsaioli Júnior  
Presidente da Banca

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Campinas, julho de 1999

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL

UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	
	N639s
V.	Ex.
TOMBO BC/	38760
PROC.	229/99
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	28/09/99
N.º CPD	

CM-00134345-7

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA F.E.A. - UNICAMP

N639s

Nitz, Marcello

Secagem de macarrão assistida por microondas. /  
Marcello Nitz. -- Campinas, SP: [s.n.], 1999.

Orientador: Antonio Marsaioli Junior.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1. Massas alimentícias. 2. Secagem. 3. Equipamento  
industrial. 4. Qualidade. I. Marsaioli Junior, Antonio.  
II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia de Alimentos. III. Título.

*Aos colegas Adelino, Denis e  
Gustavo*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Marsaioli pela dedicação à orientação na realização deste trabalho.

Ao Instituto Mauá de Tecnologia por todo o apoio.

Ao Prof. Gustavo Ferreira Leonhardt, do Instituto Mauá de Tecnologia, que nos incentivou para a realização deste trabalho.

Ao competente e prestativo funcionário do Instituto Mauá de Tecnologia, Arthur Selmikaites, cuja participação na realização deste trabalho foi fundamental.

Ao Prof. José Thomaz Senise pelas valiosas explicações.

Ao pastificio SELMI pelo apoio à pesquisa. O interesse demonstrado pela empresa e a atenção que nos foi dispensada em todos os momentos foram de suma importância. De forma especial, agradecemos ao Sr. Ricardo Selmi, à Srta. Cristiane Vieira Palma e ao Sr. Antonio de Carvalho.

Aos acadêmicos e futuros colegas de profissão: Devisom, Priscila e Michella.

À Professora Miriam Dupas Hubinger e à secretaria de pós-graduação pelas orientações no âmbito administrativo.

# **BANCA EXAMINADORA**

Defesa de Dissertação de Mestrado

Secagem de Macarrão Assistida por Microondas

Autor: Marcello Nitz

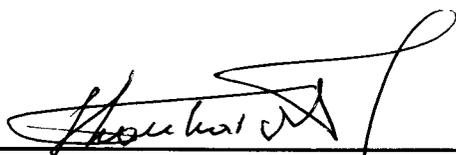


---

Prof. Dr. Antonio Marsaioli Jr

Orientador

Faculdade de Engenharia de Alimentos – Universidade Estadual de Campinas



---

Prof. Dr. Gustavo Ferreira Leonhardt

Membro

Escola de Engenharia Mauá – Instituto Mauá de Tecnologia



---

Prof. Dr. Satoshi Tobinaga

Membro

Faculdade de Engenharia de Alimentos – Universidade Estadual de Campinas

---

Prof. Dr. Evandro Conforti

Suplente

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – Universidade Estadual de Campinas

# SUMÁRIO

<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>I</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....	<b>II</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS</b> .....	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>4</b>
2.1 A EVOLUÇÃO DA TECNOLOGIA DE MICROONDAS NO PROCESSAMENTO DE ALIMENTOS .	4
2.2 ALGUMAS APLICAÇÕES INDUSTRIAIS DAS MICROONDAS .....	6
2.3 EVOLUÇÃO AQUÉM DO ESPERADO .....	8
2.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DO AQUECIMENTO DIELÉTRICO.....	10
2.5 COMO AS MICROONDAS AQUECEM OS ALIMENTOS .....	11
2.6 PROCESSOS CONVENCIONAIS DE SECAGEM DE MASSAS ALIMENTÍCIAS .....	17
2.7 SECAGEM DE MASSAS ALIMENTÍCIAS COM MICROONDAS .....	21
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>24</b>
3.1 O SECADOR DE LEITO DESCENDENTE COM APLICAÇÃO DE MICROONDAS .....	24
3.2 DETERMINAÇÃO DE UMIDADE DO MACARRÃO.....	28
3.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DO AR .....	29
3.4 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DE MACARRÃO .....	29
3.5 MEDIDA DOS TEMPOS DE RESIDÊNCIA NO SECADOR .....	31
3.6 O MACARRÃO UTILIZADO NOS ENSAIOS DE SECAGEM .....	32
3.7 VERIFICAÇÃO DE DEFEITOS NO PRODUTO FINAL .....	33
3.8 EQUALIZAÇÃO DO MACARRÃO.....	34
3.9 DESCRIÇÃO DE UM ENSAIO DE SECAGEM .....	34
3.10 ENSAIOS EXPLORATÓRIOS.....	36
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>37</b>
4.1 ENSAIOS EXPLORATÓRIOS.....	37
4.2 TEMPOS DE RESIDÊNCIA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DA ESTEIRA .....	39
4.3 ENSAIOS DE SECAGEM.....	40
4.4 ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DE DEFEITOS .....	43
4.5 ANÁLISE DA SECAGEM .....	46
4.6 PROPRIEDADES DIELÉTRICAS .....	49
<b>5. SUGESTÕES</b> .....	<b>55</b>

5.1 MODIFICAÇÕES NO PROTÓTIPO .....	55
5.2 ESTUDOS POSTERIORES .....	58
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>60</b>
<b>7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>62</b>

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 2.1 — VARIÁVEIS NO PROCESSAMENTO DE MASSAS ALIMENTÍCIAS COM MICROONDAS NA LIPTON LTD. ....	21
TABELA 3.1 — DIMENSÕES DO PROTÓTIPO.....	27
TABELA 4.1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS EXPLORATÓRIOS DE SECAGEM DE MASSAS CURTAS COM MICROONDAS. ....	38
TABELA 4.2 – TEMPOS DE RESIDÊNCIA E VAZÃO DE MASSA SECA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DA ESTEIRA. ....	39
TABELA 4.3 – CONSUMO ESPECÍFICO DE ENERGIA DE MICROONDAS OU DENSIDADE DE POTÊNCIA APLICADA (Wh/kg DE PRODUTO).....	39
TABELA 4.4 – CONDIÇÕES DO AR DE SECAGEM NOS DIVERSOS ENSAIOS...	41
TABELA 4.5 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS. ....	41
TABELA 4.6 – INCIDÊNCIA DE DEFEITOS (%) EM FUNÇÃO DAS CONDIÇÕES ESTUDADAS — POTÊNCIA DE MICROONDAS E TEMPO DE RESIDÊNCIA NO LEITO.....	44
TABELA 4.7 – MASSA COM 32,4% DE UMIDADE, MEDIDAS A 23°C.....	49
TABELA 4.8 – TABELA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA O MODELO DA EQUAÇÃO 4.1.....	52
TABELA 4.9 – FATOR DE PERDA RELATIVO — $\epsilon''$ — EM FUNÇÃO DA FREQUÊNCIA DE ONDA, PARA ÁGUA DESTILADA A 25,0°C. ....	53
TABELA 4.10 – FATOR DE PERDA DO MACARRÃO A 2,45 GHz, EM FUNÇÃO DE TEMPERATURA E UMIDADE. ....	53

## LISTA DE SÍMBOLOS

E	campo elétrico, V/m
f	freqüência de microondas, GHz.
F	probabilidade acumulativa inversa da distribuição F.
$P_v$	potência absorvida por unidade de volume, W/m <sup>3</sup>
R	coeficiente de correlação
T	temperatura
t	tempo, h
$\omega$	freqüência angular, s <sup>-1</sup>
$\kappa$	permissividade dielétrica
$\kappa'$	constante dielétrica
$\kappa''$	fator de perda
$\epsilon'$	constante dielétrica relativa
$\epsilon''$	fator relativo de perda
$\epsilon_0$	constante dielétrica do espaço livre, 8,854 10 <sup>-12</sup> F/m
tg $\delta$	tangente de perda

## RESUMO

Na produção de massas alimentícias, a etapa de secagem tem grande importância do ponto de vista de qualidade do produto, assim como nos aspectos econômicos. O objetivo do presente trabalho foi avaliar um equipamento desenvolvido para a secagem de massas alimentícias curtas com a utilização de microondas, visando à redução do tempo de secagem em comparação aos processos convencionais. A operação objetiva reduzir o teor de umidade de aproximadamente 15 até 12 a 13% em base úmida.

O equipamento é constituído de um leito descendente percorrido pelo alimento. Uma esteira transportadora sob a extremidade inferior do leito movimenta-se perpendicularmente ao fluxo de produto. A velocidade dessa esteira controla o tempo de residência no secador. No percurso entre os bocais de alimentação e descarga, o produto passa por seções onde recebe a aplicação de microondas e é ventilado com ar quente.

Foram avaliadas diferentes combinações de potência de microondas e tempo de residência. As demais variáveis — umidade, temperatura e velocidade do ar — foram fixadas. A umidade final e a ocorrência de defeitos na massa foram as respostas estudadas. A partir dos resultados exploratórios obtidos neste trabalho pôde-se comprovar a viabilidade técnica de se secar massas curtas nesse equipamento, tendo sido possível também, apontar

modificações a serem feitas no protótipo visando à melhoria da operação e sua aplicação em escala industrial.

As propriedades dielétricas do macarrão foram determinadas para valores diversos de umidade. O conhecimento destes parâmetros permite avaliar o comportamento do material sob o efeito de um campo de microondas.

## **ABSTRACT**

During pasta manufacturing, the drying process has a major importance both in quality and economic aspects. A piece of equipment developed for drying short cut pasta with microwave energy was evaluated in an attempt to reduce drying time in comparison with conventional processes. This operation must reduce the moisture content of the product from 15 to 12-13%, wet basis.

The short cut pasta runs through a falling bed as a conveyer-belt moves below it. The speed of the belt controls the residence time in the dryer. Inside the equipment, microwave and hot air are applied to the product.

Different combinations of microwave power and residence time were evaluated. The other variables such as moisture, temperature and velocity of air were not studied. The final moisture and the occurrence of damage to the product were the responses analyzed. From the exploratory results obtained in this work, the technical possibility of drying pasta in this piece of equipment was attested. It was also possible to suggest changes to be implemented in the prototype in order to make the scale up and further industrial application possible.

The dielectric properties of pasta were determined for different moisture contents. These parameters are important to evaluate the behavior of the material in a microwave field.

## **1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS**

Dados fornecidos pela ABIMA — Associação Brasileira das Indústrias de Massas Alimentícias — indicavam, em 1997, um consumo anual per capita de macarrão no Brasil, de 4,9 kg. Na Itália esse consumo era de 27,0 kg, e nos Estados Unidos, 9,0 kg. A capacidade de produção instalada no país era de aproximadamente 1.100.000 toneladas por ano.

No Brasil o macarrão é um produto muito bem aceito por todas as classes sociais. Uma pesquisa do IBGE mostrou que ele está entre as trinta maiores despesas alimentares do país (TOLEDO, 1997). Essa popularidade das massas alimentícias se deve ao seu baixo custo e sua conveniência do ponto de vista de facilidade de preparo e ampla vida-de-prateleira. As etapas de fabricação são praticamente as mesmas desde os primórdios. As máquinas, porém, têm evoluído consideravelmente e a qualidade do produto também tem melhorado ao longo dos anos.

De todas as operações que fazem parte do processo de fabricação do macarrão seco, aquela que merece maior atenção é a secagem. Esta é a etapa mais demorada e de papel preponderante na qualidade do produto final. Os secadores de grandes pastifícios são enormes para atender a um mínimo de capacidade de produção. Ao longo dos últimos anos,

pesquisas das melhores condições de secagem — umidade e temperatura do ar — têm oferecido melhorias significativas na operação. No entanto, tem sido muito difícil conseguir uma redução substancial do tempo de secagem com o sistema de aquecimento convectivo dos secadores convencionais.

A secagem com microondas de massas alimentícias cortadas já é uma realidade em alguns países. Geralmente empregam-se microondas em combinação com o aquecimento convectivo para otimizar a remoção da umidade. Os resultados relatados são surpreendentes. Verificam-se, além de melhorias na qualidade do produto final, reduções significativas no tempo de secagem e nos custos. Os secadores descritos na literatura são túneis através dos quais a massa é transportada por esteiras. No trajeto há a aplicação de microondas e convecção forçada, em diferentes seções do secador (SVENSON, 1987; DECAREAU, 1984 e 1985; SMITH, 1979; MEISEL, 1976 e 1978; SCHIFFMANN, 1973; ANON, 1972 e 1974; MAURER, TREMBLAY & CHADWICK, 1971).

O presente trabalho teve como objetivo avaliar um novo equipamento para a secagem de massa cortada assistida por microondas, constituído de um leito descendente percorrido pelo produto. A construção do leito é modular e permite que sejam experimentadas combinações diversas de aquecimento dielétrico e convecção forçada. Não se encontrou nenhuma referência a essa sorte de equipamento na literatura técnica pertinente.

Em função dos resultados exploratórios obtidos pode-se estudar a viabilidade técnica da implantação do referido equipamento em escala industrial, apontando as modificações necessárias e os estudos a serem desenvolvidos posteriormente com esta finalidade.

As propriedades dielétricas em função da frequência de onda eletromagnética empregada foram determinadas para uma massa com 32,4% de umidade a 23°C. Outras medidas dessas

propriedades foram efetuadas a 2450 MHz, em umidades diversas. Os resultados certamente servirão de referência para estudos mais aprofundados e para a modelagem dos processos de secagem ou aquecimento de macarrão com energia de microondas.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 A evolução da tecnologia de microondas no processamento de alimentos**

No início dos anos sessenta o primeiro processo industrial de alimentos com a utilização das microondas tornou-se operacional. Este destinava-se à secagem final de fatias de batata após a fritura. O então bem sucedido processo despertou o interesse de pelo menos cinco grandes fabricantes de equipamentos nos Estados Unidos e Inglaterra (DECAREAU, 1984). Desde então, vários sistemas com aplicação de microondas foram sendo desenvolvidos em vista da possibilidade eminente de redução de custos e aumento de produtividade.

SCHIFFMANN (1975) relatou a existência de pelo menos setenta unidades industriais alimentícias que utilizavam as microondas no processamento. Os principais sistemas instalados destinavam-se ao pré-cozimento de carne de frango, têmpera de carne, aquecimento de pães doces para fermentação (“proofing”) e posterior fritura dos mesmos,

pré-cozimento de bacon, assadura de pão, secagem de massas alimentícias, secagem de vegetais, descongelamento de peixe e cozimento de carne e de peixe (DECAREAU, 1985; SMITH, 1979; MEISEL, 1978; ANON, 1972 e 1974; SCHIFFMANN, 1973; BEDROSIAN, 1973; MAURER, TREMBLEY & CHADWICK, 1971). Alguns processos pioneiros, como a secagem final de batata após a fritura, logo deixaram de ser explorados por motivos econômicos, e os fabricantes de equipamentos procuraram especializar-se em aplicações mais promissoras e já consagradas da época. Os investimentos eram altos e previa-se um grande crescimento das aplicações de microondas no processamento de alimentos para os anos que se seguiam (SCHIFFMANN, 1975).

Dados de 1992, referentes aos Estados Unidos, estimavam a existência de cerca de duzentos e sessenta sistemas industriais com aplicação de microondas no processamento de alimentos. Destes, mais de duzentos destinavam-se ao descongelamento parcial de carne — processo conhecido como *têmpera* —, cerca de vinte e cinco ao cozimento de bacon e de dez a vinte eram empregados na secagem de massas alimentícias. Os demais sistemas eram distribuídos em aplicações diversas (SCHIFFMANN, 1992; RICHARDSON, 1991). Dados desse mesmo ano apontavam que, nos EUA, 90% das residências possuíam fornos a microondas. Estimava-se na época que o gasto energético com fornos domésticos no mundo inteiro estaria em torno de 50.000 MW. Por outro lado, contrariando as expectativas dos anos sessenta e setenta, o gasto energético com equipamentos industriais a microondas era estimado em apenas 35 MW (SCHIFFMANN, 1992). Isso mostra que a aplicação industrial das microondas, em especial na indústria alimentícia, não teve o mesmo desenvolvimento das aplicações residenciais.

## 2.2 Algumas aplicações industriais das microondas

O mais difundido processo industrial que utiliza as microondas é o destinado à têmpera de carne. Energia de microondas é empregada para elevar a temperatura da matéria-prima até cerca de  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , quando o descongelamento é continuado pelo modo convencional, evitando que o aquecimento passe a danificar a superfície do produto. As unidades existentes — estimadas em mais de duzentas — têm as vantagens de reduzir drasticamente o tempo de processamento, aumentar a capacidade de retenção de água, reduzir o crescimento de microrganismos e requerer menos espaço físico (NITZ et al., 1998; BATISTA & MARRERO, 1995; SCHIFFMANN, 1992 e 1973; RICHARDSON, 1991; MUDGETT et al., 1989; DECAREAU, 1984 ).

SLATER (1975) descreveu o sucesso obtido na aplicação de microondas combinadas com vácuo para a secagem de alimentos sensíveis a temperaturas elevadas. Experiências realizadas numa empresa francesa, utilizando cogumelos e aspargos, resultaram em produtos de qualidade superior aos convencionais, com uma grande retenção de sabor e aroma. O equipamento empregado nessa secagem operava em regime contínuo e apresentava 4,57 m de comprimento. Sua capacidade de secagem era de 4 a 7 litros de água por hora. Outro processo que combina microondas e vácuo foi descrito no trabalho de CLARY & OSTROM (1994) — ensaios de secagem de uvas proporcionaram bons resultados econômicos e de qualidade do produto final. A secagem de maçãs e cogumelos combinando microondas e convecção forçada foi estudada por FUNEBO & OHLSSON (1998). Nestes estudos o tempo de secagem pôde ser reduzido à metade quando comparado aos processos convencionais. Foi possível também otimizar o processo com vistas à maior qualidade final dos produtos.

A secagem de massas alimentícias é uma das aplicações mais bem sucedidas dentre aquelas que empregam as microondas. A LIPTON, uma empresa canadense, foi a pioneira nessa aplicação. Utilizando-se de um equipamento contínuo com capacidade de produção de 1 ton/h, a LIPTON implantou um processo vinte vezes mais produtivo que o tradicional, cujo resultado era um produto com qualidades superiores ao obtido pela secagem convencional. Tratava-se da produção de massas cortadas tipo massinha para sopas desidratadas (MAURER, TREMBLAY & CHADWICK, 1971). A GOLDEN GRAIN, uma empresa americana, empregou microondas para outros tipos mais comuns de massas cortadas. A secagem dielétrica era desenvolvida entre dois outros estágios: secagem com ar quente e resfriamento com ar úmido (SMITH, 1979; MEISEL, 1978; ANON, 1974 e 1972). As vantagens verificadas em comparação ao processo tradicional são diversas. Entre elas: menor necessidade de espaço físico, menor tempo de processamento, melhor qualidade do produto final, maior facilidade de limpeza e menores custos operacionais (BATISTA & MARRERO, 1995; SCHIFFMANN, 1992, 1975 e 1973; SVENSON, 1987; DECAREAU & PETERSON, 1986; DECAREAU, 1984, 1985 e 1986; SMITH, 1979; MEISEL, 1978; ANON, 1972 e 1974; MAURER, TREMBLAY & CHADWICK, 1971).

Nem todos os processos encontraram vantagens na aplicação das microondas. Além da secagem de fatias de batata após a fritura, outros também fracassaram. Entre eles, o branqueamento de vegetais. Tal operação mostrou-se mais onerosa e proporcionou produtos finais de pior qualidade comparando-se aos processos convencionais com vapor (BATISTA & MARRERO, 1995; MUDGETT et al., 1989). Estudos dessa aplicação continuam sendo desenvolvidos e procura-se agora combinar as microondas com outros tratamentos (RICHARDSON, 1991; MUDGETT et al., 1989). Outro exemplo clássico de processo mal sucedido é o cozimento de partes de frango combinando-se vapor d'água saturado e microondas, que apresentou inicialmente grandes vantagens com relação aos laboriosos processos tradicionais, tanto com relação à capacidade de produção, quanto à qualidade do produto final (DECAREAU, 1984 e 1985). Todavia, o aumento dos lucros não se mostrou

significativo e o problema de constantes colapsos dos equipamentos fez com que as linhas desenvolvidas fossem abandonadas (SCHIFFMANN, 1992). A aplicação das microondas na fermentação e fritura dos pães doces também foi deixada. Tratava-se de uma tecnologia aparentemente muito melhor. As vantagens apontadas inicialmente foram diversas. Entre elas: melhoria de rendimento e produtividade, economia de gordura, maior vida-de-prateleira e uma qualidade superior do produto final. Os motivos para o fracasso são complexos. Vão desde problemas puramente técnicos até mesmo à sabotagem por parte de operadores temerosos do novo sistema (SCHIFFMANN, 1975, 1986 e 1992; BEDROSIAN, 1973).

Dentre diversas linhas de pesquisa recentemente desenvolvidas com a aplicação de microondas na indústria de alimentos, devem-se citar os trabalhos realizados na Universidade Estadual de Campinas: secagem de café (CUNHA, 1996; CUNHA, CANTO & MARSAIOLI, 1996), cozimento de embutidos cárneos (OLIVEIRA, 1997) e parboilização de arroz (ROCHA, 1998).

### **2.3 Evolução aquém do esperado**

DECAREAU (1985) apontou alguns prováveis motivos para o fato do progresso da tecnologia das microondas ter tido resultados muito aquém das expectativas dos anos sessenta e setenta. São eles: falta de cooperação entre os que fornecem e aqueles que utilizam as microondas, falta de conhecimento sobre o comportamento dos alimentos com relação às microondas e a impossibilidade de se empregarem frequências outras além

daquelas alocadas para o uso industrial — 915 e 2450 MHz — , o que dificulta a otimização dos processos. GERLING (1986) atribuiu o fracasso na implantação dos processos industriais com microondas a três grandes motivos. São eles: conflitos de interesses entre os fabricantes de equipamentos e os de alimentos, gerando problemas de ordem contratual que muitas vezes impossibilitavam o desenvolvimento do novo processo; falta de experiência e diálogo por parte de todos os interessados envolvidos, levando-os muitas vezes a subestimar os gastos ou projetar máquinas inadequadas e, finalmente, falta de preparo daqueles que operavam e faziam a manutenção do equipamento, fazendo com que o processo fosse muitas vezes abandonado após algum tempo de operação.

MUDGETT (1986) ressaltou que os projetos de sistemas com aplicações de microondas muitas vezes falham por serem estabelecidos na base de tentativa e erro e por desconhecimento de modelos preditivos que relacionem as propriedades elétricas dos alimentos aos perfis transientes de tempo-temperatura empregados nos cálculos de destruição de microrganismos e de parâmetros de qualidade do produto.

A avaliação detalhada do processo buscando aliar os interesses comerciais aos técnicos é essencial para o sucesso da utilização das microondas. BEDROSIAN (1973) descreveu os ingredientes necessários para se empregar microondas numa nova linha de produção e ressaltou, ainda, a importância de se buscar a combinação com outras fontes de energia como meio de se reduzir os custos iniciais.

## **2.4 Vantagens e desvantagens do aquecimento dielétrico**

Desde o surgimento da tecnologia de aquecimento dos alimentos por microondas, o que tem atraído os pesquisadores e as indústrias são as inúmeras vantagens em comparação aos processos convencionais. Com as microondas, a geração de calor é instantânea e a transferência de energia térmica se dá de dez a vinte vezes mais rapidamente que nos processos convencionais (BATISTA & MARRERO, 1995; MUDGETT et al., 1989). No aquecimento dielétrico é possível manter a superfície do alimento preservada, evitando a perda das características do produto. Além disso, o tempo de processamento é reduzido significativamente. A evidente consequência desse fato é o aumento da capacidade de produção (RICHARDSON, 1991; SCHIFFMANN, 1986). Além das que já foram apontadas, SVENSON (1987) descreveu outras vantagens encontradas na maioria das aplicações industriais. São elas: maior facilidade de limpeza dos equipamentos, redução dos tempos de parada por quebra e menor trabalho de instalação, manutenção e operação dos equipamentos. Em muitos casos, as microondas melhoram a qualidade dos produtos finais, como no caso de massas alimentícias, onde se verifica menor perda de amido durante o cozimento, maior realce da cor amarela do produto e menor número de microrganismos (DECAREAU, 1984; SMITH, 1979; MEISEL, 1978).

Em geral, os equipamentos que empregam a energia das microondas apresentam um custo inicial mais elevado. À medida que as reservas de combustíveis fósseis forem tornando-se escassas, haverá uma maior procura por meios alternativos de aquecimento. O progresso na tecnologia de fabricação dos magnetrons — dispositivos geradores das microondas — possibilitará processos com maior eficiência na conversão da energia elétrica em microondas a custos cada vez menores (DECAREAU, 1986).

Pelo fato de serem poucas as aplicações já consagradas industrialmente, quando se decide processar um alimento com microondas há de se prever a necessidade de gastos adicionais com melhorias e modificações no produto ou no processo. Portanto, há a necessidade de constante suporte técnico (SCHIFFMANN, 1992).

MUDGETT et al. (1989) e DECAREAU (1985) citaram trabalhos que apontam que os únicos efeitos nocivos passíveis de serem causados pelas microondas são de origem térmica. Apesar disso, a ignorância com relação a esses fatores de segurança ainda é um obstáculo para o desenvolvimento das aplicações industriais com microondas (SCHIFFMANN, 1992).

RICHARDSON (1991) acenou com outro aspecto negativo das microondas: o fato de que em muitos produtos o aquecimento se dá de maneira não uniforme. MUDGETT (1986), DECAREAU (1985 e 1986) e SCHIFFMANN (1986) destacaram a necessidade de se desenvolverem modelos preditivos para o aquecimento dielétrico de alimentos, permitindo que os processos sejam adequadamente dimensionados e operados.

## **2.5 Como as microondas aquecem os alimentos**

As microondas de potência, empregadas no processamento térmico de alimentos, são geradas por dispositivos denominados magnetrons, que convertem a energia elétrica em um campo eletromagnético confinado. As frequências alocadas e mais comuns para as aplicações industriais no mundo todo são as de 915 e 2450 MHz (AL-DURI & McINTYRE,

1992; SCHIFFMANN, 1986; DECAREAU, 1984 e 1985), que correspondem a comprimentos de onda no ar de 33 e 12 cm, respectivamente (SCHIFFMANN, 1986). As interações dos alimentos com o componente elétrico do campo gerado pelos magnetrons é dominante, uma vez que o componente magnético interage fracamente com os alimentos. Isto ocorre por os alimentos conterem somente traços de minerais magnéticos, como níquel, cobalto e ferro, sendo que a maioria das moléculas presentes — incluindo a água — possui polarização elétrica considerável (MUDGETT et al., 1989).

O campo elétrico gerado pelos magnetrons propaga-se na forma de onda, apresentando, portanto, alternância de polaridade e intensidade bilhões de vezes por segundo. Com isso, as moléculas de água, por serem polares, são forçadas a orientar seus pólos de acordo com o campo elétrico a que estão submetidas (BATISTA & MARRERO, 1995; AL-DURI & McINTYRE, 1992; MUDGETT et al., 1989; SVENSON, 1987; DECAREAU, 1984 e 1985; SCHIFFMANN, 1975). A conseqüente rotação das moléculas de água pode causar o rompimento de pontes de hidrogênio existentes entre moléculas vizinhas, implicando em geração de calor. MUDGETT et al. (1989) batizaram o fenômeno de “fricção molecular”. Em acréscimo, calor é gerado pela interação do campo elétrico com os íons positivos e negativos dissolvidos na água. A migração desses íons para as regiões carregadas positiva ou negativamente e a colisão com outras moléculas é também causa do aquecimento (SCHIFFMANN, 1975). MUDGETT et al. (1989) atribuíram o efeito do aquecimento causado pelos íons não ao choque descrito acima, mas sim ao rompimento de mais pontes de hidrogênio entre as moléculas de água e os íons dos sais dissolvidos. Em alimentos, embora se discuta com maior freqüência o efeito da polaridade da água, é sabido que a condução iônica desempenha o papel preponderante no aquecimento dielétrico (SCHIFFMANN, 1986). Portanto, a velocidade de absorção das microondas é diretamente proporcional ao conteúdo dipolar e iônico da substância. A elevação da temperatura do alimento, por sua vez, não depende só da referida velocidade de absorção, mas também das próprias propriedades físicas — seu calor específico, densidade, geometria e condutividade térmica.

Essa velocidade varia, ainda, com a temperatura, o estado físico da matéria e a frequência de onda empregada.

A partir da discussão anterior, conclui-se que o aquecimento dos alimentos com microondas é afetado por certas propriedades do equipamento empregado e do material processado. A permissividade dielétrica de um material —  $\kappa$  — é a propriedade que descreve a interação de um material com um campo elétrico, ou seja, sua capacidade de absorver, armazenar, transmitir e refletir energia (ENGELDER & BUFFLER, 1991; AL-DURI & McINTYRE, 1991; NELSON & KRASZEWSKI, 1990; MUDGETT et al., 1989; DECAREAU & PETERSON, 1986; SCHIFFMANN, 1986 e 1987; MUDGETT, 1986; STRUMILLO & KUDRA, 1986; SENISE, 1985; DECAREAU, 1985; KIRK & HOLMES, 1975). A permissividade dielétrica —  $\kappa$  —, dada pela equação 2.1, é um número complexo. Sua parte real —  $\kappa'$  — é denominada constante dielétrica e a parte imaginária —  $\kappa''$  — fator de perda. Uma outra propriedade dielétrica dos materiais é a tangente de perda —  $\text{tg}\delta$  — dada pelo quociente entre o fator de perda e a constante dielétrica.

$$\kappa = \kappa' - j\kappa'' \quad (2.1)$$

$$\text{tg } \delta = \frac{\kappa''}{\kappa'} \quad (2.2)$$

Seguem abaixo os significados físicos:

- Constante Dielétrica: mede a capacidade de um material de armazenar energia elétrica.

- Fator de Perda: é um parâmetro adimensional dado pelas propriedades elétricas do material. Seu valor indica a capacidade do material de dissipar energia elétrica na forma de calor.
- Tangente de Perda: é a relação entre o fator de perda e a constante dielétrica. Seu valor indica a capacidade do material de ser penetrado por um campo elétrico e de dissipar essa energia na forma de calor.

A potência absorvida por unidade de volume de um material exposto à radiação de microondas pode ser estimada pelo modelo apresentado na equação 2.3 que se segue (ROUSSY & PEARCE, 1995; AL-DURI & McINTYRE, 1992; NELSON & KRASZEWSKI, 1990; SCHIFFMANN, 1986 e 1987; STRUMILLO & KUDRA, 1986; MUDGETT, 1986; DECAREAU & PETERSON, 1986; SENISE, 1985).

$$P_v = \omega \varepsilon_0 E^2 \varepsilon'' \quad (2.3)$$

Onde:

- $P_v$  é a potência por unidade de volume (W/m<sup>3</sup>).
- $\omega$  é a frequência angular, expressa em s<sup>-1</sup>.
- $\varepsilon_0$  é a constante dielétrica do espaço livre cujo valor é  $8,854 \cdot 10^{-12}$  F/m.
- $E$  é a intensidade do campo elétrico no próprio alimento, dada em V/m.

- $\epsilon''$  é o fator relativo de perda, adimensional dado pelo quociente entre o fator de perda  $\kappa''$  e a constante dielétrica do espaço livre  $\epsilon_0$ .

Da equação 2.3 pode-se depreender, mais uma vez, que a potência absorvida pelo alimento processado com microondas é dependente de propriedades do equipamento empregado, que influencia diretamente os valores de  $\omega$  e  $E$ , e de propriedades do próprio material, implícitas no valor de  $\epsilon''$ . Vale ressaltar que o fator relativo de perda,  $\epsilon''$ , também varia significativamente com a temperatura e a frequência de onda eletromagnética empregada. Por essas razões o emprego da equação 2.3 é dificultado (MUDGETT, 1986).

Do ponto de vista prático, as propriedades elétricas dos alimentos podem ser estimadas em função de seu teor de umidade, sólidos e sais. MUDGETT et al. (1977) avaliaram três modelos para cálculo das propriedades dielétricas de alimentos com alto teor de umidade, considerando-os como sendo compostos de uma fase sólida inerte e de uma solução aquosa ativa, constituída de água e íons dissolvidos. Houve boa concordância entre os valores preditos e os medidos experimentalmente. O fator relativo de perda da solução aquosa ativa considera os efeitos da polaridade da água e da condução iônica. A análise qualitativa das expressões obtidas explica o comportamento dielétrico dos alimentos em função da temperatura e frequência de onda empregada (MUDGETT, 1986).

Valores das propriedades dielétricas de diversos alimentos em temperaturas entre 60 e 140°C e submetidos a campos de 2800, 900 e 450 MHz foram apresentados por OHLSSON & BENGTTSSON (1975). LAURENCE, FORBUS & NELSON (1994a e 1994b) apresentaram as propriedades dielétricas de diversas frutas e vegetais na faixa de frequência entre 0,20 e 20 GHz. Nesses trabalhos, puderam comprovar que o comportamento dos alimentos com relação às microondas é bastante variável, dependendo muito da frequência de onda empregada, da temperatura e do próprio alimento, evidentemente. É geralmente

ressaltado na literatura que a profundidade de penetração das microondas é muito maior na frequência de 915 MHz em comparação à de 2450 MHz — mais usualmente empregada. Contudo, verificou-se que mesmo essa assertiva não é válida para todos os alimentos em todas as faixas de temperatura. Dados experimentais mostraram menor penetração das microondas de 915 MHz para temperaturas acima de 80°C nos alimentos estudados por OHLSSON & BENGTSSON (1975).

A dependência do comportamento dielétrico das substâncias com relação à temperatura, composição, densidade e frequência de onda empregada foi também analisada por GOYETTE et al. (1990) e NELSON & KRASZEWSKI (1990). Os referidos estudos mostraram, por exemplo, que uma dada frequência que proporciona um aquecimento eficiente sob certas condições pode rapidamente perder sua eficácia com o aumento da temperatura. NELSON (1991) descreveu, em um trabalho de revisão, a natureza da variação das propriedades dielétricas dos materiais. Algumas técnicas de modelagem foram também descritas. ENGELDER & BUFFLER (1991) descreveram os principais métodos de medida de propriedades dielétricas de alimentos e embalagens, fazendo uma análise comparativa de suas principais vantagens e desvantagens.

Os trabalhos citados evidenciam a dificuldade de se modelar o aquecimento dielétrico das substâncias, haja vista o comportamento variável das propriedades elétricas relevantes.

## 2.6 Processos convencionais de secagem de massas alimentícias

A resolução 12/31 da Comissão Nacional de Normas e Padrões do Ministério da Saúde define massa alimentícia como sendo o produto não fermentado, obtido pelo amassamento da farinha de trigo, da sêmola do trigo com água, adicionado ou não de outras substâncias permitidas. O padrão de identidade e qualidade das massas alimentícias classifica a massa fresca como tendo no máximo 30 e a massa seca 13% de umidade em base úmida. Segundo seu formato, a massa pode ser longa, como espaguete e talharim; curta ou cortada, como ave-maria e parafuso; ou massinha, como alfabeto e estrelinhas. LIRICI (1984) descreveu em seu trabalho mais de uma centena de formatos diversos de massas alimentícias. É oportuno destacar que no presente trabalho os termos massa alimentícia e macarrão são empregados indiscriminadamente.

Pode-se dividir o processo de fabricação de massa seca em quatro etapas básicas. São elas: mistura e homogeneização dos ingredientes; extrusão ou prensagem e corte; secagem e, finalmente, embalagem. De todas elas, não há dúvida que a mais complexa é a etapa de secagem. É nesta fase de processamento que o produto adquire sua coloração e textura finais (GIESE, 1992; MILATOVIC & MONDELLI, 1991; MANSER, 1990; HUMMEL, 1966). As condições devem ser corretamente controladas para evitar danos físicos que podem vir a surgir mesmo após o empacotamento do produto (PECZALSKI, 1996; MILATOVIC & MONDELLI, 1991; LIRICI, 1990; MANSER, 1990; HUMMEL, 1966). A operação de secagem também exerce influência sobre as características de cozimento do macarrão, embora esta seja dependente também da qualidade das matérias-primas (D'EGIDIO, MARIANI & NOVARO, 1993 e 1996). Além dos diversos aspectos tecnológicos, existe também a importância da secagem do ponto de vista econômico. É a mais demorada de todas as operações e os equipamentos em geral ocupam a maior parte do espaço físico da fábrica

destinado à produção (MILATOVIC & MONDELLI, 1991; LIRICI, 1990; HUMMEL, 1966).

Ao ser conduzida para a etapa de secagem, a massa alimentícia, seja curta ou longa, possui cerca de 30% de umidade em base úmida. No caso de massa curta, o transporte do produto à etapa denominada de pré-secagem é feito por uma esteira vibratória — conhecida como “trabatto” —, sendo a massa submetida a uma intensa ventilação com ar quente. O objetivo é a remoção do excesso de umidade superficial para evitar a formação de grumos de produto na esteira. A intensa ventilação também é feita com as massas longas. Porém, pelo fato de essas serem transportadas em varas suspensas, não há o movimento vibratório. Nessa etapa, que dura poucos minutos, a massa alimentícia perde de 2 a 3% de umidade (LIRICI, 1990).

Após o “trabatto” a massa curta é conduzida à primeira etapa de secagem propriamente dita. É a pré-secagem. Nessa etapa a velocidade de secagem é bastante alta e o teor de umidade da massa é reduzido até 15 a 18%, quando se verifica uma mudança no traçado da curva de secagem. A velocidade de secagem passa a cair rapidamente e o tempo necessário para baixar o teor de umidade até os 12 a 13% necessários é muito alto em comparação ao tempo da pré-secagem (MILATOVIC & MONDELLI, 1991; LIRICI, 1990; ANDRIEU & STAMATOPOULOS, 1986; HUMMEL, 1966).

Os processos de secagem têm evoluído consideravelmente ao longo dos anos. Têm-se buscado as melhores condições de secagem — temperatura e umidade do ar — que resultem em um menor tempo de processamento com o máximo de qualidade do produto final. Os processos industriais tradicionais empregavam temperaturas de secagem de aproximadamente 50°C. Como consequência, os tempos de secagem muitas vezes ultrapassavam quarenta horas. Por volta de 1979 surgiram os processos conhecidos pela sigla HT — “high temperature” — que usavam temperaturas na ordem de 66 a 76°C.

Verificaram-se melhorias na qualidade sanitária do produto. A coloração e as características culinárias também eram superiores. E a produtividade aumentou, pois os tempos de secagem passaram a ser de até dezessete horas, dependendo, evidentemente, das dimensões da massa (MILATOVIC & MONDELLI, 1991).

Na secagem de massas longas os dois processos mais empregados atualmente são derivados do HT. O primeiro emprega temperaturas entre 75 e 85 °C implicando em tempos de nove a quinze horas de secagem. O outro, já conhecido como VHT — “very high temperature” — trabalha com temperaturas de 75 até 95 °C, resultando em tempos de processamento de quatro horas e meia a sete horas e meia. A característica mais original da secagem VHT é a introdução de uma etapa de umidificação entre as já consagradas seções de estabilização e resfriamento (DALBON, 1996).

MANSER (1990) e DIDONÈ (1992) descreveram o mais moderno processo de secagem direta de massas alimentícias existente, denominado HHT — “ultrahigh temperature”—, onde são empregadas temperaturas de ar de secagem acima de 100 °C, com elevada depressão de bulbo úmido. Através dessa técnica conseguem-se tempos de secagem de duas a cinco horas apenas.

Não é a rapidez com que a umidade é removida do produto que pode vir a danificá-lo estruturalmente, mas sim a falta de uniformidade do tratamento. LIRICI (1990) enfatizou a necessidade de se manter a massa em ambiente com umidade e temperaturas fixas na fase final de secagem, onde restam somente de um a dois pontos percentuais de umidade a perder. O objetivo é equilibrar o produto estruturalmente, minimizando os gradientes de umidade e temperatura. O defeito mais comum associado à secagem é o “caneamento” — aparecimento de trincas ou estrias na massa seca. Esse defeito está associado à contração não uniforme do produto durante a secagem. PECZALSKI et al. (1996) modelaram e simularam

o desenvolvimento de tensões em massa alimentícia durante a secagem e comprovaram que o produto está sujeito ao “caneamento” a partir da fase final do período de alta velocidade de secagem — a pré-secagem.

ANDRIEU & STAMATOPOULOS (1986) estudaram a cinética de secagem convencional de massas alimentícias com formatos de placa plana e cilindro infinitos. A perda de umidade pôde ser representada pelo modelo da difusão. Neste trabalho, verificou-se que a curva de secagem — umidade base seca em função do tempo — pôde ser dividida em três partes distintas, sendo que em cada uma delas verificou-se a dependência da difusividade mássica efetiva com a temperatura. Os valores experimentais do referido trabalho foram analisados por LEONHARDT (1995) que chegou a expressões que seguem a Lei de Arrhenius para modelar a dependência da difusividade com a temperatura. Uma conclusão importante dos trabalhos de ANDRIEU & STAMATOPOULOS (1986) foi que a secagem convencional é totalmente limitada pela difusão interna da umidade quando se empregam velocidades de ar superiores a 1 m/s. Baseando-se na cinética estudada por ANDRIEU & STAMATOPOULOS (1986), WESTPHALEN & LEONHARDT (1997) desenvolveram um aplicativo computacional denominado WINDRY para simulação em computador do processo convencional de secagem. Neste aplicativo, a equação de BRADLEY, descrita e testada no estudo de BOQUET, CHIRIFE & IGLESIAS (1978), foi empregada para o cálculo da umidade de equilíbrio do macarrão.

## 2.7 Secagem de massas alimentícias com microondas

A secagem de macarrão, como já foi abordado anteriormente, representa uma das mais bem sucedidas aplicações das microondas no processamento de alimentos. A primeira instalação industrial foi da empresa canadense LIPTON Ltd., destinada à produção de macarrão tipo massinha. O processo de secagem descrito na literatura é composto por três etapas distintas: um primeiro estágio de pré-secagem com ar quente seguido por uma etapa de secagem — com aplicação concomitante de microondas e ar quente — e, finalmente, uma fase final de equalização ou estabilização estrutural (SVENSON, 1987; DECAREAU, 1984 e 1985; SMITH, 1979; MEISEL, 1976 e 1978; ANON, 1972 e 1974, MAURER, TREMBLAY & CHADWICK, 1971). Os principais dados do processo descritos por DECAREAU (1984 e 1985), SMITH (1979) e MEISEL (1976 e 1978) estão resumidos na tabela 2.1.

TABELA 2.1 — Variáveis no processamento de massas alimentícias com microondas na LIPTON Ltd.

Seção	Temp. do ar (°C)	Veloc. do ar (m/min)	Umid. inicial da massa (%)	Umid. final da massa (%)	Tempo de processo (min)	Umid. Relativa (%)
Pré secagem	71-82	*	30	23	1	*
	71-82	*	23	18	35	*
Secagem	82-93	30,5	18	13-13,5	12	15-20
Equalização	60	zero	13-13,5	12,5-13	60	70-80

\* valores não disponíveis na literatura.

Analisando-se as curvas de secagem convencionais de materiais pouco porosos, inclusive massas alimentícias, verifica-se um mesmo padrão de comportamento (LIRICI, 1990; ANDRIEU & STAMATOPOULOS, 1986). Enquanto se consegue manter a superfície do material úmida durante a secagem, a velocidade de remoção de água é máxima e praticamente constante. A partir de um certo teor de umidade — umidade crítica — o processo passa ser limitado pelo transporte de umidade do interior para a superfície do material, e a consequência disso é a queda da velocidade de secagem (ANDRIEU & STAMATOPOULOS, 1986; SRUMILLO & KUDRA,1986). Na secagem de massas alimentícias, embora não se possa caracterizar a existência de uma umidade crítica, pois todo o processo é limitado pela difusão interna da água, no teor de aproximadamente 18% de umidade verifica-se uma diminuição significativa da velocidade de secagem (LIRICI, 1990; ANDRIEU & STAMATOPOULOS, 1986).

Com o emprego de microondas, as características da curva de secagem mudam significativamente. LEONHARDT & WESTPHALEN (1997), estudando a secagem de macarrão com microondas, concluíram que um modelo cinético de primeira ordem descreveu a variação da umidade com o tempo de processamento e a potência de microondas aplicada. Os parâmetros cinéticos desse modelo dependem, evidentemente, das características do equipamento e do material processado. Os estudos foram realizados em cavidade descontínua.

SMITH (1979) descreveu a influência da aplicação de microondas na secagem, concluindo que o aquecimento dielétrico, combinado com a convecção forçada convencional e introduzido a partir da umidade crítica, apresenta efeito sinérgico na secagem, ou seja, conseguem-se velocidades mais altas que a soma das velocidades somente com convecção forçada e somente com microondas. Pode-se explicar esses resultados tendo em vista que a geração de calor no interior do alimento, causada pela radiação de microondas, favorece o transporte da umidade para a superfície, de onde ela é removida pelo ar seco. Portanto, a

aplicação de microondas a partir da umidade crítica atua no mecanismo limitante do processo convencional de secagem — a difusão interna da água — não permitindo, então, a queda da velocidade de secagem e reduzindo significativamente o tempo de processamento (FUNEBO & OHLSSON, 1998; DATTA, 1990; SVENSON, 1987; SMITH, 1979; MEISEL, 1976).

SCHIFFMANN (1973) apontou que as primeiras seis unidades de secagem de massinha com microondas, fabricadas e comercializadas pela empresa norte americana MICRODRY Corporation, produziam 3000 lb/h de produto com a aplicação de 60 kW de microondas. Num trabalho posterior, SMITH (1979), presidente da MICRODRY, relatou a existência de um equipamento com sistema de microondas de aproximadamente 30 kW destinado à secagem de até 4000 lb/h de massinha. Os dados de consumo energético da literatura são, portanto, bastante divergentes. Os consumos específicos dos processos supra são de 44 e 16,5 Wh/kg, respectivamente. Essa discrepância se deve, entre outros aspectos, ao fato de a potência aplicada não ser necessariamente igual àquela absorvida pelo produto, dependendo esses dados das características construtivas do equipamento e de outros parâmetros de processo. A umidade e a temperatura do ar de secagem também exercem influência na potência de microondas necessária, haja vista que se tratam de processos combinados.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 O secador de leite descendente com aplicação de microondas**

O equipamento objeto de estudo deste trabalho está apresentado na figura 3.1 e esquematizado na figura 3.2. Ele é constituído de um leito descendente de seção retangular percorrido pela massa alimentícia. A velocidade de descida do produto, e conseqüentemente, seu tempo de residência no interior do secador, é regulada pela velocidade da esteira que se move perpendicularmente ao sentido de escoamento do produto, sob o leito.

Poucos centímetros abaixo do bocal de alimentação estão localizados seis guias de onda que transmitem a energia individual dos magnetrons — potência nominal de 800 W cada, operando na frequência de 2,45 GHz, alocada para utilização industrial. Eles estão instalados aos trios, em paredes opostas do leito, de forma que os aplicadores funcionam independentemente um do outro, sendo possível operar com três potências de aplicação —

1600, 3200 e 4800 W. Esses valores levam em consideração a conveniência de se ter uma aplicação simétrica de energia, ou seja, as válvulas operando aos pares, uma em cada parede oposta do leito.

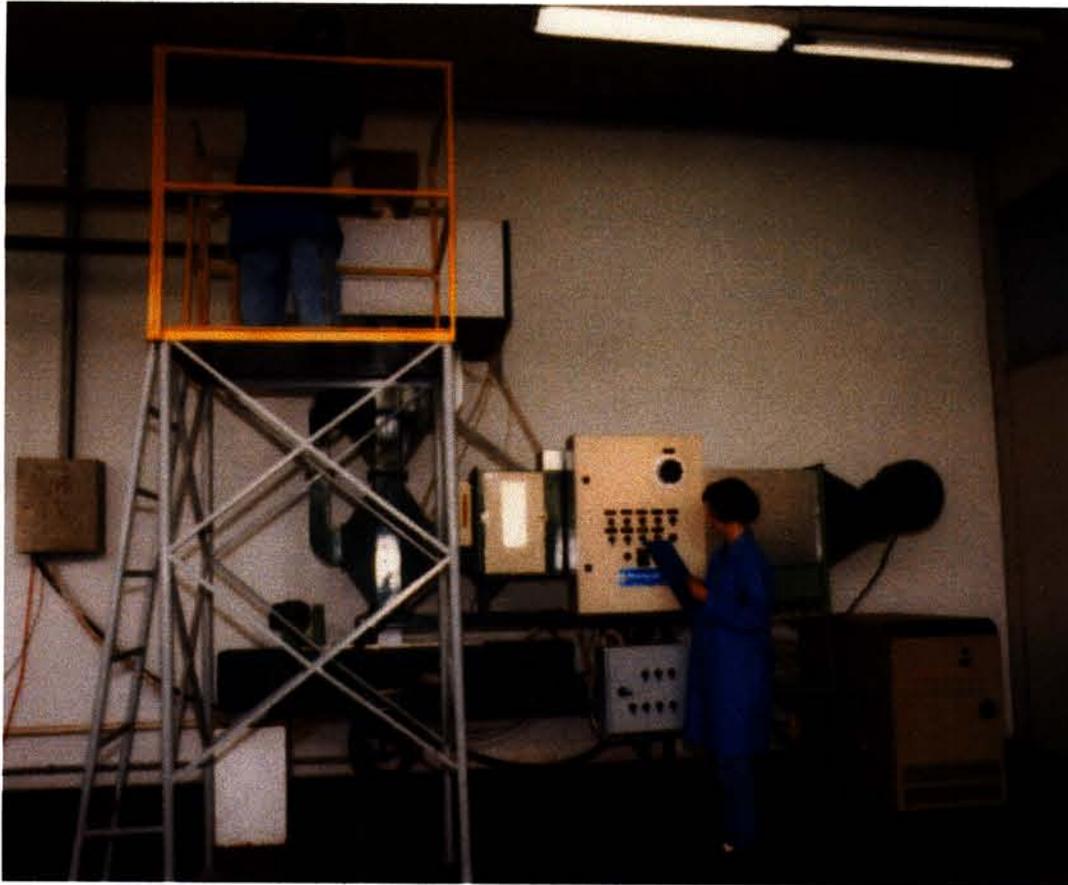


FIGURA 3.1 — Fotografia do secador de leito descendente com aplicação de microondas.

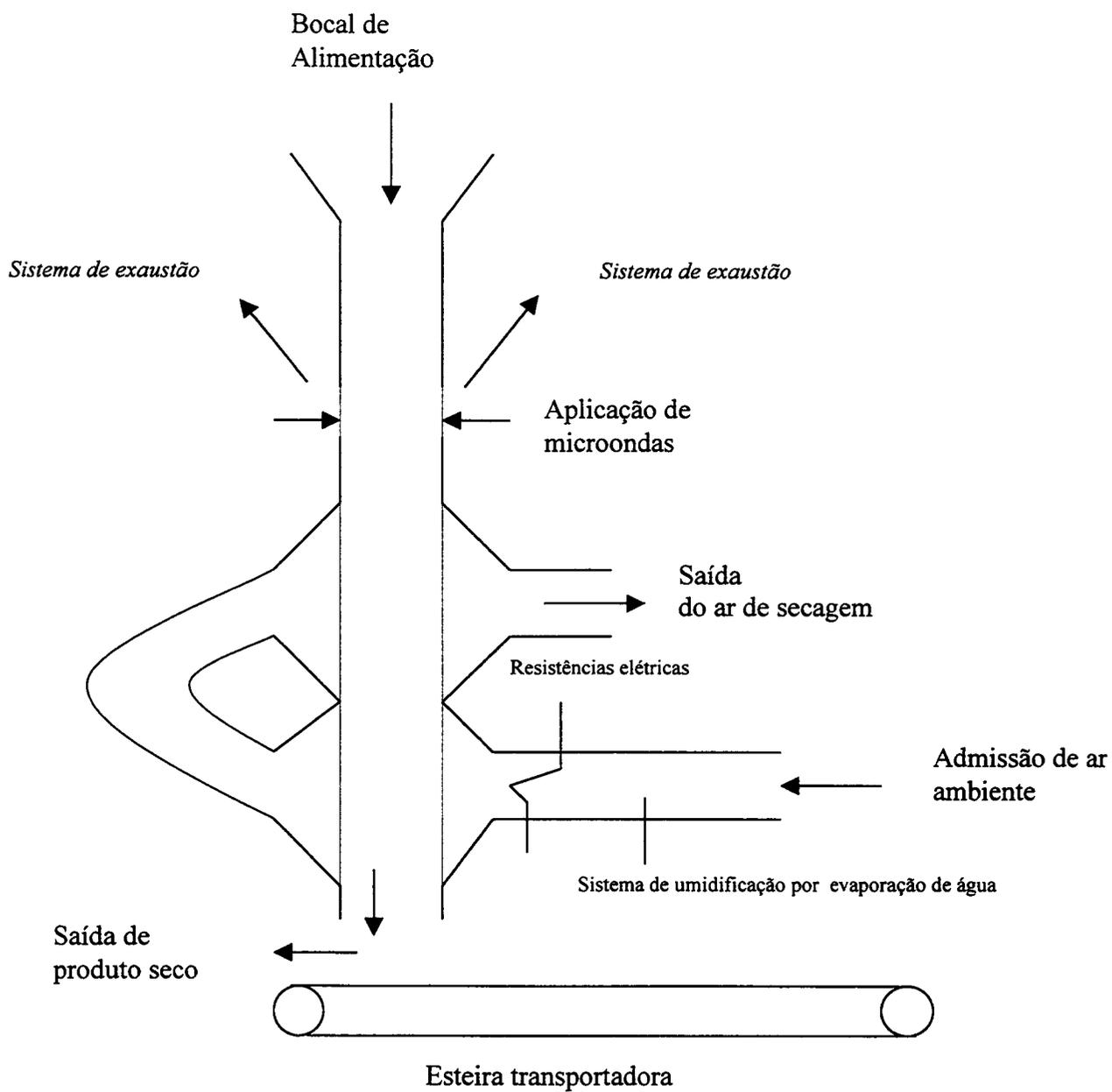


FIGURA 3.2 — Esquematização do secador de leito descendente com aplicação de microondas.

As figuras 3.1 e 3.2 pressupõem um sistema de alimentação cruzada do ar de secagem. Entretanto, o equipamento é modular e permite que, com pequenas modificações, se introduza o ar em uma só passagem.

Após ser aspirado pelo sistema de ventilação, o ar ambiente é umidificado por água evaporada. Oito resistências elétricas de 1000 W cada, acionadas aos pares, imersas em água, promovem a evaporação. O ar umidificado é então aquecido por outro conjunto de dezesseis resistências elétricas de 500 W cada, que, a exceção de uma, são acionadas aos trios. A velocidade da esteira também é facilmente controlada, pois o motor que a traciona — 0,33 cv — possui variador de velocidade.

As principais dimensões do protótipo estão relacionadas na tabela 3. 1.

Medidas prévias apontaram índices de aproximadamente 2% de reflexão nos guias de onda, estando a cavidade preenchida com produto. Não se justifica, portanto, a instalação de um sistema de tocos para casamento de impedância.

TABELA 3.1 — Dimensões do protótipo.

Seção	Dimensões (cm)	Volume (L)
Módulo de aplicação de microondas	22 x 11 x 45	11
Módulo superior de convecção forçada	22 x 11 x 64	15
Módulo inferior de convecção forçada	22 x 11 x 64	15

O aplicador de microondas do secador de leite descendente foi patenteado pelo INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA (1994). Ele foi construído em 1990 e destinava-se ao estudo de

parboilização de arroz. Em parceria com a empresa BRAIBANTI DO BRASIL S/A INDÚSTRIA E COMÉRCIO o secador foi construído para servir a testes de secagem de massas alimentícias com microondas. No entanto, a BRAIBANTI foi extinta e o projeto de pesquisa abandonado antes de seu término. Alguns poucos ensaios exploratórios foram realizados e os resultados estão apresentados na tabela 4.1. O secador está atualmente instalado no Laboratório de Microondas do Centro de Pesquisas do INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA.

### **3.2 Determinação de umidade do macarrão**

A determinação de umidade do macarrão foi feita de acordo com o método oficial de análise da AOAC — Associação de Químicos Analíticos Oficiais (AOAC, 1984). Nesta determinação, aproximadamente 2 g de amostra triturada e peneirada em peneira mesh 20 são colocados em pesa-filtro previamente seco e tarado. O pesa-filtro é introduzido em estufa a 130°C até se verificar massa constante. Antecedendo as pesagens em balança analítica, os pesa-filtros eram retirados da estufa e deixados resfriar em dessecadores com sílica até temperatura ambiente.

A umidade era determinada para o macarrão introduzido no equipamento, na saída do leito, após resfriamento do produto em condições ambientes e após a etapa de equalização, descrita em 3.9.

### **3.3 Determinação das propriedades do ar**

Para a determinação das propriedades termodinâmicas do ar de secagem, dois termômetros — um comum e outro com mecha úmida — foram empregados para a obtenção das temperaturas de bulbos seco e úmido do ar. O método de determinação e os cálculos subsequentes são descritos com detalhe nos textos clássicos de secagem (MUJUMDAR, 1995; STRUMILLO & KUDRA, 1986; KEEY, 1972).

### **3.4 Determinação das propriedades dielétricas de macarrão**

Para a determinação das propriedades dielétricas — constante dielétrica e fator de perda — foi empregado o aparelho de sonda coaxial modelo HP85070B de fabricação da Hewlett Packard, descrito no trabalho de ENGELDER & BUFFLER (1991). A técnica em que se baseia é a da sonda coaxial de extremidade aberta (ROUSSY & PEARCE, 1995; BUFFLER, 1993).

Uma sonda colocada em contato com a superfície do alimento emite sinais de microondas nas frequências selecionadas na faixa entre 0,200 e 6,0 GHz. Detectando a intensidade do sinal refletido o aparelho calcula os valores da constante dielétrica e fator de perda. Algumas hipóteses são consideradas: material não magnético, isotrópico, homogêneo e infinito, ou seja, não há transmissão do sinal através da amostra em teste. Além disso, no caso específico

de sólidos, estes devem ter uma superfície plana e lisa, sem espaço vazio entre a sonda e o material.

Em face das restrições ao método, não é possível empregar qualquer formato de massa na determinação. No pastificio SELMI de Campinas – SP foram obtidas amostras de massa de trigo duro após a etapa de extrusão, antes do corte. A massa foi então moldada para apresentar uma superfície plana que possibilitasse o perfeito contato com a sonda do aparelho medidor. As amostras foram acondicionadas em pequenos dessecadores contendo soluções salinas saturadas diversas. Os dessecadores foram levados a estufa a 50°C por duas semanas. A escolha dos sais baseou-se nas isotermas apresentadas nos estudos de ANDRIEU, STAMATOPOULOS & ZAFIROPOULOS (1985) e nos valores de umidade relativa de equilíbrio dos sais apresentados nos estudos de KIRANOUDIS et al. (1993), tendo o objetivo de se obter o produto equilibrado em umidades compreendidas entre 25 e 10% base úmida.

Após as medidas das propriedades dielétricas, feitas em cinco repetições, as amostras tiveram sua umidade determinada conforme descrito em 3.2.

A faixa de frequência selecionada foi de 0,500 a 4,50 GHz. Neste intervalo foram feitas 81 medições com intervalos de 50 MHz.

A temperatura da amostra no instante da medida foi tomada com um termômetro a infravermelho, marca RAYTEK, modelo PM Plus.

A sonda empregada na medida das propriedades dielétricas é recomendada para materiais líquidos ou semi-sólidos. Para uma correta medição, faz-se necessário um perfeito contato da sonda com a superfície do material, sem a existência de espaços com ar. Dado a dificuldade

de se conseguir este perfeito contato, das cinco medidas tomadas foi selecionada apenas uma em cada condição — aquela que apresentava maiores valores de fator de perda. Esta decisão baseou-se no fato de que o ar existente entre a sonda e a amostra tende a baixar o valor do fator de perda  $\epsilon''$ , e a medição com os maiores resultados deveria ser a mais correta.

Foram também realizadas medidas em quadruplicata das propriedades dielétricas do macarrão com o teor de umidade do instante da coleta na fábrica, ou seja, sem nenhuma espécie de acondicionamento especial. Duas amostras foram preparadas seguindo o mesmo procedimento daquelas acondicionadas em dessecadores. Em seguida, estas foram envoltas com PVC para impedir a variação na umidade no trajeto da fábrica ao laboratório onde se fizeram as medidas.

### **3.5 Medida dos tempos de residência no secador**

O tempo de residência no secador foi uma das variáveis cuja influência foi estudada através da variação da velocidade da esteira transportadora do secador. Para relacionar a velocidade da esteira com o tempo de residência foram realizados os ensaios descritos a seguir.

Primeiramente, o leito foi preenchido com massa desde a extremidade superior da seção de microondas até o bocal de descarga. O macarrão retido no leito foi, então, descarregado e pesado. Com isso obteve-se a massa de macarrão retida no equipamento.

O ajuste da velocidade era feito através de motovariador controlado por um botão com escala de 0 até 10

Para as determinações de tempo de residência média-se, através de cronometragens e pesagens, a vazão de produto correspondente a uma certa velocidade da esteira. A massa de produto retida no leito era então dividida pela vazão determinada, obtendo-se, assim, o tempo de residência correspondente àquela vazão.

Os ensaios de tempo de residência foram feitos em triplicata.

### **3.6 O macarrão utilizado nos ensaios de secagem**

O macarrão utilizado nos testes de secagem foi fornecido pelo Pastificio SELMI de Campinas – SP.

Para os ensaios de secagem, o macarrão era retirado da esteira transportadora no final da etapa de pré-secagem, onde a umidade seria de aproximadamente 16%, podendo esse valor variar devido a fatores diversos, como paradas de máquina, ajustes de condições do ar no secador industrial e velocidade do sistema de transporte. Nenhuma outra linha de produção do pastificio oferecia condições para retirada de amostra em umidades abaixo de 22%.

O formato selecionado para os estudos foi a massa curta de trigo duro tipo “penne” (LIRICI, 1984), com espessura média de 1,7 mm. Esse formato pode ser aproximado ao de uma placa plana infinita de dimensão característica — meia espessura — 0,85 mm. Comercialmente, essa massa recebe o nome de “penne superiore”, marca Renata.

A massa recolhida no pastificio era embalada em sacos de polietileno com capacidade de 15 kg e estes colocados em caixas de papelão para o transporte até São Caetano do Sul, local do ensaio.

Em virtude da limitação de transporte, a quantidade de massa recolhida — aproximadamente 150 kg — era suficiente para o estudo de até quatro ou cinco condições experimentais num mesmo dia de ensaio.

### **3.7 Verificação de defeitos no produto final**

Um problema encontrado na secagem de macarrão no equipamento em estudo foi o aparecimento de pontos brancos, ou bolhas, na massa. Esse defeito, conforme será discutido oportunamente, está associado ao excesso de energia de microondas irradiada ao alimento. Para quantificar esse defeito e relacioná-lo com as condições operacionais, fez-se simplesmente uma contagem do número de peças de macarrão defeituosas numa amostra de no mínimo 200 unidades, obtendo-se, então, a percentagem de peças defeituosas.

### **3.8 Equalização do macarrão**

O processo de equalização sucedeu ao de secagem da massa. Duas amostras retiradas da saída do leito eram colocadas em um recipiente de plástico rígido, cilíndrico e perfurado, com diâmetro de 10 e altura de 20 cm. Este recipiente sem tampa era, então, levado a um dessecador com umidade relativa controlada — solução de cloreto de sódio saturada. O conjunto era mantido em estufa com temperatura regulada a 60°C, por uma hora. A 60°C a umidade relativa de equilíbrio com uma solução saturada de cloreto de sódio é de 74,5% (KIRANOUDIS et al., 1993).

### **3.9 Descrição de um ensaio de secagem**

Segue-se a descrição do procedimento adotado na realização de um ensaio de secagem.

- a) Acionamento e regulagem das condições do ar de secagem — vazão, temperatura e umidade.
- b) Preenchimento do leito com o produto até o limite superior da seção de microondas.
- c) Acionamento da esteira transportadora na velocidade desejada.

- d) Acionamento do sistema de microondas e introdução contínua de produto.
- e) Para cada ensaio era aguardada a passagem de dois tempos de residência para que se estabelecesse o regime estacionário. Procedia-se, então, a coleta de amostras. Passado o primeiro tempo de residência era introduzido no secador o macarrão proveniente de uma caixa de papelão da qual se recolhiam duas amostras de produto para determinação de umidade inicial. Essas amostras de aproximadamente 25g cada eram colocadas em frasco de vidro com fechamento hermético para posterior análise. Decorrido mais um tempo de residência, o macarrão da caixa da qual se havia retirado amostra estaria deixando o leito. Deste produto final eram, então, retiradas amostras para determinação de umidade — novamente dois frascos com aproximadamente 25g cada. Cerca de 400g de macarrão da saída do leito eram colocados em dois sacos plásticos de polietileno deixados abertos para resfriamento do produto nas condições ambiente. Esse produto seria destinado à contagem de unidades defeituosas conforme descrito em 3.7 e também teria sua umidade determinada. Duas outras amostras de aproximadamente 300g cada eram encaminhadas para o procedimento de equalização, conforme descrito em 3.9. Decorrida uma hora de equalização, amostras do macarrão equalizado eram colocadas nos já citados vidros herméticos.
- f) Recolhidas todas as amostras, o equipamento era imediatamente ajustado para uma nova condição experimental. Repetia-se, então, o procedimento a partir do item “e”.

Num mesmo dia de trabalho era possível estudar até cinco condições de processo distintas, sendo esse número limitado pela quantidade de massa possível de ser transportada de Campinas para o laboratório em São Caetano do Sul.

### **3.10 Ensaio exploratório**

A realização do presente trabalho tomou como referência alguns poucos ensaios de secagem de macarrão realizados no equipamento em estudo no ano de 1997. Os resultados estão apresentados na tabela 4.1 e a metodologia empregada na ocasião está descrita a seguir.

Não houve funcionamento dos sistemas de aquecimento e umidificação do ar. As microondas foram acionadas em máxima potência — 4800 W, e a remoção da umidade era feita com os sistemas de ventilação e exaustão e o ar soprado encontrava-se em condições ambiente.

A umidade do macarrão foi determinada conforme descrito em 3.2.

A massa processada foi fornecida pelo pastificio ADRIA, de São Caetano do Sul - SP. O formato era parafuso, tipo trigo mole.

Não foi quantificada a ocorrência de defeitos na massa.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Ensaio exploratórios**

Os resultados dos ensaios exploratórios realizados conforme metodologia descrita em 3.11 estão relacionados na tabela 4.1.

Verificou-se que foi possível atingir a umidade final desejada — 12 a 13% em base úmida, somente nos ensaios 5, 6 e 9. As secagens bem sucedidas foram aquelas em que a umidade inicial do produto era de 17 a 20%. Não foi possível secar o alimento a partir de teores mais altos de umidade inicial, mesmo empregando elevados tempos de residência. Em todas as condições analisadas houve a ocorrência de pontos brancos, ou bolhas, na massa.

TABELA 4.1 – Resultados dos ensaios exploratórios de secagem de massas curtas com microondas.

Ensaio	Tempo de residência no leito (min)	Umidade inicial, base úmida (%)	Umidade final, base úmida (%)
1	18	27	16
2	18	26	16
3	14	26	21
4	14	26	19
5	11	17	12
6	11	18	12
7	64	25	14
8	20	24	16
9	38	20	13

O que se depreendeu dos resultados é que não só a literatura técnica recomenda a utilização das microondas a partir da umidade crítica como também o protótipo em estudo está limitado a operar dessa maneira.

Em face do exposto, decidiu-se avaliar a utilização do equipamento para a secagem final do macarrão, ou seja, a partir de teores de umidade em torno de 18%. Todavia, a fábrica que se dispôs a fornecer a matéria-prima nas quantidades necessárias — o pastificio SELMI — possui uma única linha de produção de massa cortada que possibilita a retirada de produto com umidade inferior a 22%. Nessa linha, no bocal de descarga de uma das seções do secador, antes da etapa de estabilização, a massa encontra-se com aproximadamente 16% de umidade.

## 4.2 Tempos de residência em função da velocidade da esteira

Os resultados apresentados na tabela 4.2, que se segue, foram obtidos conforme descrito em 3.5.

TABELA 4.2 – Tempos de residência e vazão de massa seca em função da velocidade da esteira.

Velocidade	Vazão média (kg/min)	Tempo de residência no leito (min)
2	0,49	36
3	0,95	19
4	1,3	14
5	1,6	12
6	2,0	9,1
7	2,1	8,4
8	2,8	6,4
9	2,9	6,1
10	3,0	5,9

Com base nesses resultados, construiu-se a tabela 4.3, que traz as quantidades de energia de microondas aplicadas por kg de massa em cada combinação possível de potência e velocidade de esteira — consumo específico de energia eletromagnética (Wh/kg).

TABELA 4.3 – Consumo específico de energia de microondas ou densidade de potência aplicada (Wh/kg de produto).

Velocidade	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Vazão (kg/min)	0,49	0,95	1,3	1,6	2,0	2,1	2,8	2,9	3,0
Potência (kW)									
1,6	54,6	28,0	21,2	17,2	13,6	12,6	9,67	9,20	8,94
3,2	109	56,0	42,4	34,5	27,2	25,3	19,3	18,4	17,9
4,8	164	84,1	63,6	51,7	40,8	37,9	29,0	27,6	26,8

Os números da tabela 4.3 foram usados como referência na procura da condição ideal de operação do secador como será discutido na seqüência deste trabalho.

### **4.3 Ensaio de secagem**

Os ensaios foram conduzidos conforme descrito em 3.10.

Os testes foram realizados em séries de até cinco condições distintas. Os resultados de uma série eram analisados e somente então decidia-se acerca das novas condições de processo a serem experimentadas. A primeira série de ensaios é constituída dos testes de 1 até 5 da tabela 4.5. À segunda série correspondem os ensaios de 6 até 9. À terceira, os testes 10 e 11, e, finalmente, à quarta série correspondem os ensaios de números 12 a 14.

O estabelecimento das quatro primeiras condições tomou como referência os ensaios exploratórios números 5 e 6 da tabela 4.1, cujos resultados, no que tange ao fator umidade final, foram satisfatórios. O que se buscou foi trabalhar com valores de tempo de residência próximos aos desses testes. A quinta condição estudada foi escolhida arbitrariamente.

Na tabela 4.4 estão relacionadas as condições do ar nas quatro série de ensaios.

TABELA 4.4 – Condições do ar de secagem nos diversos ensaios.

Série de ensaios	Temperatura de bulbo seco (°C)	Umidade relativa (%)
1	82 ± 8	12,5
2	75 ± 8	13,5
3	82 ± 8	9,3
4	84 ± 8	8,3

Na seqüência, apresentam-se os resultados experimentais de cada série, seguidos de uma breve análise que justifica o estabelecimento das condições a serem testadas na série seguinte de ensaios. Num primeiro instante, toda a discussão foi centrada no fator incidência de defeitos, sendo a análise da secagem propriamente dita deixada para a seção 4.6.

TABELA 4.5 – Resultados experimentais.

Ensaio	Pot. (kW)	Tempo de residência no leito (min)	Densidade de Potência (Wh/kg)	Umidade inicial da massa — base úmida (%)	Umidade da massa, saída do leito — base úmida (%)	Umidade da massa resfriada no ambiente — base úmida (%)	Umidade da massa equalizada — base úmida (%)	Peças defeituosas (%)
1	4,8	14	63,6	*	*	*	12,7	28
2	3,2	14	42,4	*	*	*	12,4	13
3	3,2	12	34,5	*	*	*	13,0	8,4
4	4,8	12	51,7	*	*	*	12,7	8,7
5	4,8	5,9	26,8	*	*	*	13,5	0,70
6	1,6	14	21,2	15,2	13,5	13,5	13,1	0,96
7	1,6	19	28,0	16,1	13,9	13,8	13,6	8,7
8	3,2	9,1	27,2	14,7	13,3	13,5	13,1	7,3
9	4,8	6,4	29,0	14,9	13,7	13,7	13,5	0,89
10	4,8	9,1	40,8	12,6	10,7	10,5	10,7	6,4
11	3,2	8,4	25,3	11,6	11,2	11,2	11,0	1,06
12	3,2**	8,4	25,3	14,0	12,6	12,5	12,1	1,12
13	3,2	6,4	19,3	13,9	12,3	12,8	11,8	0
14	4,8	8,4	37,9	14,0	13,2	12,1	11,6	0,48

\* Análises não realizadas por problemas técnicos.

\*\* Ensaio repetido.

Na primeira série de ensaios não foi possível determinar a umidade da massa no início — embora se estime que é de aproximadamente 16% de acordo com informações da fábrica SELMI —, na saída do leito e após resfriamento em condições ambientes. Isso prejudicou a realização de qualquer tipo de análise acerca da secagem nas condições operacionais em apreço.

Optou-se por não se repetir esses ensaios, pois embora se tenha conseguido secar a massa até o teor desejado de umidade em algumas das condições operacionais, os resultados não foram favoráveis no que se refere à ocorrência de defeitos, com exceção do ensaio 5, onde a densidade de potência aplicada foi de 26,8 Wh/kg.

Os defeitos na massa seca a que se faz menção são atribuídos a excesso de irradiação de energia de microondas, o que causa o aparecimento de bolhas brancas no produto. Quando isso ocorre, devem-se buscar condições operacionais onde haja menor densidade de potência aplicada. Na figura 4.1 apresenta-se uma fotografia de peças de macarrão defeituosas.



Figura 4.1 – Defeitos na massa associados ao excesso de irradiação de energia de microondas

Na segunda série de testes procurou-se baixar a densidade de potência em comparação aos primeiros ensaios, tentando-se, com isso, reduzir a incidência de defeitos na massa. Diante dos resultados obtidos, verificou-se que o parâmetro densidade de potência quando analisado isoladamente não era suficiente para explicar a incidência de defeitos na massa. Uma mesma densidade de potência a 1,6, 3,2 ou 4,8 kW produziria resultados distintos no que tange à ocorrência de bolhas na massa.

Na terceira série de testes procurou-se estudar a incidência de defeitos a 4,8 kW numa densidade de potência entre 29,0 Wh/kg — da segunda série — e 51,7 Wh/kg — da primeira série de testes. A 3,2 kW procurou-se baixar ainda mais a densidade de potência com relação às séries anteriores de ensaios.

Na quarta e última série de testes o ensaio número 11 foi repetido, pois a umidade inicial do macarrão estava muito abaixo daquela com que se desejava trabalhar. Não houve necessidade de se repetir o ensaio 10, pois pôde-se inferir que sendo o nível de defeitos nessa condição 6,4%, caso a umidade inicial da massa fosse mais elevada, este índice teria resultado ainda maior. A incidência de bolhas no produto é favorecida com uma maior umidade do produto, pois quanto maior for esta, maior a absorção de energia de microondas.

#### **4.4 Análise da ocorrência de defeitos**

Na tabela 4.6 estão relacionados, para uma melhor visualização, os índices de defeitos obtidos em todas as condições operacionais estudadas.

O que se pôde verificar a partir da tabela 4.6 é que a incidência de defeitos diminui com o aumento da velocidade numa mesma potência aplicada. A única exceção a essa regra se deu nas velocidades 7 e 8, à potência de 4,8 kW. Contudo, deve-se atentar para o fato de que a condição à velocidade 7 e potência de 4,8 kW — densidade de potência 37,9 Wh/kg — foi ensaiada partindo-se de uma massa com 14% de umidade, ou seja, abaixo da umidade inicial

das demais condições testadas nessa mesma potência. Como já fora ressaltado, o aparecimento dos defeitos é favorecido por um teor inicial mais elevado de umidade, pois a absorção de energia de microondas aumenta com a umidade. Os resultados dos ensaios 11 e 12, repetições da mesma condição operacional, corroboram esta assertiva.

TABELA 4.6 – Incidência de defeitos (%) em função das condições estudadas — potência de microondas e tempo de residência no leito.

Velocidade da esteira	3	4	5	6	7	8	9	10
Tempo de residência no leito (min)	19	14	12	9,1	8,4	6,4	6,1	5,9
Potência (kW)								
1,6	8,71	0,960						
3,2		12,6	8,40	7,32	1,06	0		
4,8		28,3	8,70	6,41	0,478	0,887		0,697

Uma importante observação experimental qualitativa é que à medida que o número de peças defeituosas diminui, é também reduzida a área da peça que é afetada.

Pode-se concluir que, à potência de 4,8 kW, o índice de defeitos cai abaixo de 1% a partir da velocidade 7 — densidade de potência 37,9 Wh/kg. Não se conseguiu, no equipamento em estudo, impedir a ocorrência de defeitos a 4,8 kW, o que indica que, para se trabalhar com esse protótipo, nessa potência, devem ser empregadas densidades de potência mais baixas que as atualmente possíveis.

A 3,2 kW foi possível obter uma massa sem bolhas a partir de consumos específicos de energia menores que 19,3 Wh/kg. Se isso foi possível a 3,2 kW, pode-se inferir que a 1,6 kW, acima das velocidades 4 ou 5 — densidades de potência 17,2 e 13,6 Wh/kg, respectivamente, também pode-se chegar a um produto sem nenhuma incidência de defeitos.

Numa avaliação final do processo no que diz respeito à ocorrência dos defeitos na massa, verificou-se que se obteve incidência de bolhas em torno de 1% no ensaio 6 — potência de 1,6 kW e densidade de potência 21,2 Wh/kg — ensaio 11 — potência de 3,2 kW e densidade de potência 25,3 Wh/kg — e ensaio 9 — potência de 4,8 kW e densidade de potência 29,0 Wh/kg. Portanto, baseando-se nessas informações, não se pode associar a incidência de defeitos ao consumo específico de energia quando se aplicam potências diferentes. À medida que aumenta a potência, a tolerância da massa ao surgimento de defeitos também aumenta, tendo como referência o parâmetro densidade de potência — ou consumo específico de energia. Esse fato pode ser explicado tendo em vista a forma como a energia de microondas é transferida ao produto. Nas potências de 1,6, 3,2 e 4,8 kW utilizam-se dois, quatro e seis guias de onda, respectivamente. O aumento do número de guias de onda garante uma melhor distribuição da energia na cavidade aplicadora, o que favorece a diminuição da incidência de defeitos.

Até o momento, a discussão dos resultados contemplou o fator índice de peças defeituosas, pois para uma análise correta do equipamento devem-se determinar quais as mínimas velocidades de esteira possíveis para a obtenção de um produto com um mínimo de peças defeituosas em cada uma das possíveis potências de trabalho. Uma vez feita essa análise, agora parte-se para a discussão dos resultados da secagem propriamente dita.

## 4.5 Análise da secagem

O macarrão, por imposição legal, deve apresentar uma umidade máxima de 13%, expressa em base úmida. O secador em estudo está sendo avaliado para realizar a secagem final do macarrão, ou seja, substituindo a última etapa do processo industrial, a qual reduz seu teor de umidade de 16% até 13% em 5 h, nas condições operacionais do pastificio SELMI.

Na discussão que se segue procurar-se-á realizar uma análise comparativa dos resultados obtidos nas três potências distintas com as quais se trabalhou.

Empregando 4,8 kW de potência foi possível atingir a faixa desejada de umidade nos ensaios com velocidades de esteira 4 e 5 — densidades de potência 63,6 e 51,7 Wh/kg. Nessas operações houve uma ocorrência muito elevada de defeitos na massa, o que impossibilita a utilização dessas condições. No ensaio nessa mesma potência à velocidade 6 — densidade de potência 40,8 Wh/kg — a discussão da secagem fica inviável em vista da baixa umidade inicial com a qual se trabalhou.

A melhor condição operacional empregada a 4,8 kW foi aquela com densidade de potência 37,9 Wh/kg, quando a massa teve seu teor de umidade reduzido de 14 a 13,2% no leito, com um baixo índice de incidência de defeitos. Com a equalização, a umidade passou a 11,6% — demasiadamente baixa, porém, aceitável. Isso evidencia que se a umidade inicial fosse mais próxima dos 15%, poder-se-ia alcançar, com a equalização, ou até mesmo com o resfriamento ambiente, os 13% desejáveis. Contudo, deve-se atentar para o fato de que quando o teor de umidade é elevado, conforme já discutido anteriormente, há uma tendência ao aumento na incidência de peças defeituosas. Na potência de 4,8 kW foi testada uma ampla faixa de condições operacionais e nenhuma proporcionou a ausência de bolhas na

massa. O aumento da velocidade da esteira, ou seja, a redução do tempo de residência e da densidade de potência aplicada traria benefícios no sentido de reduzir, ou até mesmo impedir, a incidência de defeitos. Porém, a secagem não se daria a contento.

A 3,2 kW, com densidades de potência 42,4, 34,5 e 27,2 Wh/kg, foi possível, com o auxílio da operação de equalização, atingir ou ao menos aproximar-se bastante — como no último caso — da umidade final desejada de 13%. Contudo, nas citadas condições operacionais a incidência de defeitos impossibilitaria a implantação do processo. A partir de densidade de potência 25,3 Wh/kg, ainda na potência de 3,2 kW, verifica-se uma redução significativa na incidência de defeitos e a secagem também é satisfatória. Com 25,3 Wh/kg, condição testada na quarta série de ensaios, a umidade foi baixada de um teor inicial de 14 até 12,6% no leito. Em seguida conseguiu-se uma redução de meio ponto percentual — até 12,1% de umidade — com a equalização. É plausível admitir que se partindo de uma massa com teor de umidade próximo aos 15%, poder-se-ia alcançar, nessas condições operacionais, a umidade desejada comercialmente. Contudo, mais uma vez deve-se ter em mente que uma umidade inicial maior facilita a ocorrência de defeitos que, nesse caso específico, já superou o índice de 1%. Ainda à potência de 3,2 kW, com densidade de potência abaixo de 19,3 Wh/kg, a secagem mostrou-se satisfatória com ausência de defeitos. O mesmo comentário realizado com relação à condição anterior pode ser feito: espera-se conseguir, com o auxílio da operação de equalização, uma umidade final máxima de 13% partindo-se de uma massa com aproximadamente 15% de umidade nessa condição operacional. Mas possuindo a massa uma umidade inicial mais elevada, o índice de defeitos poderia deixar de ser nulo, o que implicaria na imposição de se trabalhar com densidades de potência ainda mais baixas.

A 1,6 kW, duas condições experimentais foram analisadas: densidades de potência 28,0 e 21,2 Wh/kg. No primeiro caso, a incidência de defeitos foi elevada. Além disso, não foi possível atingir o teor desejável de umidade final, pois partiu-se de uma umidade inicial de 16,1%. Partindo-se de uma massa um pouco mais seca, 15,2% de umidade, e empregando-se

velocidade mais alta, foi possível, com 21,2 Wh/kg, reduzir a umidade no leite até 13,5%. Com a equalização, chegou-se a uma umidade final de 13,1%. Empregar velocidades mais altas seria desejável para essa potência, pois mesmo com consumo específico de energia de microondas de 21,2 Wh/kg, o índice de peças defeituosas foi de 0,96%. Entretanto, ao que tudo indica, com tempos de residência mais curtos parece impossível atingir a umidade final de 13%, mesmo lançando mão da operação de equalização.

Uma observação que se faz importante é acerca da etapa de equalização. O estabelecimento dessa operação baseou-se nas informações da literatura. Seu objetivo era de equilibrar estruturalmente a massa, deixando a umidade e a temperatura se distribuírem num gradiente menos intenso do que aquele verificado no final da secagem. Com isso, buscava-se evitar a ocorrência do caneamamento — rachaduras no produto. O que se verificou é que, deixando a massa resfriar no ambiente, o caneamamento não ocorreu, o que não justifica a implantação da operação de equalização por esse motivo. Todavia, com a equalização conseguiu-se, em geral, uma maior redução da umidade da massa quando comparado à operação de resfriamento ambiente.

Em face dos resultados até aqui discutidos podem-se tecer algumas considerações acerca do protótipo em estudo, visando à sua melhoria e continuidade de sua avaliação técnica. Apresentam-se, nas seções 5.1 e 5.2, as sugestões de modificações e estudos posteriores.

## 4.6 Propriedades dielétricas

Conforme procedimento descrito em 3.4, seguem na tabela 4.7 os resultados das medidas de propriedades dielétricas do macarrão.

TABELA 4.7 – Massa com 32,4% de umidade, medidas a 23°C.

Frequência (GHz)	Constante dielétrica relativa				Fator de perda relativo			
	$\epsilon'$				$\epsilon''$			
0,50	27,87	28,18	28,21	28,09	6,78	6,93	6,97	6,88
0,55	27,45	27,79	27,90	27,73	6,80	6,92	6,98	6,87
0,60	27,13	27,50	27,53	27,40	6,78	6,93	6,99	6,86
0,65	26,85	27,18	27,23	27,11	6,81	6,95	6,99	6,89
0,70	26,55	26,88	26,94	26,87	6,81	6,93	6,98	6,90
0,75	26,35	26,64	26,72	26,60	6,85	6,97	7,02	6,92
0,80	26,10	26,41	26,46	26,38	6,89	7,00	7,04	6,94
0,85	25,85	26,11	26,19	26,08	6,92	7,03	7,09	6,97
0,90	25,61	25,91	25,95	25,89	6,95	7,07	7,16	7,02
0,95	25,40	25,72	25,74	25,68	6,93	7,09	7,13	7,00
1,00	25,21	25,46	25,53	25,46	7,00	7,12	7,18	7,10
1,05	24,99	25,26	25,30	25,24	7,01	7,15	7,17	7,10
1,10	24,79	25,06	25,09	25,01	7,08	7,20	7,24	7,14
1,15	24,58	24,88	24,91	24,86	7,07	7,18	7,23	7,13
1,20	24,43	24,70	24,73	24,66	7,13	7,27	7,31	7,21
1,25	24,26	24,52	24,55	24,51	7,15	7,26	7,31	7,20
1,30	24,04	24,33	24,35	24,31	7,17	7,31	7,33	7,26
1,35	23,89	24,16	24,22	24,17	7,17	7,30	7,34	7,26
1,40	23,76	24,02	24,06	24,00	7,23	7,36	7,40	7,30
1,45	23,60	23,87	23,92	23,85	7,28	7,40	7,45	7,35
1,50	23,39	23,68	23,68	23,66	7,30	7,43	7,46	7,37
1,55	23,32	23,56	23,60	23,55	7,30	7,45	7,49	7,37
1,60	23,17	23,43	23,44	23,43	7,34	7,44	7,48	7,40
1,65	23,04	23,28	23,30	23,26	7,35	7,52	7,52	7,43
1,70	22,88	23,15	23,15	23,11	7,33	7,46	7,51	7,40
1,75	22,76	23,00	23,03	23,00	7,36	7,51	7,55	7,46
1,80	22,64	22,88	22,90	22,87	7,41	7,53	7,57	7,47
1,85	22,52	22,76	22,70	22,74	7,46	7,61	7,61	7,52
1,90	22,36	22,64	22,66	22,62	7,44	7,60	7,62	7,52
1,95	22,27	22,50	22,52	22,48	7,46	7,59	7,64	7,54
2,00	22,18	22,42	22,44	22,42	7,50	7,64	7,67	7,58
2,05	22,06	22,29	22,30	22,30	7,56	7,66	7,71	7,62
2,10	21,95	22,19	22,20	22,18	7,55	7,67	7,72	7,62
2,15	21,83	22,06	22,08	22,05	7,56	7,69	7,73	7,62

Frequência (GHz)	Constante dielétrica relativa				Fator de perda relativo			
	$\epsilon'$				$\epsilon''$			
2,20	21,74	21,96	22,00	21,98	7,59	7,75	7,77	7,69
2,25	21,62	21,83	21,85	21,83	7,62	7,77	7,78	7,68
2,30	21,51	21,73	21,74	21,74	7,66	7,79	7,83	7,73
2,35	21,41	21,64	21,65	21,63	7,68	7,80	7,84	7,75
2,40	21,32	21,53	21,53	21,53	7,69	7,84	7,88	7,78
2,45	21,22	21,46	21,45	21,45	7,70	7,84	7,87	7,77
2,50	21,12	21,32	21,32	21,32	7,71	7,86	7,89	7,81
2,55	21,00	21,22	21,23	21,24	7,75	7,89	7,91	7,83
2,60	20,93	21,16	21,15	21,16	7,74	7,89	7,93	7,83
2,65	20,85	21,06	21,05	21,08	7,79	7,93	7,96	7,87
2,70	20,72	20,95	20,94	20,95	7,79	7,94	7,97	7,88
2,75	20,65	20,86	20,87	20,88	7,82	7,96	8,00	7,92
2,80	20,56	20,78	20,78	20,79	7,84	7,97	8,00	7,93
2,85	20,47	20,68	20,68	20,69	7,86	8,01	8,06	7,97
2,90	20,36	20,58	20,57	20,59	7,86	8,04	8,05	7,97
2,95	20,29	20,51	20,49	20,49	7,91	8,05	8,08	8,03
3,00	20,20	20,40	20,39	20,41	7,94	8,07	8,08	8,03
3,05	20,10	20,31	20,30	20,31	7,95	8,09	8,11	8,05
3,10	20,02	20,23	20,22	20,25	7,95	8,11	8,12	8,06
3,15	19,90	20,10	20,08	20,11	7,98	8,17	8,19	8,09
3,20	19,84	20,04	20,02	20,05	8,01	8,15	8,17	8,11
3,25	19,75	19,94	19,93	19,94	8,02	8,14	8,20	8,15
3,30	19,67	19,86	19,85	19,86	8,04	8,20	8,20	8,15
3,35	19,57	19,76	19,75	19,76	8,07	8,22	8,23	8,17
3,40	19,49	19,68	19,68	19,68	8,04	8,20	8,21	8,16
3,45	19,42	19,61	19,61	19,61	8,07	8,21	8,23	8,18
3,50	19,33	19,52	19,50	19,53	8,06	8,21	8,24	8,19
3,55	19,27	19,46	19,45	19,46	8,09	8,23	8,26	8,19
3,60	19,18	19,36	19,35	19,35	8,08	8,23	8,29	8,20
3,65	19,14	19,32	19,31	19,31	8,10	8,23	8,26	8,21
3,70	19,05	19,23	19,22	19,22	8,14	8,29	8,32	8,25
3,75	18,97	19,16	19,15	19,15	8,11	8,25	8,29	8,22
3,80	18,91	19,09	19,09	19,08	8,14	8,28	8,31	8,25
3,85	18,85	19,04	19,02	19,03	8,14	8,28	8,30	8,24
3,90	18,78	18,96	18,95	18,96	8,15	8,29	8,33	8,26
3,95	18,72	18,90	18,89	18,90	8,17	8,31	8,34	8,28
4,00	18,66	18,84	18,81	18,83	8,19	8,33	8,36	8,29
4,05	18,60	18,77	18,75	18,76	8,22	8,36	8,39	8,32
4,10	18,53	18,70	18,68	18,70	8,23	8,36	8,39	8,33
4,15	18,46	18,65	18,61	18,63	8,24	8,38	8,40	8,33
4,20	18,40	18,58	18,55	18,57	8,27	8,42	8,45	8,38
4,25	18,34	18,52	18,49	18,50	8,27	8,41	8,44	8,38
4,30	18,26	18,44	18,41	18,43	8,30	8,45	8,47	8,41
4,35	18,20	18,37	18,34	18,36	8,31	8,44	8,47	8,41
4,40	18,13	18,31	18,27	18,29	8,34	8,47	8,50	8,44
4,45	18,05	18,23	18,20	18,22	8,37	8,50	8,53	8,47
4,50	17,99	18,16	18,13	18,15	8,37	8,51	8,54	8,47

Tem-se na figura 4.2 uma representação gráfica dos dados da tabela 4.7. Foram plotados os valores médios de  $\epsilon'$  e  $\epsilon''$  das quatro medições efetuadas.

Para a propriedade fator de perda —  $\epsilon''$  — foi possível ajustar os dados da tabela 4.7 a um modelo linear, dado pela expressão 4.1.

$$\epsilon'' = 0,406 \cdot f + 6,74 \quad (4.1)$$

No modelo supra  $f$  é a frequência de onda, expressa em GHz e  $\epsilon''$  é o fator de perda relativo.

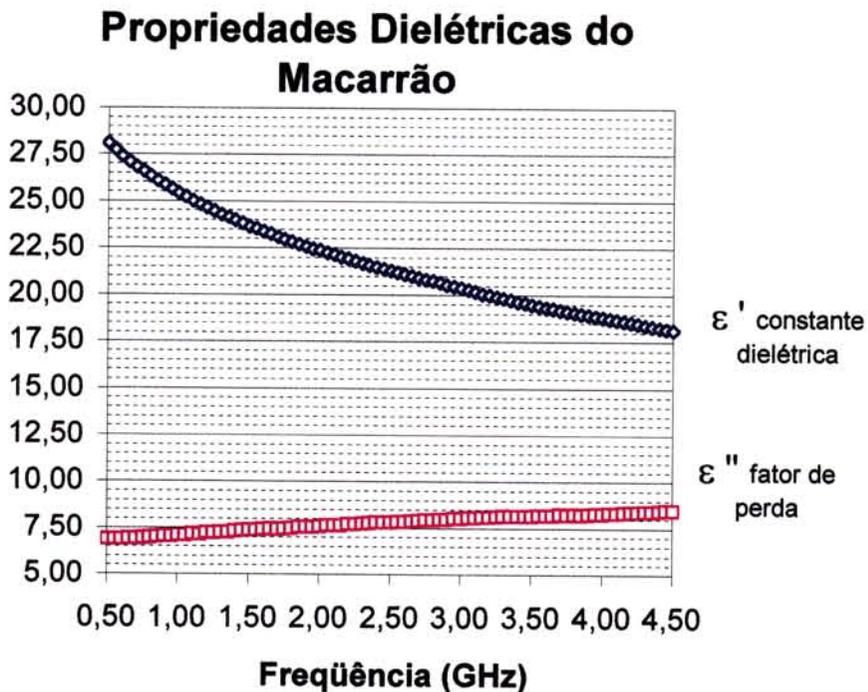


FIGURA 4.2 – Constante dielétrica e fator de perda em função da frequência de onda eletromagnética — massa alimentícia com 32,4% de umidade à temperatura de 23°C.

A representatividade do modelo pôde ser atestada pelo alto valor de variação explicada —  $R^2$  — obtido da análise de variância apresentada na tabela 4.8, que se segue.

TABELA 4.8 – Tabela de análise de variância para o modelo da equação 4.1.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Graus de Liberdade	Média Quadrática
Regressão	73,055	1	73,0549
Resíduos	2,676	322	0,0083
Falta de ajuste	1,28090	79	0,0162
Erro puro	1,3952	243	0,0057
Total	75,731	323	
$R^2$	98,3%		
F calculado	8790		
F tabelado	6,7 (99% de confiança)		

O que se pôde depreender dos resultados obtidos é que a constante dielétrica é decrescente na faixa de frequência analisada e o fator de perda, por outro lado, é crescente. Quanto à ordem de grandeza, é sabido que a água é uma substância com alto fator de perda, o que se deve à sua característica polar, conforme discutido na seção 2.5 do presente trabalho. Seguem na tabela 4.9 alguns valores do fator de perda da água destilada a 25°C, obtidos durante a calibração do aparelho HP85070B, procedimento este descrito no item 3.4.

Nota-se que em alguns valores de frequência, o fator de perda da massa chega a superar o da água destilada. Na frequência de maior importância para a aplicação industrial — 2,45 GHz — o fator de perda da água é somente pouco superior ao da massa — 9,52 e 7,80 respectivamente. Isso demonstra que, do ponto de vista qualitativo, as propriedades dielétricas da massa no teor de umidade e temperatura analisadas favorecem o seu processamento com microondas, pois conforme já discutido em 2.5, a potência absorvida é diretamente proporcional ao fator relativo de perda —  $\epsilon''$ .

TABELA 4.9 – Fator de perda relativo —  $\epsilon''$  — em função da frequência de onda, para água destilada a 25,0°C.

Frequência (GHz)	Fator de perda $\epsilon''$
0,50	2,01
0,90	3,63
1,10	4,41
1,50	5,96
2,00	7,84
2,45	9,52
3,00	11,53
3,50	13,32
4,00	14,98

Seguindo a metodologia descrita em 3.4, os resultados na tabela 4.10 foram obtidos para as propriedades dielétricas do macarrão em função do teor de umidade, a 2,45 GHz.

TABELA 4.10 – Fator de perda do macarrão a 2,45 GHz, em função de temperatura e umidade.

Umidade do macarrão - base úmida (%)	Temperatura de medida (°C)	Fator de perda $\epsilon''$
23,9	46	7,76
17,0	35	2,87
10,0	34	0,66
26,4	23	5,29
20,3	23	2,90
14,4	23	1,35

O que se depreende da tabela 4.10 é que o fator de perda decresce com a umidade do macarrão. Isso se deve ao fato de a água desempenhar influência preponderante nessa grandeza, em vista de sua característica polar.

Algumas considerações importantes devem ser feitas com relação a estas medições. Não se encontrou na literatura nenhum trabalho que tivesse publicado os valores das propriedades dielétricas de macarrão. Desta forma, não foi possível comparar ordem de grandeza e atestar a validade da metodologia descrita em 3.4. A existência de espaços com ar entre a sonda e o material pode levar a resultados bastante errôneos. A reprodutividade das medidas foi muito ruim. Na metodologia proposta, optou-se por adotar o maior valor de fator de perda obtido — por motivos já apresentados em 3.4.

Para que se ateste com maior confiança a validade destas medidas, convém a comparação de alguns dos resultados com outros mais precisos e obtidos a partir de técnicas mais adequadas para o tipo de material em estudo, como por exemplo a técnica da cavidade ressonante (ROUSSY & PEARCE, 1995; BUFFLER, 1993).

Os valores de fator de perda obtidos reforçam a observação feita com relação à incidência de defeitos na massa, a qual é favorecida por valores mais elevados de umidade do produto. Quanto maior a umidade, maior a potência absorvida, pois maior o fator de perda — equação 2.3.

## **5. SUGESTÕES**

### **5.1 Modificações no protótipo**

Com vistas a alcançar o objetivo de se avaliar tecnicamente o protótipo em estudo, algumas modificações são sugeridas a seguir.

- Melhor mistura do ar

Nos ensaios realizados verificou-se uma grande dificuldade em se ajustar as condições do ar de secagem. O pequeno comprimento da tubulação não permitia uma adequada mistura do ar, o que fazia com que se obtivessem variações de até 8°C em torno de um certo valor médio de temperatura. Ou seja, a variação da temperatura com o ponto de medida era muito alta, dificultando qualquer tipo de estudo comparativo entre diversas condições de secagem. Outro fator que certamente contribuiu para essa discrepância é a falta de isolamento térmico

nessa tubulação. Portanto, o que se sugere de modificação no protótipo é a ampliação dessa tubulação de ar à jusante dos sistemas de aquecimento e umidificação, e sua cobertura com um material isolante térmico. Outra modificação que vai ao encontro do objetivo de se ter uma melhor regulagem das condições do ar é fazer com que todas as resistências de aquecimento tenham o funcionamento independente, e não aos trios como no atual sistema.

- Maior capacidade de umidificação do ar

No presente trabalho não se avaliaram os efeitos das condições do ar na operação de secagem. Trabalhou-se sempre com a máxima umidade relativa possível de ser obtida, o que evidenciou a limitação do sistema de umidificação. Uma sugestão de modificação desse sistema é a instalação de aspersores de vapor d'água, se possível integrantes de um sistema automático de controle das condições do ar.

- Medida da vazão de ar

Para possibilitar a avaliação termodinâmica da operação de secagem neste protótipo — balanços de massa e energia — é necessário ter medidas das vazões de ar admitido no secador e na passagem através do leito. Portanto, devem ser introduzidas modificações nesse sentido.

- Medidas das condições do ar em pontos estratégicos do secador

Ainda com vistas a se avaliar termodinamicamente a operação, é importante conhecer as propriedades do ar que passa através do leito e que deixa o equipamento. Essas informações são de extrema importância para se estudar configurações com reciclo.

- Instalação de amostradores no leito

Amostras de massa em diferentes pontos do leito permitirão a avaliação da cinética de secagem nesse protótipo em função das diversas condições experimentadas. Portanto, são necessárias modificações que permitam a retirada de amostras de macarrão em diferentes posições no leito descendente.

- Modificação do sistema de tração da esteira transportadora

Os resultados experimentais exploratórios do presente trabalho indicam que, para ser possível a utilização da potência de 4,8 kW, faz-se necessário o uso de velocidades mais altas. Portanto são necessárias modificações no sistema de polias do motor que traciona a esteira transportadora.

- Aumento da capacidade do leito na secagem direta

Para ser possível operar com as potências de 1,6 ou 4,8 kW deverão ser utilizados tempos de residência maiores que os atualmente praticáveis, para que a secagem se dê a contento. Em face disso, deve-se considerar o aumento da altura ou da seção transversal do leito no trecho de secagem convectiva. Com isso, mantém-se pequena a residência no trecho de microondas, minimizando a incidência de defeitos e aumenta-se o tempo de secagem convectiva.

- Estudo da reflexão de microondas

Para otimizar a transmissão de energia de microondas na cavidade aplicadora, convém verificar o índice de reflexão no equipamento. Com isso, poder-se-á avaliar a necessidade de se ter um sistema de casamento de impedância nos guias de onda instalados.

## **5.2 Estudos posteriores**

Uma grande dificuldade na realização deste trabalho foi a obtenção do produto para os testes. Além disso, em função de flutuações havidas no próprio processamento na indústria, o material era recebido em condições muito variáveis de umidade e temperatura, o que dificultou a realização de um estudo comparativo entre as diversas condições operacionais. Para minimizar este problema e possibilitar a realização de um maior número de ensaios, seria bastante conveniente a instalação deste protótipo num pastificio. Com abundância de matéria-prima e sem o problema de transporte, os testes seriam mais facilmente realizados e muitas interferências seriam eliminadas.

Com as modificações propostas no item 5.1 será possível avaliar a influência de diversas condições do ar na secagem, quantificando e diferenciando os efeitos das microondas e da convecção forçada.

Outras respostas poderiam ser estudadas, como a qualidade do macarrão no cozimento e aspectos sensoriais como cor e sabor.

Nos processos industriais convencionais, um mesmo secador processa diversos formatos de massa cortada. Para ser implantado industrialmente, o secador assistido por microondas também deve ter essa flexibilidade operacional. Portanto, são necessários ensaios com outros formatos de massa para verificar essa possibilidade.

Com relação à determinação das propriedades dielétricas do macarrão empregando o método da sonda coaxial de extremidade aberta, deve-se avaliar a validade dos resultados obtidos para massa com baixos teores de umidade. Para isso, os resultados obtidos devem ser confrontados com aqueles determinados por outras técnicas, como a de cavidade ressonante. Sendo a metodologia comprovada válida, poder-se-á estudar o comportamento das referidas propriedades com a temperatura do material.

## 6. CONCLUSÃO

Os resultados mostraram ser possível secar massas alimentícias curtas no protótipo em estudo, partindo-se de teores de umidade de aproximadamente 15%.

Sem que se façam modificações no equipamento, a potência de microondas empregada deve ser de 3,2 kW — com densidade de potência 25,3 Wh/kg, podendo este valor variar em função do teor de umidade inicial da massa.

Todos os resultados mostraram uma significativa redução de tempo de processamento em comparação aos processos convencionais. E em nenhum caso ocorreu o canejamento do produto.

A ocorrência de bolhas na massa durante o processo de secagem está associada ao excesso de irradiação de energia de microondas. À medida que se reduz o tempo de residência e a umidade da massa na cavidade de aplicação de microondas, diminui a incidência de tais defeitos. Um teor de umidade mais elevado favorece o aparecimento das bolhas, pois é maior a capacidade do material de absorver a energia de microondas. Esta assertiva é justificada pelos valores do fator relativo de perda em função da umidade do material. Quanto maior a umidade, maior o valor de  $\epsilon''$ .

Com a redução na incidência de bolhas, é reduzida também a área da peça que é afetada.

Não houve evidências de que a operação de equalização contribuísse para evitar o caneamamento da massa. Esse tipo de defeito não se verificou em nenhuma das condições experimentais estudadas.

São necessárias modificações no protótipo que possibilitem uma melhor avaliação técnica antes de se considerar uma ampliação de escala.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) AL-DURI, Bushra; McINTYRE, Seamus. Comparison of Drying Kinetics of Foods Using a Fan-Assisted Convection Oven, a Microwave Oven and a Combined Microwave/Convection Oven. **Journal of Food Engineering**, v.15, p.139-155, 1992.
- 2) ANDRIEU, J.; STAMATOPOULOS, A. Durum wheat pasta drying kinetics. **Lebensmittel Wissenschaft und Technologie**, vol 19(6), p.448-456, 1986.
- 3) ANDRIEU, J.; STAMATOPOULOS, A.; ZAFIROPOULOS, M. Equation for fitting desorption isotherms of durum wheat pasta. **Journal of Food Technology**, v.20, p.651-657, 1985.
- 4) Anon. Drying time cut up to 90%, energy use in half. **Food Processing**, Sept, 1974.
- 5) Anon. Microwaves Dry Pasta. **Food Engineering**, p.94-96, Apr, 1972.
- 6) AOAC — ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official Methods of Analysis**. p.267, 14 ed., USA, 1984.
- 7) BATISTA, A. R.; MARRERO, M. Aplicacion de las microondas en la industria alimentaria. **Alimentaria**, p.119-125, Mar, 1995.
- 8) BEDROSLAN, Karakian. The necessary ingredients for successful microwave applications in the food industry. **Journal of Microwave Power**, p.173-178, 8(2), 1973.

- 9) 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**, v.13, p.319-327, 1978.
- 10) BUFFLER, Charles R. **Microwave Cooking and Processing**, Engineering Fundamentals for the Food Scientist. Van Nostrand Reinhold, USA, 1993.
- 11) CUNHA, M. L. **Estudo da Secagem do café cereja descascado pelo processo a ar quente assistido a microondas**. Campinas, 1996. 74p. Dissertação de mestrado (Mestre em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- 12) CUNHA, M. L.; CANTO, M. W.; MARSAIOLI Jr, A. **A novel system for drying pulped coffee cherry beans by means of heated air assisted by microwaves**. In: 12<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA 96. Praha: August, 1996. P1.60 [852].
- 13) D'EGIDIO, M. G., MARIANI, B. M.; NOVARO, P. Caratteristiche della materia prima e tecnologie di essicamento: loro influenza sulla qualità della pasta. **Tecnica Molitoria**, p.105-112, Febbraio, 1996.
- 14) D'EGIDIO, M. G., MARIANI, B. M.; NOVARO, P. Influence of raw material characteristics and drying technologies on pasta cooking quality: a review of our results. **Italian Food and Beverage Technology**, p.29-32, n.1, May, 1993.
- 15) DALBON, G. Innovazione tecnologica e qualità della pasta di grano duro. **Tecnica Molitoria**, 47(7), p.656-665, luglio, 1996.
- 16) DATTA, A. K.; HU, W. Optimization of Quality in Microwave Heating. **Food Technology**, p.53-56, Dec, 1992.
- 17) DATTA, Ashim. K. Heat and mass transfer in the microwave processing of food. **Chemical Engineering Progress**, p.47-53, June, 1990.
- 18) DECAREAU, R. V. Microwaves in food processing. **Food Technology in Australia**, v.36, n.2, p.81-86, Feb, 1984.
- 19) DECAREAU, R. V.; PETERSON, R. A. **Microwave Processing and Engineering**. London: Ellis Horwood, 1986, 224p.

- 20)DECAREAU, Robert V. **Microwaves in the food processing industry**. London: Academic Press Inc., 1985. 233p.
- 21)DIDONÈ, Gastone. Thermo-Active System, una nuova tecnologia nell'essiccamento delle paste corte. **Tecnica Molitoria**, p.389-400, maggio, 1992.
- 22)ENGELDER, David S.; BUFFLER, Charles R. Measuring Dielectric Properties of Food Products at Microwave Frequencies. **Microwave World**, vol.12, n.2, p. 6-15, 1991.
- 23)FUNEBO, Tomas; OHLSSON, Thomas. Microwave-Assisted Air Dehydration of Apple and Mushroom. **Journal of Food Engineering**, vol.38, p.353-367, 1998.
- 24)GERLING, John E. Microwaves in the Food Industry: Promise and Reality. **Food Technology**, p.82-83, June, 1986.
- 25)GIESE, James. Pasta: New Twists on an Old Product. **Food Technology**, p.118-126, Feb, 1992.
- 26)GOYETTE, J.; CHAHINE, R.; BOSE, T. K.; AKYEL, C.; BOSISIO, R. Importance of the dielectric properties of materials for microwave heating. **Drying Technology**, p.1111-1121, v.8, n.5, 1990.
- 27)HUMMEL, C. **Macaroni Products: Manufacture, Processing and Packing**. London,: Food Trade Press, Ltd., 1966, 287p.
- 28)INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA, José Thomaz Senise. **Exposição Construtiva em Aplicador de Microondas para o Processamento de Líquidos, Suspensões e Material Granulado**. BR n. UM 7400571-5, 1994
- 29)KEEY. R. B. **Drying: Principles and Practice**. Pergamon Press, Braunschweig, 1972.
- 30)KIRANOUDIS, C. T; MAROULIS, Z. B.; TSAMI, E.; MARINOS-KOURIS, D. Equilibrium Moisture Content and Heat of Desorption of Some Vegetables. **Journal of Food Engineering**, n.20, p.55-74, 1993.
- 31)KIRK, D., HOLMES, A. W. The heating of foodstuffs in a microwave oven. **Journal of Food Technology**, v. 10, p. 375-384, 1975.

- 32)LEFEUVRE, S.; SADEGHI, Me.; MAJDABADINO, M.; AUDHUY, M. Shrinkage of porous materials during microwave drying. **Drying Technology**, p.1049-1060, n.8, v.5, 1990.
- 33)LEONHARDT, G. F.; WESTPHALEN, D. L. **Microwave drying of short cut pasta.** In: Proceedings of the Inter-American Drying Conference, p. 448-453, Itu, São Paulo, 1997.
- 34)LEONHARDT, Gustavo Ferreira. **Massas Alimentícias – Tecnologia e Engenharia.** Escola de Engenharia Mauá, 192p., abril de 1995.
- 35)LIRICI, Luciano. Il catalogo delle paste alimentari. **Tecnica Molitoria**, p.865-881, Dicembre, 1984.
- 36)LIRICI, Luciano. L'essiccazione delle paste alimentari. **Tecnica Molitoria**, p.471-481, 491, Giugno, 1990.
- 37)MANSER, J. L'influenza delle altissime temperature di essiccazione sulla qualità delle paste alimentari. **Tecnica Molitoria**, p.13-25, Gennaio, 1990.
- 38)MAURER, R. L.; TREMBLAY, M. R.; CHADWICK, E. A. Microwave Processing of Pasta: improves product, reduces cost and production time. **Food Technology**, p. 32-37, v.25, Dec, 1971.
- 39)MEISEL, Nicolas. Essiccamento delle paste alimentari com microonde. **Tecnica Molitoria**, p.101-105, Dic.,1976.
- 40)MEISEL, Nicolas. Les micro-ondes au service des techniques alimentaires. **Industries Alimentaires et Agricoles**, p.997-1003, 1978.
- 41)MILATOVIC, Lj.; MONDELLI, G. **Pasta Technology Today.** Trad. de Cinzia Tussardi. Pinerolo: Chiriotti Editori, 1991, 349p.
- 42)MUDGETT, R. E.; GOLDBLITH, S. A.; WANG, D. I. C.; WESTPHAL, W. B. Predictions of Dielectric Properties in Solid Foods of High Moisture Content at Ultrahigh and Microwave Frequencies. **Journal of Food Processing and Preservation**, n.1, p.119-151, 1977.
- 43)MUDGETT, Richard E. Microwave Properties and Heating Characteristics of Foods. **Food Technology**, p.84-93, 98, June, 1986.

- 44)MUDGETT, Richard E. et al. Microwave Food Processing. **Food Technology**, p.117-126, Jan., 1989. Scientific Status Summary.
- 45)MUJUMDAR, A. S. **Handbook of Industrial Drying**. Marcel Dekker, Inc., vol I, 2ed.,742p., 1995.
- 46)NELSON, S; FORBUS Jr., W; LAWRENCE, K. Microwave Permittivities of Fresh Fruits and Vegetables from 0.2 to 20 GHz. **Transactions of the ASAE**. p.183-189, vol.37,n.1, 1994b.
- 47)NELSON, S; FORBUS Jr., W; LAWRENCE, K. Permittivities of Fresh Fruits and Vegetables at 0.2 to 20 GHz. **Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy**. p.81-93, vol.29,n.2, 1994a.
- 48)NELSON, Stuart O. Dielectric Properties of Agricultural Products, Measurements and Applications. **IEEE Transactions on Electrical Insulation**, vol. 26, n.5, p.845-869, Oct, 1991.
- 49)NELSON, Stuart O.; KRASZEWSKI, Andrzej W. Dielectric Properties of materials and measurement techniques. **Drying Technology**, p. 1123-1142, v.8, n.5, 1990.
- 50)NITZ, M; LEONHARDT, G. F.; SENISE, J. T.; MARSAIOLI Jr, A. Processamento Industrial de alimentos com microondas. **Revista Engenharia de Alimentos**, ano 4, n. 17, p.24-26, Fev, 1998.
- 51)OHLSSON, T.; BENGTSSON, N. E. Dielectric Food Data for Microwave Sterilization Processing. **Journal of Microwave Power**, v.10(1), p.93-108, 1975.
- 52)OLIVEIRA, E. M. **Desenvolvimento de um sistema contínuo fechado para a produção industrial de embutidos cárneos cozidos com a aplicação de microondas**. Campinas, 1998. 233p. Tese de doutorado (Doutor em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas
- 53)OSTROM, G. A. S.; CLARY, C. D. Microwave Vacuum and Liquid Media Dehydration of Seedless Grapes. **Microwave World**, p.6-9, v.15,n.2, 1994.
- 54)PECZALSKI, R.; LAURENT, P.; ANDRIEU, J.; BOYER, J. C.; BOIVIN, M. **Drying - induced stress build-up within spaghetti**. Drying 1996, Proceedings of the 10<sup>th</sup> International Drying Symposium. Anais, p.805-816, vol.B. Kraków: July, 1996.

- 55) RICHARDSON, Phillip. Microwave technology: the opportunity for food processors. **Food Science and Technology Today**, v.5, n.3, p.146-148, 1991.
- 56) ROCHA, C. R. **Aplicação de microondas na parboilização de arroz**. Campinas, 1998. 71p. Dissertação de mestrado (Mestre em Engenharia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.
- 57) ROUSSY, G; PEARCE, J. A. **Foundations and Industrial Applications of Microwaves and Radio Frequency Fields**, Physical and Chemical Processes. John Wiley & Sons, England, 1995.
- 58) SCHIFFMANN, Robert F. Food Product Development for Microwave Processing. **Food Technology**, p.94-98, June, 1986.
- 59) SCHIFFMANN, Robert F. Microwave and Dielectric Drying. In: MUJUMDAR, Arun S. **Handbook of Industrial Drying**. New York: Marcel Dekker, Inc., 1987, cap.10, p.327-356.
- 60) SCHIFFMANN, Robert F. Microwave Processing in the U.S. Food Industry. **Food Technology**, p.50-52,56, Dec, 1992.
- 61) SCHIFFMANN, Robert F. Microwaves Challenge Today's Heat Processing. **Food Engineering**, p.72-76, Nov, 1975.
- 62) SCHIFFMANN, Robert F. The applications of microwave power in the food industry in the United States. **Journal of Microwave Power**, p.137-142, 8(2), 1973.
- 63) SENISE, J. T. A utilização de rádio-freqüência e microondas na eletrotermia industrial. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, v.8, n.1, p.51-61, 1985.
- 64) SLATER, Lloyd E. Advanced Technology: : Innovating with Microwaves. **Food Engineering**, p.51-53, July, 1975.
- 65) SMITH, Franklin J. Microwave-hot air drying of pasta, onions and bacon. **Microwave Energy Applications Newsletter**, vol. 12. n. 6, p.6-12, 1979.
- 66) STRUMILLO, Czeslaw; KUDRA, Tadeusz. Drying in Energy Fields. In: **Topics in chemical engineering Volume 3 - Drying: Principles, Applications and Design**. Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.

- 67)SVENSON, George. Microwave systems save time, energy. **Prepared Foods**, p.86-90, Oct, 1987.
- 68)TOLEDO, José Roberto. Pão lidera consumo na mesa do brasileiro. **Folha de São Paulo**, São Paulo, 25 dez. 1997. Caderno 1, p.6.
- 69)WESTPHALEN, D. L.; LEONHARDT, G. F. **WINDRY**: Pasta Drying Simulator. In: Proceedings of the Inter-American Drying Conference, p. 461-468, Itu, São Paulo, 1997.