



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
COPEAG - COORD. DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. AGRÍCOLA**



# **PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SECADOR POR MICROONDAS  
PARA SECAGEM DE GRÃOS EM CAMADA ESPESSA**

**RONALDO ARAÚJO ALVES**

**CAMPINA GRANDE  
PARAÍBA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA



**DISSERTAÇÃO**  
**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM ARMAZENAMENTO E**  
**PROCESSAMENTO DE PRODUTOS AGRICOLA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SECADOR POR MICROONDAS**  
**PARA SECAGEM DE GRÃOS EM CAMADA ESPESSA**

**RONALDO ARAÚJO ALVES**

**Campina Grande – Paraíba**  
**SETEMBRO – 2003**

**RONALDO ARAÚJO ALVES**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SECADOR POR  
MICROONDAS PARA SECAGEM DE GRÃOS EM  
CAMADA ESPESSA**

**Dissertação apresentada ao Curso  
de Pós-Graduação em Engenharia  
Agrícola da Universidade Federal de  
Campina Grande, em cumprimento  
às exigências para obtenção do grau  
de Mestre.**

**Orientadores:**

**Prof. Dr. Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata**

**Prof. Dra. Maria Elita Martins Duarte**

**CAMPINA GRANDE - Pb  
Setembro /2003**



## Ficha Catalográfica

A 474d Alves, Ronaldo Araújo

Desenvolvimento de um secador por microondas para secagem de grãos em camada espessa / Ronaldo Araújo Alves. Campina Grande: UFCEG, 2003.

93p. : il.

Inclui bibliografia

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)

UFCEG/CCT/DEAG

1. Secador por microondas – grãos
2. Curvas de secagem - Equações

CDU: 633.1:531.364.7:537-962

631.365(043)



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DO MESTRANDO

**RONALDO ARAÚJO ALVES**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SECADOR POR MICROONDAS  
PARA SECAGEM DE GRÃOS EM CAMADA ESPESAA**

**BANCA EXAMINADORA**

**PARECER**

*Mário Eduardo R.M. Cavalcanti Mata*      APROVADO  
Dr. Mário Eduardo R.M. Cavalcanti Mata-Orientador

*Maria Elita Duarte Martins*      APROVADO  
Dra. Maria Elita Duarte Martins-Orientadora

*Marcelo Sampaio de Alencar*      APROVADO  
Dr. Marcelo Sampaio de Alencar-Examinador

*José Jeferson da Silva Nascimento*      APROVADO  
Dr. José Jeferson da Silva Nascimento-Examinador

**SETEMBRO - 2003**

## **DEDICATÓRIA**

**A DEUS  
AOS MEUS PAIS EDVALDO e  
ANITA,  
AOS MEUS IRMÃOS RUBENS,  
RUBIVAL, RONILDO E ROSINEIDE,  
A MINHA ESPOSA EDNA E A MEU  
FILHO BRUNO.**

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por mais um dia de vida e luz;

Aos meus pais Edvaldo e Anita, aos meus irmãos Rubens, Rubival, Ronildo e Rosineide, pelo companheirismo do dia a dia;

A minha esposa Edna Agra Toscano de Araújo pela paciência, incentivo e companheirismo;

Ao meu filho Bruno Agra Araújo, razão pela qual fiz este mestrado;

Aos professores orientadores, Dr. Mario Eduardo R. M. Cavalcanti Mata e M.Sc. Joabson Nogueira de Carvalho, pelo apoio, orientação, amizade e paciência durante a realização deste trabalho;

Aos professores da banca examinadora, Dra. Maria Elita Martins Duarte, Dr. Marcelo Sampaio de Alencar e Dr. José Jéferson da Silva Nascimento pelas correções que muito contribuíram para este trabalho;

Aos professores deste curso, Dra. Rossana Maria F. de Figueirêdo, Dr. Alexandre José de Melo Queiróz, Dr. Francisco de Assis Santos e Silva, Dr. Francisco de Assis Cardoso Almeida;

Aos colegas do curso e em especial aos amigos Waldemir Soares da Costa pelo incentivo ao ingresso neste mestrado e ao Professor João Evangelista;

Aos colegas do curso de Engenharia Elétrica, Bruno Albert, Edmar Candeia, e Waslon Terllizzier;

A secretária do curso de Pós-graduação em Engenharia Agrícola Rivanilda pelo carinho e amizade;

Aos funcionários, Renato e Luciene do Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas;

A todos que contribuíram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

# ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xi</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xv</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xvii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xviii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>5</b>
2.1 Importância do milho.....	5
2.2 Secagem convencional do milho.....	6
2.2.1 Cinética da secagem convencional.....	6
2.2.2 Secagem em camada fina.....	8
2.2.2.1 Equações empíricas de secagem em camada fina.....	9
2.2.3 Secagem em camadas espessas.....	10
2.3 Fundamentos do aquecimento por microondas.....	13
2.3.1 Equações de Maxwell.....	13



2.3.2	Introdução às ondas eletromagnéticas e espectro de frequência	14
2.3.3	Conversão da energia eletromagnética em calor.....	17
2.3.3.1	Condução iônica.....	18
2.3.3.2	Rotação dipolar.....	18
2.3.4	Propriedades dielétricas dos alimentos.....	19
2.3.4.1	Variação da permissividade elétrica com o conteúdo de água.....	20
2.3.4.2	Variação da permissividade elétrica com a temperatura.....	21
2.3.4.3	Variação da permissividade elétrica com a frequência	22
2.3.4.4	Variação da permissividade elétrica com a densidade volumétrica.....	24
2.3.5	Propagação de ondas em meios ilimitados.....	24
2.3.6	Reflexão e transmissão de duas ondas planas.....	26
2.3.7	Absorção de energia de microondas.....	27
2.3.8	Efeitos do aquecimento dos materiais por microondas em relação as suas propriedades térmicas.....	30
2.4	Sistemas de microondas.....	32

2.4.1 Oscilador magnetron.....	33
2.4.2 Fonte de potência de microondas para alimentação do magnetron.....	35
2.4.3 Guias de onda retangulares.....	37
2.4.4 Cavidades ressonantes.....	39
2.4.5 Termopares.....	40
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>41</b>
3.1 Modificações efetuadas no equipamento do forno de microondas....	41
3.1.1 Forno de microondas.....	42
3.1.2 Balança eletrônica.....	48
3.1.3 Medidor de temperatura.....	50
3.2 Produto usado no experimento como matéria prima.....	51
3.3 Distribuição de campo elétrico no interior da cavidade do forno original.....	52
3.4 Distribuição de campo elétrico nas camadas do milho usando o forno original e o protótipo do secador.....	52
3.4.1 Distribuição de campo nas camadas do milho usando forno original.....	53
3.4.2 Distribuição de campo nas camadas do milho usando o protótipo do secador.....	53

3.5 Curvas de potência absorvida nas camadas de milho com alturas de 2 cm, 5 cm e 10 cm.....	54
3.5.1 Determinação da curva de potência absorvida usando uma carga contendo água.....	54
3.5.2 Procedimento para determinação das curvas de potência absorvidas nas camadas de milho com alturas de 2 cm, 5 cm e 10 cm.....	55
3.5.3 Gráficos das curvas de potência para camadas de milho com alturas de 2 cm, 5 cm e 10 cm.....	59
3.6 Secagem contínua para camadas de milho com alturas de 2 cm, 5 cm e 10 cm.....	59
3.7 Secagem intermitente para as camadas de milho de 2 cm, 5 cm e 10 cm.....	62
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>64</b>
4.1 Avaliação da distribuição de campo elétrico no interior da cavidade do secador de microondas sem carga e com carga.....	64
4.1.1 Distribuição de campo elétrico no interior da cavidade do forno original sem carga.....	64
4.1.2 Distribuição de campo elétrico nas camadas do milho usando o forno de microondas original e o secador protótipo por microondas.....	66

4.2 Curva de potência absorvida com uma carga de água e nas camadas de milho com altura de 2 cm, 5cm e 10cm utilizando-se o secador protótipo por microondas.....	68
4.2.1 Curva de potência absorvida usando uma carga de água.....	68
4.2.2 Curvas de potência absorvida nas camadas de milho com alturas de 2 cm, 5 cm e 10 cm.....	69
4.3 Curvas de secagem contínua para as camadas de milho com alturas de 2 cm, 5 cm e 10 cm.....	72
4.4 Curvas de secagem intermitente para as camadas de milho de 2 cm, 5 cm e 10 cm de altura.....	75
4.5 Aspecto da cor da camada de milho após a secagem intermitente.....	80
<b>5 CONCLUSÕES.....</b>	<b>82</b>
<b>6 SUGESTÕES.....</b>	<b>84</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>85</b>
<b>8 APÊNDICE.....</b>	<b>88</b>
<b>9 APÊNDICE A.....</b>	<b>89</b>
<b>10 APÊNDICE B .....</b>	<b>92</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURAS		PÁGINA
Figura 1	Processo de ocorrência de uma potência média de 490 Watts, no forno microondas.....	04
Figura 2	Curva típica de um processo de secagem de um produto agrícola pelo sistema convectivo.....	07
Figura 3	Secador convencional para secagem de milho em camada fina.....	12
Figura 4	Onda eletromagnética plana uniforme.....	15
Figura 5	Processo de rotação de um dipolo sob a influência de um campo elétrico alternado.....	19
Figura 6	Modelo aproximado da variação de $\epsilon_r''$ com $X$ .....	21
Figura 7	Variação da permissividade elétrica com a temperatura.....	22
Figura 8	Variação da permissividade dielétrica com a frequência.....	23
Figura 9	Reflexão e transmissão da energia das microondas.....	26
Figura 10	Curvas do conteúdo de água de um produto biológico em função do tempo por microondas e pelo processo convectivo.....	31
Figura 11	Imagem da válvula magnetron (a), e partes elétricas da válvula magnetron (b).....	34
Figura 12	Diagrama em blocos de uma fonte DC genérica.....	35

Figura 13	Circuitos retificadores. (a) circuito retificador de meia-onda, (b) circuito retificador de onda completa.....	36
Figura 14	(a) Fonte DC com estágio de filtragem, (b) forma de onda resultante para o caso da retificação de meia-onda e onda completa.....	36
Figura 15	Circuitos dobradores de tensão típicos. (a) meia - onda, (b) onda completa.....	37
Figura 16	Meios de transporte de microondas por guia de onda retangular.....	38
Figura 17	Termopar.....	40
Figura 18	Diagrama de blocos do secador.....	41
Figura 19	Esquema elétrico da placa de controle (a) e circuito elétrico da placa de controle (b).....	43
Figura 20	Diagrama de bloco do TCA 785.....	44
Figura 21	Esquema da fonte do magnetron.....	45
Figura 22	Suportes de borracha inseridos entre o transformador e a carcaça do forno.....	45
Figura 23	Espalhador de campo eletromagnético metálico (a) e espalhador de campo eletromagnético metálico instalado no topo da cavidade retangular do forno de microondas (b).....	46
Figura 24	Circuito de controle do motor de corrente contínua.....	47
Figura 25	Exaustor na lateral do forno de microondas.....	47
Figura 26	Balança acoplada à cavidade via suporte de teflon.....	48
Figura 27	Balança ligada ao computador 486DX100.....	49

Figura 28	Interface gráfica para aquisição de dados.....	49
Figura 29	Medidor de temperatura digital de precisão (a) e sensores termopares posicionados ortogonalmente ao campo elétrico (b).....	50
Figura 30	Amostras de milho seco.....	51
Figura 31	Recipiente cilíndrico com quatro camadas de milho separadas por círculos de papel canson umedecidas com cloreto de cobalto.....	53
Figura 32	Milho seco com teor de umidade inicial de 10,25% em base úmida..	55
Figura 33	Uso do ventilador para retirada do excesso de água da superfície.....	56
Figura 34	Fluxograma do processo para obtenção das curvas de potências absorvidas nas camadas de milho de 2 cm, 5 cm e 10 cm.....	58
Figura 35	Aquisição de dados feita pelo computador.....	60
Figura 36	Fluxograma da secagem contínua das camadas de milho de altura de 2 cm, 5 cm e 10 cm.....	61
Figura 37	Fluxograma da secagem intermitente das camadas de milho de altura de 2 cm, 5 cm e 10 cm.....	63
Figura 38	Distribuição de campo elétrico no interior da cavidade do forno original no topo (a), no centro (b) e na base (c) .....	65
Figura 39	Distribuição de campo elétrico nas camadas de milho usando forno original (a) e usando o protótipo do secador (b).....	67
Figura 40	Curva característica de potência de uma carga de água.....	68

Figura 41	Curva de potência absorvida para camada de milho de 2 cm de altura.....	70
Figura 42	Curva de potência absorvida para camada de milho de 5 cm de altura.....	70
Figura 43	Curva de potência absorvida para camada de milho de 10 cm de altura.....	71
Figura 44	Curva de secagem contínua para a camada de milho de 2 cm de altura.....	73
Figura 45	Curva de secagem contínua para a camada de milho de 5 cm de altura.....	73
Figura 46	Curva de secagem contínua para a camada de milho de 10 cm.....	74
Figura 47	Curvas de secagem intermitente e temperaturas para a camada de milho de 2 cm.....	78
Figura 48	Curvas de secagem intermitente e temperaturas para a camada de milho de 5 cm.....	79
Figura 49	Curvas de secagem intermitente e temperaturas para a camada de milho de 10 cm.....	79
Figura 50	Aspectos das cores da camada de milho original (a), da camada de milho de 2 cm (b), da camada de milho de 5 cm (c) e da camada de milho de 10 cm após secagem intermitente.....	80



## LISTA DE TABELAS

TABELAS		PAGINA
Tabela 1	Espectro de freqüências eletromagnéticas.....	17
Tabela 2	Parâmetros dielétricos, profundidade de penetração das microondas em função da umidade e freqüência à 2450 MHz.....	30
Tabela 3	Tipos de termopares.....	40
Tabela 4	Parâmetros das camadas de altura de 2 cm, 5 cm e 10 cm.....	62
Tabela 5	Valores experimentais de corrente de anodo, potência absorvida e parâmetros da equação da curva característica de potência para a carga de água.....	69
Tabela 6	Valores experimentais de corrente de anodo, potência absorvida e parâmetros da equação da curva característica de potência para as camadas de milho de altura de 2 cm, 5cm e 10 cm.....	71
Tabela 7	Parâmetros da curva característica de secagem contínua para as camadas de 2 cm, 5 cm e 10 cm de altura.....	74
Tabela 8	Parâmetros da curva característica de secagem intermitente para as camadas de 2 cm, 5 cm e 10 cm de altura.....	76
Tabela 9	Parâmetros da curva característica de temperatura para as camadas de 2 cm, 5 cm e 10 cm de altura.....	76
Tabela 10	Tempo de secagem intermitente final para as camadas de milho de 2 cm, 5 cm e 10 cm de altura.....	77
Tabela 11	Temperatura final da secagem intermitente para as camadas de 2 cm, 5 cm e 10 cm de altura.....	78

Tabela A1	Valores de tempo e conteúdo de água para secagem contínua da camada de 2 cm.....	89
Tabela A2	Valores de tempo e conteúdo de água para secagem contínua da camada de 5 cm.....	90
Tabela A3	Valores de tempo e conteúdo de água para secagem contínua da camada de 10 cm.....	91
Tabela B1	Valores de tempo e conteúdo de água para secagem intermitente da camada de 2 cm.....	92
Tabela B2	Valores de tempo e conteúdo de água para secagem intermitente da camada de 5 cm.....	93
Tabela B3	Valores de tempo e conteúdo de água para secagem intermitente da camada de 10 cm.....	94

## RESUMO

O aquecimento é uma das várias possibilidades de aplicação de microondas. O processo de conversão da energia eletromagnética em calor, diretamente no interior do produto, além de outras vantagens, possibilita sua utilização no beneficiamento de grãos, especificamente em processos de secagem. Este trabalho, tem por finalidade a utilização de um secador por microondas na secagem de grãos de milho em camadas de 2 cm, 5 cm e 10 cm de altura, desenvolvido a partir de um aparelho de forno por microondas doméstico, modificado para fins do experimento, com a substituição do painel de controle, a adição de um espalhador de campo, um exaustor, uma cunha metálica, um transformador de filamento, um medidor de corrente de anodo e isoladores da base do transformador de alta tensão. A distribuição de campo elétrico nas camadas de milho usando o protótipo do secador por microondas mostra-se uniforme, devido às modificações feitas com a instalação de um espalhador de campo e uma cunha metálica. As potências absorvidas pelas camadas foram determinadas indiretamente pelo ajuste da corrente de anodo. Quatro potências foram escolhidas por meio das curvas características de potência para irradiar cada camada. As curvas de potência não são lineares, devido ao produto não ser homogêneo. As camadas de milho de 2 cm, 5 cm e 10 cm de altura foram desidratadas de aproximadamente 53 % para 13 % em base seca, por dois métodos de secagem: o método de secagem contínua, no qual a irradiação por microondas na camada não sofre interrupção e o método de secagem no qual a exposição a microondas sofre interrupção. Verifica-se para este segundo método, que a temperatura de secagem para cada camada variou em média de 70 °C até 130 °C e que o tempo de secagem diminui com o aumento da potência aplicada, independente do método empregado.

## ABSTRACT

Heating is one of the several possibilities of application of microwaves. The process of conversion of the electromagnetic energy in to heat, directly inside the product, besides other advantages, facilitates its use in the processing of products, specifically in the drying processes. This work has the purpose of using a dryer based on microwaves in the drying of corn grains in layers of 2 cm, 5 cm and 10 cm of height. The equipment is based on a microwave oven, modified for the experiment, with the substitution of the control panel, the addition of a field scatter, an exaustor, a metallic wedge, a filament transformer, a meter of anode current and insulators et the base of the transformer of high voltage. The distribution of electric field in the corn layers using the prototype of the dryer is shown to be uniform, due the modifications. The power absorbed by the layers were indirectly measured for the adjustment of the anode current. Four levels of power were chosen by means of the characteristic plots to irradiate each layer. The power curves are not linear, because the product is not homogeneous. The layers of corn of 2 cm, 5 cm and 10 cm of height were dehydrated from approximately 53% for 13% in dryness basis, using two drying methods: the exposition of the layer to microwave does not suffer interruption and the second drying method, for which the exposition to microwaves suffers interruption. It is verified, for this second method, that the drying temperature for each layer varied, on the average from 70 °C up to 130 °C and that the interval of drying decreases with the increase of the method used, independent of the applied power.

## 1. – INTRODUÇÃO

Ao se tratar dos problemas relativos à conservação dos grãos armazenados, não se deve deixar de fazer referência ao conteúdo de água do produto, pois este é um dos fatores que regem a conservação de grãos e sementes e deve ser acompanhada do período que antecede a colheita até a sua comercialização (PUZZI, 1986).

Os grãos antes da colheita atingem um grau de maturação fisiológica, que é o ponto de máxima qualidade do produto, pois é nessa fase de maturação que esses grãos atingem o máximo de matéria seca. Ao atingirem a máxima qualidade, os grãos têm um conteúdo de água elevado para a sua conservação, fazendo-se necessária a secagem. Portanto, segundo CAVALCANTI MATA (1997), de todas as operações unitárias utilizadas em processos agroindustriais, a secagem é, provavelmente, a mais importante e a mais comum em todos os setores de processamento de sólidos.

A secagem de grãos ou sementes pode ser definida como um processo termodinâmico, no qual ocorre a diminuição do conteúdo de água desses materiais biológicos, objetivando a conservação da massa do produto para inviabilizar a ação de agentes degenerativos (fungos e bactérias) e reduzir a taxa de respiração dos grãos e bloquear a ocorrência de reações enzimáticas dos grãos.

Para STRUMILLO (1986) a secagem é a remoção de água ou de qualquer outro líquido de um material sólido, na forma de vapor, por meio de uma fase gasosa instaurada, utilizando um mecanismo de vaporização térmica, uma temperatura inferior à de ebulição. A condição necessária e suficiente para que um produto seja submetido ao fenômeno de secagem é que a pressão de vapor d'água sobre a superfície do produto,  $P_{wo}$ , seja maior que a pressão parcial do vapor d'água no ar,  $P_w$ . A cinética da secagem está relacionada com as variações do conteúdo de água médio e temperatura do produto submetido à secagem. A cinética da secagem permite ainda calcular, entre outros parâmetros, o conteúdo de água total do produto, o tempo de secagem e o consumo de energia. Basicamente, só pode ser observado por meio do levantamento das curvas de secagem, ou seja, conteúdo de água  $X$  (kg/kg.s) em função do tempo e velocidade de secagem  $W$

( $\text{kg/m}^2.\text{s}$ ) em função do conteúdo de água médio  $X$  ( $\text{kg/kg.s}$ ) ou ainda da velocidade de secagem  $W$  ( $\text{kg/m}^2\text{s}$ ) em função do tempo.

De acordo com SILVA (1995) a secagem de produtos agrícolas pode ser realizada de duas formas: natural e artificial. Na secagem natural utiliza-se incidência da irradiação solar para reduzir o conteúdo de água do grão, que pode ser feita na própria planta ou então, quando retirada da planta mãe, em terreiros ou painéis solares. A grande desvantagem deste procedimento está na dependência climática para a realização do processo.

Por outro lado, a secagem artificial, que não depende das condições climáticas, consiste em aumentar a velocidade do processo de secagem, utilizando equipamentos denominados secadores. Na secagem artificial, podem-se destacar os secadores de camada estacionária que são muito utilizados nas fazendas e na indústria. Nesses secadores convencionais aplica-se o processo no qual o ar é utilizado como meio de transporte de calor e massa, vindo o ar a ceder uma quantidade de calor para os grãos, reter e transladar uma quantidade de massa de água na forma de vapor. Este processo de aquecimento transfere energia da superfície do grão para o seu interior em tempos longos e com lenta penetração.

A secagem realizada pelos secadores descritos leva em consideração o princípio da transferência de calor e massa pelo sistema difusivo, sendo estimado em um consumo energético de 12% de todo o sistema de produção (ROSSI e ROA, 1988). Desta forma, durante os últimos anos, o crescente aumento do preço e a escassez de energia têm levado vários pesquisadores a procurar novos métodos de secagem no sentido de otimizar o uso de energia.

Com o fim da segunda guerra mundial e devido à grande recessão surgida no período pós-guerra, muitas indústrias e laboratórios de pesquisa tiveram, obrigatoriamente, que redirecionar, adaptar e, sobretudo, criar novas aplicações para os seus produtos, principalmente das válvulas desenvolvidas para o emprego em sistemas de radares. Em face disso, foram desenvolvidas novas e melhores válvulas, cujas aplicações englobavam, também, a área médica. Em nível industrial e comercial, surgiram os primeiros fornos de

microondas, os RADARNGE, sendo que, em meados dos anos 60, começaram a aparecer às primeiras aplicações na secagem de papel (CRAPUCHETTES, 1966).

Segundo FELTRE e SETSUO (1989) os átomos de diferentes eletronegatividades produzem ligações polares e, a cada ligação polar, associa-se um vetor momento polar. Uma molécula pode ter mais de uma ligação polar como, por exemplo, a água. Esses dipolos, embora originalmente dispostos de forma aleatória, tendem a se alinhar com o campo aplicado. Submetidos a um campo alternado de alta frequência, os dipolos passarão a adquirir uma oscilação, de acordo com a frequência do campo aplicado.

Portanto, a eficiência do aquecimento, penetração e absorção seletiva de energia, instantaneidade no controle do processo, entre outras, são algumas vantagens que têm motivado diversos setores da sociedade para a pesquisa e desenvolvimento do aquecimento por campos de altas frequências, dentre os quais encontra-se, principalmente, a secagem.

Predominantemente, os aplicadores mais frequentes em processos de aquecimento e secagem por microondas são três tipos: os aplicadores do tipo forno de multimodo, em processamento descontínuo ou por batelada, cavidades ressonantes multimodo em processamento contínuo e aplicadores de ondas progressivas.

O aplicador do tipo forno de microondas consiste de uma cavidade metálica à qual a energia de microondas é acoplada. Uma vez introduzida a energia no interior da cavidade, as condições de oscilação são estabelecidas. Alguns aplicadores dispõem, muitas vezes, de "espalhadores de ondas" e ou sistemas de movimentação do material no interior da cavidade (pratos giratórios).

Recentemente, a utilização do forno de microondas tem sido apontada como uma das alternativas para uma série de aplicações no meio agrícola como a secagem de grãos. No entanto, um dos problemas, que tem sido assinalado como inibidores à sua implantação, é o fato de que as potências utilizadas são intermitentes e não contínuas o que conduz à falta de precisão dos sistemas de controle. A variação de potência nessas unidades não se dá simplesmente pela diminuição da potência, mas sim, pela utilização da

potência máxima em um pequeno intervalo de tempo, seguido de um intervalo de tempo sem emissão da microonda, resultando, desta forma, em um suposto uso de uma potência média em um determinado intervalo de tempo, como está ilustrado na Figura 1.

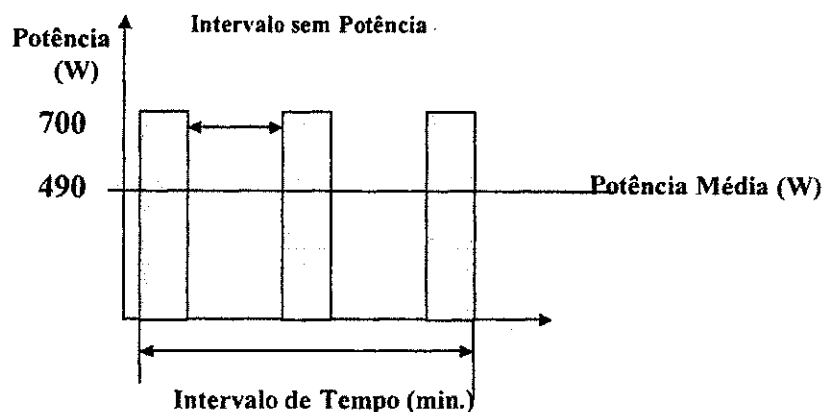


Figura 1 – Processo de geração de uma potência média de 490 watts, no forno microondas.

Este fator tem ocasionado uma falta de homogeneidade na condução de diferentes pesquisas sobre microondas o que tem adiado a sua utilização.

Assim, torna-se necessário envidar esforços no sentido de modificar o processo de emissão de microondas e estudar o comportamento dos produtos agrícolas expostos a potências linearizadas.

Portanto, este trabalho tem como objetivo:

- Desenvolver um secador à base de microondas a partir de modificações de um forno microondas doméstico, projetando-o para trabalhar com potências linearizadas em relação às correntes de anodo;
- Automatizar o sistema de informações de perda de água durante a secagem do milho;
- Estudar a secagem do milho em camadas espessas (2, 5 e 10 cm) para diferentes correntes (50, 100, 150 e 200 mA) de um sistema de potência linearizada;
- Estudar diferentes equações que representem o fenômeno de secagem do milho por microondas.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 – Importância do milho

O milho é produzido em todo o território do Brasil e é uma das principais culturas de subsistência, sendo que no ano de 2001 obteve uma safra alcançando 41,541 milhões de toneladas. No ano de 2000, a safra havia sido de 31,89 milhões de toneladas, e no ano de 2002 girou em torno de 35,500 milhões de toneladas. Em 2003 a expectativa fica em torno de 40,600 milhões de toneladas (BRASIL, 2003).

Em termos de produção, é o milho a segunda espécie mais cultivada no mundo, depois do arroz. Os Estados Unidos respondem por 41% do total da produção mundial; seguidos pela China, com 18%; União Européia com, 7%; e Brasil, com 6%.

Os Estados Unidos mostram-se também os maiores consumidores do cereal, além do excedente de 15% para exportação, o que o transforma no maior exportador mundial. Já a China consome 20% do milho produzido no mundo.

O principal destino do milho, no Brasil, é a alimentação animal, que absorve em média, 65% do total produzido. Portanto, a demanda do cereal mostra-se ligada à cadeia pecuarista, à avicultura e à suinocultura. Das 41,541 milhões de toneladas, produzidas na safra de 2001, 26,4 milhões de toneladas de milho foram destinadas ao consumo animal sendo que 13,5 milhões de toneladas foram absorvidos pela avicultura; 8,6 milhões de toneladas pela suinocultura; 2,8 milhões de toneladas pela pecuária e 1,5 milhões de toneladas por outros animais.

Ainda do total de milho produzido no Brasil, a indústria processou e absorveu cerca de 10% dessa produção; o ser humano foi responsável pelo consumo direto de 3,6% da produção; perdas e sementes, por 0,6%; exportação, por 13,6%; e outros, por 8,7% (BRASIL, 2003).

## 2.2 – Secagem convencional do milho

A existência de uma rede armazenadora bem estruturada não só pode possibilitar a formação de estoques reguladores, mas é uma medida necessária para se contornar as crises de abastecimento por meio da distribuição regular dos produtos e conseqüente diminuição das flutuações de preços, como também pode permitir a estocagem de excedentes exportáveis para atender à demanda do mercado internacional.

Segundo DONZELES (1982), a variedade de um produto, época e método de colheita, percentuais de impurezas, método de secagem, tratamento fitossanitário e condições de armazenamento são parâmetros que definem a qualidade do produto e dão subsídios para determinar o seu grau de deterioração.

Dentre as operações de pós-colheita do milho, sendo as principais acima mencionadas, destaca-se a operação de secagem artificial devido à sua grande importância dentro do sistema de produção agrícola, principalmente em regiões produtoras de grãos, as quais apresentam grandes áreas plantadas onde, no início de cada safra, o produto é colhido com elevado teor de umidade, tornando-se obrigatória a sua secagem para uma armazenagem segura.

De acordo com ROSSI e ROA (1988), a secagem é responsável pelo consumo de 12% de toda a energia do sistema de produção, portanto especial atenção deve ser dada a esta operação unitária, principalmente quando se visa baixar os custos de produção.

Dada a importância econômica e social do milho, a escassez de energia e o aumento em seu custo de produção, torna-se necessário estudar os sistemas de secagem encontrados no mercado, a fim de avaliar os seus desempenhos energético e operacional.

### 2.2.1 – Cinética da secagem convencional

A cinética da secagem está relacionada com as variações do conteúdo de umidade médio e temperatura do produto submetido à secagem. A cinética da secagem permite ainda calcular, entre outros parâmetros, o conteúdo de umidade total do produto, o tempo de secagem e o consumo de energia. A curva de conteúdo de umidade  $X(\text{kg}/\text{kg}_s)$  vs. tempo

é obtida relacionando a massa de água contida no sólido com a massa do sólido seco (massa resultante no produto, quando toda a sua umidade for eliminada) de acordo com a seguinte expressão:

$$X\% = \frac{M_a}{M_s} \cdot 100, [\text{kg/kg}] \quad (2.1)$$

em que:

$M_a$  = massa de água [kg];

$M_s$  = massa de matéria seca [kg].

Na Figura 2 encontra-se, genericamente, a curva de conteúdo de água de um produto em função do tempo, típica de um processo de secagem convencional em camada fina, pelo sistema convectivo.

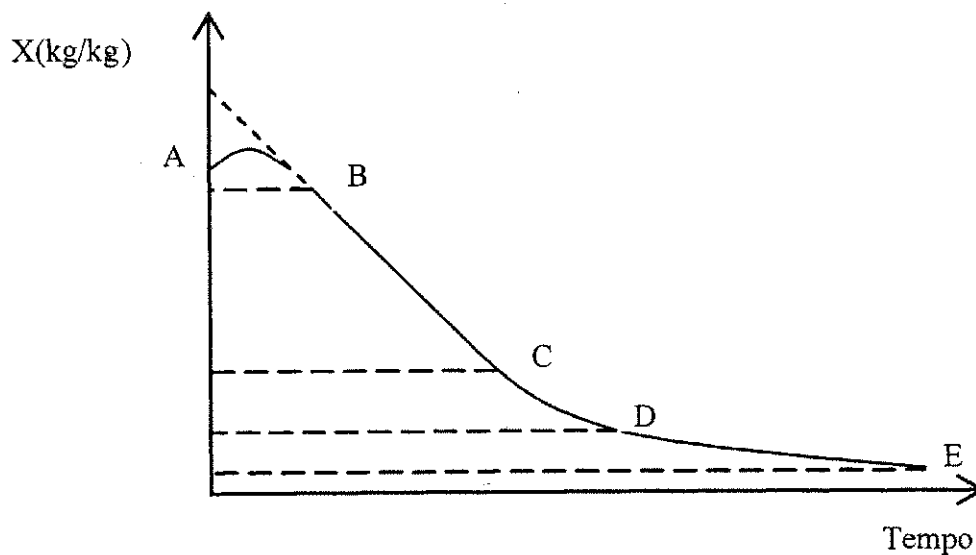


Figura 2 – Curva típica de um processo de secagem de um produto agrícola pelo sistema convectivo.

A curva de umidade, como apresenta na Figura 2, consiste de quatro períodos, a saber:

- a) Período AB – também chamado de período transitório da secagem. Neste, todas as inicializações do processo são realizadas, ou seja, estabelecem-se os gradientes de transferência de massa e temperatura;
- b) Período BC – período de velocidade constante, representado graficamente por uma característica linear;
- c) Período CD e DE – períodos de velocidades decrescentes.

### 2.2.2 – Secagem em camada fina

De acordo com BROOKER et al. (1992), a secagem de produtos agrícolas em camada fina apresentam duas fases distintas:

- a) taxa constante de secagem e
- b) taxa decrescente de secagem.

A fase de taxa constante de secagem de produtos biológicos pode ser observada quando os produtos têm alto conteúdo de água inicial (acima de 70-75%, base úmida [b.u]). Normalmente, acima dessa faixa de conteúdo de água, a resistência interna ao transporte de água é muito menor que a resistência externa à remoção de água da superfície. Já a fase de taxa decrescente caracteriza-se pela descontinuidade da camada de água na superfície de evaporação. A resistência interna ao transporte de vapor de água torna-se maior que a resistência externa.

Vários mecanismos físicos têm sido propostos para descrever a transferência de massa (conteúdo de água) em produtos capilares porosos, tais como (FORTES 1980):

- a) difusão de líquido, em virtude do gradiente de concentração;
- b) difusão de vapor, em virtude do gradiente de pressão;
- c) movimento de água, em virtude das forças capilares;
- d) fluxo de líquido e vapor, em virtude da diferença de pressão total, causada por pressão externa, contração, alta temperatura e capilaridade;

- e) escoamento por efusão, que ocorre quando o caminho livre das moléculas de vapor é da ordem do diâmetro dos poros;
- f) movimento do líquido, em virtude da força gravitacional; e
- g) difusão superficial, praticamente desprezível.

### 2.2.2.1– Equações empíricas de secagem em camada fina

CAVALCANTI MATA (1997), estudando a secagem de milho debulhado, em camada fina, propôs uma expressão derivada da equação de Fick (2.3) para representar o processo de secagem em toda a sua extensão.

$$RU = \frac{U - U_e}{U_i - U_e} = e^{-kt^\eta}, \quad (2.2)$$

em que:

- $\eta$  - constante empírica, adimensional;
- $t$  - tempo de secagem [h];
- $k$  - constante de secagem [ $h^{-1}$ ];
- $RU$  - razão de umidade;
- $U$  - conteúdo de água [% base seca];
- $U_e$  - conteúdo de água de equilíbrio [% base seca];
- $U_i$  - conteúdo de água inicial [% base seca].

A teoria de difusão líquida tem como modelo matemático a equação de Fick, considerando que o fluxo de umidade no interior do sólido é gerado por um gradiente de concentração. A seguinte equação é válida:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D \nabla M), \quad [1/s] \quad (2.3)$$

em que:

- $\frac{\partial M}{\partial t}$  - taxa de difusão [1/s];
- $D$  - coeficiente de difusão [ $m^2/s$ ];

$M$  – conteúdo de água [kg/kg];

$\nabla$  - operador Del;

$\nabla \cdot$  - divergente;

o  $\nabla$  é definido por:

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z}.$$

THOMPSON et al. (1968) propuseram a seguinte equação para secagem de milho, em temperatura de 60 a 149 °C:

$$t = A \ln(RU) + B(\ln(RU))^2, \quad (2.4)$$

em que:

$t$  – é o tempo de secagem [h];

$A$  – 1,86178 + 0,00488 T;

$B$  – 427,3640 exp (-0,03301 T).

em que:

$T$  - temperatura do ar de secagem [°F].

### 2.2.3 – Secagem em camadas espessas

VAN REST e ISAACS (1968) evidenciaram que, em se tratando de teoria de secagem, o estudo da secagem de grãos, em camadas espessas, fundamenta-se nas características de secagem dos grãos em camadas finas. Desse modo, HUKILL (1974), citado por VAN REST e ISAACS (1968), desenvolveram um modelo para secagem em camada espessa, considerando as características de secagem dos grãos em camadas finas.

Segundo Hukill citado por BROOKER et al. (1992), as expressões para calcular o teor de umidade dos grãos e a temperatura do ar, durante os processos de secagem em camadas espessas, em função do tempo de secagem e da posição do grão na camada, são dadas a seguir:

$$M = (M_o - M_e) \cdot \frac{e^{c \cdot x}}{e^{c \cdot x} + e^{k \cdot \theta} - 1} + M_e, \quad (2.5)$$

$$T = (T_o - T_g) \cdot \frac{e^{k \cdot T}}{e^{c \cdot x} + e^{k \cdot \theta} - 1} + T_g, \quad (2.6)$$

$$c = \frac{k \cdot (M_o - M_e)}{p \cdot (t_o - t_g)}, \quad (2.7)$$

$$p = \frac{600 \cdot Q \cdot Sa}{W \cdot V}. \quad (2.8)$$

em que:

$M$  – conteúdo de água do grão no tempo  $\theta$ , na altura  $x$  [% base seca];

$T$  – temperatura do ar no tempo  $\theta$ , na altura  $x$  [°C];

$c$  – constante de resfriamento [ $m^{-1}$ ];

$x$  – altura da espessura da camada [m];

$\theta$  – intervalo de tempo [h];

$k$  – constante de secagem [ $h^{-1}$ ];

$e$  – base dos logaritmos neperianos;

$Q$  – fluxo de massa de ar por unidade de área da seção transversal da massa de grãos, normal ao fluxo de ar [ $kg \cdot min^{-1} \cdot m^{-2}$ ];

$Sa$  – calor específico do ar [ $kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ ];

$W$  – massa específica da matéria seca contida nos grãos [ $kg \cdot m^{-3}$ ];

$V$  – calor latente de vaporização da água contida nos grãos [ $kJ \cdot kg^{-1}$ ];

$T_g$  – temperatura do ar na saída da massa de grãos, quando este está em equilíbrio higroscópico com o grão [°C];

$T_o$  – temperatura inicial do ar de secagem [°C];

$M_o$  – conteúdo de água inicial do grão [% base seca];

$M_e$  – conteúdo de água de equilíbrio higroscópico do grão [% base seca];

$P$  – constante para determinar condição de secagem [ $m/mim \cdot ^\circ C$ ].

BAKKER – ARKEMA et al. (1978) afirmaram que, comumente os secadores convencionais são avaliados em função de sua capacidade horária, sendo que a energia específica raramente é considerada. Informaram que os parâmetros avaliados no campo são: a) dos grãos: tipo de grãos, conteúdo de água inicial e final (% b.u), temperatura inicial e final ( $^{\circ}\text{C}$ ), conteúdo de água inicial e final da impureza (%), massa específica aparente inicial e final ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), massa do produto úmido (kg) e índices de qualidade; b) do ar: temperatura do ar ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ ), temperatura do ar de secagem ( $^{\circ}\text{C}$ ) e umidade relativa (%); c) do secador: fluxo de ar ( $\text{m}^3\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{t}^{-1}$ ), volume ( $\text{m}^3$ ) ou fluxo de grãos ( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ), tempo de secagem (h) ou comprimento da coluna de secagem (m), tempo de resfriamento (h) ou comprimento da coluna de resfriamento (m), largura da coluna de secagem (m), pressão estática (mmca), tempo de carga (h) e tempo de descarga, (h); d) de energia: ventilador e transportadores ( $\text{kWh}\cdot\text{ lote}^{-1}$ ) ou ( $\text{kWh}\cdot\text{h}^{-1}$ ) e o tipo e quantidade de combustível ( $\text{kJ}\cdot\text{h}^{-1}$  ou  $\text{kJ}\cdot\text{ lote}^{-1}$ ); e) do desempenho: duração do teste ou volume de produto úmido (h ou  $\text{m}^3$ ), água removida (% b.u), capacidade de secagem de produto úmido ( $\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ ), consumo específico de energia para secagem, sem energia elétrica e com energia elétrica ( $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  de água evaporada). Na Figura 3 pode-se verificar as partes principais que integra um secador convencional em camada fina.

- |                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| A = unidade condicionadora de ar    | 1, 2, 3 = chave de contato                  |
| B = duto de aquecimento de ar       | G = auto transformador de voltagem (variac) |
| C = duto de condução do ar aquecido | t = termostato                              |
| D = corpo do secador                | h = bandeja de secagem                      |
| E = Diafragma                       |   |

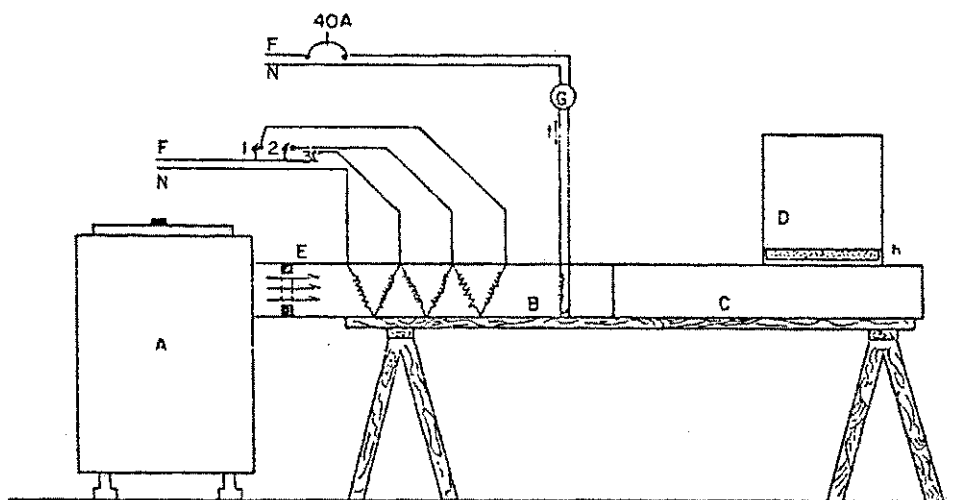


FIGURA 3 – Secador convencional para secagem de milho em camada fina.



## 2.3 – Fundamentos do aquecimento por microondas

### 2.3.1 – Equações de Maxwell

A teoria eletromagnética fundamenta-se, como toda teoria, em certos postulados entre os quais se incluem as famosas Equações de Maxwell. Muitos problemas da engenharia de microondas envolvem o uso dessas equações, que governam os campos eletromagnéticos e em sua forma puntual, são representadas pelas seguintes equações:

$$\nabla_x \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (2.9)$$

em que:

$\vec{E}$  - vetor intensidade de campo elétrico [V/m];

$\vec{B}$  - vetor densidade de fluxo magnético [Wb/m<sup>2</sup>];

$\nabla$  - operador Del;

$\nabla_x$  - rotacional.

o  $\nabla$  é definido por:

$$\nabla = i \frac{\partial}{\partial x} + j \frac{\partial}{\partial y} + k \frac{\partial}{\partial z},$$

$$\nabla_x \vec{H} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \vec{J}, \quad (2.10)$$

em que:

$\vec{H}$  - vetor intensidade de campo magnético [A/m];

$\vec{D}$  - vetor densidade de fluxo elétrico [C/m<sup>2</sup>];

$\vec{J}$  - vetor densidade corrente de condução [A/m<sup>2</sup>].

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho, \quad (2.11)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0, \quad (2.12)$$

em que :

$\nabla \cdot$  - divergente.

As equações acima não são independentes entre si. A Equação (2.9) é a lei de indução de Faraday na forma puntual ou diferencial, pois o rotacional de um vetor é a integral de linha deste vetor em torno de um contorno fechado infinitesimal, dividido pela área da superfície delimitada, quando esse volume tende para zero por este contorno. Já a Equação (2.10) é a forma generalizada da Lei Circuitual de Ampere. A generalização ocorre pelo acréscimo do termo  $\partial \vec{D} / \partial t$ , o qual é chamado de densidade de corrente de deslocamento. A Equação (2.11) é a forma diferencial da lei de Gauss, enquanto a equação (2.12) expressa a inexistência de "cargas magnéticas" ou pólos magnéticos isolados, pois as linhas de fluxo magnético formam um sistema de laços fechados.

Existem ainda as relações constitutivas, que são equações que relacionam os vetores densidade de fluxo com os vetores intensidade de campo.

$$\vec{B} = \mu^* \vec{H}, \quad (2.13)$$

$$\vec{D} = \epsilon^* \vec{E}, \quad (2.14)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}, \quad (2.15)$$

Aos Quais  $\mu^* = \mu' - j\mu''$  representa a permeabilidade magnética complexa do material, enquanto  $\epsilon^* = \epsilon' - j\epsilon''$  é a permissividade elétrica complexa e  $\sigma$  é a condutividade elétrica.

### 2.3.2 – Introdução às ondas eletromagnéticas e espectro de frequência

Há mais de 100 anos, J.C.Maxwell desenvolveu a teoria clássica do eletromagnetismo, ele previu que uma onda eletromagnética tem associados um campo elétrico E um campo magnético H, que obedecem às equações de campo de Maxwell . A teoria de Maxwell prevê que E e H devem ser perpendiculares entre si e à direção de propagação e portanto E deve ser perpendicular ao eixo x como ilustrado na Figura 4. Se

for escolhida a direção de  $E$  como a do eixo  $y$ , o plano de polarização é assumido, por convenção como o plano  $yx$  ou o plano que contém  $E$  e a direção de propagação.

A frequência  $f$  da onda é o número completo de ciclos por segundo em um ponto. Como o período  $T$  representa o tempo necessário para um ciclo, então  $f = 1/T$ . O comprimento de onda  $\lambda$  é a distância mais curta ao longo da qual a onda se repete. Desde que a onda viaje a uma distância de um comprimento de onda em um tempo de um período, a velocidade  $c$  a que qualquer onda se desloca através do espaço é  $c = \lambda/T$  ou  $c = f\lambda$ . A onda apresentada na Figura 4 é então descrita por:

$$E = E_o \text{sen}(\omega t - \beta x), \quad (2.16)$$

$$H = H_o \text{sen}(\omega t - \beta x), \quad (2.17)$$

em que:

$E$  – intensidade de campo elétrico instantâneo [V/m];

$E_o$  – intensidade de campo elétrico [V/m];

$H$  – intensidade de campo magnético instantâneo [A/m];

$H_o$  – Intensidade de campo magnético [A/m];

$\omega = 2\pi f$  e  $\beta = 2\pi/\lambda$ ;

$\omega$  – frequência angular [rad/s];

$\beta$  – fator de fase da onda [ $m^{-1}$ ].

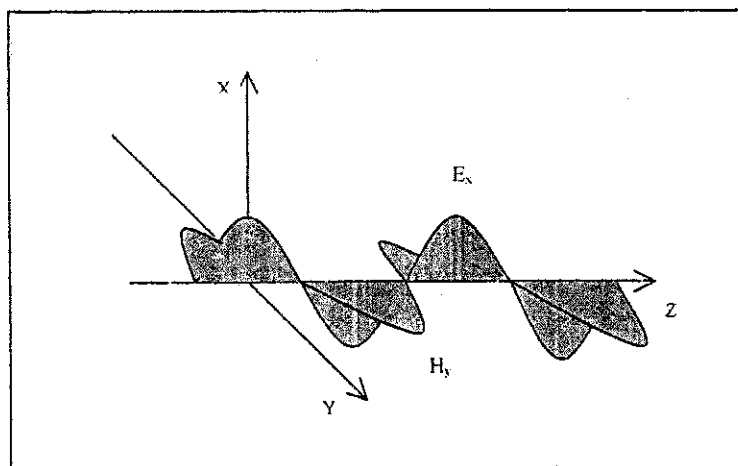


FIGURA 4 – Onda eletromagnética plana uniforme.

Convencionou-se chamar de microondas as frequências compreendidas na faixa entre 300 MHz a 300 GHz (comprimento de onda entre 1m e 1mm), sendo que as frequências de microondas permitidas para utilização em aquecimento são:  $915 \pm 25$  MHz,  $2.450 \pm 50$  MHz,  $5.800 \pm 75$  MHz e  $24.225 \pm 125$  MHz.

As microondas, como a luz, irradiam através do espaço com velocidade de  $3 \cdot 10^8$  m/s. As microondas podem ser refletidas, como a luz em um espelho, tal como uma chapa metálica, e são refratadas, tal como é a luz, sobre uma interface dielétrica. As microondas podem também ser focalizadas, mas, ao em vez de sistemas de espelhos e lentes utilizados em óptica, é comum empregar refletores parabólicos ou antenas tipo corneta. Microondas são também absorvidas por muitas substâncias e mostram fenômenos de interferências. Nas frequências das microondas a difração é uma propriedade importante. O fenômeno da difração complica enormemente a previsão dos campos que prevalecem quando um objeto é exposto à energia das microondas.

Na Tabela 1 encontra-se o espectro de frequência eletromagnética dividido a partir do comprimento de onda  $\lambda$ , que é calculado pela equação:

$$\lambda = c/f, \quad (2.18)$$

em que:

c – velocidade da luz no espaço livre ( $\approx 3 \times 10^8$  [m/s]);

f – frequência [Hz].

Tabela 1 – Espectro de frequências eletromagnéticas

Faixa de frequência	Comprimento de onda	Nomenclatura
30 a 300 Hz	10.000 a 1.000 km	ELF Frequência Extremamente Baixa
300 a 3.000 Hz	1.000 a 100 km	VF Frequência de Voz
3 a 30 KHz	100 a 10 km	VLF Frequência Muito Baixa
30 a 300 KHz	10 a 1 km	LF Frequência Baixa
300 a 3.000 KHz	1.000 a 100 m	MF Frequência Média
3 a 30 MHz	100 a 10 m	HF Frequência Alta
30 a 300 MHz	10 a 1 m	VHF Frequência Muito Alta
300 a 3.000 MHz	1.000 a 100 mm	UHF Frequência Ultra Alta
3 a 30 GHz	100 a 10 mm	SHF Frequência Super Alta
30 a 300 GHz	10 a 1 mm	EHF Frequência Extremamente Alta

Fonte: ROCHA (1999)

### 2.3.3 - Conversão da energia eletromagnética em calor

Nos processos tradicionais de transferência de calor, basicamente a transferência de calor é feita por três processos: Condução, convecção e irradiação.

Na condução, o material a ser aquecido é colocado em contato com a fonte de calor.

Já no processo por convecção há a necessidade de um meio (geralmente o ar) para a transferência de calor da fonte para o material.

No processo de irradiação destaca-se o aquecimento por campos eletromagnéticos ou eletrônicos, em que o aquecimento é diretamente no interior do material.

Existem três tipos de aquecimento eletrônico, isto é, o aquecimento por indução, o aquecimento por microondas e o dielétrico.

O aquecimento por indução baseia-se na indução de correntes parasitas no material provocados por uma corrente alternada circulando por um enrolamento que envolve o material, o acoplamento da energia é por meio do campo magnético.

O aquecimento dielétrico ou por radiofrequência envolve o aquecimento de materiais dielétricos. O material a ser aquecido é colocado entre dois eletrodos que podem ser de muitos tipos, dentre os quais tem-se: o de placas paralelas, o de campo espalhado e o de campo em zigue-zague.

O terceiro tipo de aquecimento eletrônico, ou por microondas, é também do tipo dielétrico, diferindo do anterior, principalmente, nas frequências empregadas e na maneira pela qual o aquecimento é conduzido, utilizando aplicadores do tipo cavidade ressonante ou guias de ondas.

Existem vários mecanismos em escala molecular e atômica para a conversão de energia de microondas em energia térmica. Para SHIFFMANN (1987), entretanto, no aquecimento de alimentos por microondas, apenas a condução iônica e a rotação polar são de maior interesse.

#### **2.3.3.1 – Condução iônica**

A condução iônica ocorre quando os íons de um material movem-se em resposta a um campo elétrico. Os íons são cargas unitárias e podem ser aceleradas por campos elétricos na direção oposta à de sua polaridade. A energia cinética que os íons adquirem é fornecida pelo campo externo aplicado. Esses íons acelerados colidirão com outras moléculas ionizadas ou não, transferindo parte de sua energia cinética para o deslocamento dessas moléculas (que tenderão a colidir com outras), sendo uma outra parte dessa energia dissipada sob forma de calor. Para frequências na faixa de microondas, por exemplo, 2450 MHz, numerosas colisões ocorrerão e muito mais calor será gerado.

#### **2.3.3.2 – Rotação dipolar**

Muitas moléculas, tais como a da água, são de natureza dipolar, ou seja, possuem um centro de cargas assimétrico assemelhando-se aos dipolos elétricos. Esses dipolos são influenciados pela ação de um campo eletromagnético externo, da mesma forma que um dipolo elétrico. Embora tais dipolos estejam normalmente orientados aleatoriamente, eles tentarão se alinhar com o campo aplicado. Contudo, sob a influência de um campo externo alternado, esses dipolos passarão a adquirir uma oscilação, ora em um sentido ora em

outro, de acordo com a frequência do campo aplicado. A rotação dipolar é representada, esquematicamente, na Figura 5.

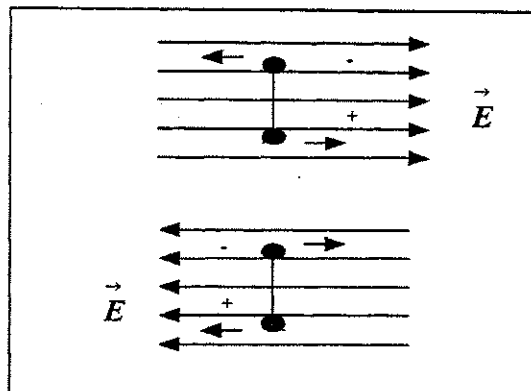


FIGURA 5 – Processo de rotação de um dipolo sob a influência de um campo elétrico alternado.

#### 2.3.4 – Propriedades dielétricas dos alimentos

O aquecimento por microondas, nas frequências geralmente empregadas no processamento industrial, ou seja, 915 e 2450 MHz, resulta de interações dos constituintes químicos dos produtos com um campo eletromagnético. Tais interações conduzem a uma geração de calor instantânea dentro do produto, devido a um “atrito molecular”, primariamente por uma ruptura de pontes de hidrogênio fracas, associados com a rotação dos dipolos de moléculas de água e com a migração de sais livres, em um campo elétrico de rápida mudança de polaridade.

Os materiais em geral, com exceção dos metais, e os materiais biológicos, em particular, podem ser visualizados como dielétricos não ideais de um capacitor, que possuem a habilidade de armazenar e dissipar energia elétrica de um campo eletromagnético, por meio de um conjunto de propriedades elétricas expressas em notação complexa, e caracterizadas como “permissividade dielétrica”, uma propriedade elétrica complexa com um componente real, constante dielétrica, e um componente imaginário, fator ou constante de perdas. A propriedade elétrica de interesse básico em microondas é a permissividade elétrica. Essa propriedade, reflete a capacitância do material em armazenar e dissipar energia eletromagnética. As propriedades dielétricas de um material são definidas pelas Equações (2.19), (2.20) e (2.21):

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'', \quad (2.19)$$

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}, \quad (2.20)$$

em que:

$\varepsilon^*$  - permissividade elétrica complexa do material [F/m];

$\varepsilon'$  - constante dielétrica do material [F/m];

$\varepsilon''$  - fator de perdas do material [F/m].

ou, em termos de permissividade complexa relativa,

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r' - j\varepsilon_r'', \quad (2.21)$$

em que:

$\varepsilon_r$  - permissividade elétrica relativa complexa do material [F/m];

$\varepsilon_r'$  - constante dielétrica relativa do material [F/m];

$\varepsilon_r''$  - fator de perdas relativa do material [F/m],

em que:

$\tan \delta$  - tangente de perdas [-].

Já as características indutivas dos materiais estão relacionados com a resistência e a indutância do material e são definidas por um conjunto de propriedades as quais podem ser expressas em termos da permeabilidade magnética complexa do material,

$$\mu^* = \mu' - j\mu'', \quad (2.22)$$

em que:

$\mu^*$  - permeabilidade magnética complexa do material [H/m];

$\mu'$  - permeabilidade magnética [kg.m/c<sup>2</sup>];

$\mu''$  - fator de perdas magnéticas [kg.m/c<sup>2</sup>].

#### 2.3.4.1 – Variação da permissividade elétrica com o conteúdo de água

As propriedades dielétricas dos produtos líquidos e semi-sólidos dependem, primeiramente, dos seus conteúdos de água, sais e sólidos. Muitas aplicações envolvem a remoção de água de um produto, conseqüentemente as variações de  $\varepsilon_r'$  e  $\varepsilon_r''$  com o



conteúdo de água de um produto têm grande importância no projeto de dispositivos de secagem e ou aquecimento por microondas.

A variação do fator de perdas com o conteúdo de água  $X$  de um material está representada, qualitativamente, no gráfico da Figura 6.

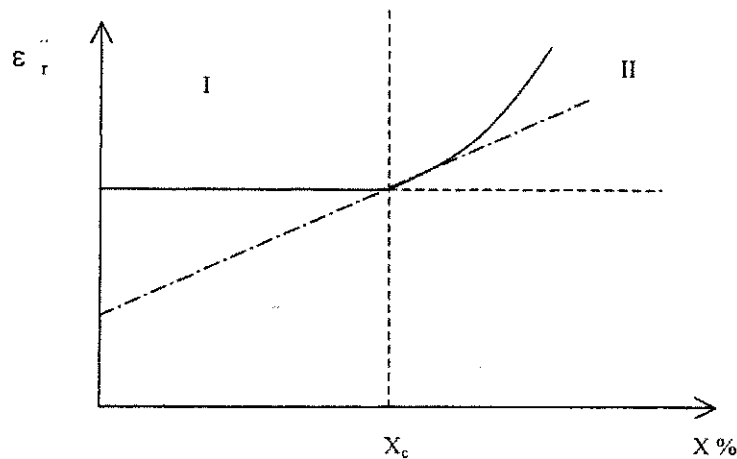


FIGURA 6 – Modelo aproximado da variação de  $\epsilon_r''$  com  $X$ .

Pode-se relacionar, na curva da Figura 6, duas regiões distintas aos dois estados da água no material, caracterizadas pela inclinação  $d\epsilon_r''/dX$ . A inclinação menos acentuada (relativa ao eixo  $X\%$ ), para baixos conteúdos de água, está relacionada à água ligada (região I), enquanto que, para conteúdos de água do produto, a inclinação (mais acentuada) relaciona-se com a água livre (região II). A mudança da inclinação ocorre para um conteúdo crítico  $X_c$ . Porém, alguns materiais exibem de forma gradual esta mudança, proporcionando grande dificuldade na identificação das regiões.

#### 2.3.4.2 – Variação da permissividade elétrica com a temperatura

Sabe-se que muitos produtos, sobretudo os alimentos, contêm uma grande quantidade de água, conseqüentemente, suas propriedades dielétricas comportam-se de forma similar às da água, quando representadas em função da temperatura como apresentado na Figura 7.

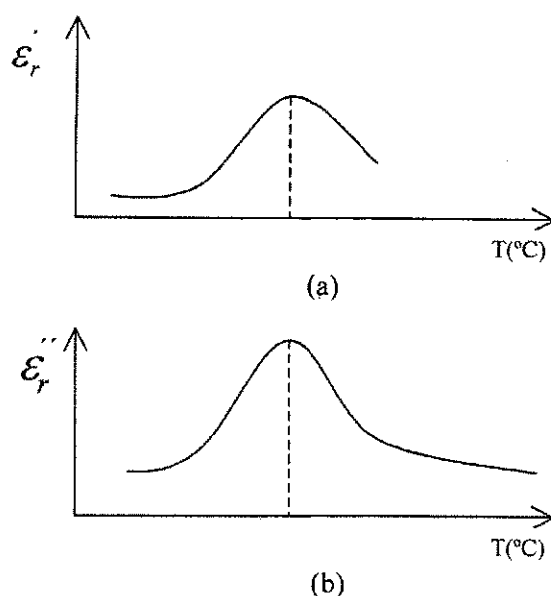


FIGURA 7 – Variação da permissividade elétrica com a temperatura.

Ambos  $\epsilon_r'$  e  $\epsilon_r''$  apresentam grandes aumentos com a temperatura próximo ao ponto de descongelamento do material, decrescendo posteriormente, exceto para produtos salinos. A partir daí, o decréscimo das perdas polares com a temperatura ( para a frequência de 2,8 GHz) é equilibrado por um aumento das perdas por condutividade, resultando em um  $\epsilon_r'$ , praticamente constante com a temperatura. Contudo, quando a frequência fica abaixo de 1 GHz, as perdas por condutividade dominam sobre as perdas dipolares e  $\epsilon_r''$  aumenta com a temperatura (METAXAS, 1988).

#### 2.3.4.3 – Variação da permissividade elétrica com a frequência

As propriedades dielétricas dos materiais variam consideravelmente com a frequência do campo aplicado, com exceção de alguns materiais de baixíssimas perdas, isto é, materiais que absorvem pouca ou quase nenhuma energia. O comportamento dessas propriedades no início da faixa de microondas é diferente daquela no final da faixa.

As propriedades dielétricas de materiais polares são descritas pelas equações de Debye citado por CASTRO (1999), expressas por:

$$\epsilon_r' = \epsilon_{r\infty}' + \frac{(\epsilon_{rs}' - \epsilon_{r\infty}')}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad (2.23)$$

$$\epsilon_r'' = \frac{(\epsilon_{rs}' - \epsilon_{r\infty}')\omega}{1 + \omega^2 \tau^2}, \quad (2.24)$$

em que:

$\epsilon_{rs}'$  - constante dielétrica estática ou DC [F/m];

$\epsilon_{r\infty}'$  - permissividade elétrica para as altas frequências [F/m];

$\omega$  - frequência em radianos [rad/s];

$\tau$  - tempo de relaxação [ $\mu$ s].

As relações definidas pelas Equações (2.23) e (2.24) estão representadas graficamente na Figura 8.

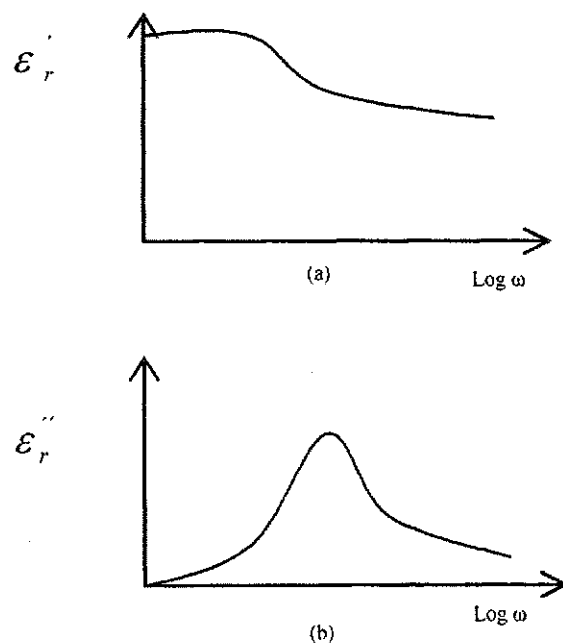


FIGURA 8 – Variação da permissividade dielétrica com a frequência.

### 2.3.4.4 – Variação da permissividade elétrica com a densidade volumétrica

Sabendo-se que a influência de um campo eletromagnético num dielétrico depende da massa total que interage com o campo, a massa por unidade de volume, ou densidade, terá efeito nas propriedades dielétricas dos materiais. Isto é observado, principalmente, em materiais particulados, tais como os granulados ou pulverizados.

Em alguns casos práticos, há necessidade de se conhecer as propriedades do material sólido como acontece com os cereais, onde os seus núcleos são pequenos demais para se fixarem nos dispositivos utilizados para as medidas da amostra.

### 2.3.5 – Propagação de ondas em meios ilimitados

O aquecimento por microondas está relacionado com a conversão da energia eletromagnética em calor, sendo essa transportada através do espaço livre ou de qualquer outro meio pelas ondas eletromagnéticas. As ondas planas, caracterizadas pela frente de onda de possuir uma superfície equifásica plana infinita, em instantes de tempos fixos, é a solução mais simples da equação de onda. As ondas planas uniformes têm a propriedade de, para qualquer instante de tempo fixo, apresentar os vetores  $\vec{E}$  e  $\vec{H}$  uniformes sobre as superfícies planas.

A equação de onda para o caso particular onde  $\vec{E}$  tenha componente somente na direção “x” e  $\vec{H}$  somente em “y” é mostrado a seguir como:

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + \omega^2 \mu^* \varepsilon^* E_x = 0, \quad (2.25)$$

em que:

$E_x$  – campo elétrico na direção x [V/m];

$\omega$  – frequência angular [rad /s];

$\mu^*$  - permeabilidade magnética complexa do material [H/m];

$\varepsilon^*$  - permissividade elétrica complexa do material [F/m];

$z$  – profundidade na direção do eixo z [m].

Transformando-se esta equação em uma equação diferencial ordinária, a solução será da forma:

$$E_x = E_m^+ e^{-\gamma z} + E_m^- e^{+\gamma z}, \quad (2.26)$$

em que:

$E_x$  – campo elétrico na direção x [V/m];

$E_m^+$  – amplitude complexa da onda [V/m];

$E_m^-$  – amplitude complexa da onda [V/m];

$z$  – profundidade na direção do eixo z [m];

$\gamma$  - constante de propagação complexa da onda [1/m].

em que  $E_m^+$  e  $E_m^-$  são as amplitudes complexas da onda propagante nas direções positivas e negativas de z, respectivamente  $\gamma$  é a constante de propagação dada por:

$$\gamma = \alpha + j\beta, \quad (2.27)$$

sendo  $\alpha$  a constante de atenuação e  $\beta$  a constante de fase. Para um meio sem perdas (espaço livre) a  $\alpha$  é igual a zero e  $\beta = \omega\sqrt{\mu^*\epsilon^*}$ . Por outro lado, para regiões com perdas, de modo geral, tem-se:

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu^*\epsilon^*}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\epsilon^{*2}}} - 1 \right]}, \text{ [Np/m]} \quad (2.28)$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu^*\epsilon^*}{2} \left[ \sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2\epsilon^{*2}}} + 1 \right]}, \text{ [rad/m]} \quad (2.29)$$

em que:

$\sigma$  – condutividade do material [U/m];

$\mu^*$  - permeabilidade magnética complexa do material [H/m];

$\epsilon^*$  - permissividade elétrica complexa do material [F/m];

$\omega$  – frequência angular [rad/s].

### 2.3.6 – Reflexão e transmissão de ondas planas

Quando uma onda eletromagnética plana, que se propaga em um determinado meio e encontra um segundo meio com características diferentes ( $\epsilon$ ,  $\mu$ ,  $\sigma$ ), será parcialmente transmitida e parcialmente refletida.

A incidência de uma onda plana uniforme, sob um ângulo  $\Phi$ , em uma fronteira formada por dois meios dielétricos, resulta em uma onda refletida, sob um ângulo  $\theta$  com a normal, no meio de incidência e uma onda transmitida (ou refratada) no segundo meio sob um ângulo  $\psi$  com a normal, tal como apresentado na Figura 9.

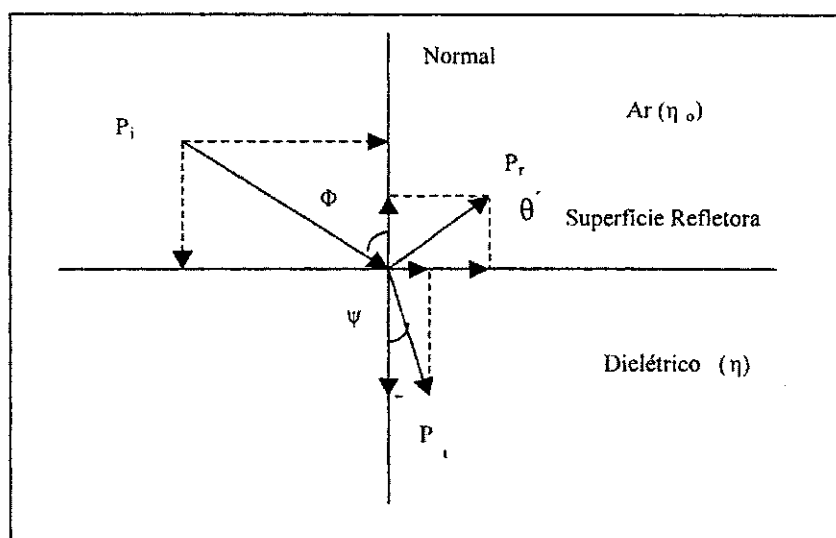


FIGURA 9 – Reflexão e transmissão da energia das microondas.

Uma onda eletromagnética que se propaga no ar e atinge a superfície de um material, a um certo ângulo de incidência, é parcialmente refletida e parcialmente transmitida. As magnitudes relativas dependem do grau de discrepância das impedâncias entre o material e o ar. Maior a disparidade, mais a energia incidente será refletida da interface ar-material e menos será transmitida ao produto.

A relação de potência refletida para a onda que se choca contra a superfície a um ângulo de incidência é, então:

$$R_n = (\eta_0 \cos \psi - \eta \cos \phi) / (\eta_0 \cos \psi + \eta \cos \phi), \quad (2.30)$$

$$T_n = (4\eta_0 \eta \cos \psi \cos \phi) / (\eta_0 \cos \psi + \eta \cos \phi)^2, \quad (2.31)$$

em que:

$\eta_o$  – impedância intrínseca do ar [ $\Omega$ ];

$\eta$  - impedância intrínseca do produto [ $\Omega$ ];

$\psi$  - ângulo de refração da onda no dielétrico [rad];

$\Phi$  – ângulo de incidência da onda no espaço livre [rad].

As razões das potências refletidas e transmitidas para a potência incidente, respectivamente, podem ser calculadas para produtos homogêneos a partir das impedâncias intrínsecas do ar e do produto, e dos ângulos de incidência e reflexão relacionados à equação de Descartes ( ou Snell),

$$\text{sen } \psi = \frac{\eta}{\eta_o} \cdot \text{sen } \phi, \quad (2.32)$$

em que:

$\eta_o$  – impedância intrínseca do ar [ $\Omega$ ];

$\eta$  - impedância intrínseca do produto [ $\Omega$ ];

$\psi$  - ângulo de refração da onda no dielétrico [rad];

$\Phi$  – ângulo de incidência da onda no espaço livre [rad].

### 2.3.7 – Absorção de energia de microondas

A absorção da energia das microondas dentro de um produto pode ser expressa por um fator de atenuação  $\alpha$ , que está relacionado com as propriedades dielétricas do produto. A propagação de uma onda plana em um material dielétrico é caracterizada por um fator de atenuação  $\alpha$  e por um fator de fase  $\beta$  (constante de fase), de acordo com as relações:

$$\gamma = \alpha + j\beta, \quad (2.33)$$

$$\gamma = j\omega\sqrt{\epsilon^* \mu^*}, \quad (2.34)$$

em que:

- $\gamma$  - constante de propagação complexa da onda [1/m];
- $\alpha$  - constante de atenuação [Np/m];
- $\beta$  - constante de fase [rad/m];
- $\mu^*$  - permeabilidade magnética complexa do material [H/m];
- $\varepsilon^*$  - permissividade elétrica complexa do material [F/m];
- $\omega$  - frequência angular [rad/s].

O componente real ou fator de atenuação  $\alpha$  está relacionado com a aptidão do material em atenuar ou absorver a energia elétrica acoplada pelo material de um campo eletromagnético e é o principal determinante da distribuição energética em materiais dielétricos homogêneos.

A profundidade a partir de uma superfície irradiada, na qual a intensidade do campo elétrico foi reduzida a 1/e do seu valor na superfície, sendo a penetração (VON HIPPEL, 1954), é dada por:

$$Z = \frac{1}{\alpha} = \frac{\lambda_0}{2\pi} = \left[ \frac{2}{\varepsilon' [(1)]} \right], [\text{m}] \quad (2.35)$$

em que:

- $Z$  - Profundidade na direção do eixo z [m];
- $\alpha$  - constante de atenuação [Np/m];
- $\varepsilon_r$  - constante dielétrica relativa do material [F/m];
- $\tan\delta$  - tangente de perdas [-];
- $\lambda_0$  - comprimento de onda no vácuo [m].

isto é, o fator de atenuação  $\alpha$  é dado por,

$$\alpha \cong 1,482 \cdot 10^{-8} f_0 \{ \varepsilon_r' [(1 + \tan^2 \delta)^{1/2} - 1] \}^{1/2}, [\text{m}^{-1}] \quad (2.36)$$



em que:

$\alpha$  - constante de atenuação [Np/m];

$f_0$  - frequência no vácuo [Hz];

$\epsilon_r$  - constante dielétrica relativa do material [F/m];

$\tan \delta$  - tangente de perdas [-].

a potência dissipada no interior de um dielétrico é dada por,

$$P_v = \frac{\omega \epsilon'' E_m^2}{2}, \text{ [W/m}^3\text{]} \quad (2.37)$$

em que:

$P_v$  - potência dissipada por unidade de volume [W/m<sup>3</sup>];

$E_m$  - intensidade de campo elétrico [V/m];

$\omega$  - frequência angular [rad/s];

$\epsilon_r''$  - fator de perdas relativas do material [F/m].

A potência acoplada do campo, porém não absorvida pelo material, a uma certa profundidade da superfície, é então,

$$P_z = P_0 e^{-2\alpha z}, \quad (2.38)$$

em que:

$P_z$  - potência transmitida na direção de z [W];

$P_0$  - potência acoplada pela carga não-casada [W];

$\alpha$  - constante de atenuação [Np/m];

$z$  - profundidade na direção do eixo z [m].

Para ilustrar os efeitos do conteúdo de água e da frequência sobre a atenuação, na Tabela 2 encontram-se as penetrações aproximadas em um semi sólido com teores de umidade alto, intermediário e baixo, para valores arbitrários de  $\epsilon'$  e  $\tan \delta$ .

Tabela 2 – Parâmetros dielétricos, profundidade de penetração das microondas em função da umidade e frequência a 2450 MHz.

Conteúdo de água % base úmida	Constante dielétrica $\epsilon$	Tangente de perdas $\tan\delta$	Penetração (cm)
Alta	60	0,25	3,1
Intermediária	20	0,20	4,4
Baixa	10	0,15	8,2

Fonte: (MUDGETT, 1985).

Como pode ser observado, cerca de 63% da potência acoplada pelo produto é atenuada, (ou seja, absorvida) a uma profundidade relativamente curta da superfície a 2450 MHz, dependendo do conteúdo de água do produto.

### 2.3.8 – Efeitos do aquecimento dos materiais por microondas em relação às suas propriedades térmicas

As características de aquecimento dos alimentos no processamento por microondas dependem das suas propriedades térmicas, em maior ou menor grau, do conteúdo de água inicial do produto e da taxa de evaporação da água durante o processo de aquecimento. A propriedade térmica de interesse básico, tal como nos métodos de aquecimento convencionais, é a difusividade térmica,  $\alpha_t$ , definida como a razão entre a condutividade térmica,  $K$ , e o produto da densidade do material,  $\rho$ , pelo calor específico  $C_p$ ,

$$\alpha_t = \frac{K}{\rho C_p}, \quad (2.39)$$

em que:

$\alpha_t$  – difusividade térmica [ $m^2/s$ ];

$K$  – condutividade térmica [ $W/m.K$ ];

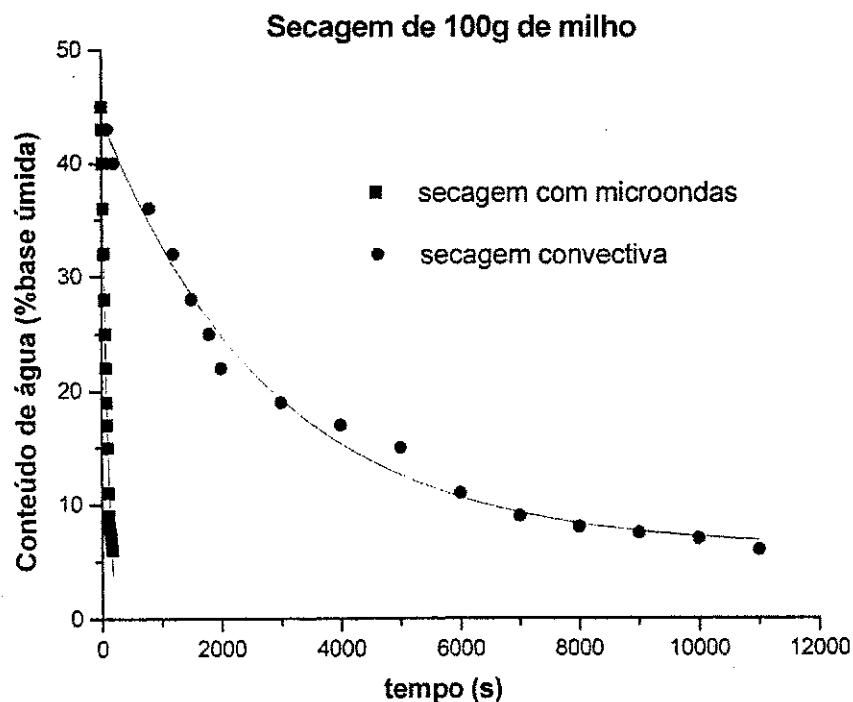
$\rho$  – densidade [ $kg/m^3$ ];

$C_p$  – calor específico a pressão constante [ $J/kg.K$ ].

Estas propriedades são extremamente dependentes da temperatura em matérias que sofrem rápida desidratação, mas são menos sensíveis às variações de temperatura, a teores de umidade relativamente constantes.

A transferência de calor nos processos de aquecimento por microondas envolve condições de regime transientes de forma similar aos encontrados nos processos térmicos convencionais, exceção se faz ao calor que é gerado dentro de um produto irradiado por microondas, por “atrito molecular” resultante da rotação dipolar em solventes polares, tais como água e álcool, e pela migração condutiva de íons dissolvidos.

Na Figura 10, encontram-se as curvas de conteúdo de água dos grãos de milho em função do tempo para secagens realizadas com microondas e em secador convencional. Observa-se, nessa figura que os períodos de tempo de secagem são bem reduzidos em comparação com o processo convencional (convectivo).



FIGURAS 10 – Curvas do conteúdo de água de um produto biológico em função do tempo para secagem por microondas e pelo processo convectivo.

## 2.4 – Sistemas de microondas

Os principais componentes de um sistema de aquecimento por microondas são a válvula de microondas, a fonte de alimentação DC para alimentação da válvula, um sistema de controle e o aplicador. Os custos desses equipamentos dependem dos componentes e da quantidade de potência que necessita a microonda, portanto o primeiro passo é estimar o montante da potência necessária para dimensionamento do secador. Para isto, a seguinte informação é necessária:

- a- vazão mássica de alimentação ( $M$ ) [ kg/s];
- b- calor específico do produto ( $C_p$ ) [J/kg.K] (para a maioria dos materiais o  $C_p$  situa-se entre 0,8 e 4,2);
- c- variação da temperatura ( $\Delta T$ ) requerida no processo [K];
- d- variação do tempo ( $\Delta t$ ), [s].

De posse destes dados, a potência de microondas na entrada absorvida pelo produto, em kW, é calculada por,

$$P = \frac{m \cdot C_p \cdot \Delta T}{\Delta t}, \quad (2.40)$$

em que:

- $P$  – potência absorvida [W];
- $m$  – massa da água [kg];
- $C_p$  – calor específico médio da água [kJ/kg.°C];
- $\Delta T$  – variação de temperatura [°C];
- $\Delta t$  – tempo de exposição de potência [s].

Se o processo de aquecimento por microondas envolver a vaporização de líquidos, a potência adicional de microondas na entrada, requerida pelo material para a vaporização, em kW, é dada por,

$$P' = \text{Quantidade de líquido [kg/s]} \times \text{Calor latente do líquido [J/kg} \times 10^{-3}\text{]},$$

em que:

- $P'$  - potência adicional de microondas [kW],

O padrão de exposição para a pessoa que trabalha nas proximidades de um equipamento de microondas foi estabelecido no início dos anos 50 em  $10 \text{ mW/cm}^2$  para exposição do corpo inteiro, por exemplo: se houvesse essa exposição a  $100 \text{ mW/cm}^2$ , causaria uma ligeira febre e que um décimo deste nível representaria um fator de segurança significativo.

A lei americana sobre o padrão de controle de emissão dos fornos de microondas para o consumidor doméstico e comercial passou a ser vigente em fins de 1971. Este padrão limita a densidade de potência que vaza dos fornos de microondas novos a um máximo de  $1 \text{ mW/cm}^2$ , e nos fornos de microondas antigos a um máximo de  $5 \text{ mW/cm}^2$ , com a medição executada à distância de 5 cm da superfície do forno (BREN, 1996).

#### 2.4.1 – Oscilador magnetron

As válvulas utilizadas nos sistemas por microondas podem ser classificadas em dois tipos: as de campo cruzado (*cross field*) e as de feixe linear (*linear beam*). Exemplos típicos de válvulas de campo cruzado são as Magnetrons e as Amplítron, sendo as Klystrons e as TWT (*Traveling Wave Tube*) exemplos de válvulas de feixe linear.

As magnetrons CW (*Continuous Wave*) são as válvulas de microondas mais comumente usadas em aplicações domésticas devido, principalmente, ao seu tamanho e capacidade de potência. As magnetrons constituem-se de dois eletrodos: um anodo cilíndrico (em geral de cobre) contendo um conjunto de cavidades ressonantes que formam o circuito determinante da frequência de operação (circuito ressonante) e um catodo ou filamento localizado axialmente à estrutura do anodo, como pode ser visto na Figura 11.

Há várias estruturas de anodo para as Magnetrons (*rise sun*, de fenda, de palhetas, etc.), mas o princípio de funcionamento é o mesmo para todas. As magnetrons operam pela excitação do material termo-iônico (em geral tungstênio) do filamento com uma alta corrente. Esse material aquece, alcançando temperaturas em média de 1900 a 2000 K. Nesta temperatura os elétrons são excitados e removidos por uma tensão DC entre o anodo e o catodo. Os elétrons são acelerados na direção do anodo em umas trajetórias espirais, proporcionadas por um campo magnético orientado paralelamente ao eixo do catodo (filamento). A estrutura do anodo, formada por cavidades ressonantes oscilando no modo

PI (modo no qual, há diferença de fase com estas oscilações), sendo a energia, acoplada por uma antena, convertida em energia de microondas.

Uma das mais importantes considerações que se deve atentar nos projetos envolvendo campos de altas frequências refere-se ao acoplamento da magnetron no aplicador de uso. Um bom acoplamento proporciona uma maior eficiência e tempo de vida útil prolongado desses geradores, além de se obter uma transferência de energia satisfatória para o interior do aplicador.

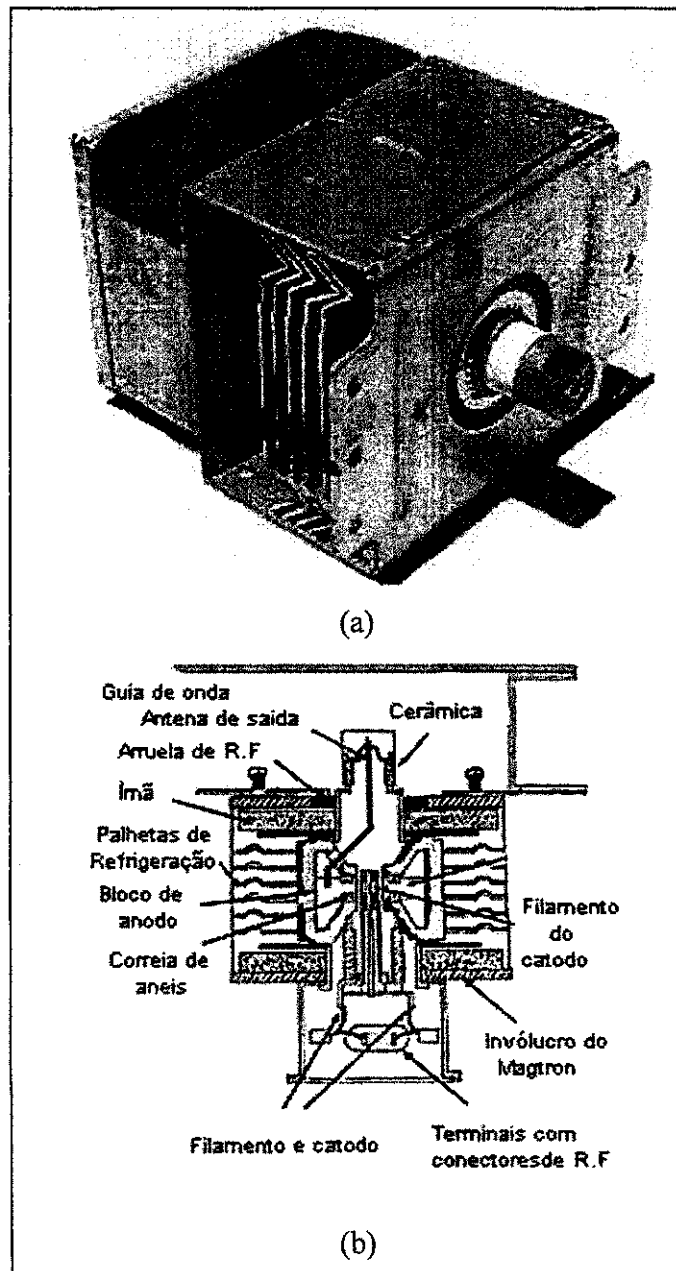


FIGURA 11 – Imagem da válvula magnetron (a), e partes elétricas da válvula magnetron (b).

Diversas formas de acoplamento proporcionam a transferência de energia gerada pela válvula (particularmente a magnetron) para o interior dos aplicadores. O mais comum e o amplamente utilizado em aplicações domésticas, usa um guia de ondas retangular entre a magnetron e o aplicador.

O acoplamento da válvula diretamente na cavidade é um outro tipo que pode ser realizado. Porém, esse tipo de acoplamento submete a válvula a níveis de potência refletida maiores que os utilizando guias.

#### 2.4.2 – Fonte de Potência de microondas para alimentação do magnetron

Uma fonte de potência de microondas converte a potência AC 50/60 Hz em potência de microondas. A alimentação do gerador, fundamentalmente, pode ser dividida em duas: uma relacionada ao fornecimento da tensão DC para o anodo/catodo e outra relacionada ao fornecimento da corrente para o aquecimento do filamento.

O diagrama esquemático de uma fonte DC genérica com um estágio de filtragem encontra-se na Figura 12.

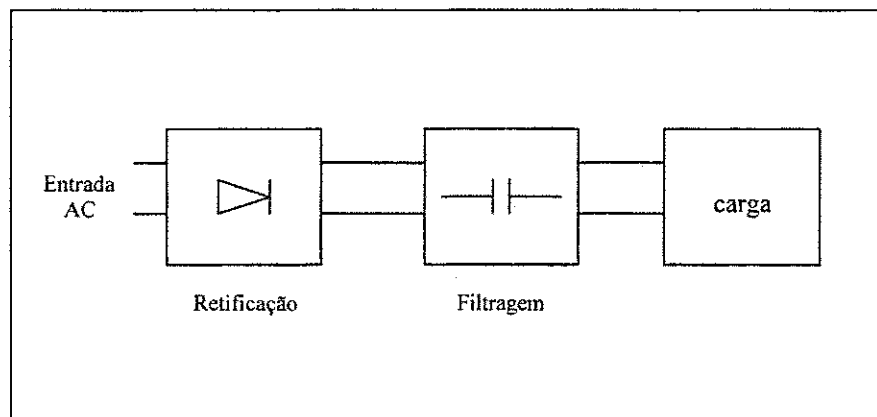


FIGURA 12 - Diagrama em blocos de uma fonte DC genérica.

Os circuitos retificadores são usados para converter um sinal de valor médio igual a zero em um com valor médio diferente de zero. Os circuitos retificadores estão na Figura 13, são eles: o retificador de meia onda e o retificador de onda completa.

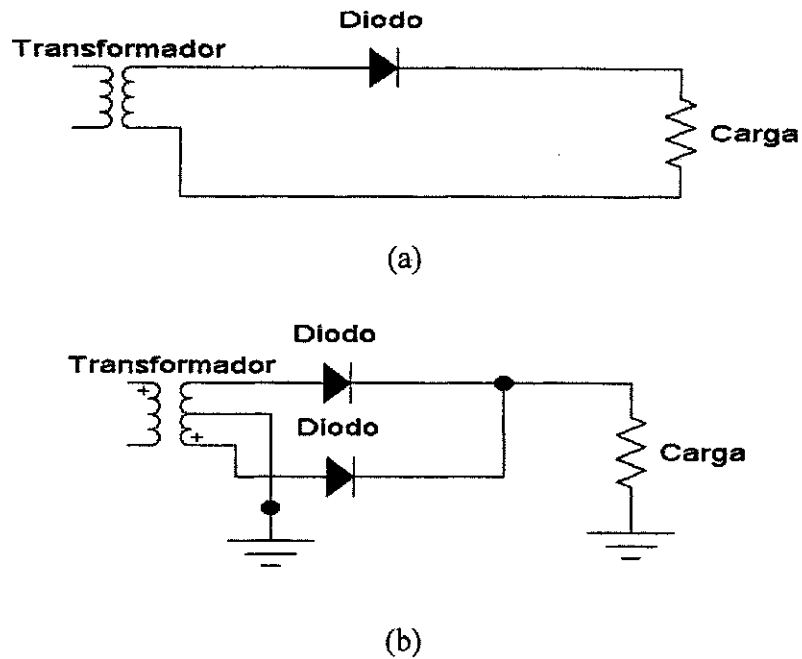


FIGURA 13 – Circuitos retificadores. (a) circuito retificador de meia - onda, (b) circuito retificador de onda completa.

Observa-se pela Figura 14, que o sinal resultante da retificação não é puramente DC ou mesmo uma boa representação dele. Existem aplicações nas quais se deseja que a saída DC seja mais suave do que o obtido somente com o estágio de retificação, utiliza-se então, geralmente, um estágio de filtragem do sinal. A Figura 14 exemplifica um circuito genérico com filtragem de capacitor.

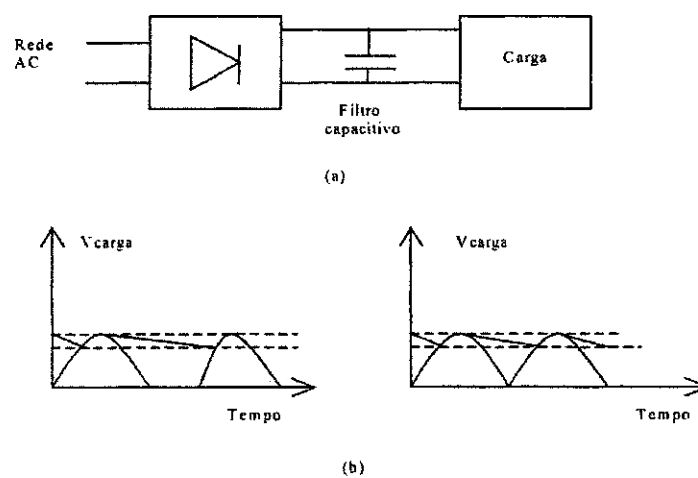


FIGURA 14 – (a) Fonte DC com estágio de filtragem, (b) forma de onda resultante para o caso da retificação de meia - onda e onda completa.



A utilização de dobradores de tensão em processos industriais utilizando microondas é bastante comum. Na Figura 15 encontram-se dois tipos de dobradores.

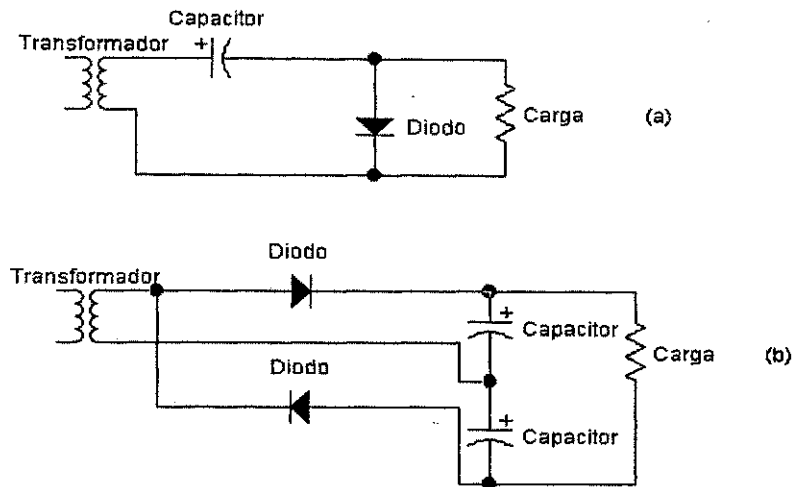


FIGURA 15 – Circuito dobradores de tensão típicos. (a) meia - onda, (b) onda completa.

Esses circuitos dobradores permitem manter a baixa capacidade de tensão de pico do transformador, e ao mesmo tempo, aumentar a tensão de pico de saída para duas ou mais vezes a tensão retificada de pico. Os circuitos dobradores de tensão de meia-onda são utilizados em magnetron, reduzindo o tamanho do circuito, número de componentes e custo total da fonte.

### 2.4.3 – Guias de ondas retangulares

A energia das microondas, tal qual a luz visível, pode ser transferida por meio do espaço por radiação, contudo este meio é bastante ineficiente quando comparado com outros meios para transporte a distâncias relativamente curtas.

Não somente linhas de transmissão, mas também guias de ondas podem ser usados para transportar a energia das microondas. O guia de ondas é constituído simplesmente de um tubo metálico de condutividade elevada, com secção transversal retangular, como pode ser visualizado na Figura 16.

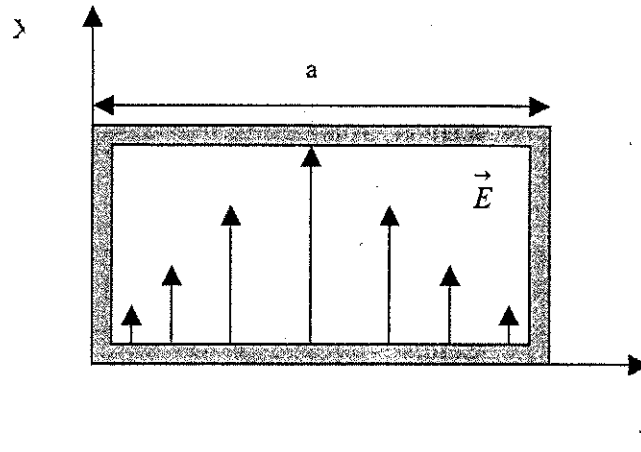


FIGURA 16 – Meios de transporte de microondas por guia de onda retangular.

As equações de Maxwell revelam que a energia pode se propagar ao longo de um guia de onda com diversas distribuições distintas dos campos elétrico e magnético ou modos. No entanto, se a maior das dimensões do guia de onda “a” excede  $0,5 \lambda_0$  mas é menor do que  $\lambda_0$ , em que  $\lambda_0$  é o comprimento de onda da radiação no vácuo, a propagação é possível somente em um modo, que é chamado de modo dominante. O modo dominante do campo elétrico possui só uma componente na direção x, que varia senoidalmente com y, com um máximo em  $y = a/2$  e anulando-se em  $y = 0$  e  $y = a$ , sendo uniforme na direção x. O campo magnético possui uma componente y, que varia senoidalmente com y, com um máximo em  $y = a/2$  e é uniforme na direção de x. O campo magnético também tem um componente na direção de propagação, que varia cossenoidalmente com y. Como o campo elétrico não tem componente na direção de propagação, este modo é denominado Transversal Elétrico, ou modo TE. O modo possui um máximo na variação de y, mas não tem variação em x, daí ser chamado de modo  $TE_{10}$ .

Um guia de onda possui assim um comprimento de onda de corte  $\lambda_c = 2a$  e uma frequência de corte associada  $f_c = c/\lambda_c$ . Para frequências abaixo de  $f_c$  ou comprimentos de onda maiores do que  $\lambda_0$ , a propagação pelo guia de onda não é possível.

O comprimento de onda de uma onda propagando em um guia de onda é chamado de comprimento do guia de onda  $\lambda_g$ , cujo valor é dado pela expressão,

$$\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{1 - (f_c / f_0)^2} = \lambda_0 / \sqrt{1 - (\lambda_0 / \lambda_c)^2}, \quad (2.41)$$

em que:

$\lambda_g$  – comprimento de onda no vácuo [m];

$\lambda_c$  – comprimento de onda de corte [m];

$\lambda_o$  – comprimento de onda no vácuo [m];

$f_o$  – frequência de onda no vácuo [Hz];

$f_c$  – frequência de corte [m].

#### 2.4.4 – Cavidades ressonantes

Uma das finalidades do guia de ondas é transmitir energia eletromagnética de um ponto para outro. Uma cavidade ressonante, por outro lado, é um dispositivo feito para armazenar energia.

Uma cavidade ressonante é qualquer meio volumétrico limitado, no qual existe o confinamento de ondas eletromagnéticas e conseqüentemente de energia. Na prática, tem-se cavidades ressonantes formadas por caixas ou cilindros ocios metálicos. Essas cavidades, quando excitadas, iniciam uma condição de oscilação ora por meio do campo elétrico, ora do magnético. As cavidades ressonantes retangulares são feitas tomando como base uma seção de um guia de ondas metálico e acrescentando a estas duas placas metálicas de tal maneira a formar uma caixa metálica. Deve-se observar uma distância mínima entre as duas placas para que a condição de oscilação possa ser estabelecida. A distância “d” entre as duas placas, necessariamente, deve ser igual a um número inteiro de meios comprimentos de onda do guia, ou seja,

$$d = n \frac{\lambda_g}{2} = n \frac{\lambda_o}{2 \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_o}{\lambda_{cmm}}\right)^2}}, \text{ [m]} \quad (2.42)$$

em que  $\lambda_o$  é o comprimento de onda em um meio ilimitado e  $\lambda_{cmm}$  o comprimento de onda de corte do guia para o modo  $m, n$ .

### 2.4.5 – Termopares

Um termopar consiste basicamente de dois metais dissimilares que produzem uma força eletromotriz quando a junção é exposta a diferentes temperaturas. A junta de medição, ou junta quente, é inserida no meio onde a temperatura deve ser medida. A referência, ou junta fria, é aberta e é normalmente conectada aos terminais do instrumento de medição. A Figura 17 apresenta o termopar com a junta de medição e a junta de referência.

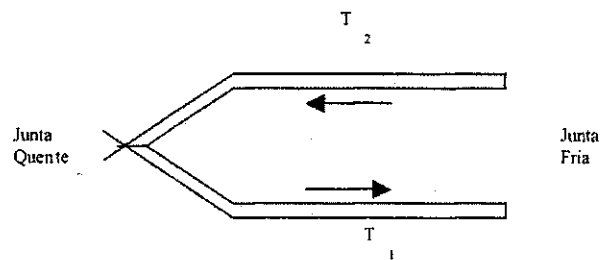


FIGURA 17 – Termopar.

A força eletromotriz de um termopar aumenta em função da diferença de temperatura entre as juntas quente e fria. Sendo assim, um instrumento sensível, capaz de medir ou ampliar a f.e.m. que deve ser calibrado e usado para ler a temperatura.

Dependendo do tipo de material empregado na confecção do termopar, a força eletromotriz produzida para uma mesma diferença de temperatura é diferente. Alguns materiais utilizados respondem com uma maior f.e.m em baixos níveis de temperatura, enquanto outros não respondem na faixa de temperatura de interesse. A Tabela 3 mostra o tipo mais comum de material utilizados na construção de termopares.

Tabela 3 – Tipos de termopares

TIPO	MATERIAL	FAIXA DE TEMPERATURA
Tipo J	Ferro-Constantan	0 à 760 °C
Tipo K	Cromel-Alumel	0 à 1260 °C
Tipo T	Cobre-Constantan	-184 à 370 °C
Tipo E	Cromel-Constantan	0 à 870 °C
Tipo S, R e B	Platina-Platina-Ródio	0 à 1480 °C

Fonte: (CARVALHO, 1996).

### 3. – MATERIAIS E MÉTODOS

A implementação e os testes preliminares de funcionamento do secador de grãos por microondas foram realizados no CEFET- João Pessoa. A fase posterior, que foi a montagem completa do experimento, na qual foram acoplados ao microondas uma balança eletrônica, o computador e todos os instrumentos de medição e realização da coleta de dados, indispensáveis para a avaliação e funcionamento do sistema, foi realizada no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola, do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande.

#### 3.1 – Modificações efetuadas no equipamento do forno de microondas.

O secador é composto por quatro partes: O forno doméstico contendo uma cavidade retangular, na qual o produto é processado, uma balança eletrônica acoplada à cavidade do forno e ligada a um computador, para medição automática do peso do produto durante o processo de secagem, e dois medidores de temperatura digital para registrar as temperaturas instantâneas durante a secagem. A configuração básica do secador por microondas é mostrado na Figura 18, que é descrita a seguir:

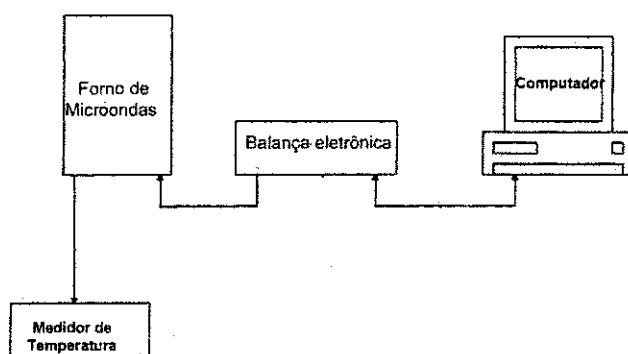


FIGURA 18 – Diagrama de blocos do secador.

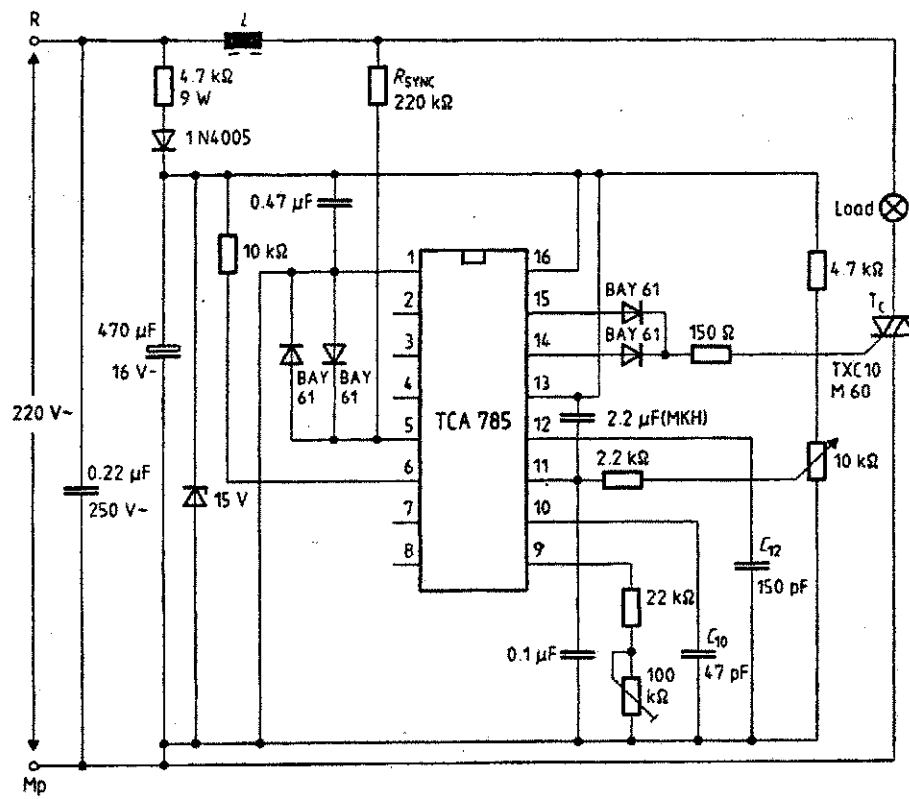
### 3.1.1 – Forno de microondas

O forno de microondas utilizado no projeto é um forno comercial da marca Brastemp modelo 127 DES, com volume da cavidade de 27 litros, potência útil de 950 W e frequência de operação de 2450 MHz.

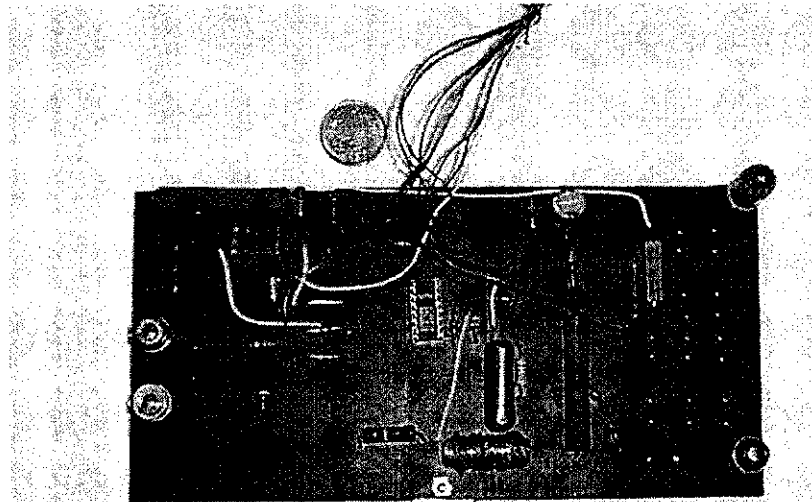
O forno original foi modificado por meio da substituição da placa de controle de potência que trabalha no regime on/off, para uma placa de controle contínuo de potência, apresentada na Figura 19. Esta placa de controle tem como princípio de funcionamento o controle do triac  $T_c$ , no qual o ângulo de gatilhamento pode ser ajustado continuamente entre  $0^\circ$  e  $180^\circ$ , usando um potenciômetro externo de 100 k $\Omega$ .

A variação do ângulo de gatilhamento resulta na variação da tensão aplicada na carga, que é representada pelo primário do transformador de alta tensão, conseqüentemente esta variação ajusta a tensão do dobrador de tensão da fonte DC de anodo da válvula de ímãs permanentes modelo 2M 167B-M14. Como a potência de saída da válvula depende da tensão de anodo, uma variação na tensão de primário do transformador de alta resulta conseqüentemente numa variação de potência de saída do secador. A estabilidade da potência da válvula após o ajuste de tensão do primário do transformador de alta tensão, depende do circuito de gatilhamento TCA 785 da Siemens que se encontra na Figura 20.

O circuito integrado TCA 785 funciona sincronizado pela rede de 220 V, garantindo pulsos de gatilhamento estáveis, para isto o sinal de sincronização é obtido via uma resistência alta na linha de tensão (V5). O detetor de tensão ao identificar o ponto zero da senoide da rede, envia um sinal de controle para o registro de sincronização. O registro de sincronização controla o gerador de rampa, por meio do capacitor C10 e pelo resistor R9. Se a tensão de rampa V10 excede a tensão de controle V11, um sinal de controle é enviado para o circuito de lógica. Dependendo da amplitude de tensão de controle V11, o ângulo de gatilhamento pode chavear com um ângulo de fase de  $0^\circ$  até  $180^\circ$ . O pino 6 do circuito integrado TCA 785, é usado para habilitar ou desabilitar os pulsos de gatilhamento, sendo assim usa-se esta facilidade para ligar ou desligar a potência do secador, sem precisar desligar todo o sistema em uso.



(a)



(b)

FIGURA 19 – Esquema elétrico da placa de controle (a) e circuito elétrico da placa de controle (b).

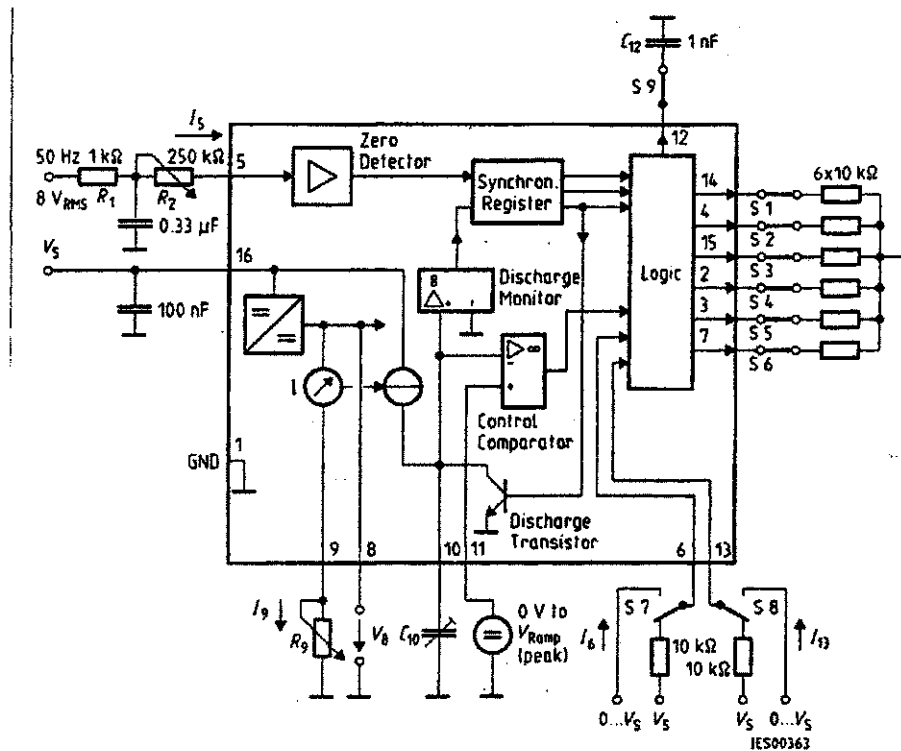


FIGURA 20 – Diagrama de bloco do TCA 785.

A maior parte dos equipamentos de potência de microondas, utiliza um transformador único para a alimentação do filamento da válvula magnetron (aproximadamente 3,15 V) e para a tensão anodo/catodo. O sistema com controle contínuo de potência por dimmer, não pode ser utilizado para alimentação de um filamento, pois a influência da variação de tensão na entrada do transformador de filamento, que resultará em uma variação no secundário do transformador de filamento CARVALHO (1996). Para solucionar esta situação usou-se um transformador de filamento com tensão de 220 V no primário e tensão de secundário de 3,15 V/ 11 A, como visto na Figura 21.



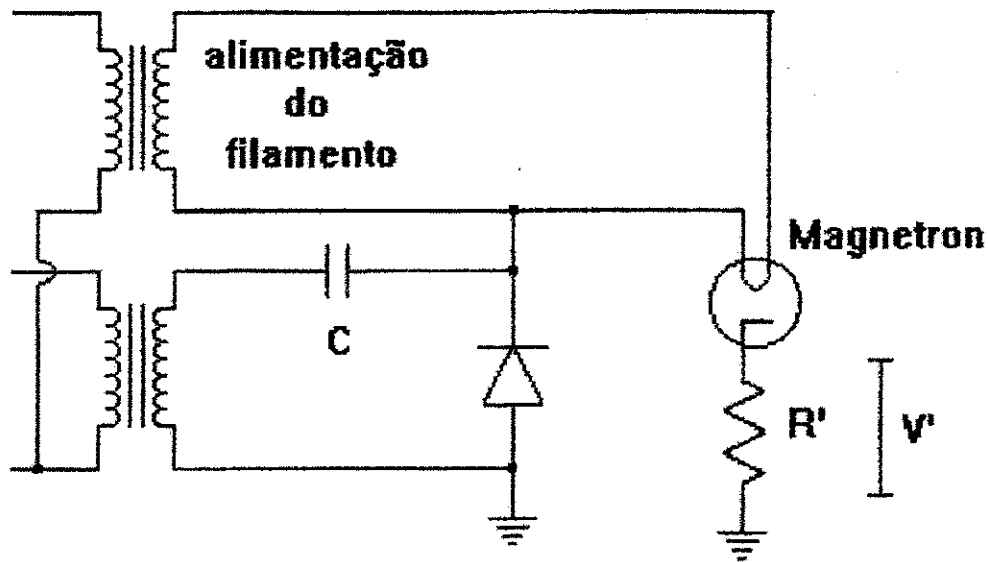


FIGURA 21 – Esquema da fonte do magnetron.

A potência de saída do magnetron pode ser monitorada a partir da corrente de anodo, com isto isolou-se o transformador de alta tensão da carcaça do forno, por meio de suportes de borracha e inseriu-se um miliamperímetro, com fundo de escala 1 A, entre o transformador e a carcaça do forno, como apresentado na Figura 22. Outra maneira de avaliar a potência do forno é medir a queda de tensão ( $v'$ ) sobre a resistência ( $R'$ ) representada na Figura 21.

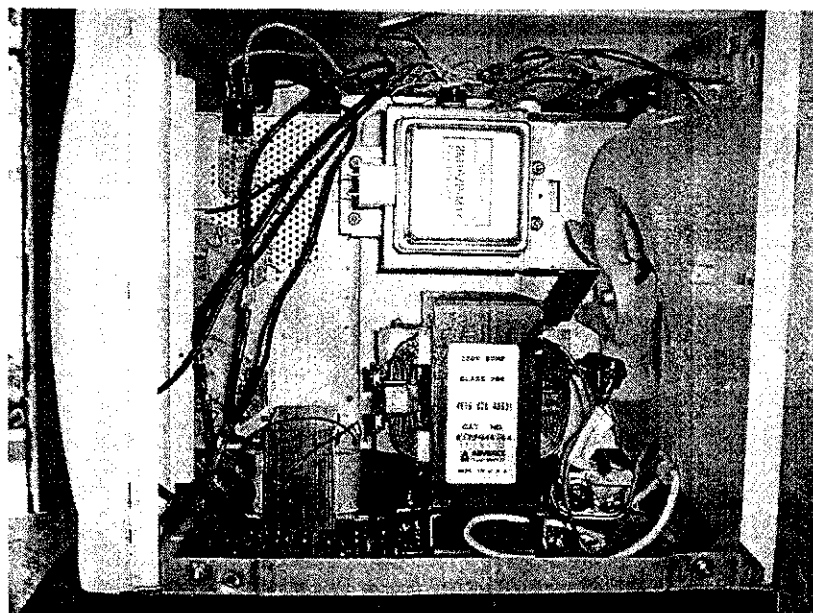
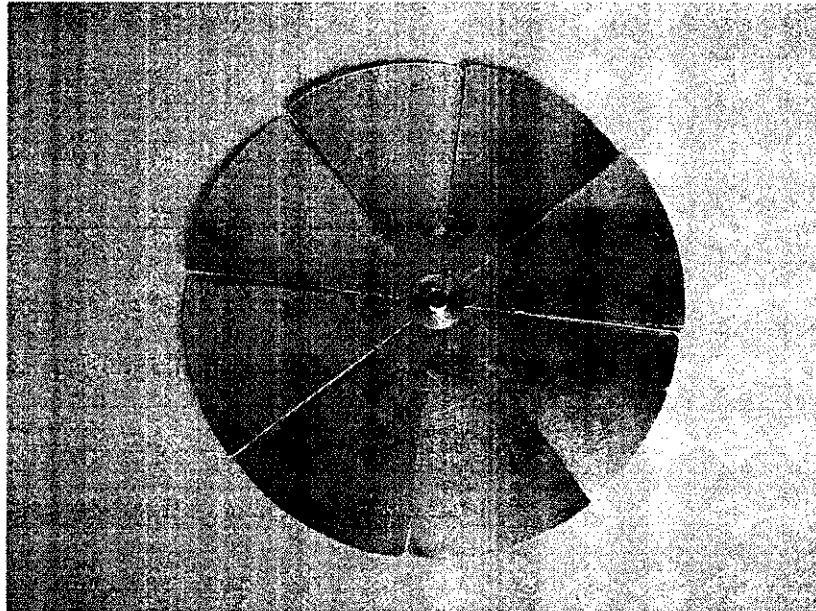


FIGURA 22 – Suportes de borracha inseridos entre o transformador e a carcaça do forno.

Os fornos domésticos de microondas não apresentam distribuição uniforme do campo eletromagnético em suas cavidades. Diante da necessidade de utilizar um forno para secagem de grãos que apresente um campo o mais uniforme possível, utilizou-se de um espalhador metálico circular de alumínio com 8 palhetas, conforme a Figura 23.



(a)



(b)

FIGURA 23 – Espalhador de campo eletromagnético metálico (a) e espalhador de campo eletromagnético metálico instalado no topo da cavidade retangular do forno de microondas (b).

O espalhador está localizado no centro do topo da cavidade do forno de microondas, e acoplado a um eixo de um motor de corrente contínua com velocidade ajustada por um circuito de controle, mostrado na Figura 24.

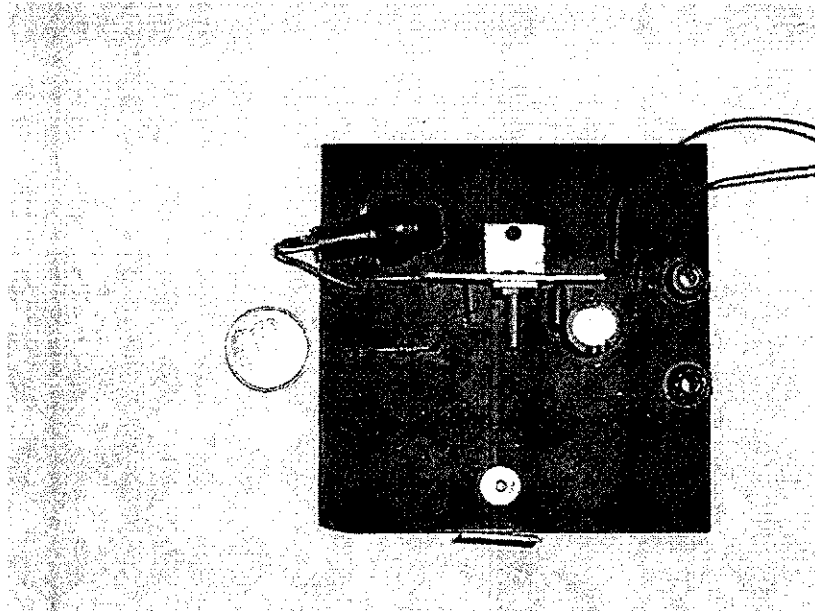


FIGURA 24 – Circuito de controle do motor de corrente contínua.

No processo de secagem dos grãos, dependendo do teor de umidade do produto, poderá ocorrer a presença de vapor de líquidos na cavidade, emitidos pelo produto, o que pode mascarar os resultados de medição de temperatura e peso. Diante deste problema foi instalado um exaustor, com velocidade controlada por um dimmer, na lateral do forno de microondas para conduzir o excesso de vapores para o exterior da cavidade, como visto na Figura 25.

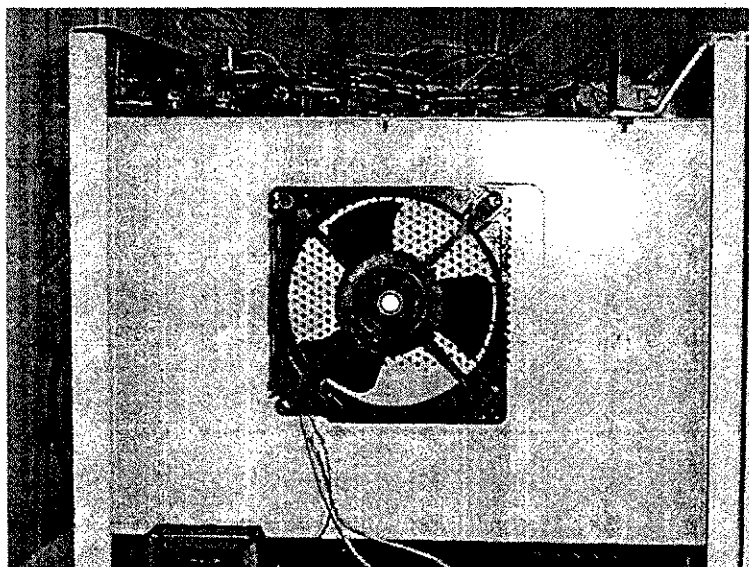


FIGURA 25 – Exaustor na lateral do forno de microondas.

### 3.1.2 – Balança eletrônica

Com a finalidade de automatizar o sistema de medição de perda de água do produto (secagem) ao longo do tempo, dentro da cavidade do forno microondas, conectou-se ao sistema, uma balança eletrônica de precisão, marca Marte, modelo AS 5500c, com carga máxima de 5 kg, sensibilidade de 0,01/0,1g e com interface serial RS 232C para um computador pessoal 486.

Essa balança Marte foi acoplada ao forno de microondas por meio de um suporte de *teflon*, o qual apresentou uma menor perda para o campo eletromagnético, sendo que na Figura 26, pode ser vista essa conexão, a qual atravessa o centro da base da cavidade do forno para dar suporte ao recipiente contendo o produto.

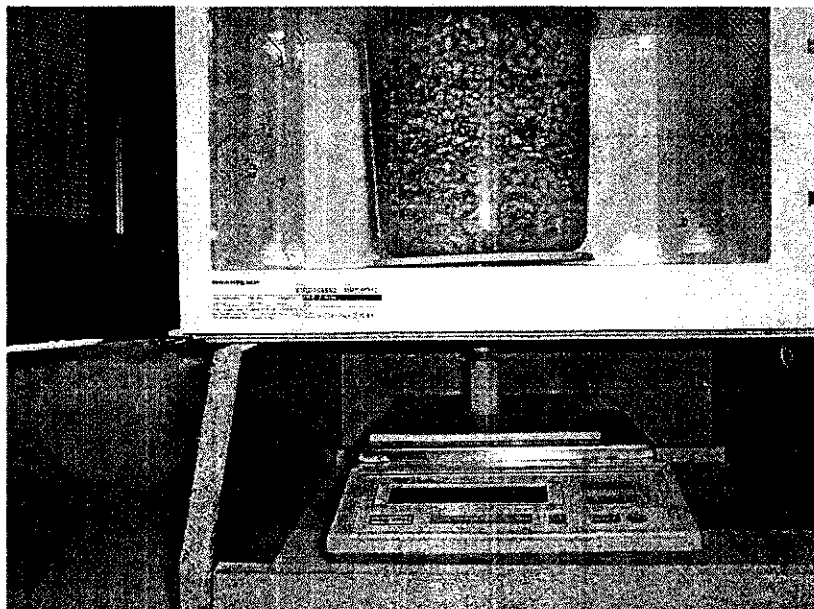


FIGURA 26 – Balança acoplada à cavidade via suporte de teflon.

Como a medição do peso do produto deve ser em tempo real para não interromper o processo de secagem, a balança foi ligada ao computador 486DX100 via sua porta de comunicação serial de entrada e saída, como mostrado na Figura 27.

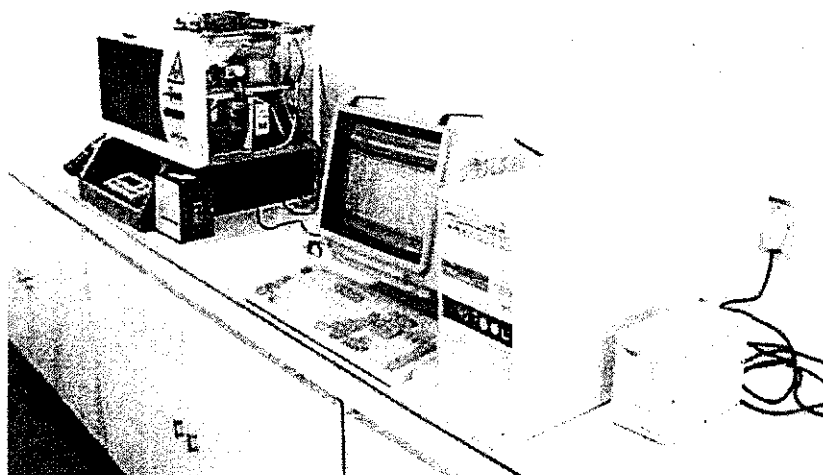


FIGURA 27 – Balança ligada ao computador 486DX100.

Após a aquisição, os dados foram lidos na tela do computador por meio de um software dedicado para esta aplicação. O software desenvolvido em linguagem Delphi, mostrado na Figura 28, apresenta os dados de pesos obtidos no tempo, com opção de uso em planilha Excel, da Microsoft.

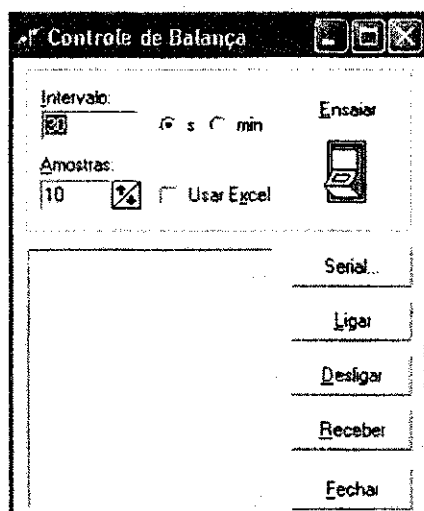


FIGURA 28 – Interface gráfica para aquisição de dados.

### 3.1.3 – Medidor de temperatura

Outro parâmetro fundamental para a caracterização das curvas de secagem é a temperatura instantânea do produto. Para a obtenção deste parâmetro, utilizaram-se medidores de temperatura digital de precisão (Figura 29). O medidor usado foi o modelo N° 91100-40 da Cole-Parme, com 25 posições de memória de leitura, com opção para ler uma ou duas temperaturas simultâneas, aceita vários tipos de sensores termopares do tipo J, K, T e E, com mini-conectores.

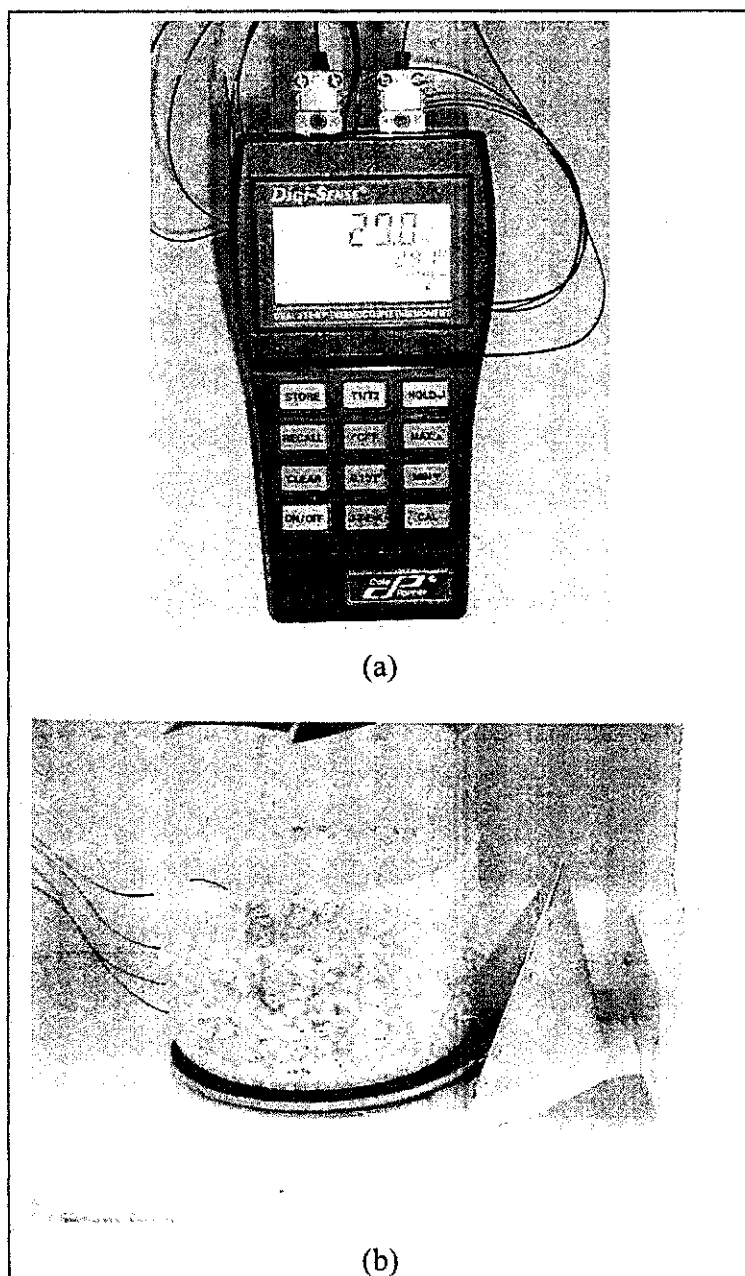


FIGURA 29 – Medidor de temperatura digital de precisão (a) e sensores termopares posicionados ortogonalmente ao campo elétrico (b).

Os sensores termopares usados para o projeto foi do tipo K (U-0850586), com faixa de temperatura de  $-250^{\circ}$  até  $404^{\circ}$  C, tendo constante de tempo igual a 0,1 segundos e resposta de tempo igual a 0,5 segundos. Nos ensaios de temperatura, utilizaram-se sensores termopares posicionados ortogonalmente ao campo elétrico dentro do produto, minimizando o efeito do campo elétrico, como mostrado na Figura 29. Nesta figura pode-se observar também a presença de uma cunha metálica feita de alumínio, posicionada no lado direito da cavidade do forno, na saída inferior de potência, objetivando um espalhamento mais suave de potência, evitando uma concentração maior de potência no lado inferior direito do recipiente contendo o produto.

### 3.2 – Produto usado no experimento como matéria-prima

Para a realização desta pesquisa, foram utilizados grãos de milho (*Zea mays* L.), variedade cargill C-125 produzida no município de Campina Grande – PB, ano de 2001.

Os grãos de milho foram comprados secos e levados ao Laboratório de Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas, onde foi determinado o seu conteúdo de água de 10,25% em base úmida (b.u). Para isso, foram retiradas quatro amostras, que foram levadas à estufa por vinte e quatro horas, à temperatura de  $105^{\circ}\text{C}$  ( $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ), como apresentado na Figura 30.

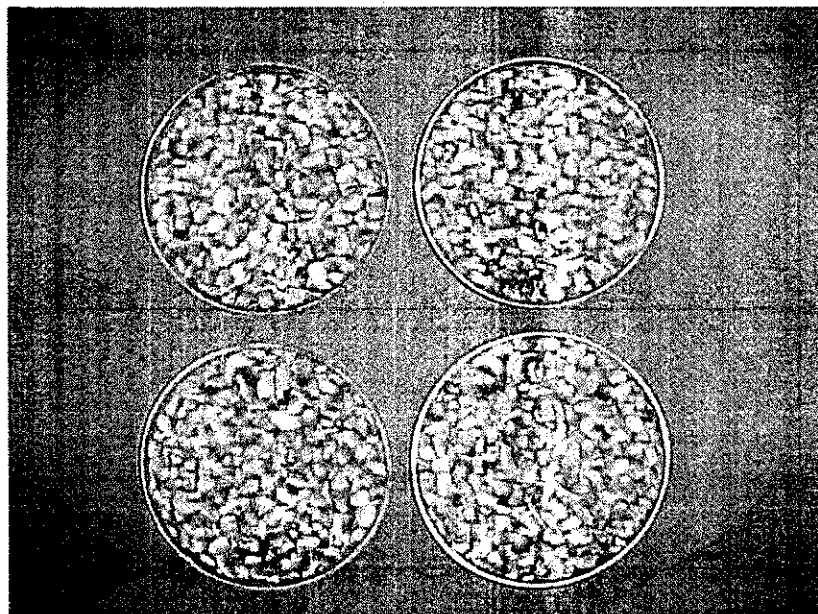


FIGURA 30 – Amostras de milho seco.

### **3.3 – Distribuição de campo elétrico no interior da cavidade do forno original**

Inicialmente, para observação da distribuição de campo elétrico no interior da cavidade do forno original, foi utilizada uma placa de papelão nas dimensões da base do forno, revestida com papel canson e umedecida com a solução de cloreto de cobalto. Esta solução muda de cor rosa para azul como consequência da perda de umidade. Foram ensaiados três procedimentos diferentes:

- Primeiro, colocou-se a placa de papelão na base da cavidade e irradiou-se potência máxima em um período de exposição de um minuto e meio.

- Segundo, colocou-se a placa de papelão na metade da cavidade e irradiou-se potência máxima por um período de exposição de um minuto e meio.

- Terceiro, colocou-se a placa de papelão no topo da cavidade e irradiou-se potência máxima por um período de um minuto e meio.

### **3.4 – Distribuição de campo elétrico nas camadas do milho usando o forno original e o protótipo do secador**

Para obter uma distribuição de campo mais uniforme dentro da cavidade, testes iniciais foram realizados, tomando como produto em estudo o milho, o qual foi distribuído em um recipiente plástico cilíndrico resistente até 105 °C em quatro camadas de 4 cm, separadas por círculos de papel canson, que apresenta a propriedade de absorver umidade com maior intensidade, e umedecidos com a solução de cloreto de cobalto, como apresentado na Figura 31.

Os testes consistiram em duas etapas distintas:

- 1- Distribuição de campo nas camadas do milho usando forno original.
- 2- Distribuição de campo nas camadas do milho usando protótipo do secador



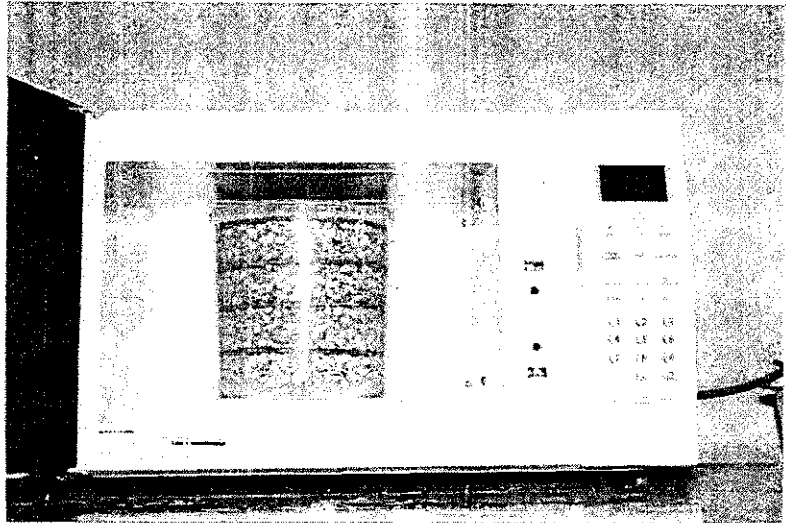


FIGURA 31 – Recipiente cilíndrico com quatro camadas de milho separadas por círculos de papel canson umedecidas com cloreto de cobalto.

#### **3.4.1 – Distribuição de campo nas camadas do milho usando forno original**

Nesta etapa do trabalho, utilizou-se um forno de microondas Brastemp sem alterações de seu projeto original. Tomou-se um recipiente plástico cilíndrico contendo milho a 25% em base úmida (b.u) distribuído em quatro camadas de 4 cm, separadas por disco de papel canson umedecidos em solução de cloreto de cobalto e aplicou-se potência de microondas máxima por três minutos de exposição.

#### **3.4.2 – Distribuição de campo nas camadas do milho usando o protótipo do secador**

Nesta segunda etapa do teste de distribuição de campo, utilizou-se o forno de microondas Brastemp, o qual passou por várias modificações de seus circuitos, além do mais se usou o espalhador de campo usado para uniformizar a distribuição de campo eletromagnético nas camadas do milho. A princípio tomou-se um recipiente plástico cilíndrico contendo milho a 25% em base úmida, distribuído em quatro camadas de 4 cm, separadas por discos de papel canson umedecidos com solução de cloreto de cobalto e em seguida aplicou-se potência de microondas máxima por três minutos.

Depois de estudar a distribuição de campo da microonda ao longo das 4 camadas e realizar os devidos ajustes, determinou-se, em seguida, as curvas de potência absorvida para as camadas de milho de 2, 5 e 10 cm.

### **3.5 – Curvas de potência absorvida nas camadas de milho com alturas de 2 cm, 5 cm e 10 cm**

Para secar qualquer produto agrícola no secador em estudo, primeiro tem que se encontrar a curva de potência absorvida que caracteriza a camada deste produto. Isto é, para cada camada de dimensões diferentes do produto, implica uma variação da permissividade elétrica com a densidade volumétrica, causando uma impedância diferente para o gerador de microondas, com isto obtém-se diferentes curvas de potência absorvida. A Equação (2.40) foi utilizada para a determinação do cálculo de potência absorvida.

#### **3.5.1 – Determinação da curva de potência absorvida usando uma carga contendo água**

Antes de determinar as curvas de potência absorvida pelo milho, determinou-se a curva de potência da água, pois este produto é homogêneo. Utilizou-se uma carga de água com massa de 0,760 kg e calor específico médio de 4,193 kJ/ kg.°C. Um recipiente cilíndrico plástico que suporta uma temperatura de até 105°C com diâmetro de 16,5 cm e altura de 12 cm, foi colocado no centro da cavidade do secador contendo esta carga e introduziram-se termopares tipo K, na faixa de temperatura de -250°C até 404°C, com constante de tempo de 0,1 seg e resposta de tempo de 0,5 seg, ligados a um medidor de temperatura digital da Cole-Parmer, com 25 posições de memória de leitura.

Foi ajustada a corrente de anodo, que variou na faixa de 100 mA até 600 mA, durante um tempo de exposição de 3 min para cada corrente ajustada, por meio de um potenciômetro localizado no painel frontal do secador, e lidas as correntes em um miliamperímetro. Mediu-se a temperatura inicial da água e em seguida, após o ajuste da corrente e a exposição de potência por 3 min, o gatilho da placa do controle foi desligado interrompendo a potência, imediatamente leu-se a temperatura final da água. Calculou-se a potência absorvida pela água usando a fórmula:

$$P = \frac{m \cdot C_p \cdot \Delta T}{\Delta t} \quad (2.43)$$

em que:

$P$  – potência absorvida [W];

$m$  – massa da água [kg];

$C_p$  – calor específico médio da água [kJ/kg.°C];

$\Delta T$  – variação de temperatura [°C];

$\Delta t$  – tempo de exposição de potência [s].

### 3.5.2 – Procedimento para determinação das curvas de potências absorvidas nas camadas de milho com alturas de 2 cm, 5 cm e 10 cm

Para determinar as curvas de potências absorvidas nas camadas de milho com 2 cm, 5 cm e 10 cm de altura, foi umedecidos uma certa quantidade de milho com conteúdo de água de 10,25 % em base úmida (b.u). Por um período de 19 horas imersos em água e verificando as amostras de diferentes locais da camada de milho para chegar ao conteúdo de água mais uniforme, o milho alcançou o conteúdo de água desejado em torno de 32 % em base úmida (b.u), como pode ser observado na Figura 32.

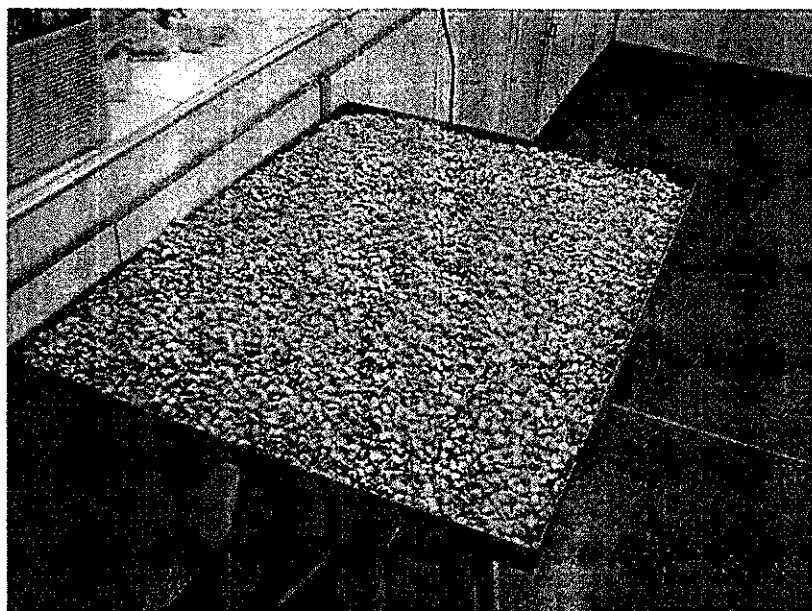


FIGURA 32 – Milho seco com conteúdo de água inicial de 10,25% em base úmida.

Em seguida, foi retirado o excesso de água em sua superfície usando um ventilador, como pode ser visualizado na Figura 33. O conteúdo de água final de 30,66% em base úmida (b.u) do milho foi determinado utilizando-se uma estufa Fanen modelo 330 à temperatura de 130 °C por um período de 4 horas. Este procedimento foi utilizado como padrão para o umedecimentos do milho.

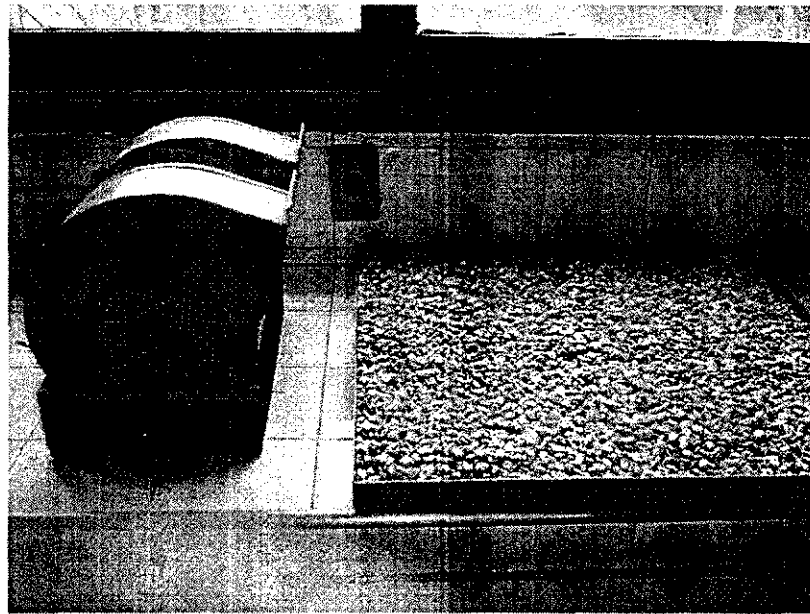


FIGURA 33 – Uso do ventilador para retirada do excesso de água da superfície.

Para as camadas de milho de 2 cm, 5 cm e 10 cm utilizaram-se as seguintes massas: 0,2488 kg, 0,754 kg e 1,433 kg, respectivamente.

Para o cálculo do calor específico do milho foi utilizada a seguinte fórmula:

$$C_p = 0,35 + 0,851 \cdot \left[ \frac{U}{(100 + U)} \right], \text{ [kcal /kg } ^\circ\text{C]} \quad (2.44)$$

em que:

$U$  – conteúdo de água final em base úmida [decimal];

$C_p$  – calor específico do milho [kcal/kg°C].

Para determinar a temperatura média para cada camada de milho de 2 cm, 5 cm e 10 cm, foram inseridos 4 termopares tipo K na faixa de -250 °C até 404 °C em um

recipiente cilíndrico plástico com diâmetro de 16,5 cm e altura de 12 cm, contendo a camada de milho, localizado no centro da cavidade do secador. Os termopares foram ligados a um medidor de temperatura digital da Cole-Parme. O período de exposição da microonda para a camada de milho de 2 cm foi de 2,6 minutos e para as camadas de milho de 5 cm e 10 cm foram de 4 minutos.

As correntes de anodo para a camada de 2 cm de milho variou de 50 mA até 580 mA, enquanto que as correntes de anodo para as camadas de milho de 5 cm e 10 cm variaram de 50 mA até 600 mA.

As potências absorvidas pelas camadas de milho de 2 cm, 5 cm e 10 cm foram calculadas pela fórmula da Equação (2.43). O fluxograma das fases utilizadas no processo de obtenção das curvas de potências absorvidas pelas camadas de milho de 2 cm, 5 cm e 10 cm de altura, encontra-se na Figura 34.

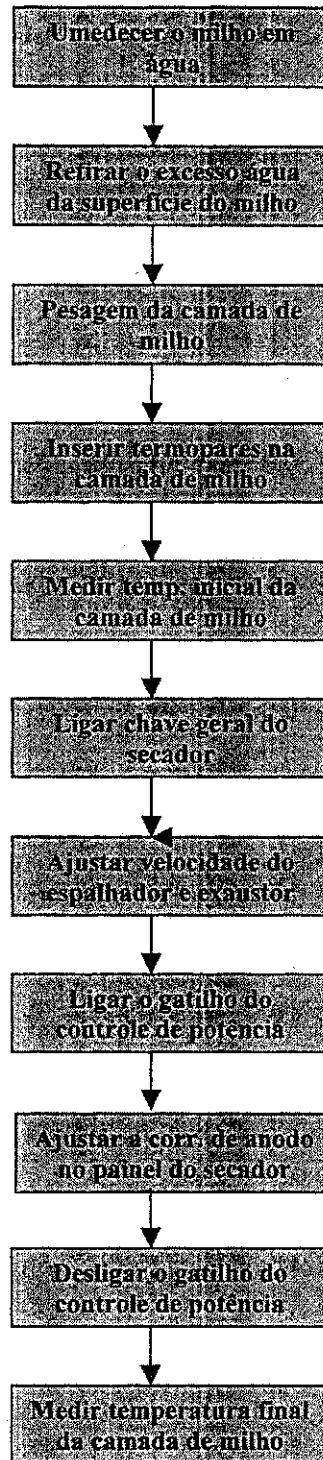


FIGURA 34 – Fluxograma do processo para obtenção das curvas de potências absorvidas nas camadas de milho de 2 cm, 5 cm e 10 cm.

### **3.5.3 – Gráficos das curvas de potências para camadas de milho com alturas de 2 cm, 5 cm e 10 cm**

Os resultados calculados das potências absorvidas nas camadas de milho de 2 cm, 5 cm e 10 cm juntamente com suas respectivas correntes de anodo foram utilizados para traçar as curvas características de potências, usando o programa computacional ORIGIN 5.0.

### **3.6 – Secagem contínua para as camadas de milho com alturas de 2 cm, 5 cm e 10 cm**

Este processo consistiu em determinar as curvas de secagem das camadas de milho de 2 cm, 5 cm e 10 cm, juntamente com suas equações que caracterizam melhor esta secagem. Para cada camada foram selecionadas 4 potências com suas respectivas correntes de anodo, retiradas dos gráficos elaborados de acordo com o descrito no item 3.5.3.

Para a secagem contínua das camadas de milho de 2 cm, 5 cm e 10 cm, inicialmente, tomou-se o produto seco com conteúdo de água de 10,25 % em base úmida e umedeceram-se os grãos de milho seguindo a metodologia descrita no item 2.5.2. Depois do milho umedecido foi determinado o seu conteúdo de água usando uma estufa a 130 °C por 4 horas. Uma vez conhecido o seu conteúdo de água inicial, a perda de peso em função do tempo, que corresponde à secagem do milho por microondas, foi medida por um computador 486DX100 ligado a uma balança eletrônica de precisão, via sua porta de comunicação serial e registrado em uma planilha Excel, como ilustrado na Figura 35.

A secagem do milho era interrompida quando o produto alcançava um conteúdo de água próximo a 13 % em base úmida.

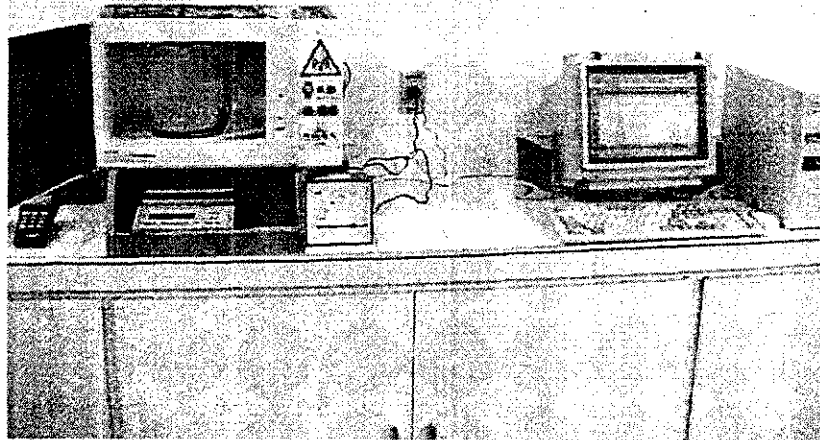


FIGURA 35 – Aquisição de dados feita pelo computador.

A secagem de milho para uma camada de 2 cm foi feita com uma quantidade de 250g de grãos e as potências escolhidas para a secagem foram de 50 W, 100 W, 200 W e 300 W, correspondendo às correntes de anodo de 56,25 mA, 100 mA, 212,5 mA e 418,5 mA. Para a secagem de milho a uma altura de 5 cm o experimento foi conduzido com uma quantidade de 760g de grãos e as potências escolhidas foram de 150 W, 300 W, 450W e 600 W, correspondendo às correntes de anodo de 100 mA, 187,5 mA, 300 mA e 450 mA.

Finalmente, para a secagem corresponder a uma altura da camada de 10 cm foi utilizada uma quantidade de 1446,2g de grãos e as potências escolhidas foram de 300 W, 500 W, 700 W e 900 W, correspondendo às correntes de anodo de 150 mA, 250 mA, 375 mA e 550 mA.

O fluxograma das etapas utilizadas no processo de secagem das camadas de milho de altura de 2 cm, 5 cm e 10 cm, está esquematizado na Figura 36.



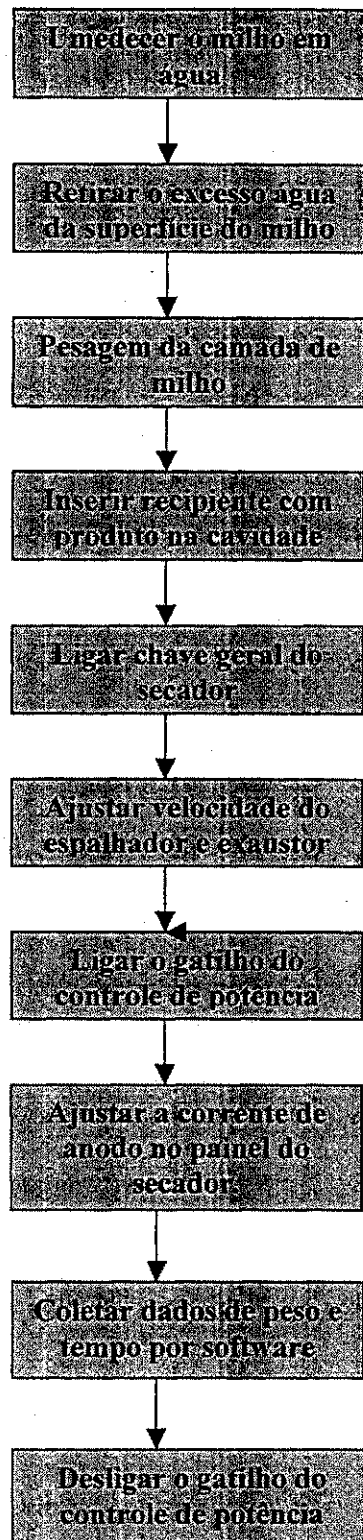


FIGURA 36 – Fluxograma da secagem contínua das camadas de milho de altura de 2 cm, 5 cm e 10 cm.

### 3.7 – Secagem intermitente para as camadas de milho de altura de 2 cm, 5 cm e 10 cm

Para determinar as curvas de secagem intermitente e as equações características para as camadas de altura de 2 cm, 5 cm e 10 cm, inicialmente tomou-se o produto seco com conteúdo de água de 10,25 % em base úmida e umedeceu em água por um período de 19 horas, em seguida determinou-se o conteúdo de água usando a estufa a 130 °C por 3 horas. Foi retirado o excesso de água da superfície do milho, para que ele pudesse ser secado. De acordo com a Tabela 4, escolheram-se quatro potências com suas respectivas correntes de anodo, encontradas por meio dos gráficos de potências citados anteriormente, para cada camada em estudo. Este processo de secagem intermitente diferencia da secagem contínua acima citado, apenas pelo fato, de haver interrupção em intervalos de tempo pré-estabelecidos durante a secagem para que se possa medir a temperatura média da camada. A secagem encerra quando o produto atinge o conteúdo de água final de 13 % em base úmida. A medição da perda dos pesos e seus respectivos tempos de secagem foi monitorada por um computador 486DX100 ligado a uma balança eletrônica de precisão, via sua porta de comunicação serial e registrada em uma planilha Excel.

Tabela 4 – Parâmetros das camadas de altura de 2 cm, 5 cm e 10 cm.

Parâmetros	Camada 2 cm	Camada 5 cm	Camada 10 cm
Peso inicial (g)	250	760	1432
Umidade inicial (%)	32,48	34	32,4
Umidade final (%)	13	13	13
Potência abs. (W)	50; 100; 200; 300	150;300;450;600	300;500;700;900
Corente anodo (mA)	50,25;100;212,5;418	100;187,5;300;450	150;250;375;550

O fluxograma das etapas utilizadas no processo de secagem intermitente das camadas de milho de altura de 2 cm, 5 cm e 10 cm, está mostrado na Figura 37.

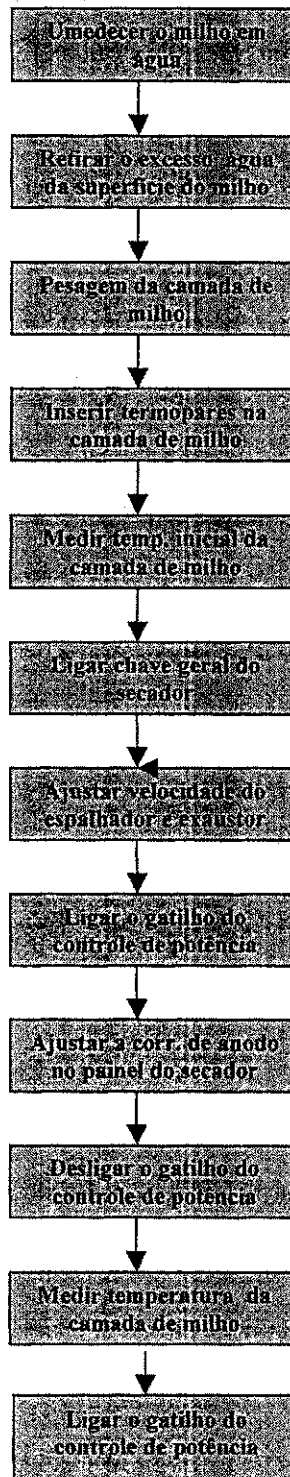


FIGURA 37 - Fluxograma da secagem intermitente das camadas de milho de altura de 2 cm, 5 cm e 10 cm.

## **4. – RESULTADOS E DISCUSSÃO**

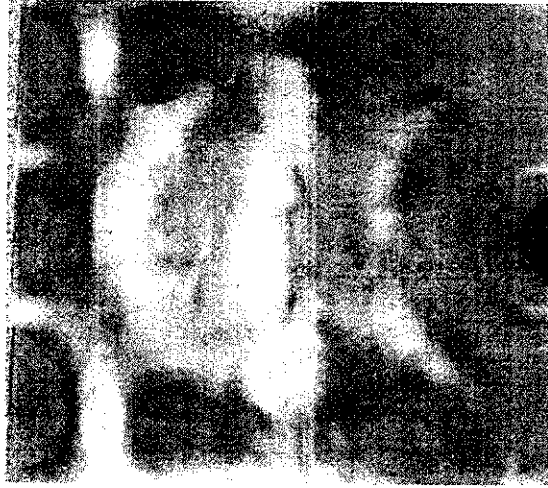
### **4.1 – Avaliação da distribuição de campo elétrico no interior da cavidade do secador de microondas sem carga e com carga**

#### **4.1.1 – Distribuição de campo elétrico no interior da cavidade do forno original sem carga**

Na Figura 38 encontra-se a distribuição do campo elétrico no interior da cavidade do forno microonda original sem carga, em três diferentes situações. Nesta figura a coloração azul representa a atuação da microonda e a intensidade de cor representa também a maior ou menor incidência do campo elétrico.

A Figura 38a, expressa a distribuição do campo elétrico no topo da cavidade onde se pode observar que existe uma maior concentração da microonda no canto direito e uma distribuição de campo elétrico em círculos no canto esquerdo. Na Figura 38b, que indica a distribuição do campo elétrico no meio da cavidade, observa-se que essa distribuição é de maior intensidade no centro e se dá em forma de círculos. Já na Figura 38c, que representa a distribuição do campo elétrico na base do forno microonda, observa-se que ela é também em forma de círculos, porém com menor intensidade.

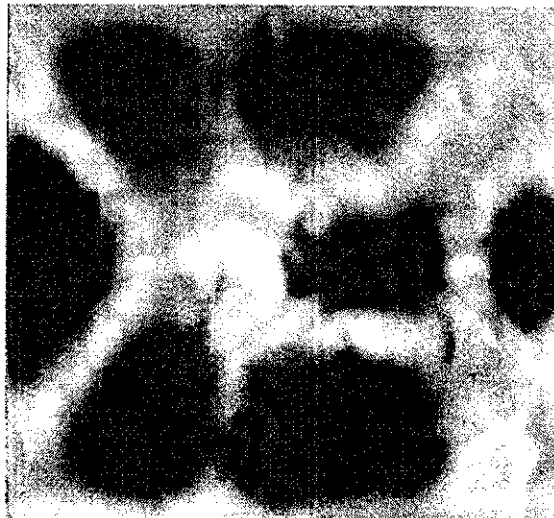
Essas três configurações de distribuição de campo, no interior da cavidade do forno microondas, indicam que existe uma necessidade de maior uniformização do campo, para que este possa ser utilizado como um secador de grãos.



(a)



(b)



(c)

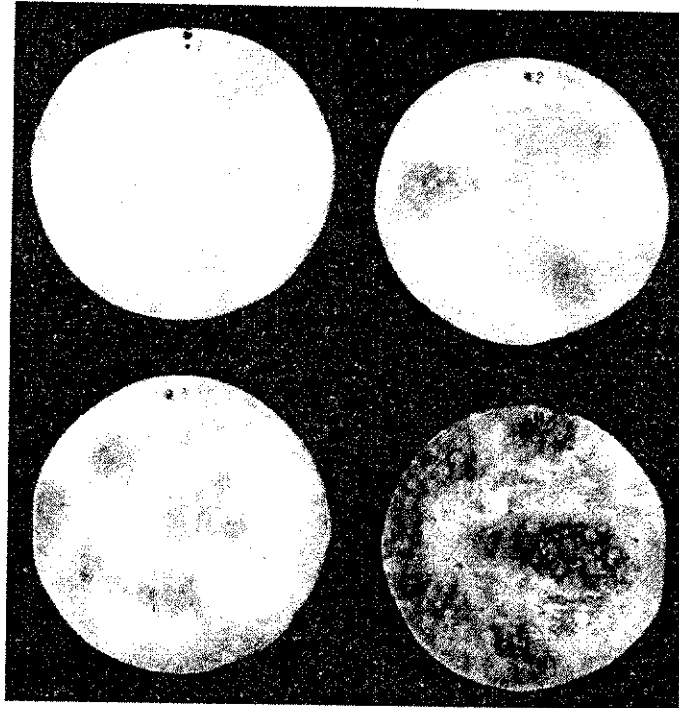
FIGURA 38 – Distribuição de campo elétrico no interior da cavidade do forno original no topo (a), no centro (b) e na base (c).

#### 4.1.2 – Distribuição de campo elétrico nas camadas do milho usando o forno microondas original e o secador protótipo por microondas

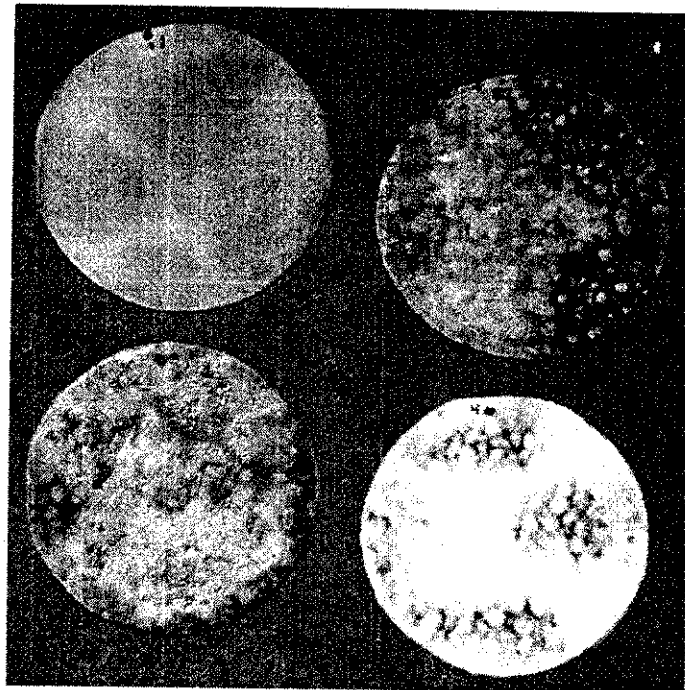
De acordo com a Figura 39a, pode-se observar a distribuição de campo elétrico nas quatro camadas de milho de 4 cm cada, localizada no centro da cavidade do forno original. Nessa figura constata-se uma distribuição do campo elétrico muito rarefeito na primeira camada de milho situada na parte superior das camadas, sendo também observada uma maior intensidade de distribuição do campo elétrico na quarta camada de milho situada na base do recipiente. Pode-se também constatar que a distribuição de campo elétrico nessas quatro camadas de milho não apresenta uma boa uniformização. No entanto, na Figura 39b, que corresponde à incidência da microonda a uma profundidade de 8 cm, verifica-se que nessa profundidade a distribuição do campo elétrico é a mais uniforme das quatro camadas de milho, tendo-se sempre como referencial a primeira camada de milho correspondente à parte de cima do recipiente.

Comparando as Figuras 39a com a 39b observa-se uma maior distribuição do campo elétrico no protótipo, constatando-se uma menor distribuição de campo na quarta camada de milho localizada na base do recipiente. No entanto, no geral, o resultado do protótipo apresenta um melhor desempenho, devido às modificações feitas no forno original, com a instalação de um espalhador de campo elétrico no topo da cavidade e de uma cunha metálica localizada na saída de microondas no lado direito inferior da cavidade, além da principal modificação feita no forno microondas que é a utilização das potências linearizadas com relação às correntes de anodo.

A confecção do secador protótipo mostrou confiabilidade, e grau de segurança, ficando o nível de densidade de potência abaixo de  $1 \text{ mW/cm}^2$  a 5 cm de distância do orifício na base do forno, onde usa-se o suporte de *teflon*, e na porta do secador.



(a)



(b)

FIGURA 39 - Distribuição de campo elétrico nas camadas de milho usando forno original (a) e usando o protótipo do secador (b).

## 4.2 – Curvas de potência absorvida com uma carga de água e nas camadas de milho com alturas de 2 cm, 5 cm e 10 cm, utilizando-se o secador protótipo por microonda

### 4.2.1 – Curva de potência absorvida usando uma carga de água

Na Figura 40, encontra-se a curva de potência absorvida pela carga de água em função da corrente de anodo, obtida experimentalmente e calculada por regressão linear. A linearidade da curva vem demonstrar que a carga de água é homogênea apresentando constante de atenuação constante.

Os valores experimentais e os parâmetros da equação que caracteriza a curva de potência encontram-se na Tabela 5.

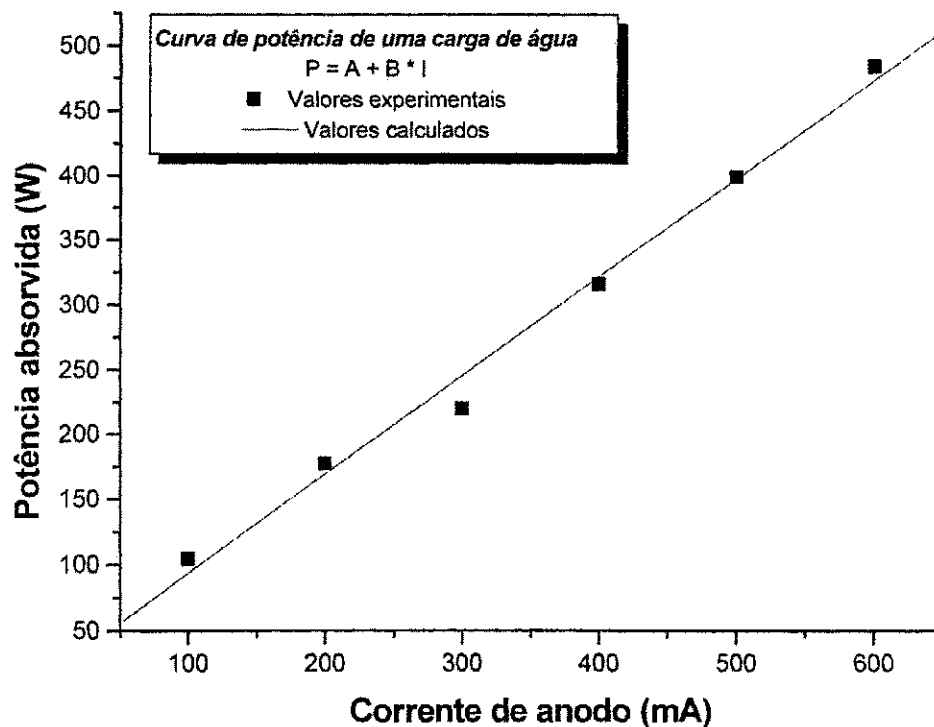


FIGURA 40 – Curva característica de potência de uma carga de água.



Tabela 5 – Valores experimentais de corrente de anodo, potência absorvida e parâmetros da equação da curva característica de potência para a carga de água.

Corrente de anodo (mA)	Potência (W)	Parâmetros da equação
100	104,7	A = 17,65
200	177,5	B = 0,76
300	220,1	R <sup>2</sup> = 0,99
400	315,9	
500	399,3	
600	484,5	

#### 4.2.2 - Curvas de potência absorvida nas camadas de milho com alturas de 2cm, 5cm e 10 cm

Para cada experiência, utilizaram-se valores de correntes do anodo diferentes que se encontram na Tabela 6.

Nas Figuras 41, 42 e 43, estão desenhados os dados experimentais e os calculados das curvas de potências adsorvidas para as camadas de milho de 2 cm, 5 cm e 10 cm de altura, respectivamente. Pode-se observar nessas figuras que as três curvas de potência não são lineares, devido ao produto não ser homogêneo, isto é, apresenta diferentes constantes de atenuação. As curvas de potência podem ser divididas em duas partes, uma parte com característica linear e a outra parte com característica não linear. As curvas apresentam faixas de potências diferentes, devido ao fato das camadas terem alturas diferentes e conseqüentemente quantitativas de água diferentes. Quanto maior a quantidade de massa de água na camada de milho, maior será a potência absorvida.

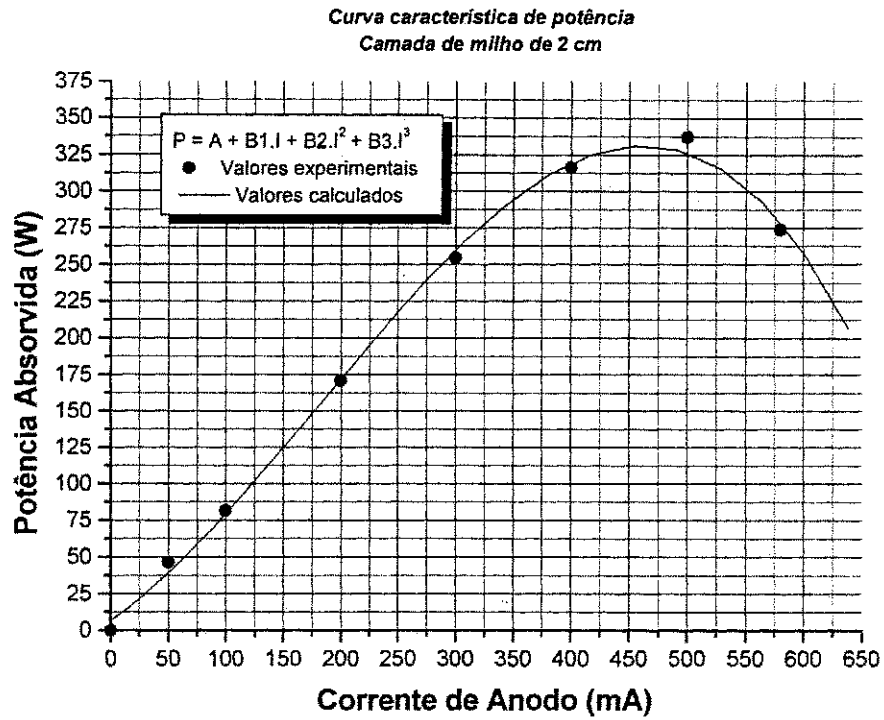


FIGURA 41- Curva de potência absorvida para camada de milho de 2 cm de altura.

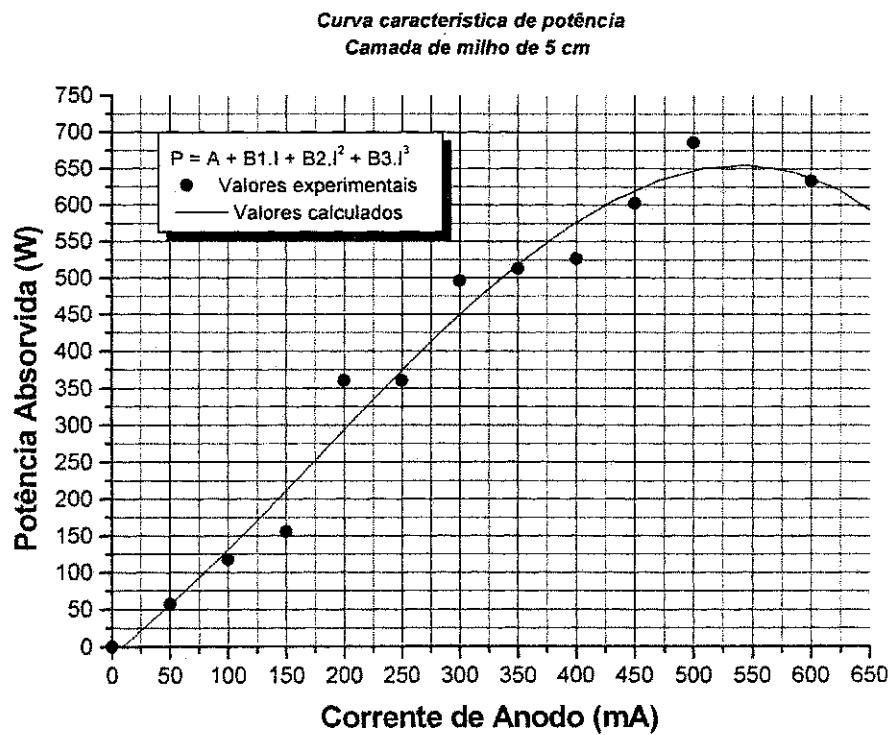


FIGURA 42 - Curva de potência absorvida para camada de milho de 5 cm de altura.

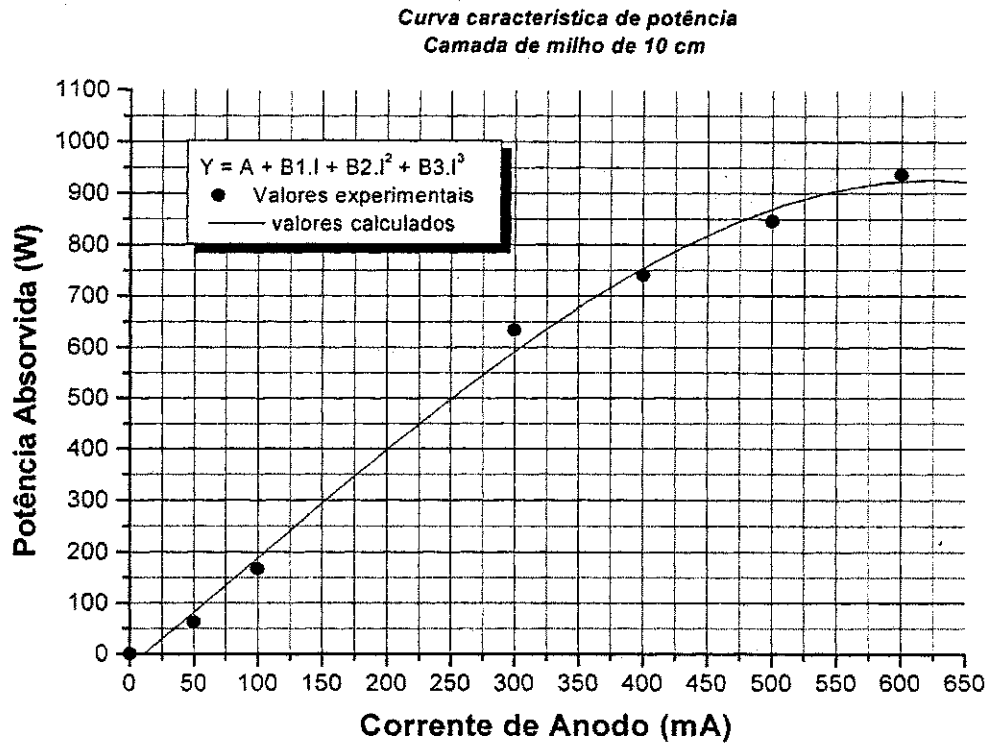


FIGURA 43 – Curva de potência absorvida para camada de milho de 10 cm de altura.

Tabela 6 – Valores experimentais de corrente de anodo, potência absorvida e parâmetros da equação da curva característica de potência para as camadas de milho de altura de 2 cm, 5cm e 10 cm.

Camada de milho de 2 cm			Camada de milho de 5 cm			Camada de milho de 10 cm		
Corrente de anodo (mA)	Potência absorvida (W)	Parâmetros da equação	Corrente de anodo (mA)	Potência absorvida (W)	Parâmetros da equação	Corrente de anodo (mA)	Potência absorvida (W)	Parâmetros da equação
0	0	A = 6,04	0	0	A = -10,76	0	0	A = -22,57
50	46,26	B1 = 0,56	50	56,67	B1 = 1,24	50	62,39	B1 = 2,06
100	81,52	B2 = 0,002	100	117,64	B2 = 0,002	100	167,23	B2 = -6,98.10 <sup>-6</sup>
200	171,06	B3 = -3,97.10 <sup>-6</sup>	150	155,79	B3 = -4,18.10 <sup>-6</sup>	200	262,56	B3 = -2,51.10 <sup>-6</sup>
300	254,53	R <sup>2</sup> = 0,997	200	360,08	R <sup>2</sup> = 0,976	300	634,49	R <sup>2</sup> = 0,995
400	316,28	-	250	360,48	-	400	740,24	-
500	337,6	-	300	496,01	-	500	845,99	-
580	273,81	-	350	512,94	-	600	936,64	-
-	-	-	400	526,21	-	-	-	-
-	-	-	450	602,68	-	-	-	-
-	-	-	500	686,38	-	-	-	-
-	-	-	600	633,28	-	-	-	-

### 4.3 – Curvas de secagem contínua para as camadas de milho com alturas de 2 cm, 5 cm e 10 cm

Com base nos resultados obtidos no secador protótipo de potência absorvida a diferentes alturas das camadas de milho, selecionaram-se quatro potências linearizadas em relação às correntes de anodo para estudo. Nas Figuras 44, 45 e 46, encontram-se as curvas de secagem contínua para as camadas de milho de 2 cm, 5 cm e 10 cm de altura utilizando-se essas potências selecionadas.

As curvas de secagem contínua para as 3 camadas de milho com suas respectivas potências absorvidas, apresentam 3 fases distintas.

Na fase 1, que é de curta duração, existe um aquecimento do produto com pequena perda de água. Na fase 2, sua duração é muito maior em relação à primeira, onde o produto realmente perde umidade até atingir um valor de 13% de conteúdo de água em base úmida ou 15% de conteúdo de água em base seca. Na fase 3, a água do produto é retirada mais lentamente, pois valores inferiores a 13% base úmida, a água do produto se encontra mais fortemente ligada às substâncias e, em consequência disso, requer mais energia para sua vaporização, portanto a sua retirada do interior do produto leva mais tempo. Observando as curvas nessas figuras, constata-se que o tempo de secagem diminui com o aumento da potência para as camadas de milho de 2 cm, 5 cm e 10 cm de altura. No entanto, nas camadas de 2 cm e 5 cm de altura, utilizando a potência máxima ocorreu perda de matéria seca.

Para evitar os pontos de campo máximo, o espalhador localizado na parte superior do secador não foi suficientemente eficaz, necessitando, talvez, que o produto fique também em movimento dentro da cavidade como no forno original. O procedimento feito de colocar um espalhador da microonda na parte superior do secador e interromper o movimento do prato (original de fabrica) foi realizado para permitir a automação do processo.

Na Tabela 7 encontram-se os coeficientes das curvas características de secagem contínua para as alturas da camada de milho de 2cm, 5cm e 10 cm e as diferentes potências

absorvidas. Os valores de variação do conteúdo de água com o tempo para as condições acima descritas encontram-se no Apêndice A.

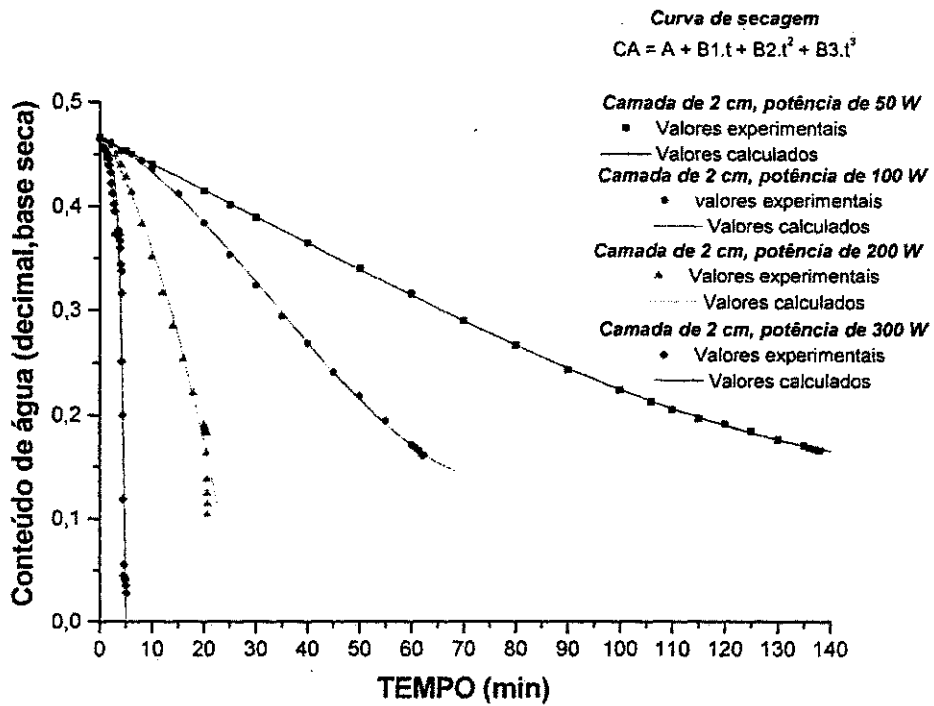


FIGURA 44 – Curva de secagem contínua para a camada de milho de 2 cm de altura.

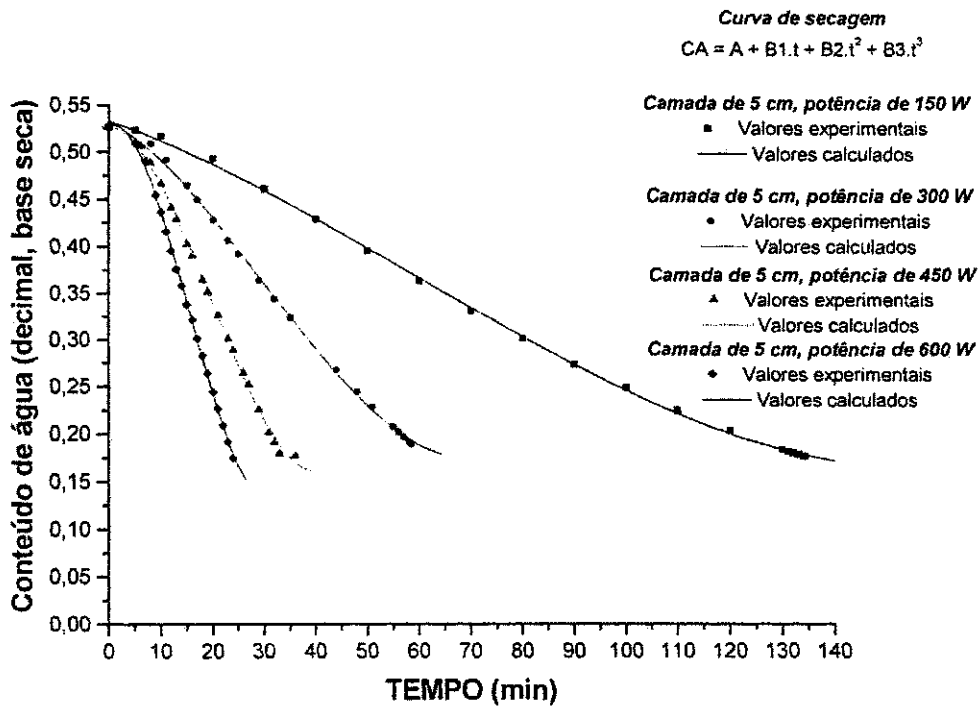


FIGURA 45 – Curva de secagem contínua para a camada de milho de 5 cm de altura.

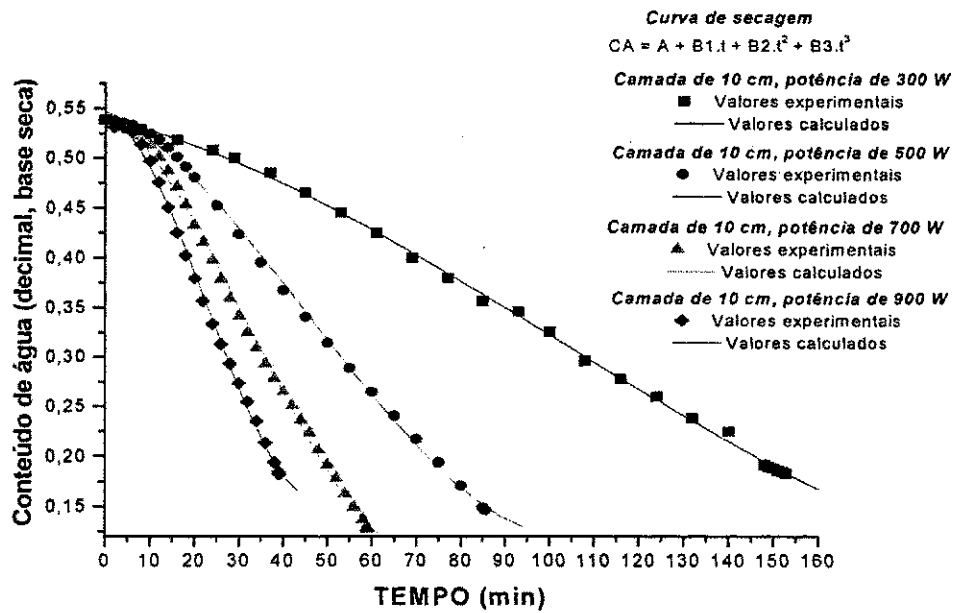


FIGURA 46 – Curva de secagem contínuia para a camada de milho de 10 cm.

TABELA 7 – Parâmetros da curva característica de secagem contínuia para as camadas de 2 cm, 5 cm e 10 cm de altura.

Equação $CA = A + B1.t + B2.t^2 + B3.t^3$					
Altura de 2 cm					
Potência (W)	A	B1	B2	B3	R <sup>2</sup>
50	0,4659	-0,0024	-4,623.10 <sup>-6</sup>	4,6013.10 <sup>-8</sup>	0,9999
100	0,4676	-0,0026	-9,939.10 <sup>-5</sup>	1,003.10 <sup>-6</sup>	0,9996
200	0,4732	-0,0086	-2,848E.10 <sup>-4</sup>	-1,538.10 <sup>-6</sup>	0,9744
300	0,4897	-0,0983	0,05959	-0,01182	0,9413
Altura de 5 cm					
150	0,5330	-0,0019	-2,115.10 <sup>-5</sup>	1,187.10 <sup>-7</sup>	0,9994
300	0,5324	-0,0028	-1,426.10 <sup>-4</sup>	1,584.10 <sup>-6</sup>	0,9989
450	0,5281	0,0024	-0,00147	3,196.10 <sup>-5</sup>	0,9993
600	0,5277	-7,277.10 <sup>-4</sup>	-6,600.10 <sup>-4</sup>	1,122.10 <sup>-5</sup>	0,9988
Altura de 10 cm					
300	0,5403	-0,0010	-1,625.10 <sup>-5</sup>	5,300.10 <sup>-8</sup>	0,9991
500	0,5472	-0,0020	-7,949.10 <sup>-5</sup>	5,771.10 <sup>-7</sup>	0,9988
700	0,5447	-0,0026	-1,909.10 <sup>-4</sup>	1,971.10 <sup>-6</sup>	0,9983
900	0,5418	-0,0011	-4,681.10 <sup>-4</sup>	6,808.10 <sup>-6</sup>	0,9984

#### 4.4 – Curvas de secagem intermitente para as camadas de milho de 2 cm, 5 cm e 10 cm de altura

Para determinar a variação de temperatura durante a secagem do milho no secador protótipo nas alturas das camadas de 2 cm, 5 cm e 10 cm e nas potências estudadas, necessitou-se interromper periodicamente a secagem para a leitura dos termopares, uma vez que a microonda interfere no equipamento de leitura. Esse procedimento se deu por indisponibilidade de ter termopares adequados para leitura automatizada, no entanto a interrupção da potência incidente no produto, caracteriza os tempos e queda de temperatura em função da interrupção.

As curvas de secagem intermitente e as curvas de temperaturas para as camadas de milho de 2 cm, 5 cm e 10 cm de altura encontram nas Figuras 47, 48 e 49, respectivamente e na Tabela 8 e 9 estão, respectivamente, os coeficientes dessas equações para as curvas de secagem e de temperatura com o tempo, obtidas por regressão não linear. Os tempos de secagem intermitente logicamente aumentaram, em relação aos tempos de secagem contínua apresentado no item anterior, devido ao fato de haver interrupção do processo e o reinício do mesmo, ocorrendo, nesse intervalo, dissipação de energia.

No Apêndice B encontram-se os valores de variação do conteúdo de água e tempo para as diferentes condições de potências adsorvidas e de alturas da camada de secagem.

TABELA 8 – Parâmetros da curva característica de secagem intermitente para as camadas de 2 cm, 5 cm e 10 cm de altura.

Equação CA = A + B1.t + B2.t <sup>2</sup> + B3.t <sup>3</sup>					
Altura de 2 cm					
Potência (W)	A	B1	B2	B3	R <sup>2</sup>
50	0,4968	-0,0029	-2,391.10 <sup>-6</sup>	4,708.10 <sup>-8</sup>	0,9986
100	0,4903	-0,0013	-7,171.10 <sup>-5</sup>	4,902.10 <sup>-7</sup>	0,9976
200	0,4925	-0,0049	6,847.10 <sup>-5</sup>	-3,473.10 <sup>-6</sup>	0,9755
300	0,4781	-0,0014	-0,0016	5,214.10 <sup>-5</sup>	0,9968
Altura de 5 cm					
150	0,5270	-0,0018	-1,532.10 <sup>-5</sup>	6,632.10 <sup>-8</sup>	0,9993
300	0,5277	-7,387.10 <sup>-4</sup>	-1,5534.10 <sup>-4</sup>	1,216.10 <sup>-6</sup>	0,9991
450	0,5254	0,0042	-2,955.10 <sup>-4</sup>	4,030.10 <sup>-6</sup>	0,9971
600	0,5314	-0,0033	-9,378.10 <sup>-4</sup>	1,937E-5	0,9966
Altura de 10 cm					
300	0,4854	-0,0011	-1,9767.10 <sup>-5</sup>	8,497.10 <sup>-8</sup>	0,9995
500	0,4865	-0,0015	-7,3342.10 <sup>-5</sup>	5,240E-7	0,9991
700	0,4874	-0,0025	-1,5522.10 <sup>-4</sup>	1,642.10 <sup>-6</sup>	0,9991
900	0,4728	0,0043	-5,8764.10 <sup>-4</sup>	7,242.10 <sup>-6</sup>	0,9990

TABELA 9 – Parâmetros da curva característica de temperatura para as camadas de 2 cm, 5 cm e 10 cm de altura.

Equação T = Y <sub>0</sub> + A <sub>1</sub> . exp ( - ( t - X <sub>0</sub> ) / t <sub>1</sub> )				
Altura de 2 cm				
Potência (W)	Y <sub>0</sub>	X <sub>0</sub>	A <sub>1</sub>	t <sub>1</sub>
50	67,5345	0	-39,2365	35,7758
100	77,0001	0	-44,0638	23,6709
200	84,7612	0	-56,2888	8,8247
300	129,1169	0	-92,4865	3,5853
Altura de 5 cm				
150	129,3309	0	-97,5580	306,1860
300	86,9943	0	-52,1828	39,2759
450	92,0884	0	-59,8453	19,6139
600	124,1487	0	-94,6733	17,3316
Altura de 10 cm				
300	55,9291	0	-27,8007	26,2422
500	91,8196	0	-57,2514	44,3917
700	78,6622	0	-50,3699	9,4780
900	136,7670	0	-101,7987	14,4467



Na Tabela 10, pode-se observar nas curvas de secagem intermitente que os tempos de secagem para cada camada tende a diminuir com o aumento de cada potência ajustada.

Na Tabela 11, encontram-se os valores de temperaturas aproximados finais, para cada camada de milho de acordo com suas potências ajustadas e verifica-se que a temperatura de secagem para cada camada variou em média de 70 ° C até 130 ° C, correspondendo à potência mínima até a potência máxima, em que os valores acima de 90°C, para secagem de grãos, são considerados como secagens a altas temperaturas. Este fato é relato por CAVALCANTI MATA (1997), que considera que a secagem acima de 90°C por um período de tempo prolongado pode degradar alguns constituintes químicos como carboidratos e proteínas.

Tabela 10 – Tempo de secagem intermitente final para as camadas de milho de 2 cm, 5 cm e 10 cm de altura.

Tempo de secagem aproximado (min)			
Potência (W)	Altura da camada (cm)		
	2	5	10
50	140	-	-
100	80	-	-
150	-	170	-
200	40	-	-
300	20	80	140
450	-	45	-
500	-	-	80
600	-	20	-
700	-	-	55
900	-	-	40

Tabela 11 – Temperatura final da secagem intermitente para as camadas de 2 cm, 5 cm e 10 cm de altura.

Temperaturas de secagem aproximada (°C)			
Potência (W)	Altura da camada (cm)		
	2	5	10
50	70	-	-
100	80	-	-
150	-	70	-
200	90	-	-
300	130	85	55
450	-	90	-
500	-	-	80
600	-	130	-
700	-	-	80
900	-	-	130

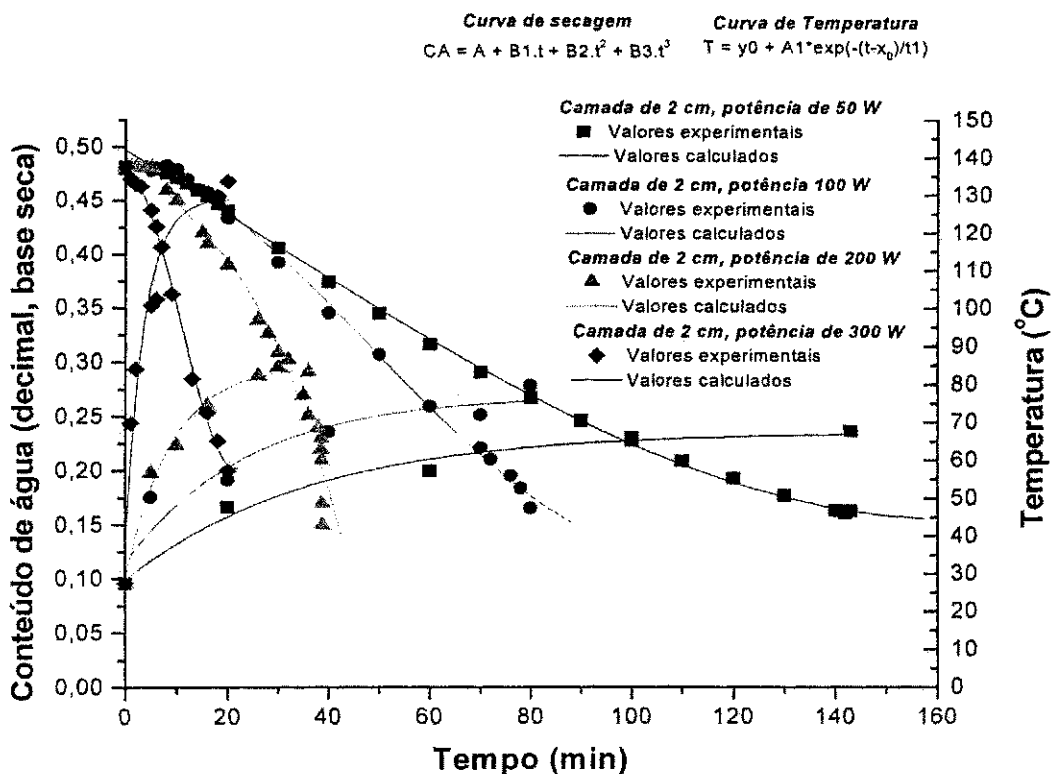
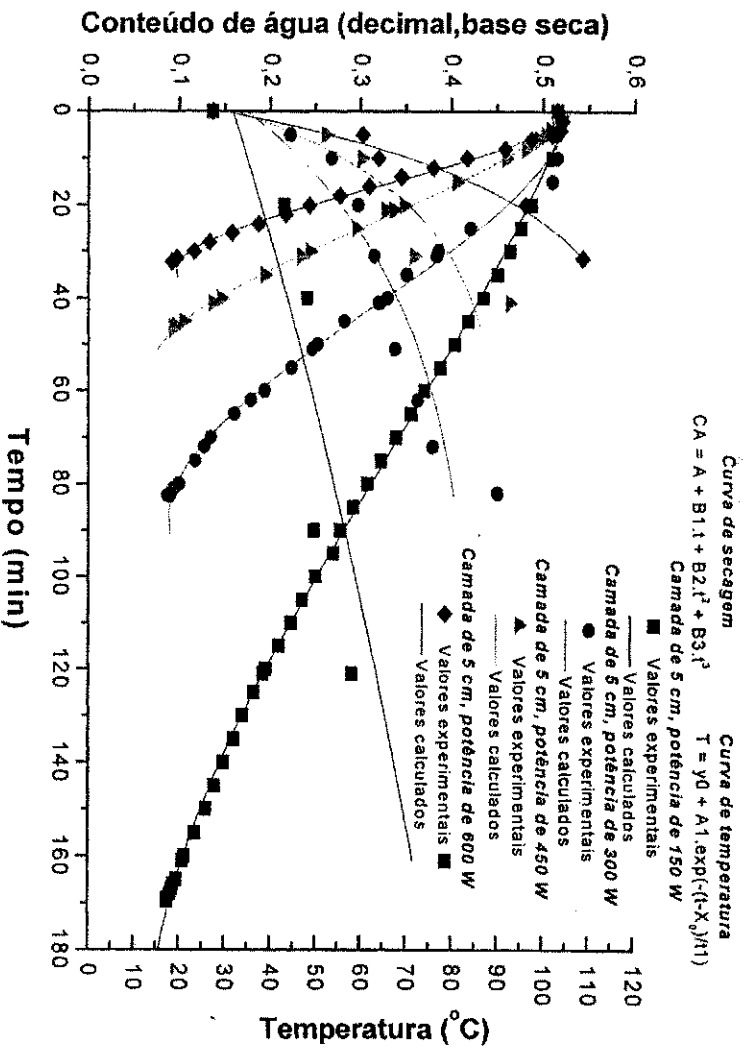
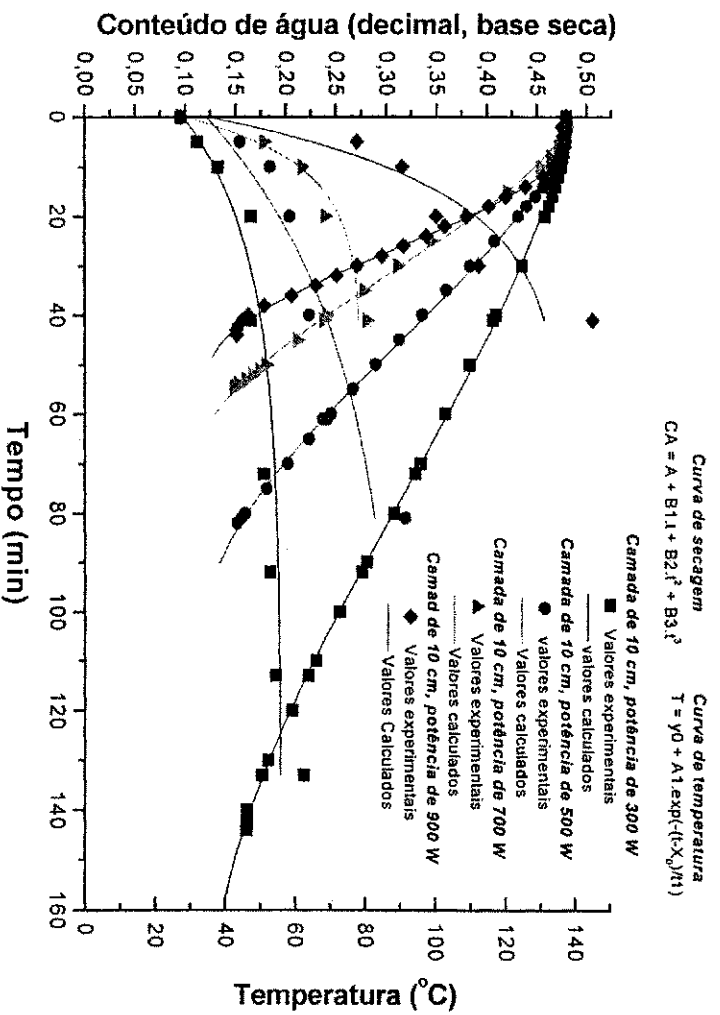


FIGURA 47 – Curvas de secagem intermitente e temperaturas para a camada de milho de 2 cm.



FIGURAS 48 – Curvas de secagem intermitente e temperaturas pra a camada de milho de 5 cm.



FIGURAS 49 – Curvas de secagem intermitente e temperaturas para a camada de milho de 10 cm.

#### 4.5 – Aspecto da cor da camada de milho após a secagem intermitente

As cores das camadas de milho de 2 cm, 5 cm e 10 cm, após serem secas com as 4 potências ajustadas, foram comparadas com o milho original e verificou-se que o processo de secagem por microondas contribui para que haja uma pequena alteração de cor do milho original, como pode ser observado na Figura 50. Contudo, segundo SILVA (1995) nos processos convencionais de secagem este fato também ocorre, uma vez que quando o produto é seco a determinadas temperaturas ocorrem alterações enzimáticas que podem provocar escurecimento resultante da oxidação das polifenoloxidasas.

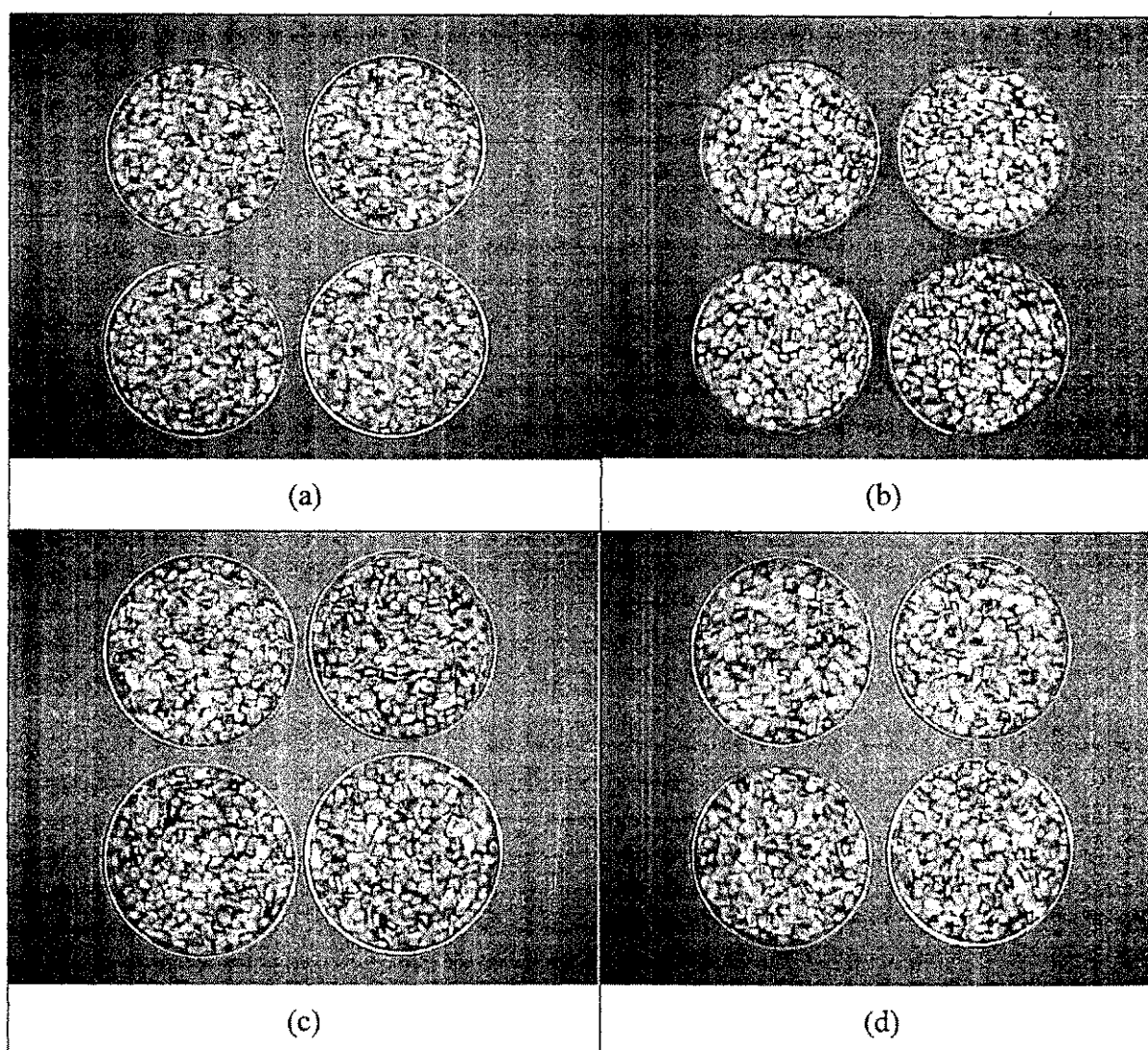


FIGURA 50 – Aspectos das cores da camada de milho original (a), da camada de milho de 2 cm (b), da camada de milho de 5 cm (c) e da camada de milho de 10 cm após secagem intermitente.

Portanto, o presente trabalho leva-nos a concluir que produtos biológicos, como o milho, podem ser secos em camadas espessas até uma altura de 10 cm, no entanto, algumas potências, onde as temperaturas do produto podem chegar a atingir 130 °C devem ser evitadas para que o produto não sofra possíveis alterações nos seus constituintes químicos.

## 5 – CONCLUSÕES

O presente trabalho foi dividido em duas fases. A primeira fase consistiu no estudo das características de operação e construção de um secador por microondas com potências linearizadas em relação à corrente de anodo. Para tanto técnicas de medidas simples e facilmente aplicáveis foram utilizadas para determinação, principalmente, da potência absorvida pelo milho e da distribuição de energia no interior do secador. Na segunda fase, o forno secador foi adaptado e instrumentalizado para a secagem de grãos de milho, cujas características de secagem obtidas viabilizam sua aplicação principalmente quando se quer rapidez de operação. Portanto diante dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- 5.1 – O campo elétrico nas camadas de milho do protótipo secador, apresenta uma melhor distribuição espacial do que a observada no forno original.
- 5.2 – A curva de potência absorvida pela água tem uma característica linear em relação as correntes de anodo.
- 5.3 – As curvas de potência absorvida pelas camadas de milho de 2 cm, 5 cm e 10 cm, tem características não lineares em relação às correntes de anodo, apresentando uma linearidade em uma faixa de corrente de anodo entre 0 e 400 mA.
- 5.4 – O protótipo de secador por microondas, com potências linearizadas variando entre 50 W e 300 W em processo de secagem contínua, consegue secar uma camada de milho de 2 cm de altura, de um conteúdo de água de aproximadamente 46,5 % até 13 % base seca, em um de tempo de aproximadamente 138 minutos e de 5 minutos.
- 5.5 - O protótipo de secador por microondas, com potências linearizadas variando entre 150 W e 600 W em processo de secagem contínua, consegue secar uma camada de milho de 5 cm de altura, de um conteúdo de água de aproximadamente 52,5 % até 17,5 % base seca, em um de tempo de aproximadamente 134 minutos e de 24 minutos.

- 5.6 – O protótipo de secador por microondas, com potências linearizadas variando entre 300 W e 900 W em processo de secagem contínua, consegue secar uma camada de milho de 10 cm de altura, de um conteúdo de água de aproximadamente 53,5 % até 15,5% base seca, em um de tempo de aproximadamente 153 minutos e de 40 minutos.
- 5.7 – O protótipo de secador por microondas, com potências linearizadas variando entre 50 W e 300 W em processo de secagem intermitente, consegue secar uma camada de milho de 2 cm de altura, de um conteúdo de água de aproximadamente 48,10 % até 15 % base seca, em um de tempo de aproximadamente 143 minutos e de 20 minutos, respectivamente, correspondendo às temperaturas finais de 68 °C e 134°C.
- 5.8 – O protótipo de secador por microondas, com potências linearizadas variando entre 150 W até 600 W em processo de secagem intermitente, consegue secar uma camada de milho de 5 cm de altura, de um conteúdo de água de aproximadamente 51,5 % até 8,7 % base seca, em um de tempo de aproximadamente 170 minutos e de 32 minutos, respectivamente, correspondendo às temperaturas finais de 67,7 °C e 133,65 °C.
- 5.9 – O protótipo de secador por microondas com potências linearizadas variando entre 300 W até 900 W em processo de secagem intermitente, consegue secar uma camada de milho de 10 cm de altura, de um conteúdo de água de aproximadamente 47,2 % até 14,8 % base seca, em um de tempo de aproximadamente 144 minutos e de 44 minutos, respectivamente, correspondendo às temperaturas finais de 62 °C e 145 °C.
- 5.10 – O tempo de secagem nas camadas de 2 cm, 5 cm e 10 cm, foi maior para o processo de secagem intermitente da microondas do que no processo de secagem contínua.

5.11 – O milho seco no protótipo de secador por microondas, nas camadas de 2 cm, 5 cm e 10 cm de altura, em processo de secagem contínua ou intermitente, tem uma pequena alteração de cor em relação à coloração do milho original.

## 6 - SUGESTÕES

A seguir, são apresentadas algumas sugestões para continuação deste trabalho:

- Análise numérica dos campos internos produzidos e conseqüente valor de temperatura obtido, utilizando modelos aproximados ou exatos;
- Utilização de secadores a estado sólido;
- Monitoração da temperatura do produto, usando medidor de temperatura óptico, para evitar a interrupção do processo de secagem;
- Automatizar totalmente o secador, utilizando circuitos de interface e programas computacionais para melhorar o controle do equipamento;
- Realizar um estudo matemático das curvas que caracterizam o processo de secagem por microondas para otimizar o processo de secagem;
- Desenvolver um secador, combinando fluxo de ar quente com a energia de microondas para secagem do produto em movimento;
- Avaliação energética;
- Usar frequência variável para ajustar a penetração do campo com o nível de água no grão;
- Tratamento estatístico, desvio padrão.



---

**7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

BAKKE – ARKEMA, F. W.; BROOKER, R. C & LEREN, L. E. Advances in Cereal Science and Technology. In: BAKKE – ARKEMA, F. W.; BROOKER, R. C & LEREN, L. E. **Cereal grain drying**. St Paul, v. 2, 1978.

BRASIL, Ministério da Agricultura. **Regras para análises de sementes**. Brasília: MARE 2003. 188p.

BREN, S. P. A. Historical introduction to EMF health effects. **IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine**, p. 24-30, july/August. 1996.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grain and oilseeds**. Westport: AVI, 1992. 450 p.

CARVALHO, J. N. **Desenvolvimento de um protótipo de sistemas de hipertermia por microondas**. 1996. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, 1996.

CASTRO, A. L. S. **Desenvolvimento de um protótipo de secador por microondas**. 1994. 47 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal da Pará, Belém, 1994.

CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. **Efeito da secagem em altas temperaturas por curtos períodos de tempo em camada estacionária, sobre a armazenagem de sementes de feijão (*Phaseolus vulgaris*L.) variedade “carioca”**. Campinas. Universidade Estadual de Campinas. 1997. 229 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Departamento de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

CRAPUCHETTES, P. W. **Microwave on production line.** Eletronics, mar. 1966.

DONZELES, S. M. L. **Curvas de quebra de milho em camadas finas; na faixa de temperatura de 45 a 150 °C.** 1982. 53 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Departamento de Engenharia Agrícola. Universidades Federais de Viçosa, Viçosa, 1982.

FELTRE, R.; SETSUO, Y. **Físico – química: teorias e exercícios.** São Paulo: Moderna, 1989. 154 p.

FORTES, M. ; OKOS, M. R. **Drying theories: their bases and advances in drying.** Science press, USA, p. 59-67, 1983.

HUKILL, W. V. **Drying of grain.** In: CHRISTEN, C. M.(ed). **Storage of cereal grains and their products.** St. Paul, Minn: American Society of Cereal Chemists, 1974, cap. 13, p. 481-508.

METAXAS, A. C.; MEREDITH, R. J. **Industrial microwave heating.** United Kingdon: Peter Peregrinus ltda, 1988. 105 p.

MUDGETT, R. E. **Dielectric properties of food.** In: DECAREAU, R. V. **Microwaves in the food industry.** London: Academic Press Food – Technology, 1985. p. 15-37.

PUZZI, D. **Abastecimento e armazenamento de grãos.** Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1986. 603p.

ROCHA, C. R. **Aplicação de microondas na parboilização de arroz.** 1998. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Departamento de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1998.

ROSSI, S. J.; ROA, G. **Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar e ar natural.** São Paulo: Academia de Ciências do Estado de São Paulo, 1980. 295 p.

SHIFFMANN, R. F. Microwave and dielectric drying. In: MUJUNDAR, A. S. (ed.). **Handbook of industrial drying.** New York: Marcel Dekker, 1987, cap. 10, p. 327-356.

SILVA, J. S. **Pré – Processamento de produtos agrícolas.** Juiz de Fora: Instituto Maria, 1995. 500 p.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: Principles and applications and desing.** Gordon and Breach Science Publishres, 1986. 150 p.

THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying. **Transactions of the ASAE,** St. Joseph, Mich, v. 11, n. 4, p. 582 – 586.

VAN REST, D. J.; ISAACS, G. W. Exposed layer drying rater of grain. **Trasactions of the ASAE,** St. Joseph, v. 11, n. 2, p. 236 – 237 e 239, mar/apr. 1968.

VON HIPPEL, A. R. **Dielectrics and waves.** Massachusetts: Mit Press, 1992, 108 p.

# APÊNDICE

**APÊNDICE A**

**TABELA A1 – Valores de tempo e conteúdo de água para secagem contínua da camada de 2 cm.**

Potência 50 W		Potência 100 W		Potência 200 W		Potência 300 W	
Tempo (min)	Conteúdo de água (b.s)	Tempo (min)	Conteúdo de água (b.s)	Tempo (min)	Conteúdo de água (b.s)	Tempo (min)	Conteúdo de água (b.s)
0	0,46542	0	0,46542	0	0,46542	0	0,46542
5	0,45357	2	0,46088	1	0,46253	0,2	0,46343
10	0,44011	4	0,45369	2	0,45777	0,4	0,46139
20	0,41456	6	0,45027	3	0,45001	0,5	0,45743
25	0,40164	8	0,44362	4	0,43995	0,7	0,45465
30	0,38949	10	0,43625	5	0,42783	0,8	0,45618
40	0,36496	15	0,41233	6	0,41366	0,9	0,45352
50	0,34037	20	0,38405	8	0,3829	1	0,4546
60	0,31577	25	0,35353	10	0,35096	1,2	0,45199
70	0,29052	30	0,32372	12	0,31673	1,4	0,4495
80	0,26706	35	0,29438	14	0,28515	1,6	0,44553
90	0,2439	40	0,26851	16	0,25351	1,8	0,43987
100	0,22454	45	0,24117	18	0,22134	2	0,43279
106	0,21269	50	0,21849	20	0,19087	2,2	0,42214
110	0,20555	55	0,19427	20,1	0,18917	2,4	0,41239
115	0,19703	60	0,17118	20,2	0,18805	2,6	0,4022
120	0,19144	60,5	0,16929	20,3	0,18658	2,8	0,39517
125	0,18465	61	0,16723	20,4	0,18434	3	0,37319
130	0,17661	61,5	0,16529	20,43333	0,18428	3,1	0,37195
135	0,17071	62	0,16169	20,46667	0,18399	3,2	0,37223
136	0,16857	62,25	0,16051	20,5	0,1834	3,3	0,37353
137	0,16732	62,33333	0,16128	20,53333	0,18264	3,4	0,37461
138	0,16607	62,41667	0,16116	20,56667	0,16346	3,5	0,37637
				20,6	0,13847	3,6	0,37637
				20,63333	0,12476	3,7	0,37268
				20,66667	0,11424	3,8	0,36651
				20,7	0,10412	3,9	0,35971
						4	0,34362
						4,1	0,33751
						4,2	0,31615
						4,3	0,25146
						4,4	0,20014
						4,5	0,11868
						4,6	0,04458
						4,7	0,0558
						4,8	0,04011
						4,9	0,04198
						5	0,03506
						5,1	0,02753

## APÊNDICE A

TABELA A2 – Valores de tempo e conteúdo de água para secagem contínua da camada de 5 cm.

Potência 150 W		Potência 300 W		Potência 450 W		Potência 600 W	
Tempo (min)	Conteúdo de água (b.s)	Tempo (min)	Conteúdo de água (b.s)	Tempo (min)	Conteúdo de água (b.s)	Tempo (min)	Conteúdo de água (b.s)
0	0,52602	0	0,52602	0	0,52602	0	0,52602
5	0,5232	8	0,50891	6	0,50621	5	0,50953
10	0,51677	11	0,4918	8	0,48851	7	0,49024
20	0,49284	15	0,46463	10	0,46639	9	0,45485
30	0,46128	17	0,45014	12	0,44145	10	0,43676
40	0,42871	20	0,4282	13	0,42878	11	0,41606
50	0,39594	23	0,40646	15	0,40304	12	0,39575
60	0,36316	25	0,39217	16	0,39017	13	0,37625
70	0,3314	29	0,3642	18	0,36422	14	0,35816
80	0,30224	32	0,34367	19	0,35135	15	0,33806
90	0,2745	35	0,32374	21	0,32621	16	0,32137
100	0,24936	44	0,26799	23	0,30147	17	0,30147
110	0,22564	48	0,24485	24	0,2892	18	0,28317
120	0,20413	51	0,22854	26	0,26487	19	0,26408
130	0,18462	55	0,20781	27	0,2524	20	0,24417
131	0,18282	56	0,20278	29	0,22605	21	0,22669
132	0,18101	57	0,19755	31	0,20212	22	0,2092
133	0,1794	58	0,19232	32	0,19105	23	0,19191
134	0,17759	58,5	0,1895	33	0,17979	24	0,17522
134,33333	0,17698			36	0,17697		



## APÊNDICE B

TABELA B1 – Valores de tempo e conteúdo de água para secagem intermitente da camada de 2 cm.

Potência 50 W		Potência 100 W		Potência 200 W		Potência 300 W	
Tempo (min)	Conteúdo de água (b.s)	Tempo (min)	Conteúdo de água (b.s)	Tempo (min)	Conteúdo de água (b.s)	Tempo (min)	Conteúdo de água (b.s)
0	0,48104	0	0,48104	0	0,48104	0	0,48104
6	0,47906	5	0,4783	2	0,4809	1	0,47
8	0,47531	6	0,48037	4	0,4808	2	0,465
10	0,47109	8	0,48238	5	0,4807	3	0,46315
12	0,46627	10	0,47867	8	0,46	5	0,44099
14	0,4596	12	0,46955	10	0,45	6	0,42556
16	0,45419	14	0,46042	15	0,42	7	0,40689
18	0,44669	16	0,45768	16	0,41	9	0,36269
20	0,44045	18	0,44753	20	0,39	13	0,28493
30	0,40558	20	0,43359	26	0,33901	16	0,25341
40	0,37423	30	0,39241	28	0,32663	18	0,22759
50	0,34466	40	0,34545	30	0,30895	20	0,21
60	0,31657	50	0,30701	32	0,30247		
70	0,29093	60	0,25956	35	0,27		
80	0,26743	70	0,22124	36	0,2512		
90	0,24637	72	0,21041	38	0,24		
100	0,22775	76	0,19563	38,5	0,23		
110	0,2093	78	0,18364	38,58333	0,22		
120	0,19294	79,91667	0,16558	38,66667	0,21		
130	0,17759			38,75	0,17		
140	0,16397			38,83333	0,15		
141	0,16337						
142	0,16129						
143	0,16367						



## APÊNDICE B

TABELA B2 – Valores de tempo e conteúdo de água para secagem intermitente da camada de 5 cm.

Potência 150 W		Potência 300 W		Potência 450 W		Potência 600 W	
Tempo (min)	Conteúdo de água (b.s)	Tempo (min)	Conteúdo de água (b.s)	Tempo (min)	Conteúdo de água (b.s)	Tempo (min)	Conteúdo de água (b.s)
0	0,51515	0	0,51515	0	0,51515	0	0,51515
10	0,51017	5	0,5151	2	0,51415	2	0,52127
20	0,48745	10	0,515	4	0,50813	4	0,51845
25	0,47629	15	0,51	5	0,50311	5	0,50953
30	0,46413	20	0,48192	6	0,49649	6	0,48761
35	0,45038	25	0,4209	8	0,48184	8	0,45878
40	0,43483	30	0,38545	10	0,45996	10	0,41746
45	0,41849	31	0,38343	15	0,40558	12	0,38037
50	0,40354	35	0,35061	20	0,34798	14	0,3451
55	0,38779	40	0,32986	21	0,33714	16	0,30962
60	0,37005	41	0,31999	25	0,2952	18	0,27737
65	0,3557	45	0,28193	30	0,24363	20	0,2431
70	0,33956	50	0,25212	31	0,23379	22	0,21649
75	0,32282	51	0,24648	35	0,19386	24	0,18706
80	0,30807	55	0,22332	40	0,1463	26	0,15804
85	0,29212	60	0,19351	41	0,13706	28	0,13345
90	0,27777	62	0,1786	45	0,10476	30	0,11631
95	0,2698	65	0,16028	46	0,09733	31,5	0,09736
100	0,24987	70	0,1345	46,5	0,09412	32,25	0,09212
105	0,23492	72	0,12765	46,58333	0,09412		
110	0,22257	75	0,11758				
115	0,20941	80	0,10006				
120	0,19486	81	0,09462				
121	0,19167	82	0,091				
125	0,18191	82,5	0,08757				
130	0,16915	82,58333	0,08898				
135	0,15958	82,66667	0,09019				
140	0,14862						
145	0,13886						
150	0,12949						
155	0,11713						
160	0,10617						
161	0,10418						
165	0,097						
166	0,09361						
167	0,09262						
168	0,09102						
169	0,08763						
169,5	0,08743						
169,58333	0,08743						

