

MARSAZOLI JUNIOR

DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO DE
MICROONDAS EM SECADOR CILÍNDRICO-ROTATIVO
COMBINADO COM AR QUENTE PARA PRODUTOS GRANULADOS

14/91

14/91

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

ANTONIO MARSAIOLI JUNIOR

Engenheiro Mecânico

Orientador

Prof. Dr. THEO GUENTER KIECKBUSCH

Orientador Externo

Prof. Dr. EVANDRO CONFORTI

DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO DE
MICROONDAS EM SECADOR CILÍNDRICO-ROTATIVO
COMBINAÇÃO COM AR QUENTE PARA PRODUTOS GRANULADOS

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia de
Alimentos da Universidade Estadual de Campinas,
para obtenção do título de "Doutor" em Engenharia
de Alimentos.

Parecer

Este exemplar corresponde a redação final da
tese defendida por Antonio Marsaioli Junior e
prolata pela Comissão
Julgadora em 20.06.91. Campinas, 1991
Campinas, 20 de junho de 1991.

Theo Guenter Kieckbusch

BANCA EXAMINADORA

Theo Guenter Kieckbusch

Prof. Dr. Theo Guenter Kieckbusch
(orientador)

Evandro Conforti

Prof. Dr. Evandro Conforti
(orientador externo)

Attilio José Giarola

Prof. Dr. Attilio José Giarola
(membro)

José Thomaz Senise

Prof. Dr. José Thomaz Senise
(membro)

Sérgio Sartori

Dr. Eng. Sérgio Sartori
(membro)

Suplente

Prof. Dr. Carlos Alberto Gasparetto
(membro)

Suplente

Profa. Dra. Florencia Cecilia Menegalli
(membro)

Campinas, 20 de *junho* de 1991

A memória de meu pai, Antonio

A minha mãe, Georgina

A minha esposa, Anita

Aos meus filhos, Simone e Luis

AGRADECIMENTOS

Aos Professores Dr. THEO GUENTER KIECKBUSCH e Dr. EVANDRO CONFORTI, pelas orientações dedicadas e atentas durante todas as etapas deste trabalho.

Aos professores integrantes da pré-banca pelas correções e sugestões para a versão final da tese : Dr. ATTILIO JOSÉ GIAROLA; Dr. JOSÉ THOMAZ SENISE; Dr. SÉRGIO SARTORI; Dr. CARLOS ALBERTO GASPARETTO e Dra. FLORENCIA CECÍLIA MENEGALLI.

A Faculdade de Engenharia de Alimentos (FEA) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), em especial aos membros do Departamento de Engenharia de Alimentos (DEA).

A Faculdade de Engenharia Elétrica (FEE) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), pela cessão do uso do LED - Laboratório de Eletrônica e Dispositivos.

A Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI) da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), pelo empréstimo de alguns de seus equipamentos de laboratório.

A Fundação Banco do Brasil (FIBEC), pelo apoio financeiro.

A CIDA - Canadian International Development Agency, pelo auxílio concedido para participação no 4^o ICEF - International Congress on Engineering and Food, assim como em um programa de treinamento e visitas relacionados à aplicação de microondas ao

processamento de alimentos, em julho de 1985, no Canadá.

A FTPTAT - Fundação Tropical de Pesquisas e Tecnologia "André Tosello" pelo auxílio concedido para a participação no 5º ICEF - International Congress on Engineering and Food, em junho de 1989, em Colônia, Alemanha.

Ao FAEP - Fundo de Apoio ao Ensino e à Pesquisa, da UNICAMP, pelo apoio recebido, que permitiu a participação no 3º *World Congress of Food Technology*, em fevereiro de 1991, em Barcelona, Espanha.

A Escola de Engenharia Mauá, na pessoa do Dr. JOSÉ THOMAZ SENISE, pelo empréstimo de um segmento de guia de onda e pelo esmero na fabricação e presteza no fornecimento dos elementos de referências nº 39/42/43/44 (Figura 23) desta obra.

Ao LNLS - Laboratório Nacional de Luz Síncroton, na pessoa do Eng. MARCO REMI, pelo empréstimo dos componentes que possibilitaram os ajustes elétricos de casamento de impedâncias, de referências nº 3/4/7/8/9/10/11 (Figura 30) desta obra.

A firma FLAMAX TERMOINDUSTRIAL LTDA., na pessoa dos Engs. AGOSTINHO P. A. MARTINS, MICHEL S. SANCHEZ e WALDIR A. BIZZO, pela valiosa cooperação para o término da construção do protótipo.

A firma AFLON ARTEFATOS PLÁSTICOS E METÁLICOS LTDA., na pessoa do Eng. OTAVIO Y. NAKAZAWA, pela doação de todo o "teflon" aplicado na fabricação do protótipo.

Ao DR. Eng. EDUARDO SAN MARTIN MARTINEZ, pela valiosa ajuda prestada por ocasião dos ensaios de processamento de arroz.

A firma NUTRISERVIÇOS, na pessoa do Dr. GABRIEL JORGE NETO, pela colaboração recebida no fornecimento de soja e na execução de diversas análises das amostras trabalhadas.

As firmas ACRIRESINAS LTDA., ASTEN & CIA. LTDA., BOLLHOFF TECNOPLÁSTICOS, CENTAURO COM. & EXP. LTDA., CERALIT S.A. IND. & COM., ECI - EQUIPAMENTOS CIENTÍFICOS E INDUSTRIAIS LTDA., OSMEC LTDA., PLASTIPRENE LTDA., RETENTORES VEDABRAS IND. & COM. LTDA., STD - SISTEMAS TÉCNICOS DIGITAIS S.A. e USINAGEM IRMÃOS GALBIATTI LTDA. pela cooperação prestada.

A ABIA, Associação Brasileira das Indústrias de Alimentos, pelas cópias deste trabalho.

A todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O protótipo desenvolvido e apresentado neste trabalho é o resultado da superposição de dois sistemas contínuos de aplicação de energia aos processos de aquecimento e/ou secagem de produtos sólidos granulados : um em que se considera uma câmara de secagem na qual o produto, em contacto direto com um gás circulante, proveniente de um circuito gerador auxiliar, troca calor com o mesmo ; outro, que se compõe de um sistema aonde a energia de microondas é gerada e conduzida à cavidade de aplicação, que corresponde deliberadamente à mesma câmara de secagem anterior, na qual a potência pode ser dissipada no produto a ser aquecido.

No estudo da câmara buscou-se conciliar os critérios de projeto aplicáveis aos secadores rotativos convencionais com as dimensões recomendadas para os aplicadores de potência de microondas. Outro objetivo foi o de garantir o confinamento das microondas ao interior do aplicador, evitando qualquer vazamento da energia das mesmas para o meio ambiente. Esta garantia foi conseguida antes mesmo do início da fabricação do protótipo, com a construção de um modelo do aplicador cilíndrico, em escala isométrica reduzida, dotado de filtros adequados nas suas extremidades; os filtros foram testados em laboratório quanto à sua capacidade de reter as microondas, não tendo acusado nenhum vazamento significativo de radiação para o ambiente, antevendo-se assim que o protótipo final poderia perfeitamente ser enquadrado dentro das normas internacionais de segurança e homologação.

O desenho do conjunto funcional do protótipo e auxiliares, bem como o seu detalhamento, tiveram sequência,

passando-se para as etapas de construção, montagem, instalação e colocação em marcha. O início da operação foi acompanhada de ajustes mecânicos, elétricos e de controle, primeiro com o protótipo em vazio, seguindo-se alguns ciclos com produtos específicos. O desempenho do sistema foi satisfatório, principalmente quanto à rapidez dos tratamentos e à aparente qualidade superior das amostras testadas. Um estudo mais específico foi feito da viabilidade operacional do protótipo na inativação enzimática de grãos de soja integral por microondas, analisando-se os aspectos técnicos e econômicos do processo e do produto tratado e comparando-os com os do produto obtido por um meio convencional, adotado em escala industrial. Os resultados deste estudo revelaram condições mais favoráveis à nova opção tecnológica das microondas quando comparadas ao processo convencional.

ABSTRACT

The developed prototype, presented in this work, results from the overlapping of two continuous systems of energy application to the heating and/or drying processes of granulated solid products : one, consisting of a drying chamber in which the product is in direct contact with a circulating gas, coming from an auxiliary generating circuit, exchanging heat with it ; the other one, composed of a system in which the microwave energy is generated and guided toward the application cavity, purposely corresponding to the same drying chamber cited before, in which the power can be dissipated into the product to be heated.

During the chamber designing, the conventional rotary dryer project criteria and the recommended dimensions for the microwave power applicators were taken into consideration. Care was taken in order to insure that the microwaves were confined to the interior side of the applicator, keeping any microwave energy from leaking to the surroundings. A reduced size isometric model of the cylindrical application cavity, endowed with suitable filters at its extremities, was built before initiating the prototype construction. The filters were tested in the laboratory as to their ability to retain the microwaves, revealing no significant radiation leakage to the surroundings, therefore it was predicted that the final prototype would perfectly comply with the international safety and homologation standards.

The functional assembly drawing of the prototype and its

ancillaries as well as the detail drawings of the parts proceeded toward the building, assembling, installation and start up steps. The operation beginning was followed up by mechanical, electrical and control adjustments, first by testing the equipment void of product and secondly running a few cycles with specific products. The performance of the system was satisfactory, mainly concerning the processing rates and the apparent superior quality of the treated samples. The prototype was further submitted to a more specific study in order to verify the operational feasibility of applying microwaves to full fat soybean enzyme inactivation. The technical and economical aspects of the process were also analyzed and the treated samples were compared with those obtained from a conventional industrial method. The results favored the new technology using the microwave inactivation process.

INDICE

	página
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. FUNDAMENTOS DO AQUECIMENTO POR MICROONDAS.....	6
2.1. Ondas Eletromagnéticas e Espectro de Radiação.....	6
2.2. Tipos de Aquecimento Eletrônico.....	10
2.3. Características Específicas do Aquecimento por Microondas.....	12
2.3.1. Sistemas de Microondas.....	17
2.3.2. Guias de Onda.....	19
2.3.3. Ondas Estacionárias.....	23
2.3.4. Medida da Potência de Microonda.....	24
2.4. Propriedades Elétricas dos Materiais e Interação com as Microondas.....	28
2.5. Efeitos do Aquecimento dos Materiais por Microondas em Relação às suas Propriedades Térmicas e aos Modos de Transferência de Calor.....	46
2.6. Medidas de Temperatura.....	55
2.7. Efeitos Diferenciais do Aquecimento.....	57
2.8. Vantagens e Desvantagens do Aquecimento por Microondas.....	58
2.9. Características Econômicas do Aquecimento por Microondas.....	66
2.10. Dispositivos de Regulamentação da Segurança das Instalações.....	71
3.0 SECADOR ROTATIVO CONTINUO CONVENCIONAL A AR QUENTE DIRETO.....	77
3.1. Campos de Aplicação e Critérios Gerais de Projeto.....	78

3.2. Vantagens e Limitações deste Tipo de Secador.....	82
4. DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE UM SECADOR ROTATIVO	.
COMBINADO AR QUENTE/MICROONDAS DE OPERAÇÃO CONTINUA.....	94
4.1. Introdução.....	94
4.2. Objetivos.....	98
4.3. Conceção Geral e Especificações Preliminares.....	99
4.4. O Problema da Filtragem da Microonda.....	101
4.4.1. Filtro de Entrada.....	102
4.4.2. Filtro de Saída.....	104
4.5. Ensaio Experimentais de um Modelo Reduzido.....	105
4.6. Desenvolvimento e Projeto do Protótipo.....	111
4.7. Critérios de Escolha dos Materiais Aplicados, dos Principais Componentes e das Conceções Construtivas Adotadas.....	122
4.8. Construção e Instalação do Protótipo.....	132
4.9. Acoplamento à Fonte Geradora das Microondas.....	134
4.10. Provisão da Instrumentação e Controle do Sistema.....	137
4.11. Ensaio Mecânicos e Medidas Corretivas.....	139
4.12. Testes Elétricos de Fugas de Radiação.....	144
4.13. Ajustes Elétricos de Casamento de Impedâncias.....	145
4.13.1. Teste em Vazio.....	148
4.13.2. Teste com Produto.....	150
4.14. Avaliação Preliminar do Sistema com Produto.....	152
5. VIABILIDADE OPERACIONAL DO SISTEMA NO ESTUDO	
DE UM CASO ESPECÍFICO.....	158
5.1. Estudo da Substituição do Aquecimento Convencional por Microondas, na Inativação Enzimática de Grãos de Soja Integral, como	

Componente da Formulação de Rações Animais.....	158
5.1.1. Aspectos Técnicos.....	158
5.1.2. Aspectos Econômicos.....	165
5.1.3. Conclusões sobre o Estudo Específico.....	168
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS.....	168
APÊNDICES.....	171
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	182

LISTA DE FIGURAS

	página
1. Uma onda eletromagnética monocromática plana.....	7
2. O espectro de frequências eletromagnéticas.....	8
3. Métodos de aquecimento eletrônico.....	11
4. Visualização da distribuição do campo elétrico em forno de microondas.....	13
5. Diagrama de um sistema genérico de aquecimento por microondas.....	17
6. Meios de transporte de microondas.....	20
7. Significado físico dos parâmetros dielétricos.....	32
8. Reflexão e transmissão da energia das microondas.....	38
9. Fração da potência incidente não atenuada como função da profundidade reduzida da amostra.....	41
10. Acoplamento de potência vs. volume de carga em um forno pequeno a 2450 MHz.....	44
11. Efeitos de relaxação e condutividade a várias frequências (Hz).....	45
12. Taxas de secagem vs. teores de umidade do material.....	51
13. Teor de umidade vs. tempo de secagem.....	53
14. Arranjos alternativos de chicanas de secadores rotativos de calor direto.....	82
15. Alternativas de selos de gás rotativos.....	83
16. Secador rotativo direto de corrente a favor.....	85
17. Esquema do aplicador com filtros nas extremidades.....	101
18. Perspectiva dos filtros do aplicador.....	103

	página
19.Segmentos N ^{ésimos} dos filtros do aplicador.....	104
20.Vista de alguns pormenores construtivos do modelo isométrico da cavidade de aplicação das microondas.....	106
21.Posicionamentos do sensor em relação ao modelo.....	108
22.Arranjo do instrumental e do modelo durante a realização dos ensaios de vazamento.....	110
23.Esquema da instalação do secador a microondas.....	115
24.Componentes de PTFE utilizados no aplicador.....	124
25.Vista em corte da cabeceira de entrada do produto no secador.....	126
26.Vista em corte da cabeceira de saída do produto no secador.....	127
27.Configurações alternativas dos dutos de circulação de ar.....	133
28.Arranjo dos principais componentes do sistema a microondas dentro do LMO do DEA/FEA.....	136
29.Transportador alternativo horizontal de paletas.....	143
30.Montagem do instrumental para os ajustes elétricos de casamento de impedância.....	147
31.Casamento de Impedâncias - Teste em Vazio.....	150
32.Casamento de Impedâncias - Teste com Produto.....	151
33.Efeito do aquecimento por microondas sobre a temperatura e perda de umidade da soja.....	163
34.Efeito do aquecimento por microondas na redução da atividade ureática.....	163

NOMENCLATURA

a	constante de acoplamento,	cm^{-3}
A	área das placas do capacitor,	m^2
b	constante de acoplamento,	-
B	massa de produto retida no secador rotativo,	kg
B	vetor densidade de fluxo magnético,	kg/s C
c	velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no espaço (vácuo) = 3×10^8	m/s
c_a	calor específico do ar,	$\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$
c_v	calor específico do vapor,	$\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$
c_v	calor específico da água,	$\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$
c_p	calor específico do produto	$\text{cal/g } ^\circ\text{C}, (\text{kJ/kg } ^\circ\text{C})$
c_p	calor específico a pressão constante	J/kg K
c_v	calor úmido específico da fase vapor,	m^3/J
C	capacitância,	F
C_1, C_2	constantes, dependentes do tipo de chicanas e do material a secar,	s/m
d	distância entre as placas do capacitor,	m
d, D_d, D_s	diâmetro efetivo do interior do secador,	m
D	coeficiente de difusão efetiva,	m^2/s
D	vetor densidade de fluxo elétrico (deslocamento),	C/m^2
e	base do sistema neperiano de logaritmos,	-
e_v	fator de mudança de fase,	(decimal)
E_m	intensidade de campo elétrico entre as placas do capacitor = V_m/d ,	V/m
$E, (E_0)$	vetor intensidade de campo elétrico, (no vácuo),	V/m
EMA	energia mínima absorvida,	$\text{cal/g}, (\text{Wh/kg})$
E_v	eficiência de acoplamento volumétrico = $100 P_o/P_m$	%
f	freqüência,	$\text{Hz}, (\text{s}^{-1})$

f_c	frequência de corte,	Hz
f_o	frequência no vácuo,	Hz
f_r	número médio de chicanas por rotação do cilindro	-
G_a	vazão mássica do ar,	kg/s
G_p	vazão mássica do produto,	kg/s
h_a	coef. transf. calor convectivo,	$\text{kJ/s m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$
$h_{fg}, (\lambda_{sm})$	calor latente de vaporização, (médio),	$\text{kJ/kg}, (\text{cal/kg})$
ΔH	calor latente de vaporização,	J/kg
H	umidade absoluta do ar,	kg/kg
H, H_o	vetor intensidade de campo magnético,	C/m s
$i(t)$	corrente elétrica alternada,	A
I	corrente elétrica,	A
I_m	corrente elétrica máxima,	A
ISM	refere-se às frequências alocadas para os campos industrial, científico e médico,	MHz
J	vetor densidade de corrente,	C/s m^2
k	condutividade térmica,	W/m K
K_m	constante de acoplamento,	cm^{ab}
L, L_d	comprimento do secador,	m
m	umidade da amostra, base úmida,	%
M	umidade local na amostra (grão), base seca,	% (decimal)
M	conteúdo médio de umidade, base seca,	(decimal)
M	vazão mássica de alimentação,	kg/s
$n, N_r (N)$	rotação do cilindro,	$\text{min}^{-1} (\text{s}^{-1})$
N	número de lâminas dos filtros de microondas,	-
Nu	número de Nusselt,	-
PB	teor de proteína bruta,	%
PI	potência incidente de microondas,	kW
P	pressão,	N/m^2
P_o, P_m	potências acopladas pela carga não-casada	

	e casada, respectivamente,	W
PR	potência refletida de microondas,	kW
PS	teor de proteína solúvel,	%
PT	potência transmitida de microondas,	kW
P_i/P_o	relação de potência transmitida por potência incidente, onde $P_i = P_o(1 - \rho ^2)$, (expresso em %),	%
P_v	potência dissipada por unidade de volume,	W/m ³
q	taxa de geração interna de calor,	W/m ³
Q	quantidade de calor,	W
Q_v	potência eletromagnética por unidade de volume do sólido úmido,	W/m ³
QBF	porcentagem de quebra de grãos no beneficiamento,	%
r	coordenada radial do grão,	m
R	raio equivalente do grão,	m
R	resistência elétrica,	ohm
R_n	coeficiente de reflexão normal da onda,	-
Re	número de Reynolds,	-
ROE	razão de voltagens de ondas estacionárias, (decimal)	
RTR	razão de potências refletida para transmitida,	%
S	vetor de Poynting,	W/m ²
$\tan \delta$	fator de perda = ϵ''/ϵ' ,	-
T, T	temperatura,	°C, K
$T = 1/f$	período,	s
T_n	coeficiente de transmissão normal da onda,	-
TE	modo de propagação de onda transversal elétrico,	-
TG	teor de gordura,	%
TRT	tempo de residência teórico,	min
t	tempo,	s
$v(t)$	tensão elétrica alternada,	V
v	velocidade de fase = ω/β ,	m/s

v_g	velocidade de grupo de propagação das microondas	m/s
v_r	velocidade periférica dos rolos de suporte,	m/s
V	volume de fluido,	cm ³
V_a	velocidade do ar,	m/s
V_m	tensão elétrica máxima,	V
V_p	velocidade efetiva das partículas,	m/s
VM	vazão mássica,	kg/min
W_t	peso total das partes rotativas do secador,	kg
X	teor de umidade, (base seca),	kg/kg
z	profundidade de penetração no material = $1/\alpha$,	m
$\alpha, (\alpha_1)$	"difusividades", (térmica),	m ² /s
α	fator (constante) de atenuação,	m ⁻¹
α	inclinação do cilindro,	grau
α	ângulo das lâminas dos filtros de microondas = $360^\circ/N$,	grau
β	coeficiente de variação,	1/K, (1/P _a)
β	fator (constante) de fase da onda = $2\pi/\lambda$,	m ⁻¹
γ	fator de propagação complexo = $\alpha + j\beta$,	m ⁻¹
δ	ângulo de fase,	rad
ϵ'	constante (permissividade) dielétrica,	F/m
ϵ''	fator de perda elétrica,	F/m
ϵ'_r	constante (permissividade) dielétrica relativa = ϵ'/ϵ_0 ,	-
ϵ''_r	fator de perda elétrica relativa = ϵ''/ϵ_0 ,	-
ϵ_0	constante dielétrica do vácuo = $8,854 \times 10^{-12}$,	F/m
ϵ^*	constante dielétrica complexa = $\epsilon' - j\epsilon''$,	F/m
ϵ_σ	fator de perda iônica relativa = $\sigma''/\omega\epsilon_0$,	-
ϕ	ângulo de incidência da onda no espaço livre,	rad
ψ	ângulo de refração da onda no dielétrico,	rad
φ	ângulo de repouso natural dos grãos,	grau

ϕ	ângulo de defasagem entre corrente e tensão elétrica,	grau
η	impedância intrínseca do dielétrico,	ohm
η_0	impedância intrínseca do espaço livre (vácuo),	ohm
λ	comprimento de onda,	m
λ_c	comprimento de onda de corte,	m
λ_g	comprimento de onda do guia de onda,	m
λ_0	comprimento de onda no vácuo,	m
ν	inclinação do cilindro,	grau
μ'	permeabilidade magnética,	kg m/C ²
μ''	fator de perda magnética,	kg m/C ²
μ^*	permeabilidade magnética complexa = $\mu' - j \mu''$,	kg m/C ²
ω	freqüência angular,	rad/s
ρ	densidade,	kg/m ³
$ \rho $	fração refletida do campo incidente de amplitude unitária,	(decimal)
σ	condutividade elétrica,	S/m
σ''	componente imaginário da condutividade complexa,	S/m
σ_c	densidade de carga elétrica,	C/m ³
θ	temperatura do produto,	°C
θ	tempo de processamento,	s

1. INTRODUÇÃO

A secagem é uma das operações unitárias mais utilizadas nos processamentos industriais, entre eles os dos alimentos, requerendo usualmente o emprego de uma fonte de calor a fim de evaporar a umidade do produto, visando reduzi-la a um teor compatível com a sua conservação posterior, diminuindo ainda substancialmente o peso do transporte (Brennan *et al.*, 1976). No entanto a secagem, tal qual a evaporação, é uma etapa da transformação dos produtos que envolve um elevado gasto energético, com a maioria dos secadores consumindo entre 6000 e 10000 kJ/kg de umidade evaporada, vale dizer, ela representa sempre um método dispendioso de separação (Leniger e Beverloo, 1975). Por outro lado, as buscas de fontes alternativas de energia têm sido incessantes, inclusive na produção dos alimentos, tendo-se difundido em países industrializados, entre outras, a técnica da aplicação das microondas às etapas de aquecimento dos processos industriais. As microondas podem ser vantajosas quando aplicadas aos processos de secagem, em virtude de algumas características específicas, tais como a sua instantânea penetração no produto tratado, com rápida conversão da energia em calor, reduzindo-se os tempos de secagem, com melhoria da produtividade; a absorção seletiva da energia pelas zonas mais úmidas, que se traduz em aquecimento e umidade final mais uniformes (Copson, 1975). Embora os industriais resistissem inicialmente à introdução de técnicas inovadoras, mesmo nos países mais adiantados (Anônimo, 1977), algumas empresas pioneiras foram conseguindo resultados surpreendentemente vantajosos, não

sòmente sob o aspécto da qualidade do produto final, como também sob o enfoque da economia global do processo, especialmente nos casos de processos combinados de aquecimento por ar quente, assistidos por microondas (Maurer *et al.*, 1971).

Entre os muitos critérios existentes para se classificar os vários tipos disponíveis de secadores, o mais geral e útil parece ser o que baseia a classificação na hidrodinâmica do escoamento do material (Strumillo e Kudra, 1986). Dentro de tal critério, distinguem-se os secadores de regime hidrodinâmico não ativo, com leito móvel, através do qual as partículas se movimentam por gravidade e/ou pela ação de forças mecânicas. Neste estudo optou-se deliberadamente por esta classe de secador, em virtude de já dispor-se, no Departamento de Engenharia de Alimentos de uma unidade de secagem rotativa a ar direto contínua, de tamanho de laboratório. Este secador foi o ponto de partida de onde seria tentada a adaptação de uma fonte energética alternativa a microondas, conforme é discutido no Capítulo 4, item 4.3 deste trabalho.

Quase nada é conhecido sobre trabalhos anteriores com secadores rotativos contínuos a ar quente, com operação de aquecimento e/ou secagem assistidas por microondas. As poucas citações relacionadas ficam por conta de uma "cavidade rotativa", porém de operação intermitente, encontrada no trabalho de Luter *et al.* (1982), que estuda a destruição de aflatoxina em amendoim por tostagem através de microondas. No Canadá, mais recentemente, Wyslouzil (1984), um dos co-autores da referida publicação de Luter, aperfeiçoou o desenho do processador rotativo de microondas,

para aplicá-lo no aquecimento contínuo de sementes de mostarda para efeito de inativação enzimática. O equipamento era baseado na configuração bastante conhecida do "secador rotativo de cascata", com provisão para introduzir a energia das microondas, assim como ar quente ou outros gases dentro do tambor de processamento. Neste desenho o produto a ser tratado era alimentado por gravidade no processador com o auxílio de um tubo localizado no eixo de rotação do tambor. Também o ar ou gases quentes podiam ser introduzidos através do mesmo tubo. O diâmetro do tubo era pequeno o suficiente para impedir que a energia das microondas escapasse para o ambiente. O produto era descarregado do tambor processador por meio de tubos dispostos radialmente, cujas dimensões outra vez eram tais de modo a prevenir qualquer escape da energia das microondas para o exterior.

Este trabalho utiliza uma configuração semelhante à do projeto de um secador rotativo contínuo convencional para operar com produtos sólidos granulados, floculados ou em pó, em especial alimentos. Filtros de microondas especialmente projetados, assim como um sistema de alimentação positiva do produto para o interior da cavidade, foram concebidos para possibilitar a operação com microondas, sem prejuízo do modo de funcionamento tradicional do processador rotativo e constituem a essência de todo este desenvolvimento, encontrando-se descritos no Capítulo 4 desta obra.

Cumpre-nos esclarecer que, por ter sido este trabalho o primeiro na área de engenharia de alimentos da UNICAMP a tratar das aplicações das microondas objetivando sua ampliação para a escala industrial, foi dado ênfase aos fundamentos teóricos do aquecimento por este tipo de

radiação eletromagnética (Capítulo 2).

O desenvolvimento deste projeto teve como ponto de partida a construção de um modelo em escala reduzida da cavidade de aplicação das microondas, a fim de primeiro comprovar o funcionamento dos filtros, testando a sua capacidade de prevenir qualquer escape da energia das microondas para o exterior. O modelo foi inteiramente aprovado sob este aspecto, permitindo a aplicação da mesma configuração ao projeto de um protótipo de processador ou forno rotativo contínuo de escala piloto.

O desenvolvimento do projeto do protótipo e de todo o sistema auxiliar teve seqüência, passando pelas etapas de especificações e aquisições dos materiais básicos e componentes, diversos serviços especializados de oficina mecânica, montagem e instalação do conjunto, até atingir mais tarde o período de colocação em funcionamento do protótipo. A partir de então foi possível obter-se a confirmação da viabilidade técnico-operacional do modelo adotado, o qual não somente acusou níveis de fuga de radiação desprezíveis, como também preencheu de forma bastante satisfatória os requisitos de ajuste das impedâncias do forno e do sistema gerador e transmissor das microondas, favorecendo as condições de desempenho com elevado aproveitamento energético.

A discussão sobre os ajustes mecânicos e elétricos do protótipo a microondas, ao final do Capítulo 4, foi feita em detalhes, uma vez que se pretende dar continuidade ao estudo em busca de sempre otimizar o equipamento e os processos que nele serão experimentados, servindo de guia a outros pesquisadores que se interessarem por seguir esta linha de

trabalho.

Os dados preliminares levantados do funcionamento do protótipo com os primeiros produtos processados, como o arroz em casca e a soja em grãos, permitiram constatar que o tratamento por microondas através deste sistema, para fins de aquecimento e/ou secagem do produto, produziu amostras com algumas características de qualidade superiores quando comparadas com aquelas obtidas a partir dos processamentos convencionais. Os indícios foram também de que a economia do processo pode conduzir a uma condição de competitividade no confronto com as tecnologias tradicionais ora vigentes, principalmente quando se tratar de produtos de qualidade superior e mais sensíveis, que exigem condições de processo menos rigorosas.

Estes resultados preliminares favoráveis sugerem ao pesquisador a busca de novas tentativas de aplicação desta tecnologia inovadora ao processamento de outros produtos, preferencialmente aqueles mais nobres e de maior valor comercial e permitem prever desde já a possibilidade de implantação de sistemas similares ao aqui descrito, em escala industrial.

2. FUNDAMENTOS DO AQUECIMENTO POR MICROONDAS

2.1. Ondas Eletromagnéticas e Espectro de Radiação

Microonda ou energia de microondas é uma modalidade de radiação eletromagnética. Como tal ela ocupa uma pequena faixa de um largo espectro eletromagnético, que se estende desde as muito baixas (da ordem de 1 Hz) até as mais altas frequências, no campo das aplicações dos raios- γ (até 10^{20} Hz). Nós todos estamos, certamente, mais familiarizados com a parte visível do espectro, o que sugere que o comportamento da luz visível possa ser utilizado como auxiliar para ilustrar as propriedades das radiações eletromagnéticas.

A luz, como sabemos, pode ser focalizada por um sistema de lentes, refletida por espelhos, refratada ou forçada a mudar de direção ao incidir sobre uma interface, ou absorvida por uma superfície negra. A luz é difratada ao redor de objetos, tal como o gume de uma faca, exhibe características de polarização e possui energia ou potência associada com a mesma.

Há mais de 100 anos passados, J.C. Maxwell desenvolveu a teoria clássica do eletromagnetismo e demonstrou que a luz visível era um tipo de onda eletromagnética. Ele previu, corretamente, que uma onda eletromagnética tem associados um campo elétrico E e um campo magnético H , que obedecem às equações de campo de Maxwell (Apêndice B). O tipo mais simples de onda eletromagnética é o monocromático, plano, linearmente polarizado no vácuo, tal como está ilustrado na Figura 1. O termo "monocromático" revela que a intensidade

do campo, em qualquer ponto do espaço, varia com o tempo, de acôrdo a uma função senoidal ou co-senoidal, a saber :

$$E = E_0 \text{sen} (2\pi t/T) \quad ; \quad H = H_0 \text{sen} (2\pi t/T)$$

aonde T é o período da onda, o tempo mais curto durante o qual ela se repete, e E_0 e H_0 são as amplitudes dos campos elétrico e magnético, respectivamente. O termo "plano" significa que, em todos os pontos do espaço sendo considerado, a onda viaja na mesma direção, que na Figura 1

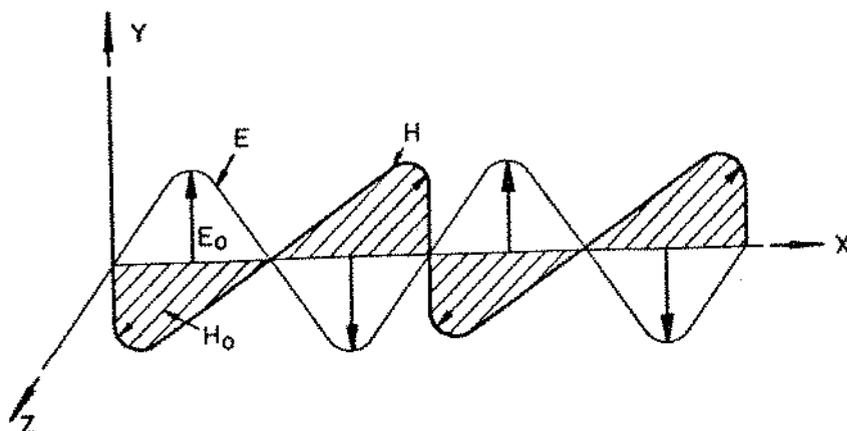


Figura 1 Uma onda eletromagnética monocromática plana

é a direção x , e em qualquer instante o valor de E é o mesmo em todos os pontos sôbre um plano perpendicular a esta direção. O mesmo se aplica para H . "Linearmente polarizada" quer dizer que o vetor de intensidade elétrica E permanece em uma direção sômente.

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 da Figura 1. 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.

de ondas, em metros, com as indicações das frequências correspondentes para as formas comuns de radiação eletromagnética.

O fato de a luz visível e as microondas serem ambas ondas eletromagnéticas sugere que elas compartilhem propriedades comuns. Isto é verídico em grande parte, mas o grau e a maneira em que várias propriedades são exibidas são influenciados pelo fato do comprimento de onda ser muito pequeno quando comparado às dimensões dos objetos no caso da luz e comparável a estas mesmas dimensões no caso das microondas.

As microondas, como a luz, irradiam através do espaço com uma velocidade de $3 \cdot 10^8$ m/s. As microondas podem ser refletidas de um simples 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 invés de sistemas de espelhos e lentes utilizados em óptica, é comum empregarem-se refletores parabólicos ou antenas tipo corneta. Microondas são também absorvidas por muitas substâncias e mostram fenômenos de interferência. Nas frequências das microondas a difração é uma propriedade importante. A "curvatura" da energia irradiada das microondas ao redor de um objeto "iluminado" pode criar situações nas quais as intensidades de campo das microondas na região de "sombra" do objeto são maiores do que aquelas nas regiões "iluminadas". O fenômeno da difração complica enormemente a previsão dos campos que prevalecem quando um objeto é exposto à energia das microondas. O efeito não é tão pronunciado na faixa das frequências ópticas, em que as dimensões dos objetos correspondem

normalmente a um grande número de comprimentos de onda.

As frequências de microondas de interesse nos processos de aquecimento são de 915 MHz e de 2450 MHz. Estas frequências correspondem a comprimentos de onda em espaço livre de 32,8 cm e 12,25 cm, respectivamente, e têm sido alocadas para aplicações industriais, científicas e médicas, ou seja, ISM (Industrial, Scientific and Medical). A maioria dos fornos de microondas domésticos opera a 2450 MHz e ambas as frequências são usadas em sistemas industriais.

Em resumo, as microondas são uma forma de radiação eletromagnética, que possuem propriedades similares às da luz visível, mas distinguem-se daquela em que o comprimento de onda é aproximadamente cinco ordens de grandeza maior. Esta diferença de comprimento de onda exige técnicas radicalmente distintas para a geração, transporte e detecção dos campos de microondas em relação às técnicas da óptica.

2.2. Tipos de Aquecimento Eletrônico

O aquecimento eletrônico pode ser classificado, de acordo com a terminologia geralmente aceita, em indutivo e dielétrico (capacitivo) ou ainda "macroonda" (Decareau, 1985).

O indutivo, como o nome diz, produz calor em um material pela indução de correntes parasitas, com o auxílio de uma corrente alternada em uma bobina circundando o material, de um modo similar a um transformador, quando uma corrente no enrolamento secundário é produzida pela indução de uma corrente no enrolamento primário (Figura 3). Estas correntes suprem o calor requerido devido às perdas de aquecimento por resistência (I^2R). O acoplamento de energia é através de

campos magnéticos e não por contacto elétrico ou mecânico. Desde que o efeito de aquecimento depende das correntes parasitas induzidas no material, este tipo de aquecimento funciona bem com condutores como o aço. As temperaturas superficiais sobem primeiro e temperaturas de fusão podem ser induzidas muito rapidamente. As frequências variam de

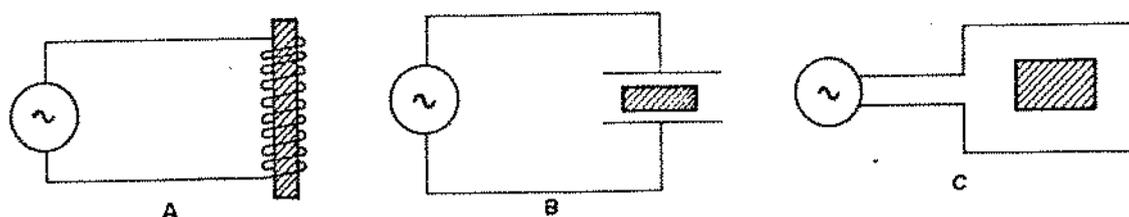


Figura 3 Métodos de aquecimento eletrônico :

A)aquecimento indutivo;B)aquecimento capacitivo de baixa frequência;C)aquecimento por microondas

960 a 10^6 Hz. A potência de saída pode atingir milhares de quilowatts. Uma das principais vantagens do aquecimento indutivo é que ele pode ficar confinado àquela parte da peça trabalhada ou material que é diretamente oposta à bobina que induz a corrente.

O aquecimento dielétrico, por outro lado, envolve o aquecimento de maus condutores elétricos, que tendem a ser, geralmente, também maus condutores térmicos. É caracterizado igualmente pela ausência de contacto elétrico e mecânico e pode ser conduzido com o material a ser aquecido posicionado entre placas de eletrodos. Isto resulta em que a operação se pareça com um capacitor em que alguma perda de energia

ocorre através das placas, causando um efeito de aquecimento no material que preenche o espaço entre as mesmas.

Em capacitores, o material entre-placas pode ser papel, ar, mica, ou plástico entre outras substâncias, e a aptidão deste material de separar a diferença de potencial entre as placas sem quebra à medida que a voltagem aumenta, é chamada de poder dielétrico do material. Isoladores elétricos são apropriadamente empregados para este propósito mas, no aquecimento dielétrico, o material colocado entre as placas pode ser alimento, madeira, produtos químicos, plásticos e outros.

Nas altas freqüências utilizadas, extendendo-se de 1 a 150 MHz, uma elevação rápida da temperatura pode ser experimentada pelo material, o qual é referido usualmente como "a carga". A potência elétrica assim transferida à carga como calor é função da freqüência, do quadrado do potencial através das placas e das propriedades elétricas e dielétricas do material. A potência de saída dos aquecedores dielétricos situa-se na casa das centenas de quillowatts.

2.3. Características Específicas do Aquecimento por Microondas

O aquecimento por microondas é também do tipo dielétrico, mas refere-se ao aquecimento que se produz em um não-condutor devido principalmente a efeitos de polarização a freqüências entre 300 MHz e 300 GHz (comprimentos de onda entre 1m e 1mm, respectivamente). Assim as diferenças básicas entre os aquecimentos capacitivo e por microondas são relacionadas primeiramente às freqüências empregadas e segundo à maneira pela qual o aquecimento é conduzido, isto

é, no aquecimento capacitivo o material é usualmente colocado entre eletrodos, enquanto que no aquecimento por microondas uma cavidade fechada ou forno é comumente empregada (vide Figura 3C).

As microondas, tal como todas as demais ondas eletromagnéticas, são passíveis de sofrer fenômenos de interferência. Isto ocorre porque a intensidade do campo elétrico em um dado ponto do espaço, a um determinado instante, é a soma dos campos elétricos de cada onda que passa por aquele ponto naquele instante. Desde que os campos elétricos podem estar em uma direção ou outra, é possível para o campo resultante em um ponto ser maior do que aqueles de quaisquer das ondas que chegam separadamente naquele ponto, ou anular-se e causar um campo elétrico evanescente no ponto. A fotografia da Figura 4 ilustra, através de uma



Figura 4 Visualização da distribuição do campo elétrico em forno de microondas (Rudolf,1989)

descarga luminosa em um gás rarefeito, a visualização do fenômeno da interferência das microondas dentro de um forno, pela qual são observadas zonas de reforço contrastando com zonas adjacentes de anulação da intensidade do campo elétrico. Um outro exemplo mais específico poderá esclarecer o assunto : se uma fonte de microondas é estabelecida e um feixe de microondas dirigido para uma região ampla, a intensidade medida deste feixe, que é a razão da potência por unidade de área do mesmo, decresce continuamente pelo afastamento da fonte, à medida que o feixe se esparrama; se o feixe for direcionado perpendicularmente a uma chapa metálica, ele será refletido e, na região próxima à chapa, haverá duas ondas, do mesmo comprimento de onda, viajando em direções opostas, a onda direta da fonte e a onda refletida da chapa. O campo elétrico da onda refletida, que é polarizado paralelamente à chapa metálica, é exatamente oposto ao campo elétrico da onda incidente e estes dois campos se anulam junto à chapa e a cada ponto situado a um número inteiro de metades de comprimento de onda distantes da chapa metálica. Entre estas posições o campo elétrico oscila com duas vezes a amplitude que teria se somente uma ou a outra onda estivesse presente separadamente. Tal combinação de duas ondas que viajam opostamente é chamada onda estacionária.

O comprimento de uma onda pode ser determinado pela medição da distância entre nós, pontos nos quais nenhum campo elétrico oscilante existe por causa do cancelamento entre ondas que se propagam em oposição. O comprimento de onda é igual a duas vezes a distância entre nós.

Um bom condutor, tal como uma chapa metálica, é um

refletor de microondas, porque os elétrons no metal, na presença do campo elétrico das ondas, movem-se de tal forma a reduzir a componente tangencial do campo elétrico no metal a zero. A resposta das cargas elétricas no metal faz com que uma onda refletida se destaque da superfície do mesmo, o que cancela a componente tangencial do campo da onda incidente na superfície. Em qualquer lugar onde haja uma interface entre materiais com diferentes propriedades elétricas, uma reflexão parcial deverá ocorrer. A lei da reflexão vale para as microondas refletidas de uma interface plana, ou seja, o ângulo do feixe refletido com a normal à superfície é igual ao ângulo do feixe incidente com a normal, estando os feixes incidente e refletido, assim como a normal à superfície, em um mesmo plano.

A refração também acontece com as microondas, da mesma forma que com as outras radiações eletromagnéticas. Se um feixe de microondas incide sobre uma interface entre duas regiões de diferentes propriedades elétricas, a um ângulo de incidência diferente do normal, a direção de propagação da onda mudará. Este é o mesmo efeito como aquele de desviar um feixe de luz quando ele atravessa do ar para a água. As mesmas leis da óptica governam a direção dos feixes incidente e refratado das microondas.

Uma outra propriedade das microondas é a polarização. O fenômeno pode ser melhor visualizado imaginando-se ondas sobre uma corda: se uma onda sobre uma corda horizontal provoca uma oscilação vertical da mesma, diz-se que a onda é polarizada verticalmente; se a corda oscila horizontalmente, perpendicularmente à extensão da mesma, diz-se que a onda é polarizada horizontalmente. Somente ondas transversais, ou

seja, ondas cujo movimento ondular é perpendicular à direção de sua propagação, podem exibir polarização.

As ondas eletromagnéticas podem apresentar polarização, portanto elas são ondas transversais. A onda é uma oscilação dos campos elétrico e magnético, os quais estão direcionados perpendicularmente à direção de propagação da onda. Existem duas direções perpendiculares à direção de propagação das ondas, assim existem duas direções do plano de polarização. Uma onda real pode ter ambos os planos de polarização presentes ao mesmo tempo, e dependendo da fase relativa entre os dois, a onda eletromagnética resultante pode estar polarizada num plano ou estar polarizada elipticamente. Ondas de diferentes polarizações que se interferem não podem nunca cancelar-se totalmente, portanto não devem apresentar interferências completamente destrutivas.

A polarização das ondas eletromagnéticas é determinada pela direção do movimento das cargas oscilatórias que atuam como fonte das ondas. As microondas são geralmente geradas pelo movimento de avanço e recuo de elétrons a alta frequência em um fio de antena ou sobre a superfície interna de um guia de onda. Há uma direção associada com o movimento dos elétrons e as ondas irradiadas são usualmente polarizadas em um plano.

Resumindo, embora as microondas apresentem muitas características comuns às ópticas, elas requerem técnicas fundamentalmente diferentes de geração, transporte e detecção dos seus campos, em relação às técnicas empregadas em óptica.

2.3.1. Sistemas de Microondas

Para o aproveitamento da energia das microondas, é preciso existir um sistema que vai gerar a energia, conduzir a mesma para um aplicador, aonde a potência pode ser dissipada no produto a ser aquecido. Um sistema generalizado pode ser composto por um conjunto de componentes, cuja configuração geral está esquematizada na Figura 5 adiante (Conforti e Tejo, 1976).

Este sistema consiste basicamente de oito partes principais:

- a.-Fonte de alimentação : fornece as tensões e correntes para o funcionamento do gerador de microondas.

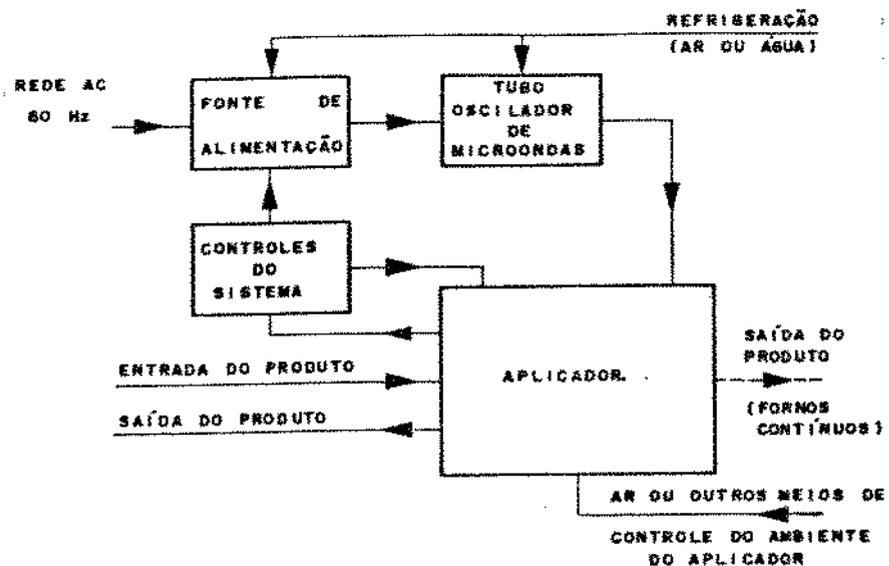


Figura 5 Diagrama de um sistema genérico de aquecimento por microondas

- b.-Gerador de microondas : é um oscilador que converte a potência a ele suprida pela fonte de

alimentação para energia de microondas em uma faixa das frequências ISM.

- c.-Seção de transmissão : propaga, irradia ou transfere a energia gerada pelo oscilador para o aplicador.
- d.-Acoplamento : permite a transferência mais eficiente da energia de microondas para o aplicador.
- e.-Cavidade, aplicador ou forno propriamente dito : é um volume limitado por paredes metálicas no interior do qual se processa a interação material-microondas.
- f.-Agitador de campo : refletor metálico giratório no interior da cavidade, que modifica as condições de contorno periodicamente, objetivando uniformizar a distribuição de energia dentro dela.
- g.-Porta ou abertura com blindagem eletromagnética : permite um fácil acesso ao interior do aplicador e deve limitar a emissão eletromagnética para o meio ambiente ao nível máximo permitido por lei.
- h.-Controles de operação e segurança : permitem selecionar as condições de aquecimento, a interrupção do fluxo de potência e também indicar, por meio de sinal audível e/ou visual, o final do ciclo de processamento.

É possível incorporar ao aplicador outros meios auxiliares de aquecimento, tais como grelhas elétricas, ar quente ou irradiação infra-vermelha, ou mesmo um sistema completo de aquecimento convencional, tal como nos sistemas mistos ou combinados.

É necessário prover os meios para a refrigeração do oscilador, dos transformadores e de quaisquer outros componentes elétricos que dissipem calor. Finalmente, é comum equipar o sistema com exaustores, para a extração dos vapores eventualmente gerados no interior do aplicador.

2.3.2. Guias de Onda

A energia das microondas, tal qual a luz visível, pode ser transferida através do espaço por radiação, contudo este meio é bastante ineficiente quando comparado com outros meios para transporte a distâncias relativamente curtas (Vankoughnett, 1972 e Smit, 1987).

Não somente linhas de transmissão mas também guias de onda podem ser usados para transportar a energia das microondas. Linhas de transmissão com condutores abertos não são comuns, visto que elas tendem a irradiar parte da energia. Linhas de transmissão coaxiais são comumente utilizadas. Uma linha ou cabo coaxial consiste usualmente de um condutor cilíndrico circular exterior combinado com um condutor interior circular localizado axialmente, como ilustrado na Figura 6(a) adiante.

Amos os condutores, externo e interno, são feitos de metais de elevada condutividade, tais como cobre ou alumínio. A configuração dos campos elétrico e magnético em um cabo coaxial está representada na Figura 6(a), com o campo elétrico confinado à direção radial e as linhas do campo magnético envolvendo o condutor central. Frentes de onda e energia se propagam no cabo coaxial com a mesma velocidade com que a luz viajaria. Esta velocidade pode ser

menor do que a propagação da luz no ar se uma substância

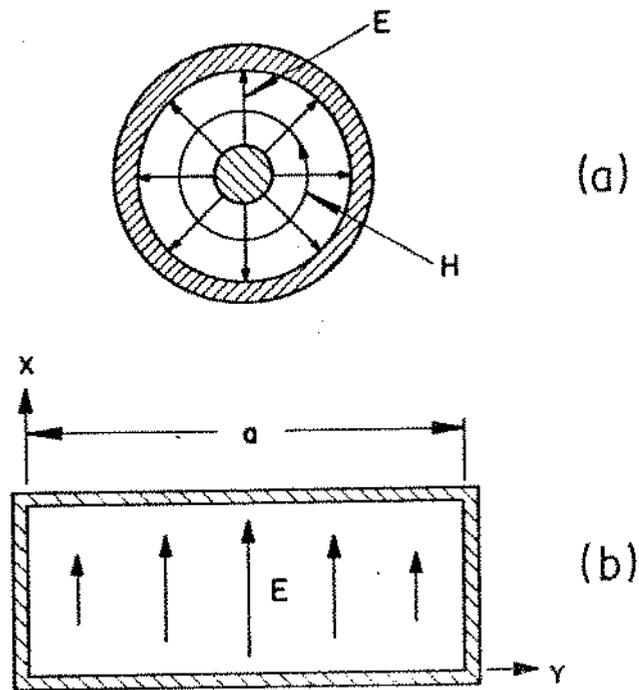


Figura 6 Meios de transporte de microondas : a) linha de transmissão coaxial; b) guia de onda retangular

dielétrica preencher o espaço entre os condutores externo e interno. Uma outra forma de transportar a energia das microondas é através do guia de onda mostrado na Figura 6(b). Ele é constituído simplesmente de um tubo metálico de condutividade elevada, com secção transversal retangular. Já foi mencionado anteriormente que um bom condutor, tal como uma chapa metálica, é um refletor de microondas. Não é surpreendente, pois, que a energia das microondas, quando introduzida no guia de onda da Figura 6(b), pode ricochetear em vai e vem entre as paredes, com alguma transferência líquida de energia para diante do guia de onda. Esta ilustração um tanto crua é de fato uma descrição relativamente precisa do mecanismo pelo qual se efetua a propagação através do guia de onda, no modo dominante, que

será definido a seguir.

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 λ_0 , onde λ_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 um componente na direção x [Figura 6(b)], 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 um 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} . Embora seja possível a propagação de modos de ordem mais alta no guia de onda, as suas dimensões são quase sempre escolhidas de maneira a que somente a propagação do modo dominante seja possível, na faixa de frequências de interesse.

Foi mencionado acima que a propagação somente é possível se a dimensão "a" do guia de onda excede $\lambda_0/2$. Se $\lambda_0 > 2a$, a propagação ou transferência de potência da microonda para diante no guia de onda não é possível. 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 λ_c , a propagação pelo guia de onda não é possível.

A explicação simplista da energia das microondas ricocheteando em vai e vem entre as paredes de um guia de onda, como foi sugerido acima para ilustrar a propagação, também sugere que a velocidade com que a energia se desloca adiante pelo guia é menor do que a velocidade no espaço livre. Esta velocidade é chamada de velocidade de grupo v_g e pode ser demonstrado que o seu valor é dado por :

$$v_g = c \sqrt{1 - (f_c/f_o)^2} = c \sqrt{1 - (\lambda_o/\lambda_c)^2}$$

O comprimento de onda de uma onda propagando em um guia de onda é chamado de comprimento do guia de onda λ_g , cujo valor é dado pela expressão :

$$\lambda_g = \lambda_o / \sqrt{1 - (f_c/f_o)^2} = \lambda_o / \sqrt{1 - (\lambda_o/\lambda_c)^2}$$

Obviamente, λ_g é sempre maior do que o comprimento de onda no vácuo λ_o para a propagação da energia a uma dada frequência. Na frequência ISM de 2450 MHz, os guias de onda padrões WR284, WR340 e WR430 (norma americana IEC R-32, R-26 e R-22, respectivamente) são usados comumente. Estes guias possuem dimensões mais largas "a" [Figura 6(b)] de 2,84", 3,40" e 4,30", respectivamente. O guia WR284 foi escolhido para a interligação dos componentes do sistema formado pelo protótipo deste trabalho. Entretanto, ele não é o mais utilizado para aplicações em potências mais elevadas, já que o valor de 2450 MHz está bem próximo da frequência de corte deste guia e portanto as perdas no guia de onda são maiores.

2.3.3. Ondas Estacionárias

O assunto até aqui discutido envolveu a propagação simples de uma onda eletromagnética. Para uma simples onda plana, como aquela representada na Figura 1, ou uma onda simples deslocando-se em um guia de onda, as intensidades médias no tempo dos campos elétrico e magnético não variam ao longo da direção da propagação. Contudo, se uma onda se propaga em uma direção e uma segunda onda se propaga na direção oposta, as duas ondas produzem uma interferência que resulta em uma intensidade de campo média no tempo que varia ao longo da direção da propagação. A variação da intensidade do campo é estacionária no espaço e portanto é denominada de padrão de onda estacionária. O padrão de onda estacionária se alterna com o tempo, na frequência da microonda. As ondas estacionárias são de particular interesse nos sistemas de aquecimento por microondas, pois um material exposto a um campo de ondas estacionário não é uniformemente aquecido.

No caso de uma onda plana em espaço livre, os máximos do padrão de interferência ou onda estacionária estão espaçados de uma distância de $\lambda_0/2$. Em um guia de onda, as interferências máximas estão distanciadas de $\lambda_g/2$. As ondas estacionárias proporcionam um meio conveniente de medir algumas características dos sistemas de microondas. Por exemplo, admitindo-se que um guia de onda entregue um campo de amplitude unitária a uma carga que absorva as microondas, e que uma fração $|\rho|$ do campo incidente de amplitude unitária é refletida da carga e o restante absorvido, neste guia de onda haverá então um padrão de onda estacionário com amplitude máxima de $(1+|\rho|)$ e mínima de $(1-|\rho|)$. O quociente

da máxima amplitude para a mínima amplitude de campo é chamado de Razão de Voltagens de Ondas Estacionárias ("ROE") ou "Voltage Standing Wave Ratio" ("VSWR"), e é dado por :

$$ROE = (1+|\rho|)/(1-|\rho|)$$

A medida do ROE determina assim o coeficiente de reflexão ρ da carga. O ROE pode ser medido pela inserção de um sensor móvel através de uma fenda longitudinal cortada ao centro da face mais larga do guia de onda.

A carga que foi referida acima pode ser um aplicador ou qualquer outro dispositivo de microondas. Se o coeficiente de reflexão ρ for zero, nenhuma parcela da potência de microondas incidente é refletida da carga e diz-se que a carga encontra-se casada com o guia de onda. Se ρ for diferente de zero, um sintonizador pode ser inserido entre o guia de onda e a carga e de tal forma ajustado a fim de criar uma reflexão de potência adicional que cancela a da carga. A combinação de sintonizador e carga então aparece como uma carga casada ao guia de onda e nenhuma potência refletida existe no guia de onda, ou seja, $ROE = 1$.

2.3.4. Medida da Potência de Microonda

Como o objetivo de um sistema de aquecimento por microondas é de dissipar potência em um material, a potência associada com uma onda eletromagnética é de grande importância. Pode-se demonstrar que a densidade de potência é dada pelo módulo do produto vetorial :

$$|S| = |E \times H|$$

O vetor S é chamado vetor de Poynting e tem dimensões de W/m^2 . Para calcular a potência total sendo transferida através da área A , o componente de S normal a A é integrado sobre a área. No caso geral E e H não estão em fase no tempo, e o fluxo de potência está associado com a parte real do vetor complexo ($E \times H^*$). No caso de uma onda plana no espaço livre, E e H se relacionam por $E = \eta_0 H$, onde η_0 é a impedância intrínseca do espaço e é igual a $120\pi \cong 377 \Omega$. Conseqüentemente, $|S| = |E|^2 / \eta_0$ para uma onda plana. Se, por exemplo, $|S| = 10^{-6} W/m^2$, então $|E| = 1,94 \times 10^{-2} V/m$. Esta simples relação entre densidade de potência e intensidade de campo elétrico aplica-se somente para ondas que são essencialmente planas. A maioria dos medidores de vazamento de radiação respondem a E^2 e são calibrados para ler densidade de potência somente para ondas planas.

Uma questão de interesse que surge é a seguinte : dado um guia de onda ou um cabo coaxial que está transferindo potência de um gerador para uma carga, como pode ser determinada a quantidade de potência de microonda que está sendo transmitida?

Um dos métodos mais comuns consiste em absorver a potência de microonda em água, medir a mudança de temperatura da água em um dado tempo, e então calcular quanta potência seria requerida para atingir esta mudança de temperatura. Alguns meios são obviamente necessários para acoplar a potência de microonda à água. Um dispositivo adequado é a assim chamada carga de água. Uma carga de água consiste, muitas vezes, de uma peça de guia de onda ou cabo coaxial que termina por uma seção contendo água de tais dimensões que toda a potência incidente de microondas é

absorvida pela água e nenhuma é refletida. Para evitar que a água sofra superaquecimento, se provêem meios para permitir um fluxo contínuo de água através da carga. Se a mudança da temperatura da água ΔT em graus Celsius for medida entre as portas de entrada e saída de água da carga e a vazão de água for de F litros por minuto, a potência de microonda P cedida à carga será de :

$$P = 70 F \Delta T \quad (\text{watts})$$

Conseqüentemente, a potência de microonda cedida para uma carga casada, pode ser encontrada conectando-se a saída do cabo coaxial ou guia de onda do gerador a uma carga de água e medindo-se a vazão de água através da carga e sua elevação de temperatura.

Embora esta técnica seja importante e útil, é muitas vezes necessário medir-se a quantidade de potência de microondas cedida a um aplicador ou outro dispositivo. Desde que o aplicador pode não apresentar uma carga casada, a potência de microonda pode ser daí refletida e a medida desta potência refletida pode também ser desejada. Para executar estas medidas, algum meio é necessário para amostrar-se a potência passando pelo guia de onda. O amostrador é geralmente um acoplador direcional, que é um dispositivo que possui a habilidade de extrair uma amostra da potência que flue em uma direção, enquanto ignora a potência que flue simultaneamente na outra direção no guia de onda. A diretividade de um acoplador direcional é a medida da qualidade da sua discriminação direcional, enquanto que o fator de acoplamento é a fração da potência

de microonda que flue no guia de onda na direção acoplada que é entregue na saída do acoplador direcional. Fator de acoplamento e diretividade são usualmente expressos em decibéis (dB), igual a 10 vezes o logaritmo(base dez) da relação de potências. Por exemplo, se um acoplador direcional com um fator de acoplamento de 50 dB e diretividade de 40 dB fosse utilizado para medir a potência transmitida em um guia de onda carregando 30 kW para a frente e 1 kW de potência refletida, o acoplador amostraria 300 mW da onda transmitida e 100 mW da onda refletida. Neste exemplo o erro de diretividade de 100 mW é aceitavelmente pequeno. O dispositivo extrai somente um milionésimo da potência que flue pelo guia de onda e assim praticamente não perturba o sistema ao efetivar a medida.

Para complementar este tipo de medição de potência, alguns meios para medir níveis de potência de microonda da ordem de miliwatts são necessários. Dois tipos de instrumentos são comumente empregados. O mais preciso dos dois é uma classe de instrumentos contendo um bolômetro, tal como um termistor. Quando a energia de microonda é absorvida pelo bolômetro, sua temperatura se eleva e assim sua resistência é alterada. A mudança de resistência é medida por um circuito eletrônico que envia uma corrente para um medidor, a qual é proporcional à potência de microonda que implicou na mudança da resistência. Tais instrumentos são aptos a medir potências com precisão de $\pm 2\%$. Se o acoplador direcional usado tem um fator de acoplamento bem calibrado e uma boa diretividade, a potência de microonda de um sistema de aquecimento pode ser medida com a mesma precisão.

Industrialmente tal precisão não é usualmente requerida,

podendo ser adotadas técnicas mais baratas. Um método aceito é o de medir níveis das potências relativas da microonda pelo sinal de corrente contínua oriundo de um detector de cristal. Este é essencialmente um diodo retificador mas, para efetuar medidas de potência relativa, ele deve possuir uma curva característica que siga uma lei quadrática. Como consequência, os medidores de potência que empregam detectores de cristal devem ser calibrados para o sistema particular com o qual eles estão sendo utilizados.

2.4. Propriedades Dielétricas dos Materiais e Interação com as Microondas

As propriedades elétricas de maior interesse básico no processamento dos materiais em geral, e dos alimentos em particular, são suas propriedades dielétricas, porque são elas que determinam algumas propriedades de transmissão relacionadas que afetam o acoplamento de energia do campo e sua distribuição dentro do produto (Mudgett, 1986). Embora os pesquisadores e engenheiros possam estar mais familiarizados com as aplicações de aquecimento por microondas, por causa do crescente uso dos fornos de microondas domésticos, as rádio frequências mais baixas são também de interesse em muitas aplicações de processamento de muitos produtos. Existem diferenças consideráveis nas respostas elétricas e térmicas dos produtos tratados sob os campos de microondas e rádio frequências, que dependem dos aspectos de composição química, estrutura física e geometria do produto, assim como do mecanismo ou modo dominante de transferência da energia do campo eletromagnético para o produto.

As regiões do espectro de frequências eletromagnéticas utilizadas nas aplicações de aquecimento dielétrico foram assinaladas na Figura 2. Conforme foi visto, as radio frequências designadas para o aquecimento dielétrico estão acima da região alocada para o aquecimento por indução e abaixo das regiões de transmissão de radio FM e televisão. As frequências de microondas destinadas ao aquecimento dielétrico estão acima da faixa da TV e abaixo da extremidade da zona infravermelha, a comprimentos de onda da ordem do milímetro e abaixo. Não serão aqui discutidos os méritos relativos da aplicação destas frequências.

A. Propriedades Dielétricas

Uma completa revisão das propriedades dielétricas nas frequências das microondas, para uma grande diversidade de alimentos e produtos agrícolas, sobre um intervalo de temperaturas, teores de umidade, e teores de sais mais comuns do processamento de alimentos, é apresentada nas publicações : Bengtsson e Risman (1971), Ohlsson et al.(1974), To et al.(1974), To (1974), Ohlsson e Bengtsson (1975), e Nelson (1980). Uma bibliografia sobre microondas anotada por Goldblith e Decareau (1973) também fornece uma extensa literatura sobre as propriedades dielétricas dos alimentos e informações relacionadas ao processamento por microondas dos mesmos. A publicação de Mudgett (1986) oferece uma atualização das propriedades elétricas básicas e sua relação com as características de aquecimento dos alimentos por microondas.

A literatura mencionada acima mostra que as propriedades

dielétricas dos produtos variam significativamente com a frequência, temperatura, teor de umidade, conteúdo salino e estado físico. De particular interesse são as medidas que demonstram que as propriedades dos alimentos sólidos desidratados, gorduras e óleos têm valores pequenos e relativamente independentes da frequência e temperatura, sugerindo que a parte sólida contribue pouco para o comportamento dielétrico a níveis de umidades elevados. Isto está de acordo com o trabalho de Hasted *et al.*(1948) : as propriedades dos alimentos podem ser efetivamente modeladas como misturas de duas fases de íons aquosos dielétricamente ativos e sólidos dielétricamente inertes. Especialmente interessante é a publicação de Roebuck e Goldblith(1975), sugerindo que os gels de agar-agar de baixa condutividade iônica podem ser usados para simular alimentos de diversos teores de umidade e condutividade iônica; isto foi feito pelo preparo dos gels com solução aquosa de cloreto de sódio e sólidos inertes, a concentrações típicas de vários produtos, e moldando-os na forma de pranchas, cilindros e esferas ou outras formas geométricas, para medida subsequente dos perfis de temperatura vs. tempo, nos estudos de aquecimento por microondas.

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, associadas com a rotação dos dipolos de moléculas de água livre e com a

migração eletroforética de sais livres, em um campo elétrico de rápida mudança de polaridade. Estes efeitos são predominantemente relacionados com os constituintes iônicos aquosos dos produtos e seus constituintes sólidos associados.

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, através 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. Tais materiais não interagem com o componente magnético do campo, por causa da sua baixa permeabilidade magnética. Além do mais, são em geral maus isolantes, pois dissipam proporções consideráveis de energia elétrica, acoplados com mecanismos de "histerese dielétrica" e condução, relacionados primariamente com a água livre e o conteúdo salino, como calor gerado internamente. As propriedades dielétricas de um material são definidas através das equações (von Hippel, 1954) :

$$\epsilon^* = \epsilon' - j \epsilon'' = |\epsilon^*| e^{-j\delta}$$

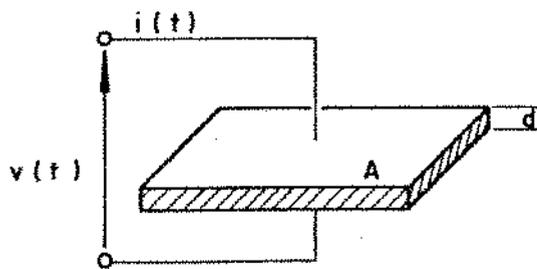
$$\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon'$$

Um exemplo simples basta para dar o significado físico destes parâmetros (Senise, 1985) :

Tenha-se (Figura 7) um capacitor construído com duas placas paralelas de área A (m^2), separadas pela distância d (m); se entre as placas há vácuo, a capacitância do capacitor é igual a :

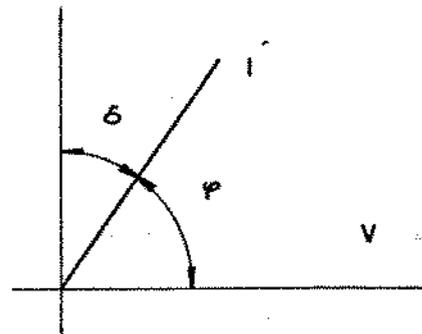
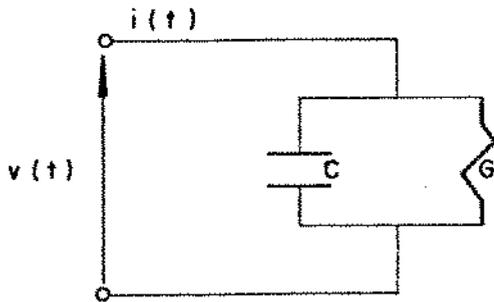
$$C = \epsilon_0 A / d, \text{ medida em farads}$$

onde ϵ_0 é a permissividade do vácuo ($\approx 8,854 \times 10^{-12} \text{ F/m}^2$).



$$C = \epsilon' A / d = \epsilon_0 \epsilon_r' A / d$$

$$G = \sigma A / d = \omega \epsilon_0 \epsilon_r'' A / d$$



$$v(t) = V_m \cos \omega t$$

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \phi)$$

$$\tan \delta = G / \omega C = \epsilon_r'' / \epsilon_r'$$

Figura 7 Significado físico dos parâmetros dielétricos

Havendo um dielétrico entre as placas, a capacitância passa a ser :

$$C = \epsilon' A / d = \epsilon_r' \epsilon_0 A / d \quad (\text{F})$$

onde ϵ_r' é a permissividade relativa do dielétrico (>1).

Se o dielétrico não for um isolante perfeito (como o vácuo), apresentando uma condutividade σ (S/m), a condutividade entre as placas vale :

$$G = \sigma A / d \quad (S)$$

Aplicando-se ao capacitor uma tensão alternada :

$$v(t) = V_m \cos \omega t$$

tem-se uma corrente :

$$i(t) = I_m \cos(\omega t + \varphi)$$

No caso de um dielétrico perfeito ($\sigma = 0$), a corrente está defasada de 90° com relação à tensão : não há componente de corrente em fase com a tensão e por isso não pode haver dissipação de energia. Por outro lado, se o dielétrico tem condutividade não nula, a defasagem da corrente é inferior a 90° , diferindo desse valor pelo ângulo δ , tal que :

$$\tan \delta = G / \omega C = \sigma / \omega \epsilon' = \epsilon'' / \epsilon' = \epsilon_r'' / \epsilon_r'$$

Observa-se que a energia armazenada por ciclo no capacitor é dada por :

$$C V_m^2 / 2 \quad (J)$$

ou, por unidade de volume :

$$\epsilon' E_m^2 / 2 \quad (J/m^3)$$

onde $E_m = V_m / d$ é a intensidade do campo elétrico entre as placas, enquanto que a potência dissipada por unidade de volume (transformada em calor) é dada por :

$$P_v = \sigma E_m^2 / 2 = \omega \epsilon'' E_m^2 / 2 \quad (\text{W/m}^3)$$

Em outras palavras, ϵ' mede a energia armazenada pelo dielétrico, por unidade de volume, quando sujeito à ação de um campo elétrico alternado de $\sqrt{2}$ V/m (1V/m é o valor eficaz), ao passo que ϵ'' mede a energia dissipada por segundo nas mesmas condições. Então $\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon'$ relaciona energia dissipada com energia armazenada pelo dielétrico.

Os valores de ϵ_r' e ϵ_r'' para diversos materiais de uso industrial e para diversos alimentos variam numa ampla faixa. As Tabelas I e II do Apêndice A incluem valores representativos de ϵ_r' e $\tan \delta$ para dielétricos sólidos e líquidos e para alguns produtos biológicos típicos, respectivamente, à temperatura ambiente (20 a 25°C).

As propriedades dielétricas dos materiais variam com a temperatura. Essa variação é importante nas aplicações de radio frequência e microondas em processos de aquecimento elétrico. É ainda de Senise (1985) o exemplo do tratamento térmico por microondas de um material como a borracha, que vem sendo adotado industrialmente com sucesso. Se forem tomados os parâmetros dielétricos da borracha entre 0 e 50 °C, verifica-se que $\tan \delta$ varia de $\approx 0,04$ a 0,40, ou seja, 10 vezes, enquanto ϵ_r' varia pouco (≈ 7 a 8 x). Então vê-se que $\epsilon_r'' = \epsilon_r' \tan \delta$ aumenta muito rapidamente com a temperatura, o que obriga a uma dosagem cuidadosa da energia entregue ao material durante o processo de aquecimento, a

fim de evitar a assim chamada "avalanche térmica". Outro exemplo citado, de primordial importância prática, é o da água, pois grande parte das aplicações de radio frequência e microondas na indústria relaciona-se com a mesma. Processos como a secagem de diversos materiais, cozimento, descongelamento de alimentos e outros, são exemplos de operações que dependem, fundamentalmente, das propriedades dielétricas da água. A Tabela I mostra que a água, no estado líquido, está incluída entre os dielétricos com valores mais elevados de ϵ_r' e $\tan \delta$, o que pode justificar a facilidade maior com que materiais que contêm água são aquecidos por microondas ou radio frequência. Por outro lado, esses parâmetros sofrem grande aumento na passagem do estado sólido (gelo) para o líquido. Esse fato sugere igualmente que sejam tomados os devidos cuidados no descongelamento de alimentos por microondas, a fim de ser evitada a já mencionada "avalanche térmica". Além disto, mesmo no estado líquido, as propriedades dielétricas da água sofrem variação sensível com a temperatura. Foi observado (Senise, 1985) que, a 3000 MHz, ϵ_r' cae de 12 para 3,5 quando a temperatura é elevada de 25 para 85°C, o que equivale a uma redução para 30% da potência dissipada por unidade de volume, suposta mantida constante a intensidade do campo elétrico.

B. Propriedades de Transmissão

Recapitulando, já foi visto que as propriedades dielétricas dos materiais biológicos nas frequências das microondas são determinadas pela composição química e são influenciadas principalmente pelos teores de água livre e de

sal do produto. Essas propriedades básicas variam significativamente com a frequência e a temperatura da medida. Sua relação com as características de aquecimento por microondas dos produtos, no entanto, é indireta, já que a distribuição de energia acoplada de um campo eletromagnético por radiação é determinada por um conjunto de propriedades de transmissão relacionadas não somente às características dielétricas dos materiais como também às suas propriedades térmicas. As propriedades térmicas que afetam as características de aquecimento dos materiais incluem a condutividade térmica, a densidade e o calor específico, ou seja, a difusividade térmica e serão discutidas mais adiante. Conceitualmente, o aquecimento por microondas envolve dois fenômenos básicos : (1) acoplamento de energia de um campo eletromagnético pelo produto e (2) atenuação da absorção da energia acoplada dentro do produto. Esses fenômenos compreendem a reflexão e a transmissão da energia nas superfícies do produto e atenuação da energia dentro do produto, como uma função de duas propriedades de transmissão fundamentais : impedância intrínseca e constante de atenuação.

E.1. Acoplamento Energético

A impedância intrínseca do material relativa ao vácuo (ou ao ar) na cavidade é da maior importância no acoplamento energético e é dada por (von Hippel, 1954) :

$$\eta = \eta_0 [1/\epsilon^*]^{1/2}$$

Foi visto na secção 2.3.3 que a impedância intrínseca η_0 do vácuo(ou ar) é de cerca de 377 Ω . Nos produtos biológicos, de teores de umidade elevado ou intermediário, a impedância intrínseca é geralmente muito menor do que a do vácuo. Para ilustrar este ponto, a água no estado líquido a 25°C tem uma impedância intrínseca de aproximadamente 42 Ω . A impedância de uma solução de NaCl 0,1M a essa temperatura não é muito diferente. As impedâncias de um alimento sólido e do gelo são, para todos os efeitos práticos, independentes da temperatura e possuem um valor ao redor de 188 Ω , cerca da metade daquele do vácuo e mais do que quatro vezes o da água a 25°C. Tais diferenças acarretam discrepâncias na impedância entre o produto e o vácuo, que determinam as frações da energia transmitida e refletida nas superfícies do produto, tal como está ilustrado na Figura 8. Isto é, 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, a magnitudes relativas que 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. As razões entre as potências refletida e transmitida, ou seja, das potências refletida e transmitida para o nível da potência incidente, respectivamente, podem ser calculadas, para produtos homogêneos, a partir das impedâncias intrínsecas do produto e do vácuo, e dos ângulos de incidência e refração relacionados à equação de Snell :

$$\text{sen } \psi = \eta \text{ sen } \phi / \eta_0$$

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

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

A relação de potência transmitida é :

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

Essas relações indicam a grandeza relativa dos níveis de potência refletida e transmitida, respectivamente, para uma onda que se propaga no espaço livre sobre uma superfície refletora ; sua soma é a unidade (Skillings, 1948). Com reflexão, o campo no espaço livre é a soma de uma onda que se propaga e uma onda estacionária. Para alterações extremas nas propriedades dielétricas junto à superfície, a onda

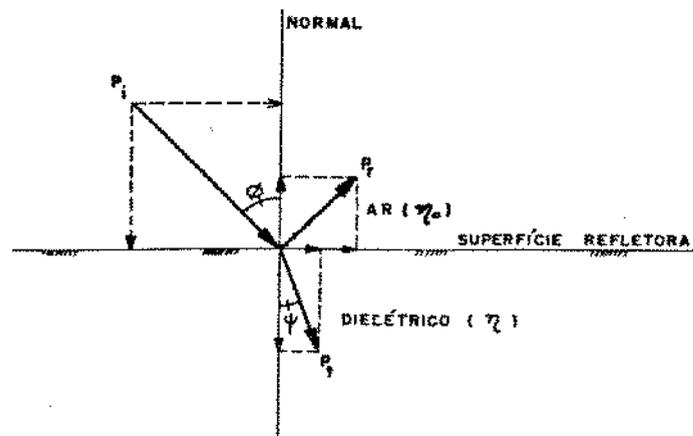


Figura 8 Reflexão e transmissão da energia das microondas

refletida é muito grande e o campo no espaço livre torna-se essencialmente uma onda estacionária. Para pequenas mudanças nas propriedades dielétricas junto à superfície, a onda refletida é muito pequena e o campo no espaço livre se reduz essencialmente a uma onda em propagação. Desta forma podem

ser criados modos de ondas estacionárias dentro de produtos homogêneos, que dependerão das características de absorção do produto e das condições para reflexão junto à interface entre o exterior e o interior do mesmo.

B.2. Absorção Energética

A absorção da energia das microondas dentro de um produto pode ser expressa por um fator de atenuação α , 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 α e por um fator de fase β (constante de fase), de acordo com as relações (Apêndice B) :

$$\gamma = \alpha + j \beta$$

$$\gamma = j \omega \sqrt{\epsilon^* \mu^*}$$

O componente real ou fator de atenuação α 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. O fator de atenuação governa a habilidade do componente elétrico do campo em penetrar o interior do dielétrico e equivale ao recíproco da profundidade de penetração no material, ou seja, a profundidade a partir de uma superfície irradiada aonde a intensidade do campo elétrico foi reduzida a $1/e$ do seu valor na superfície, sendo a penetração (von Hippel, 1954) :

$$z = 1/\alpha = (\lambda_0/2\pi) \{\epsilon_r' / 2 [(1 + \tan^2 \delta)^{1/2} - 1]\}^{-1/2} \quad (m) \quad (m)$$

isto é, o fator de atenuação α é dado por :

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

Demonstra-se que a intensidade do campo elétrico que penetra no interior do material cai exponencialmente a partir da superfície, sendo dada, conforme a lei de Lambert, pela equação :

$$E_z = E_0 e^{-\alpha z} \quad (V/m)$$

Foi visto acima que a potência dissipada no interior de um dielétrico é dada por :

$$P_v = \omega \epsilon'' E_m^2 / 2 \quad (W/m^3)$$

ou seja,

$$P_v = \pi f_0 E_m^2 \epsilon_0 \epsilon_r' \tan \delta \cong 2,782 \times 10^{-11} f_0 E_m^2 \epsilon_r' \tan \delta \quad (W/m^3)$$

Combinando esta expressão com a da intensidade do campo, tem-se :

$$P_{vz} \cong 2,782 \times 10^{-11} f_0 E_0^2 \epsilon_r' \tan \delta e^{-2\alpha z} \quad (W/m^3)$$

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

$$P_{tz} = P_0 e^{-2\alpha z}$$

A razão da potência não absorvida para a potência incidente como uma função da profundidade diminuída do material é ilustrada na Figura 9 (Mudgett, 1986). O componente imaginário

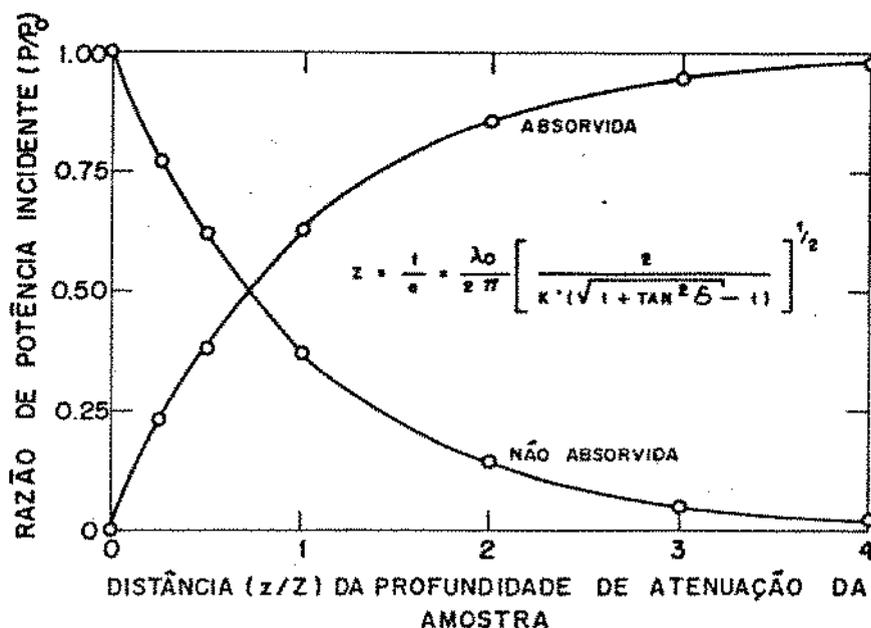


Figura 9 Fração da potência incidente não atenuada como função da profundidade reduzida da amostra

β do fator de propagação γ , ou fator de fase, é a variação de fase, por unidade de comprimento, na direção de propagação da onda. Como para uma distância igual a λ (período espacial ou comprimento de onda) a variação de fase é 2π , então: $\beta = 2\pi/\lambda$, correspondendo a uma velocidade de fase: $v = \omega/\beta$ da onda em propagação no dielétrico, com uma excitação ou período de tempo: $T = 1/f$.

O fator de fase β é calculado a partir das propriedades dielétricas do material e é dado por (von Hippel, 1954):

$$\beta = (2\pi/\lambda_0) \{ \epsilon_r / 2 [(1 + \tan^2 \delta)^{1/2} + 1] \}^{1/2}$$

ou seja:

$$\beta \cong 1,482 \times 10^{-8} f_0 \{ \epsilon_r [(1 + \tan^2 \delta)^{1/2} + 1] \}^{1/2} \quad (\text{m}^{-1})$$

O período espacial ou comprimento da onda em propagação no dielétrico é mais curto do que o comprimento de onda no vácuo ; portanto, sua velocidade de fase, ou seja, velocidade no dielétrico, é menor do que a velocidade no vácuo.

Embora a discussão precedente implique que a quantidade de energia acoplada por um material no aquecimento dielétrico possa ser facilmente previsível a partir das propriedades dielétricas fundamentais do material, estes conceitos estão restritos a uma onda plana propagando-se inicialmente no espaço livre sem contorno. Este não é o caso de um forno de microondas, pois existem múltiplas reflexões dentro da cavidade, entre as paredes da mesma e as superfícies da carga (produto). Os efeitos de acoplamento nas frequências das microondas também dependem das características de impedância do gerador da radiação, que podem variar sob condições de carga diversificadas. Por exemplo, tanto a frequência quanto a amplitude da potência acoplada de uma válvula geradora magnetron, pela transferência da energia irradiada, variam à medida que a discrepância de impedâncias entre a cavidade e o magnetron variam com a mudança das condições da carga nas frequências das microondas. Nas aplicações de aquecimento dielétrico em radio-frequências (RF), toda a potência entregue pelo gerador de RF é acoplada pela carga através de transferência de energia por condução. Independentemente do mecanismo de transferência energética, os níveis de acoplamento de potência a altas frequências são afetados pelas interações

recíprocas entre a carga e o gerador de potência, que não são facilmente determináveis *a priori*. Tais efeitos podem, entretanto, ser estimados por correlações empíricas baseadas na calorimetria líquida e sólida, que mostram uma relação aproximada entre o acoplamento de potência e o volume da carga, para materiais cujas propriedades dielétricas sejam similares àquelas dos constituintes comuns dos alimentos, tais como óleo, água, íons aquosos, e sólidos (Mudgett, 1982) :

$$P_o = P_m (1 - e^{-aV}) \quad (*)$$

$$P_o = P_m V^b / (K_m + V^b) \quad (**)$$

onde : P_o, P_m = potências acopladas pela carga não-casada e casada, respectivamente, W

a, b, K_m = constantes de acoplamento

V = volume de fluido, cm^3

Uma curva de calibração, obtida para óleo e água em um pequeno forno experimental de volume não especificado, a 2450 MHz; baseada na equação (*) acima, é mostrada na Figura 10. Medidas calorimétricas para íons aquosos e sólidos orgânicos selecionados foram similares àqueles para água e óleo, respectivamente (Keenan e Mudgett, resultados não publicados e citados em Mudgett, 1986). Os coeficientes de acoplamento a e b são provavelmente únicos para cada equipamento de aquecimento e podem ser determinados por medidas calorimétricas que são baseadas em medidas da elevação da temperatura de amostras irradiadas por um certo tempo. Na prática, os efeitos da carga sobre o acoplamento

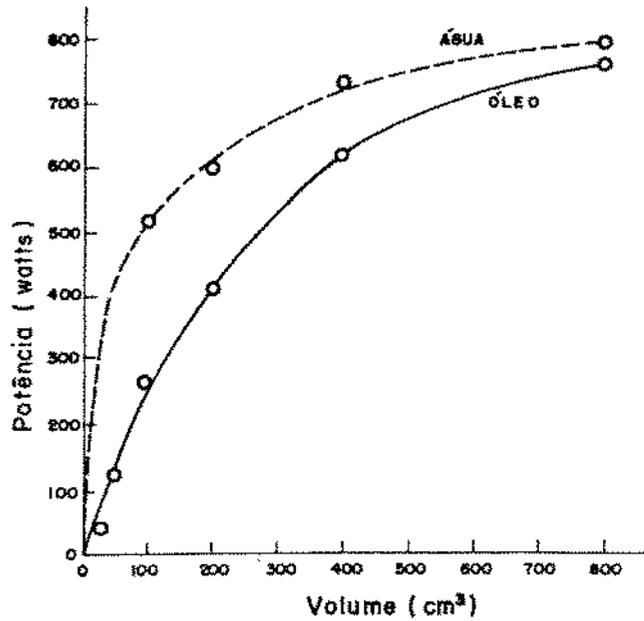


Figura 10 Acoplamento de potência vs. volume da carga em um forno pequeno a 2450 MHz

de potência, podem ser monitorados pelas razões ROE para a transferência de energia irradiada ou por medidas diretas de potência por transferência de energia condutiva.

Os modelos expressos pelas duas formas de equações (*) e (**), que são grosseiramente equivalentes, sugerem uma eficiência de acoplamento volumétrico E_v , que está relacionada com a impedância intrínseca, tamanho e geometria do produto :

$$E_v = 100 P_o / P_m \quad (\text{percentual})$$

C. Interação com as Microondas

As interações entre os componentes elétricos de um campo eletromagnético gerado por um oscilador de alta

frequência, por exemplo um magnetron ou um klystron, e os constituintes químicos de um produto biológico são responsáveis pelo aparecimento de efeitos no campo eletromagnético, nas frequências das microondas e nas radio-frequências. Estas interações são resultado, primariamente, da rotação dos dipolos das moléculas de água livre e da migração condutiva de portadores de carga associados com a eletroforese dos íons de sais dissolvidos, na direção oposta à da polaridade de um campo aplicado. A rotação de um dipolo está associada com os centros de cargas parciais positivas e negativas sobre os átomos de hidrogênio e oxigênio da molécula da água (Collie *et al.*, 1948). Os vários mecanismos de polarização nos materiais biológicos estão associados com diferentes regiões do espectro eletromagnético (de Loor e Meijboom, 1966), como esquematizado na Figura 11. O mecanismo da rotação de um

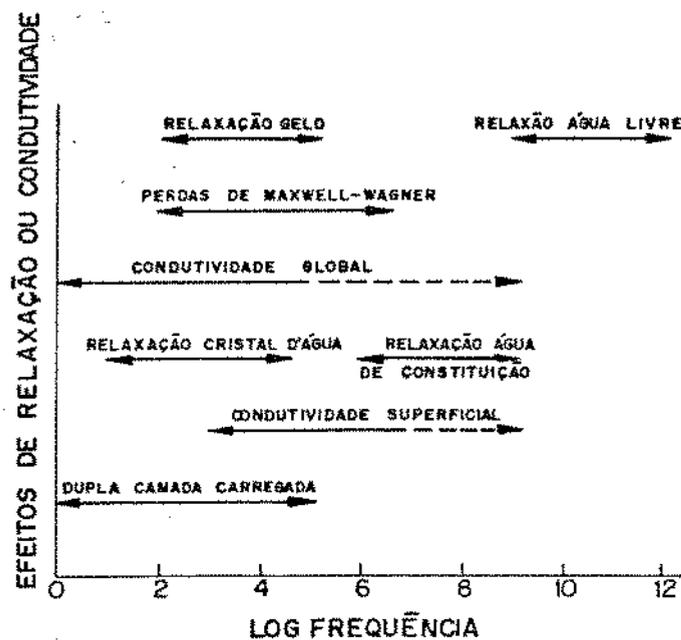


Figura 11 Efeitos de relaxação e condutividade a várias frequências (Hz)

dipolo é também conhecido como polarização orientacional e é operacional para fluidos polares sobre um amplo espectro de radio-frequências e de frequências de microondas. Abaixo da faixa de frequências das microondas, os efeitos de migração condutiva, associados com a eletroforese de sais dissolvidos nas soluções iônicas, tornam-se ascendentemente mais pronunciados, por causa de uma relação inversa entre as perdas iônicas e a frequência :

$$\epsilon'' = \sigma'' / \omega \epsilon_0$$

Nas frequências abaixo da faixa das microondas, são vistos ainda mecanismos de polarização de carga espacial ou interfacial, os quais envolvem interações entre o campo e as cargas ligadas ou aprisionadas dentro do material. Nas frequências acima das microondas e abaixo das regiões visíveis, são encontrados mecanismos de polarização atômica que envolvem o deslocamento de núcleos atômicos em relação a si próprios.

2.5. Efeitos do Aquecimento dos Materiais por Microondas em Relação às suas Propriedades Térmicas e aos Modos de Transferência de Calor

As características de aquecimento dos alimentos no processamento por microondas dependem das suas propriedades térmicas, em maior ou menor grau, do teor de umidade inicial do produto e da taxa de evaporação da umidade durante o processo de aquecimento. A propriedade térmica de interesse básico, tal como nos métodos de aquecimento convencionais, é

a difusividade térmica, α_t , definida como a razão da condutividade térmica, k , para o produto da densidade do material, ρ , pelo calor específico, c_p :

$$\alpha_t = k/\rho c_p \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

Estas propriedades são extremamente dependentes da temperatura em materiais que sofrem rápida desidratação, mas são menos sensíveis a variações de temperatura a teores de umidade relativamente constantes. No entanto, por exemplo, o valor de α_{t_w} da água varia de $1,348 \times 10^{-7}$ a $1,682 \times 10^{-7} \text{m}^2/\text{s}$ nas temperaturas de 0 e 150°C , respectivamente, para o intervalo geral de processamento por microondas, indicando uma variação de cerca de 35 % no comportamento térmico da água a essas temperaturas. Variações similares devem ser consideradas no modelamento dos processos de aquecimentos convencionais pelos métodos analítico ou de diferenças infinitesimais. O modelamento das propriedades térmicas a temperaturas baixas é mais complexo, devido a que, especialmente com os alimentos, o congelamento ocorre sobre um intervalo de temperaturas, particularmente na faixa de 0 a -18°C , e não a um ponto fixo da escala de temperatura. A temperaturas acima do congelamento, os modelos de Riedel(1969) e de Martens(1980), respectivamente, são citados por Singh(1982) como uma base para estimar os valores de α_t (m^2/s) como função do teor de umidade m (%.bu) e da temperatura T ($^\circ\text{C}$) :

$$\alpha_t = 0,088 \times 10^{-6} + (\alpha_{t_w} - 0,088 \times 10^{-6})m \quad (\text{Riedel})$$

$$\alpha_t = [0,057363m + 0,000288(T + 273)] \times 10^{-6} \quad (\text{Martens})$$

Valores das condutividades térmicas e dos calores específicos para um grande número de produtos alimentícios, a várias temperaturas e diversos teores de umidade são citados por Polley *et al.* (1980).

A transferência de calor nos processos de aquecimento por microondas envolve condições de regime transiente de forma similar aos encontrados nos processos térmicos convencionais, exceto que o calor 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. O acoplamento da energia elétrica do campo é manifestado pelo termo de calor gerado internamente, à semelhança daquele que é requerido na análise de reações químicas exotérmicas. Na análise unidimensional de pranchas, cilindros e esferas, as seguintes equações podem ser usadas para representar de uma maneira generalizada o aquecimento de materiais biológicos de geometria convencional (Holman, 1976) :

$$\text{Pranchas :} \quad \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + q/k = 1/\alpha_t \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta}$$

$$\text{Cilindros :} \quad \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + 1/r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + q/k = 1/\alpha_t \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta}$$

$$\text{Esferas :} \quad \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + 2/r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + q/k = 1/\alpha_t \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta}$$

Enquanto a esfera pode ser adequadamente representada na forma unidimensional, o cilindro é melhor representado em

duas dimensões :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} + q/k = 1/\alpha_t \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta}$$

e a prancha em três dimensões :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q/k = 1/\alpha_t \cdot \frac{\partial T}{\partial \theta}$$

O uso destas equações na modelagem dos processos de aquecimento por microondas, tal como nos processos de aquecimento convencionais, está baseado na hipótese de homogeneidade do produto e, no caso do cilindro em duas dimensões, sobre a simetria radial. Tais equações não podem ser resolvidas analiticamente para fornecer os perfis tempo vs. temperatura, porque o termo de geração de calor interior está sujeito a variações não lineares do comportamento dielétrico como uma função de tempo e temperatura. Os perfis poderão, contudo, ser obtidos pelo método aproximativo das diferenças finitas, com a geração de calor interior expressa em termos do comportamento dielétrico a intervalos de tempo discretos e com as propriedades térmicas do produto assumidas como constantes ou, mais precisamente, expressas em formas dependentes da temperatura.

A taxa de geração de calor interno pode ser aproximada, através da análise das diferenças finitas, pela potência média absorvida em cada elemento de volume diferencial dentro do produto, durante intervalos de tempo discretos, e expressa em unidades que são dimensionalmente consistentes com as unidades empregadas para tempo, temperatura e propriedades físicas do material, dentro do elemento de

volume, durante cada intervalo de tempo. A absorção de potência em cada elemento de volume (isto é, volume da camada) é então determinada pela subtração da potência remanescente no limite da camada interior daquela remanescente no limite da camada exterior, com base na constante de atenuação calculada para cada limite, por sua vez determinada a partir da permissividade complexa, por meio da equação seguinte, já apresentada à página 39 :

$$\gamma = j \omega \sqrt{\epsilon^* \mu^*}$$

O caso específico da cinética de secagem dielétrica é tratado por Strumillo e Kudra (1986), que mostram, através de uma revisão de literatura, que os principais mecanismos para a remoção de umidade por secagem dielétrica são similares aos métodos convencionais. Não obstante, a presença de uma fonte de calor interior provoca certos fenômenos, que nos processos de secagem menos intensivos não ocorrem. Através da secagem dielétrica é possível elevar a temperatura do material até o ponto de ebulição do líquido. Uma evaporação intensiva do líquido dentro do material úmido se desenvolve e, devido à resistência ao fluxo que resulta da estrutura do material, surge um gradiente de pressão interno. Isto se torna a principal força motora para a transferência de massa, especialmente durante o período de taxa de secagem constante. Como resultado da geração de calor interna é criado um gradiente de temperatura positivo dentro do material. Ele é responsável pelo movimento da umidade para a superfície do material, onde a temperatura é mais baixa (e a pressão de vapor é menor), através de fluxos

de líquido, vapor e molecular. Em alguns casos a secagem dielétrica pode alterar completamente a distribuição de umidade do material que vai ser seco, por causa da complexa dependência dos parâmetros dielétricos(constante dielétrica e fator de perda) e parâmetros físico-químicos(difusividade) sobre a temperatura e o teor de umidade. Em geral os processos de secagem dielétrica podem ser divididos em quatro períodos, que estão ilustrados na Figura 12, conforme Lyons *et al.*(1972) :

1.-*Período de aquecimento preliminar.* A temperatura do sólido úmido pode aumentar até o ponto de ebulição do líquido. Neste período não há perda de umidade e a pressão interna do material pode ser tomada como sendo igual à atmosférica.

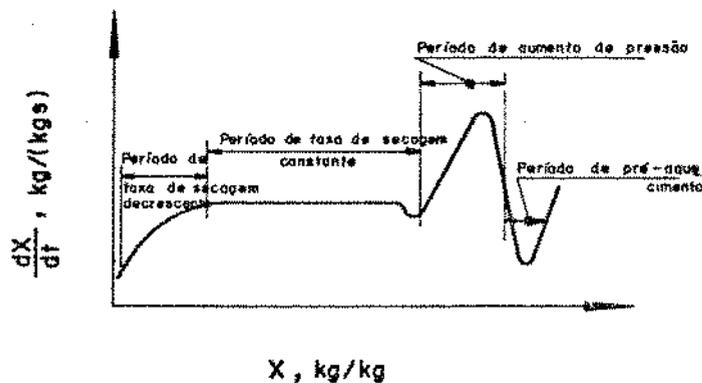


Figura 12 Taxas de secagem vs. teores de umidade do material

2.-*Período de acréscimo de pressão.* A pressão sobe desde a atmosférica até uma pressão máxima determinada pela resistência ao fluxo e à entrada de potência. O vapor gerado interiormente ao material flue em direção à superfície.

3.-*Período de taxa de secagem constante*(para entrada de potência constante).A velocidade do fluxo de vapor dentro do material é determinada pela potência absorvida e pela resistência interna ao fluxo de vapor.

4.-*Período de taxa de secagem decrescente*. O decréscimo do teor de umidade do material resulta em um declínio da potência absorvida e da força motora do movimento da umidade. A temperatura do material poderá subir se a sua estrutura for o principal receptor da energia eletromagnética a teores de umidades reduzidos.

O padrão delineado acima, como ideal para a cinética de secagem, pode ser alcançado somente sob condições especiais, a saber, corpos de porosidade capilar com teor inicial de umidade elevado sendo submetidos a secagem sob densidade de potência suficiente. Pesquisas mais recentes (Kudra,1981 e Perkin,1983) demonstram que a cinética da secagem depende também dos seguintes fatores :

- da fonte de energia que fornece o calor latente para a evaporação (somente secagem dielétrica ou secagem dielétrica combinada com ar frio ou quente).
- das propriedades higroscópicas do material úmido (não-higroscópico,parcialmente higroscópico e fortemente higroscópico).
- da estrutura do material e resistência ao fluxo de calor e de massa (resistência interna desprezível ou apreciável).
- do estado da umidade dentro do material (estado pendular ou funicular).
- da densidade de potência (geração de calor forte ou moderada).

Levando-se em conta as condições acima, os períodos de

pré-aquecimento típico, de acréscimo de pressão acima da atmosférica, que causa um fluxo extra de umidade líquida, e de taxa de secagem constante, no padrão geral da cinética de secagem, podem não ser observados. Um exemplo de comparação entre curvas de secagem e curvas de temperaturas do produto alumina, para secagens dielétrica, por convecção e combinada dielétrica mais convecção, é mostrado na Figura 13, de acôrdo com Kudra (1989) :

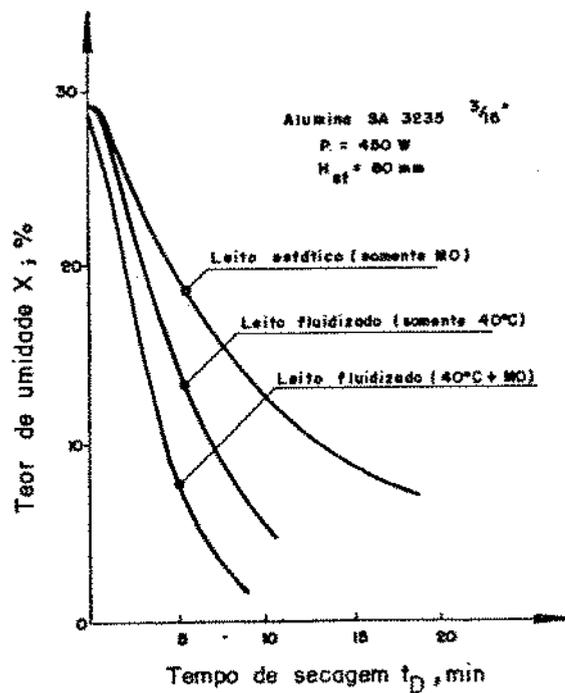


Figura 13 Teor de umidade vs. tempo de secagem

Observa-se que a temperatura t_{g2} do ar na saída do secador é sempre menor do que a do ar de entrada t_{g1} , de modo que a taxa de secagem para o modo combinado dielétrico mais convecção é sempre maior do que as taxas dos modos de secagem dielétrico e convecção considerados separadamente.

A modelagem dos processos de secagem dielétrica tem como objetivo predizer as distribuições de temperatura e umidade dentro do corpo em secagem a qualquer tempo e portanto

prever o teor de umidade final com base nas condições de secagem. Para fazer isto é preciso resolver as equações de transferência de calor e massa. Como pode ser visto da parte experimental e das considerações teóricas, o modelo clássico de secagem, que leva em conta somente uma equação de energia e outra de transferência de massa, deve ser completado por uma terceira equação, que descreve o movimento de convecção induzido pelo gradiente de pressão total em um corpo que seca. Se for possível assumir que um corpo úmido é contínuo, homogêneo e isotrópico, assim como que a sua estrutura não se altera à medida que o corpo seca e que haja um equilíbrio termodinâmico local, o sistema de equações diferenciais pode ser escrito na forma seguinte :

Massa

$$\partial X / \partial t = \alpha_m \nabla^2 X + \alpha_m \beta_T \nabla^2 T + \alpha_m \beta_P \nabla^2 P$$

Calor

$$\partial T / \partial t = \alpha_t \nabla^2 T + e_v / c_p \cdot \Delta H \cdot \partial X_l / \partial t + Q_v / \rho c_p$$

Pressão

$$\partial P / \partial t = \alpha_p \nabla^2 P - e_v / c_v \cdot \partial X_l / \partial t$$

aonde o teor de umidade $X = X_l + X_v$ equivale à concentração de massa das fases líquida e vapor dividida pela densidade do sólido seco e e_v é o fator de mudança de fase, igual à relação do fluxo de vapor para o fluxo de umidade total. Os demais símbolos aplicam-se a :

- c_p calor específico a pressão constante, J/kg K
- c_v calor úmido específico da fase vapor, m³/J
- ΔH calor latente de vaporização, J/kg
- P pressão, N/m²

Q	quantidade de calor, W
Q_v	potência eletromagnética por unidade de volume do sólido úmido, W/m ³
t	tempo, s
T	temperatura, K
X	teor de umidade (base seca), kg/kg
α	"difusividades", m ² /s
β	coeficiente de variação, 1/K (1/P _o)
ρ	densidade, kg/m ³

Subscritos :

m....massa; P....pressão; T....temperatura; v....vapor

Desde que as "difusividades" de massa, temperatura e pressão são, em geral, uma função implícita da temperatura e do teor de umidade, a estimativa da distribuição de umidade, temperatura e pressão a qualquer tempo da secagem envolve a solução de equações derivadas parciais não-lineares. Isto pode ser feito mediante suposições especiais características do sistema de secagem. Exemplos de tais soluções podem ser encontrados em algumas publicações (Perkin, 1980, Cross *et al.*, 1979 e 1982).

2.6. Medidas de Temperatura

As medidas dos perfis de temperatura-tempo dentro de um produto, durante a irradiação, com sensores de temperatura convencionais como os termistores ou os termopares, não podem ser precisas, já que estes interagem com o componente magnético do campo e podem também causar descarga de arco na superfície do sensor. Embora os perfis possam ser medidos

por termômetros de vidro contendo fluidos de baixo coeficiente de expansão térmica ou por métodos de fibra óptica de desenvolvimento recente, tais medições são incômodas e dispendiosas, pois as medidas precisas dos perfis de temperatura-tempo exigem um grande número de sensores colocados a curtos espaços entre si, a fim de produzir uma análise razoável das distribuições de temperatura dentro do produto, a intervalos de tempos discretos. O que normalmente é feito na prática é a medição dos perfis de temperatura-tempo, através de sensores convencionais, logo em seguida à irradiação, por períodos de tempo discretos, pela inserção dos sensores de temperatura em várias posições dentro do produto. Tais procedimentos são razoavelmente precisos, já que as constantes de tempo na transferência de calor convencional são relativamente longas quando comparadas com o tempo necessário para as medidas de temperatura.

Exemplos de outros recursos utilizados no levantamento dos perfis de temperatura-tempo, no período posterior à irradiação, podem ser encontrados no trabalho de Ohlsson e Risman(1978), que descreve a técnica de medida por termografia infra-vermelha, em várias secções do corpo de prova, para a obtenção de perfis de temperatura-tempo semi-quantitativos, em produtos de geometria cilíndrica e esférica. Estas medidas evidenciaram os efeitos de aquecimento de cantos e arestas, similares àqueles vistos nos processos de aquecimento convencional e, além disto, efeitos de aquecimento central, que são peculiares aos processos de aquecimento por microondas. Tais efeitos de aquecimento central, observados tanto em esferas quanto em

cilindros, foram atribuídos, pelos autores do trabalho, a um fenômeno de focalização do campo eletromagnético.

2.7. Efeitos Diferenciados do Aquecimento

O aquecimento por microondas de produtos heterogêneos, que possuem propriedades de fase física e quimicamente distintas, tais como pedaços sólidos em líquidos no caso de produtos alimentícios compostos, pode resultar em efeitos diferenciados do aquecimento. Exemplos práticos podem ser encontrados nos processamentos industriais de alimentos que incluem o descongelamento de blocos de carne ou peixe, ou no procedimento de reaquecimento de produtos compostos tais como pizza.

Os efeitos diferenciados do aquecimento nas frequências das microondas podem ser racionalizados por conceitos de impedância intrínseca de fase, em termos de reflexão e transmissão nas superfícies interiores limítrofes interfases e nos limites entre a superfície do produto e a cavidade, e de atenuação de fase. Tome-se, por exemplo, o caso dos alimentos congelados, em que a energia acoplada do campo é transmitida com pouca atenuação através da fase contínua de sólidos e gelo. A potência transmitida através dos limites da fase interna é assim grandemente atenuada pelos bolsões de salmoura não-congelada, fazendo com que os mesmos se aqueçam mais rapidamente à medida que a atenuação cresce com a temperatura devido à condutividade iônica. Em contrapartida, fases sólidas de baixa condutividade suspensas em uma fase contínua de alta condutividade seria de se esperar que absorvessem pouca energia, já que a

energia acoplada do campo é grandemente atenuada pela fase contínua, e a energia atingindo o limite da fase interna seria largamente refletida, por causa da discrepância de impedâncias que resultou da diferença das condutividades das fases, por exemplo : caso de gorduras alojadas nos músculos de uma carne magra, ou caso das sopas de vegetais. Estes tipos de mecanismos têm sido verificados através da simulação das diferenças de fase, pela utilização de camadas compostas de agar-agar, nas quais a camada inferior era de baixa condutividade, por exemplo água, e a camada superior de alta condutividade, por exemplo, cloreto de sódio aquoso, (Mudgett e Nash, 1980) : a camada iônica aquosa aqueceu bem mais rapidamente que a camada de água. Nas frequências das microondas são observadas, pois, três classes de produtos básicos que podem levar ao aquecimento diferenciado :

- (1) produtos com fases heterogêneas de baixa permissividade suspensas em uma fase contínua de alta permissividade.
- (2) produtos com fases heterogêneas, de alta permissividade, suspensas em uma fase contínua de baixa permissividade.
- (3) produtos compostos com fases heterogêneas em camadas de baixa e alta permissividade.

2.8. Vantagens e Desvantagens do Aquecimento por Microondas

Nos primórdios da industrialização dos alimentos, a qualidade dos produtos muitas vezes desconsiderava os custos energéticos. Frequentemente isto resultava em uma eficiência

muito baixa de aproveitamento da energia. Por exemplo, na secagem de massas alimentícias, a temperatura e a umidade do ar deviam ser estreitamente controladas a fim de ser evitada uma super-secagem superficial do produto, que geralmente conduz a uma perda excessiva de amido e a uma qualidade inferior durante o cozimento. Esta meta de obtenção de um balanço ideal entre temperatura e umidade do processo vai traduzir-se em um secador muito volumoso e bastante ineficiente.

Nos sistemas de processamento convencionais, o produto é geralmente aquecido com a energia térmica fornecida pela combustão de óleo ou gás. Além disso, o sub-produto, tal como a água na forma de vapor, é também removido pelo mesmo ar quente que transporta a energia térmica. Como o ar possui baixos valores de calor específico e condutividade térmica, isto geralmente governa o desenho de unidades de escala ampliada, as quais por consequência deverão operar sob condições abaixo da ótima. Existem quatro modos de transporte, limitantes potenciais da taxa de secagem, que ocorrem em série entre si, em uma operação típica :

- (1). Modo de transferência de calor externo, do ar quente para a superfície exterior do material, ou muitas vezes conhecido como o modo "convecção".
- (2). Modo de transferência de calor interno, da superfície exterior do material para a frente de evaporação através da camada seca, ou muitas vezes conhecido como o modo "condução".
- (3). Transferência de massa interna de vapor de água desde a frente de evaporação até a superfície exterior, ou

muitas vezes conhecido como o modo "difusão".

(4). Transferência externa de massa de vapor, desde a superfície até o ar quente (também "sumidor" de umidade).

É óbvio, do que foi mencionado acima, que, à medida em que a espessura da camada seca cresce durante o processo de secagem, as etapas (2) e (3), limitadoras da taxa, assumem uma importância crescente, conhecida como o "problema do isolamento". Portanto, o aquecimento convencional é usualmente muito lento se a energia tiver que penetrar a profundidades consideráveis para cumprir seu objetivo. Se a temperatura for aumentada para acelerar o processo, o exterior do produto ficará excessivamente seco ou super-cozido. A qualidade do alimento ficará comprometida. Esta é a principal razão da utilização precária de energia entre todas as operações existentes de processamento dos alimentos.

Do que foi acima exposto, é evidente que o aquecimento por microondas pode oferecer o melhor resultado quanto à solucionar o problema encontrado no aquecimento convencional. Com base nesta premissa é que o trabalho de desenvolvimento em aquecimento por microondas tem avançado.

Contudo, não se pode estacionar aqui. O fato é que, embora o aquecimento por microondas tivesse removido as etapas (1) e (2), limitadoras da taxa de secagem, a etapa de transferência de massa "difusão" permanece. Como o processo por microondas pode ser tratado como aquecimento volumétrico, a pressão interna irá crescer se o vapor não puder ser removido tão rapidamente quanto ele é formado.

Isto ilustra uma outra característica do aquecimento por

microondas, segundo a qual não há limitação natural de temperatura e/ou pressão quando a energia é capturada dentro do produto. Este problema imprevisto causa muitas vezes um super-aquecimento e, conseqüentemente, a qualidade do produto sofre. Por outro lado, como no caso da secagem de massas alimentícias, pode-se tirar vantagem deste fenômeno exclusivo através da remoção da umidade sobre a superfície com o auxílio de ar quente. Na realidade, esta é a base do conceito de aquecimento assistido por microondas. Com o fluxo constante de umidade através da superfície do material que está sendo seco, o gradiente de temperatura entre o ar quente e a superfície pode ser grandemente reduzido e, como conseqüência, o problema da super-secagem ou da tensão térmica é também reduzido.

Após a discussão preliminar em torno de alguns problemas clássicos de secagem que a energia das microondas pode ajudar a resolver, é possível examinar agora como esta forma de energia pode ser usada vantajosamente nos sistemas de aquecimento. Algumas das vantagens potenciais do aquecimento por microondas são as seguintes :

(1). Penetração da Energia

Assim como foi ilustrado no exemplo da Figura 8, a energia das microondas pode penetrar a maioria dos materiais não-metálicos em uma extensão apreciável. Isto implica que, em um sistema de aquecimento por microondas, o calor é gerado tanto internamente, como bem próximo à superfície do material que está sendo tratado. Outros métodos aplicam calor somente superficialmente. A temperatura máxima deve ser limitada, caso seja desejado evitar a ocorrência de

queima, e o tempo de processamento é controlado pela condutividade térmica. A energia das microondas é capaz de superar essas limitações de tempo e temperatura. Esta propriedade é usada com vantagem na maioria dos sistemas de aquecimento por microondas. Se as dimensões do produto são maiores do que a profundidade de penetração, então certamente o aquecimento do centro vai depender da condutividade térmica do material.

(2). Absorção Seletiva da Energia

Alguns materiais dissipam bem ou absorvem prontamente a energia das microondas, enquanto outros tendem a não absorvê-la. Esta propriedade é também utilizada com vantagem em muitos sistemas. Na secagem de papel por microondas, por exemplo, a água tende a absorver rapidamente a energia das microondas, o contrário se passando com os constituintes menos absorventes do papel. Isto possibilita que o produto úmido, com níveis desiguais dos teores iniciais de umidade do papel, possa ser seco uniformemente. A mesma vantagem é alcançada na secagem de muitas camadas absorventes de microondas, quando aplicadas sobre materiais básicos de dissipação energética relativamente pequena. Tal propriedade é com freqüência referida como de "nivelamento da umidade".

(3). Controle Instantâneo

A maioria dos sistemas de aquecimento convencionais, tal como um forno de ar quente, requerem um tempo considerável para processarem uma mudança na temperatura do forno. Em contra-partida, os níveis de potência das microondas podem ser ajustados eletronicamente em uma fração de segundo, se

desejado, uma característica que torna o equipamento de microondas facilmente adaptável aos sistemas automatizados.

(4). Dimensões Reduzidas da Câmara de Aquecimento

Os sistemas de aquecimento por microondas geralmente necessitam menos espaço útil de piso do que os sistemas convencionais, para uma capacidade produtiva equivalente. Assim como foi explicado no item (1) acima, não se fica, em muitos casos, limitado a constantes de tempo térmicas, e desta forma, mais potência pode ser transferida ao produto em um período de tempo mais curto, significando um comprimento reduzido da câmara de aquecimento para uma dada capacidade de produção. Em contraste, os secadores convencionais a ar quente devem, muitas vezes, ser de comprimentos consideráveis, em razão de poder atingir níveis aceitáveis de eficiência. Este não é o caso para a maioria dos sistemas de aquecimento por microondas.

(5). Alta Eficiência

Nos tempos atuais, a desnecessária exaustão das fontes energéticas é uma preocupação de muita gente. Portanto, as possibilidades dos sistemas de microondas de alta eficiência são atrativas. Hoje em dia, sistemas de microondas que convertem potência de corrente alternada de 60 Hz em calor, sobre o material tratado, com eficiências superiores a 50 %, não são incomuns. Sistemas de alta potência, que geralmente contêm válvulas geradoras de microondas mais eficientes, são de eficiência consideravelmente mais elevada.

(6). Limpeza do Processamento por Microondas

A energia é transferida de uma maneira limpa. Ou seja, o processamento por microondas, que é uma operação inerentemente seca e isenta de fumos, é essencialmente limpa do ponto de vista ambiental, especialmente quando comparada a processos que requerem veículos adicionais para as transferências de calor.

(7). Outras Vantagens

Algumas, entre outras bem estabelecidas vantagens da energia das microondas (ou alta frequência) sobre as técnicas convencionais que estão bem documentadas (Perkin, 1979), podem ser enumeradas, em um caráter mais específico :

- (a). Eficiência maior dentro do período de taxa descendente da secagem - o que pode reduzir os custos operacionais.
- (b). Expansão ("puffing") do material por pressão interna, p.ex., em sonhos ("donuts"), no tabaco, etc.
- (c). Gradiente de temperatura desnecessário para efetivar o transporte da energia das microondas.
- (d). A transferência de calor é independente do fluxo de ar e a transferência de massa também independe, de forma crescente, do fluxo de ar, à medida que a temperatura dos sólidos aumenta, de modo que velocidades do fluxo de ar elevadas não são necessárias, o que pode resultar em economia de energia na potência do ventilador.
- (e). A super-secagem é evitada.

- (f). Substituição de uma matéria prima cara por outra mais barata, como na assadura de pão, reduzindo assim os custos das matérias primas.
- (g). Custos de limpeza e manutenção relativamente baixos.
- (h). Ausência de efeitos térmicos residuais no ambiente uma vez desligada a energia das microondas.
- (i). As anteriores devem ser acrescidas as importantes vantagens dos processamentos à vácuo ou pressão.

Quanto às desvantagens do aquecimento por microondas, pode-se comentar que a natureza da energia das microondas tende a tornar também certas aplicações muito difíceis ou impraticáveis. Mencione-se, por exemplo, a situação, já comentada no item 2.4.A, da "avalanche térmica", provocada por um fenômeno de variação da característica dielétrica de dissipação ($\tan \delta$) do material em função da variação da temperatura. A absorção seletiva também pode apresentar desvantagens, além das vantagens, como é o caso das operações de "têmpera" de produtos congelados, através da qual algum eventual material descongelado possui um valor de $\tan \delta$ muito mais elevado do que o do gelo. Outro exemplo pode ser citado no que tange ao aquecimento por microondas de objetos metálicos ou de finas coberturas aplicadas sobre os mesmos, que se revela muito difícil, senão impossível, devido à reflexão quase que total da energia das microondas a partir dos metais. Outras substâncias, tais como o poliestireno e o teflon, transmitem, mas absorvem pouca energia das microondas e são pois difíceis de se aquecer. O fator que com frequência torna o aquecimento por microondas não-atrativo é o econômico, o que visto no item seguinte.

2.9. Características Econômicas do Aquecimento por Microondas

Um exemplo extremo, porém bastante interessante, de economia comparativa do aquecimento por microondas, é dado a seguir (Freedman, 1972) : Uma simples caldeira de aquecimento a gás, de capacidade de 160.000 BTU/h (47kW), evapora 50 kg de água por hora e pode ser comprada e instalada por menos de US\$500,00. Ela consome menos do que US\$0,25 de combustível por hora, com expectativa de operação efetiva por 20 anos. Um sistema a microondas, de desempenho equivalente, deve entregar 50 kW de potência de microondas para a água (retirando 100 kW da rede), e deve custar pelo menos US\$50.000,00, tendo um custo operacional da ordem de US\$5,00 por hora (incluindo alocação dos custos de reposição da válvula). Isto simplesmente demonstra que as "caldeiras de vapor a microondas" não tem probabilidade de se constituírem em um item de importância e que uma estimativa econômica corriqueira é uma primeira consideração.

O processamento de produtos de borracha, seja para descongelamento ou vulcanização, a "têmpera" da carne congelada, a secagem de massas alimentícias, o cozimento de "bacon" e outros são técnicas de aplicação de microondas já bem estabelecidas (Metaxas, 1981). Cada uma oferece alguma vantagem exclusiva sobre a técnica convencional equivalente e por isso têm encontrado seu lugar reservado dentro de seus diversificados ambientes industriais. O equipamento de alta frequência, no entanto, é intensivo em capital e o aspecto econômico de uma determinada aplicação deve ser cuidadosamente examinado antes que qualquer equipamento seja instalado na indústria. Antes de introduzir um sistema a

microondas como parte da instalação de um processo completo, é necessário conduzir-se uma exaustiva análise econômica (Jolly, 1972, 1976). Uma análise econômica comparativa simplificada de dois sistemas de secagem, um convencional a ar quente e outro combinado a ar quente/microondas, sob dois pontos de vista normalmente considerados em uma primeira instância - o da economia energética e o da capacidade aumentada, é apresentado na obra de Metaxas (1988) como exemplo ilustrativo, embora o próprio autor ressalve que os cálculos devam somente ser considerados como orientativos em busca de uma justificativa para a compra de uma instalação de alta frequência.

Outros fatores devem igualmente ser ponderados, além de uma comparação econômica mais explícita. Se os custos operacionais de um equipamento convencional são menores do que os de um equipamento a microondas para conduzir a mesma etapa de um processo, devem existir características exclusivas do produto tratado por microondas, tais como vida de prateleira ou sabor melhorados, para compensar o custo adicional. Por exemplo, o pão processado por microondas pode ser considerado como viável economicamente em virtude de permitir o uso de uma matéria prima mais barata e a economia agregada justificar o investimento em capital de um equipamento de microondas (Chamberlain, 1975).

Outra consideração de importância ao ser tomada uma decisão se refere ao espaço disponível que existe em uma fábrica para a nova instalação. O equipamento convencional tende a ser maior e mais pesado do que o equipamento a microondas e há circunstâncias em que parte da fábrica tem que ser ampliada ou as fundações existentes reforçadas para

acomodar o equipamento convencional. Se o espaço já disponível pode acomodar um sistema a microondas mais leve e compacto, isto pode representar um importante argumento financeiro no sentido de qual dos dois sistemas comprar.

Muitas vezes o equipamento de aquecimento convencional possui eficiência global particularmente baixa, devido a fatores tais como uma taxa decrescente de secagem ou a necessidade de manter a temperatura durante as interrupções da produção por causa de um procedimento de aquecimento inicial difícil ou demorado. Resposta lenta aos ajustes também resulta em ineficiência, assim como acontece com a operação em capacidades substancialmente diferentes daquela de projeto. Em tais casos, a resposta rápida, as características de aquecimento volumétrico e o rápido aquecimento inicial do equipamento a microondas vai com certeza proporcionar uma significativa economia de custos.

Não existe um código estabelecido de práticas quanto a quando usar a energia de alta frequência. Seguindo as linhas mestras até aqui delineadas, cada aplicação deve ser considerada por seus próprios méritos e, mais do que isto, deve ser examinada de dentro do seu próprio ambiente e das restrições da fábrica, disponibilidade de combustível, ponto de vista gerencial e de mão-de-obra e outros fatores similares que caracterizam a essência e a individualidade de cada companhia (Metaxas, 1988).

Para que um sistema de aquecimento por microondas possa ser comprovado como economicamente interessante, os custos de capital e operacional do sistema devem ser confrontados com vantagens tais como melhoria da qualidade do produto, aumento da capacidade produtiva, etc. Como tais fatores são

específicos de cada aplicação, pouco poderá ser dito em geral acerca dos ganhos econômicos, porém alguns custos aproximados dos sistemas a microondas poderão ser derivados facilmente. Os custos a seguir sugeridos devem ser considerados apenas como estimativas grosseiras.

Os principais componentes de um sistema de aquecimento por microondas são a válvula de microondas, a fonte de potência e o aplicador. Desde que os custos devidos a estes componentes dependem de quanta potência de microondas se necessita, o primeiro passo é estimar o montante da potência requerida. Para isto, a seguinte informação é necessária :

a.-Vazão mássica (M) em kg/s de alimentação

b.-Calor específico (c_p) do produto em J/kg.K. Para a maioria dos materiais o c_p situa-se entre 0,8 e 4,2

c.-Variação da temperatura (ΔT) requerida no processo, K

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

$$P = M \times c_p \times \Delta T \times 10^{-3}$$

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 :

$$P' = \text{Qtd. de líquido kg/s} \times \text{C. lat. do líquido J/kg} \times 10^{-3}$$

Cálculada a potência necessária com as fórmulas acima, 10 a 20 % deste valor deve ser acrescido por conta das perdas de potência no guia de onda, nas paredes do

aplicador, etc. Se for usada uma quantia apreciável de ar quente coadjuvante no aplicador, o requisito de potência de microondas pode ser reduzido significativamente.

De posse desta estimativa de potência, deve-se então determinar qual tamanho de válvula (ou válvulas) de microondas seria adequado. Tanto em 915 quanto em 2450 MHz, vários tamanhos de válvulas comerciais estão disponíveis, de 0,3 a 75 kW. Com o objetivo de calcular a potência de entrada necessária em 60 Hz, pode-se assumir uma eficiência de conversão entre 50 e 60 %, adotando-se o maior valor para as válvulas de maior potência. Tipicamente, 10 % da potência de entrada em 60 Hz é perdida na fonte de alimentação e 40 % é dissipada como perdas de calor na válvula de microondas.

Os custos de capital podem ser divididos entre a fonte de potência, a válvula, o aplicador e o sistema. Para os dois primeiros o custo do investimento soma aproximadamente US\$1.000,00 por quilowatt de potência de microonda (VanKoughnett, 1972). Estão excluídos : a) sistemas de potência de 1 kW e menores, tais como aqueles usados nos fornos domésticos de microondas; b) módulos de 1 kW, para uso em sistemas com múltiplas fontes de potência alimentando um aplicador, que poderão custar tão somente US\$350,00. Fontes de potência de microondas sofisticadas, com instrumentação e controle mais elaborados, custam tipicamente US\$1.500,00 por quilowatt. Os custos do aplicador, juntamente com os do sistema, são bastante dependentes dos requerimentos específicos de uma aplicação e tanto podem situar-se num patamar de US\$2.000,00 a US\$3.000,00 por quilowatt, para sistemas de 1 a 5 kW, quanto reduzir-se a US\$1.000,00 ou menos por quilowatt, para

sistemas de potências mais elevadas.

Dois dos principais componentes do custo operacional são o custo da energia elétrica e o custo de reposição da válvula de microondas. O consumo de potência em 60 Hz é grosso modo o dobro da potência de saída de microonda. Com base em um custo da energia elétrica de US\$0,05 por kWh, este componente do custo operacional é de US\$0,10 por kWh de energia de microonda. As válvulas magnetron de microondas possuem uma vida útil típica de 2.000 a 3000 horas, embora normalmente elas possam durar até o dobro deste tempo. Seu custo é de aproximadamente US\$150,00 por kW de potência de saída. Portanto, o custo de reposição fica em torno de US\$0,05 por kW de energia de microonda. Por outro lado, um sistema de 30 kW, 2450 MHz, que emprega uma válvula klystron com expectativa de vida útil acima de 6.000 horas, custando cerca de US\$10.000,00, fica também com um custo de reposição ao redor de US\$0,05 por kWh.

Se comparados com os custos de geração da energia de aquecimento convencional, os custos de aquecimento por microondas são elevados. Fica, portanto, evidente que o lugar para o aquecimento por microondas no processamento industrial corresponde ao daquelas áreas nas quais as vantagens assinaladas previamente possam ser plenamente alcançadas.

2.10. Dispositivos de Regulamentação da Segurança das Instalações

A razão pela qual têm sido impostos limites para as emissões de microondas relaciona-se com os possíveis efeitos prejudiciais decorrentes de uma excessiva exposição à

energia das microondas de parte do pessoal que trabalha ao redor de tais equipamentos. Se a energia das microondas pode aquecer os alimentos e outros materiais biológicos, ela pode aquecer igualmente o ser humano. Esta é, com certeza, a base dos usos terapêuticos da energia das microondas no tratamento de uma variedade de doenças. Na verdade, muitas pesquisas têm sido conduzidas em anos recentes que demonstram que o aquecimento controlado com a energia das microondas a 2450 MHz pode, em conjunto com o tratamento quimioterápico, reduzir ou mesmo interromper certos desenvolvimentos cancerosos.

Até o presente não tem havido casos confirmados de pessoas afetadas pela emissão de energia de fornos de microondas, ao contrário, estes fornos têm mantido um invejável "record" de segurança. Os relatórios da literatura médica têm documentado que as condições para ocorrerem efeitos prejudiciais mais do que excedem os níveis de energia das microondas com chance de serem encontrados. Para submeter-se às condições de exposição perigosa uma pessoa teria que fazer um esforço especial com este objetivo.

Pesquisas em laboratório têm demonstrado que as microondas podem provocar a formação de cataratas nos olhos de animais. Foi o que aconteceu com uma cobaia exposta a um nível de exposição de 80 mW/cm^2 por uma hora, repetido diariamente por 10 dias consecutivos, com seus olhos posicionados a 5 cm da fonte de microondas; ao nível de 40 mW/cm^2 , com tratamentos de uma hora diário por 15 dias consecutivos, não houve desenvolvimento de qualquer catarata (Carpenter e Van Ummersen, 1968). Ficou demonstrado que era necessário uma elevação de temperatura de 10 a 14°C na

matéria vítrea do olho para o desenvolvimento da catarata (Williams *et al.*, 1956).

Pessoas que trabalham ao redor de equipamentos de microondas não estariam sujeitas a tais condições anormais de exposição às emissões. No entanto, se alguém fosse exposto a este nível de energia das microondas, a sensação de calor resultante seria uma advertência suficiente para afastá-lo do local. A semelhança com outras formas de energia radiante, o nível diminui inversamente com o quadrado da distância da fonte.

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 mW/cm^2 para exposição do corpo inteiro. Este número foi baseado em que uma exposição a 100 mW/cm^2 causaria uma ligeira febre e que um décimo deste nível representaria um fator de segurança significativo. Este valor é ainda aceito pelo exército americano como padrão para o pessoal que trabalha nas vizinhanças dos equipamentos de radar. O mesmo valor tem sido adotado desde então pelo American National Standards Institute (norma ANSI C95.1), que estabelece que a exposição de corpo inteiro de 10 mW/cm^2 é segura por um período de tempo ilimitado, sob condições ambientais normais. A título de comparação, a carga de calor sobre o corpo humano durante um banho de sol é várias vezes maior, situando-se em algo entre 60 e 100 mW/cm^2 .

Como uma indicação do sucesso que os fabricantes tem tido no projeto dos fornos de microondas para atender o padrão estabelecido, foi confirmado pelo "Bureau of Radiological Health" americano, em pesquisa de campo, que as

porcentagens de vazamento menores que $0,1 \text{ mW/cm}^2$ aumentaram de cerca de 30 % em 1972 para cerca de 60 % em 1977. É razoável assumir que tem-se conseguido melhorar esta marca desde aquele tempo.

A lei americana sobre o padrão de controle da 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 a um máximo de $1,0 \text{ mW/cm}^2$ na fábrica e daí em diante ao máximo de $5,0 \text{ mW/cm}^2$, com a medição executada à distância de 5 cm da superfície do forno. O padrão também inclui a provisão de interchaveamento de segurança e a prevenção da inserção de um ou mais objetos que poderiam causar maiores vazamentos de microondas. Entretanto, esta mesma lei não estabeleceu padrões para os sistemas de processamento industrial. Elder *et al.* (1973) discutiram este assunto minuciosamente, extendendo-se sobre a filosofia de se estabelecerem padrões e destacando a diferença da aplicação dos mesmos aos equipamentos usados pela população em geral, que exercem pouco ou nenhum controle sobre o seu uso, e aos equipamentos industriais, aonde pouca gente está geralmente envolvida na operação destes equipamentos e aonde pode haver bom controle sobre a sua utilização. Uma questão deve ser levantada : "É necessário um padrão para proteger a saúde e a segurança do público?" Até aqui a resposta parece ser não. Elder *et al.* também salientaram que existem poucos sistemas industriais em operação, naquele tempo (1973) situando-se em torno de 300 instalações. Os resultados de um levantamento, acerca dos equipamentos de processamento industrial com níveis de potência entre 2,5 e 120 kW, foram

apresentados. Na base deste estudo até certo ponto limitado, que mostrou que 3 entre 11 atingiram o padrão de desempenho estabelecido para os fornos de microondas, enquanto que os demais apresentaram vazamentos de 20 a 190 mW/cm^2 , algumas recomendações foram feitas, as quais são transcritas em seguida :

- 1.0 vazamento de radiação das portas de entrada e saída de unidades dotadas de sistema de transporte não deve exceder os níveis de intensidade de vazamento de microondas para os quais o equipamento foi desenhado.
- 2.0 vazamento de radiação através de portas com dobradiças ou de correr não deve exceder uma intensidade de 5 mW/cm^2 a 5 cm durante a operação.
3. Todos os inter-travamentos e monitores de segurança devem funcionar corretamente. No caso de unidades completamente equipadas com sistema de transporte, estariam incluídos todos os inter-travamentos das portas e fonte de potência ou monitores de circulação e detectores de arco.
4. A tubulação utilizada para as cargas de água devem estar livres de rachaduras e defeitos de envelhecimento que poderiam causar uma falha repentina e excessivo vazamento.
5. Etiquetas de advertência devem ser colocadas em todas as portas de entrada e saída das unidades dotadas de sistemas de transporte, a fim de alertar o pessoal a não introduzir os dedos ou outros objetos estranhos através das aberturas,

enquanto o sistema está em operação.

6. Etiquetas de advertência devem ser afixadas alertando o pessoal para cuidar de não abrir as portas de acesso enquanto o equipamento está em operação para evitar exposição excessiva na eventualidade de falhar o sistema de inter-travamento.

Estas recomendações são válidas hoje tanto quanto elas eram na época em que foram primeiramente apresentadas, no ano de 1973.

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através do COBEI - Comitê Brasileiro de Eletricidade, vem cuidando desde o final de 1983, em reuniões da Comissão Técnica CT-27-A, da elaboração de normas no campo do aquecimento industrial por microondas.

3.0 SECADOR ROTATIVO CONTINUO CONVENCIONAL A AR QUENTE DIRETO

Um secador rotativo consiste de um cilindro, que gira sobre mancais adequados e, via de regra, apresenta-se ligeiramente inclinado em relação à horizontal (Perry, 1984). O comprimento do cilindro pode variar de 4 a mais de 10 vezes o seu diâmetro, o qual pode variar de menos de 0,3 a mais de 3 m. A alimentação de sólidos é feita por uma extremidade do cilindro e progride através dele em virtude da rotação, da diferença de nível, e inclinação do cilindro, descarregando como produto acabado pela outra extremidade. Gases que atravessam o cilindro podem acelerar ou retardar a vazão mássica de sólidos, dependendo de o sentido do fluxo de gás ser a favor ou em contra-corrente com o percurso dos sólidos, respectivamente.

Os secadores rotativos têm sido classificados como *direto, indireto-direto, indireto, e tipos especiais*. Os termos se referem aos métodos de transferência de calor, sendo "direto" quando o calor é adicionado aos sólidos ou deles removido por intercâmbio direto entre o gás circulante e os sólidos e sendo "indireto" quando o meio de aquecimento é separado de um contacto físico com os sólidos por uma parede metálica ou tubo.

O tipo de secador que interessa ser aqui referido é o rotativo direto. Suas características operacionais, quando executando processos de transferência de massa e calor, tornam-no adequado para a realização de secagem, reações químicas, recuperação de solvente, decomposições térmicas, misturas, etc. O tipo específico selecionado de secador (ou resfriador) rotativo direto é usualmente um cilindro

metálico liso, com ou sem chicanas (taliscas) interiores. Ele é adequado para operações a baixa e média temperaturas, sendo esta limitada primariamente pelas características de resistência do metal empregado na sua fabricação.

3.1. Campos de Aplicação e Critérios Gerais de Projeto

O equipamento rotativo é aplicável ao processamento contínuo ou intermitente de sólidos que são de escoamento relativamente livre e granulares quando descarregados como produto. Os materiais que não são inteiramente de fluxo livre sob as condições de sua alimentação, são manipulados de uma forma especial, ou pela reciclagem de uma parte do produto final, que é pré-misturado com o material a alimentar em um misturador externo, para formar um produto granulado para alimentar o processo, ou pela manutenção de uma camada de produto de livre fluxo no cilindro, na extremidade de alimentação e, em essência, realizando uma operação de pré-mistura no próprio cilindro. Um processo de reciclagem adequadamente desenhado vai permitir o processamento de muitas formas de suspensões e soluções alimentadas nos recipientes rotativos.

Como uma regra geral, as unidades de calor direto são as mais simples e de construção mais econômica, e são empregadas quando o contacto direto entre os sólidos e o ar, ou às vezes com os gases de combustão, pode ser tolerado. Devido a que a carga de calor total deve ser introduzida pelo ou removida do fluxo de gás, grandes volumes e altas velocidades de gases são normalmente requeridas. Estas últimas raramente serão menores do que 0,5 m/s em um desenho econômico. Daí decorre que o uso de equipamento rotativo

direto com sólidos que contêm partículas extremamente finas é provável que ocasione perdas por arraste excessivas no fluxo do gás de saída.

Entre os equipamentos auxiliares dos tipos rotativos de calor direto, uma câmara de combustão é necessária para atender às temperaturas elevadas, enquanto que serpentinas a vapor aletadas são usadas para as temperaturas mais baixas. Caso seja exigido que se previna a contaminação do produto com os gases da combustão nas unidades de calor direto, podem ser empregados aquecedores de ar de queima indireta de gás ou óleo para se alcançar temperaturas superiores às do vapor disponível.

O método de alimentar o equipamento rotativo vai depender das características do material e da localização e tipo dos equipamentos de processamento à montante da unidade rotativa. Quando a alimentação vem de cima, uma calha descarregadora que se estende até o interior do cilindro pode ser usada. Para efeito de selagem ou quando a alimentação gravitacional não for conveniente, um alimentador de rosca é normalmente empregado. Em unidades de calor direto em corrente favorável, pode ser desejável o encamisamento da calha de descarga ou do alimentador com circulação de água fria, se houver contacto com o fluxo de gás quente na entrada. Isto deve prevenir o superaquecimento da parede de metal, que resulta no superaquecimento e/ou na incrustação dos materiais alimentados sensíveis ao calor.

Transportadores pneumáticos são freqüentemente empregados tanto como transportadores do produto seco quanto como resfriadores do mesmo. Outro tipos de resfriadores muitas vezes utilizados são as roscas transportadoras, os

transportadores vibratórios, e os resfriadores rotativos diretos e indiretos.

A poeira arrastada no fluxo do gás de saída é comumente removida em coletores ciclônicos. Esta poeira pode ser realimentada no processo ou coletada separadamente. Para materiais valiosos ou partículas extremamente finas, coletores tipo saco podem seguir um coletor ciclônico, desde que a estabilidade à temperatura do tecido do saco não seja um fator limitante. Quando estão presentes gases tóxicos ou sólidos, o gás de saída se encontra a uma temperatura elevada, ou a recirculação do gás em um sistema selado é necessária, precipitadores úmidos podem ser usados em seguida ao ciclone ou de forma independente. O ventilador de exaustão deve ser colocado à jusante do sistema coletor.

Para uma melhor operação, a taxa de alimentação ao equipamento rotativo deve ser estreitamente controlada e uniforme em quantidade e qualidade. Devido a que as temperaturas dos sólidos são difíceis de medir e as mudanças são detectadas de forma muito lenta, a maioria das operações dos equipamentos rotativos são controladas por meios indiretos, sendo quase sempre a temperatura do produto tomada apenas para fins de controle secundário. As temperaturas do gás de entrada e de saída são medidas e controladas em unidades tais como os secadores diretos. Os secadores rotativos de calor direto são usualmente equipados com chicanas ou taliscas em seu interior, para elevação e derramamento dos sólidos através do fluxo de gás durante a passagem pelo cilindro. Estas chicanas estão normalmente deslocadas a cada 0,6 a 2 m, a fim de assegurar uma melhor continuidade e uniformidade das cortinas de sólidos no gás.

O formato das chicanas depende das características de manuseio dos sólidos. Para materiais de livre fluxo, é empregada uma chicana radial com uma dobra de 90° . Para materiais pegajosos é utilizada uma chicana radial plana sem dobra. Quando os materiais mudam de característica durante a secagem, o desenho da chicana também muda ao longo do comprimento do secador. Muitos desenhos padronizados de secadores adotam chicanas planas sem dobras na primeira terça-parte inicial do secador, medida a partir da extremidade de alimentação, chicanas com dobras de 45° na terça-parte central, e chicanas com dobras de 90° na terça-parte final do cilindro. Chicanas espiraladas são às vezes previstas no início do percurso do material para acelerar o avanço do fluxo a partir da calha de descarga ou transportador e impedir qualquer retrocesso, na extremidade de alimentação, em direção ao selo de vedação do gás.

Quando é utilizada corrente a favor gás-sólido, as chicanas podem ser dispensadas no trajeto final do interior do cilindro, na extremidade de saída do produto, a fim de reduzir o arraste de sólidos pelo gás de saída. O derramamento de produto úmido na extremidade de alimentação de um secador contra-corrente, por outro lado, serve, freqüentemente, como um meio efetivo de precipitação dos sólidos secos arrastados pelo fluxo de gás antes que este atravesse o cilindro. Em secadores de grande seção transversal, elementos internos ou partições são às vezes utilizados com a finalidade de ser obtida uma melhor distribuição do material e uma redução na produção de poeira e de moagem por impacto. O uso de componentes interiores aumenta a dificuldade de limpeza e manutenção, a menos que

seja deixado espaço suficiente entre as partições para o fácil acesso de uma pessoa. Alguns exemplos de arranjos de chicanas mais comuns são mostrados na Figura 14.

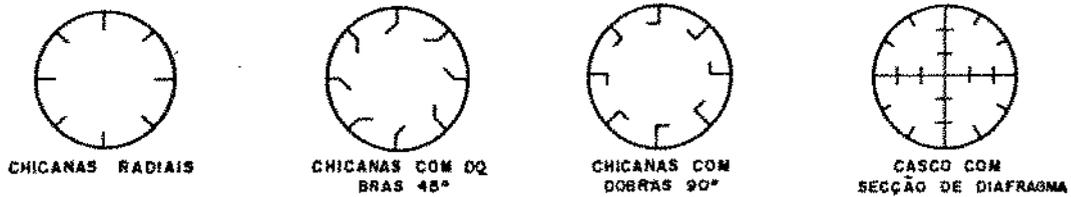


Figura 14 Arranjos alternativos de chicanas de secadores rotativos de calor direto.

O fluxo em contra-corrente gás-sólidos proporciona uma eficiência de transferência de calor maior para uma dada temperatura do gás de entrada, porém a corrente a favor pode ser usada mais freqüentemente na secagem de produtos sensíveis ao calor a mais altas temperaturas do gás de entrada, por causa do rápido resfriamento do gás durante a evaporação inicial da umidade superficial.

Métodos diferentes são empregados para a vedação do cilindro rotativo a fim de evitar que haja vazamento de gás através da abertura anular entre o cilindro móvel e as partes estacionárias das câmaras das extremidades. Nenhum deles pode ser considerado um selo eficiente de sólidos, nem tão pouco algum deve funcionar satisfatoriamente como um selo de gás se for permitido o vazamento de sólidos através do elemento retentor sobre o cilindro. Três exemplos comuns de selos de gás são mostrados na Figura 15 (Perry, 1984) :

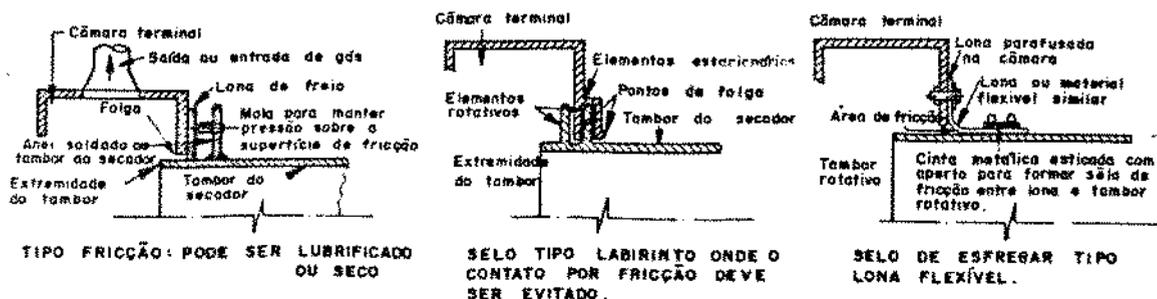


Figura 15 Alternativas de selos de gás rotativos

Em secadores rotativos diretos, poucas vezes se necessita de selos de gás completamente estanques, porém, através de um controle cuidadoso da pressão interna, geralmente mantida entre $2,45 \times 10^{-3}$ e $24,5 \times 10^{-3}$ kPa abaixo da pressão atmosférica, consegue-se evitar o escape de poeira para o exterior e o vazamento de ar de fora para o interior é minimizado.

Os gases são forçados através do cilindro por um exaustor ou pela combinação de exaustor-ventilador. Por este último arranjo é possível manter um controle muito preciso da pressão interna, mesmo quando a perda de pressão total do sistema é elevada. No entanto, quando um aquecedor de ar de baixa perda de pressão é utilizado, somente o exaustor é, em geral, suficiente, já que as maiores perdas de pressão se localizam nos dutos de saída do ar e nos coletores de pó. O uso de um ventilador por si mesmo, para forçar o gás através do cilindro, não é normalmente posto em prática, porque a pressão interior é maior do que a atmosférica e o ar quente e a poeira poderão ser insuflados através dos selos de gás

ou sair para as áreas de trabalho exteriores.

Quando se tenta estabelecer *critérios gerais de projeto e dimensionamento* para os secadores rotativos contínuos a ar quente diretos, deve-se levar em conta que o processo de secagem, à semelhança de muitas outras operações unitárias da engenharia dos processamentos, é uma mistura de "arte" baseada na experiência e "ciência", com base nas aproximações analíticas (Kelly, 1987). As técnicas de desenho e operação no mundo industrial dependem muito da componente artística; a abordagem científica é para ser encontrada nos estudos e publicações daqueles cientistas dos laboratórios universitários e das instituições de pesquisa. Idealmente, deveria haver uma difusão gradual de conhecimentos dos laboratórios para o mundo industrial, através do que uma compreensão maior do processo é adquirida, que conduz ao melhoramento ou inovação no desenho industrial e na operação da instalação.

Não é possível hoje em dia reunir em um só trabalho todo um conjunto de conhecimentos que possa ser identificado como a prática industrial corrente dos secadores rotativos. Os fabricantes não liberam informações de projeto, e cada fabricante dispõe de suas próprias peculiaridades e requisitos de desempenho. Um recurso do qual se pode lançar mão e que deve ser de interesse imediato para os projetistas industriais e operadores dos equipamentos rotativos de secagem é buscar, entre a massa de conhecimentos publicados sobre o assunto, os fundamentos da modelagem do processo de secagem, através da simulação da operação deste tipo de secador. Um estudo muito interessante, que enfoca este assunto, é aquele de avaliação crítica dos aspectos de

transferência de calor e massa e da modelagem de três tipos de secadores, entre eles um do tipo rotativo direto de corrente a favor (Bakker-Arkema,1986). Neste trabalho o autor destaca que, para a simulação deste secador, são necessárias cinco equações diferenciais para a modelagem das transferências de calor e umidade, às quais deve ser agregado um modelo para o transporte das partículas sólidas. Esta modelagem do secador foi desenvolvida e se revelou adequada para ser aplicada industrialmente. Um secador rotativo direto de corrente a favor, empregado na secagem de arroz parboilizado, foi o tipo industrial utilizado para a modelagem e está mostrado esquematicamente na Figura 16.

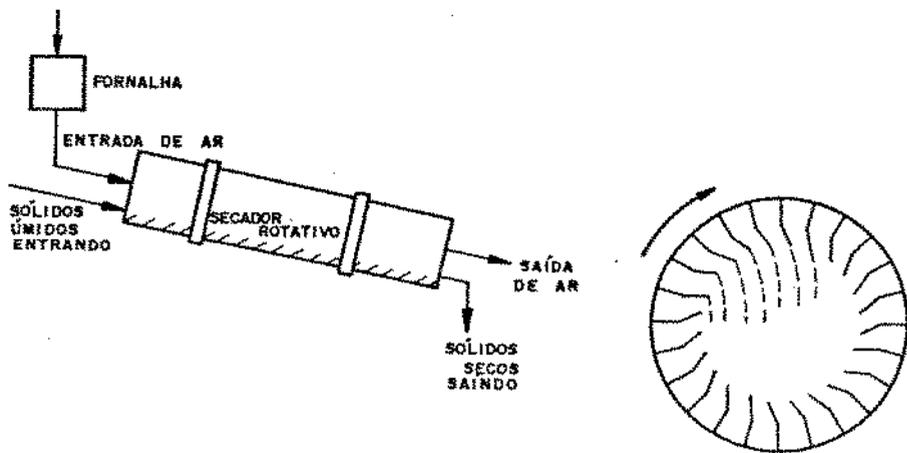


Figura 16 Secador rotativo direto de corrente a favor

A modelagem do secador rotativo de calor direto requer a solução simultânea de uma série de equações que expressam

(1) a transferência de calor e massa das partículas individuais, e (2) o movimento dessas partículas em seu percurso pelo secador rotativo.

Através dos balanços de calor e massa em uma seção transversal do secador rotativo de calor direto, resultam para o modelo aplicável a partículas individuais esféricas, as cinco seguintes equações diferenciais :

$$dT/dx = -h_a(T-\theta)/(G_a c_a + G_a c_v H) \quad (1)$$

$$d\theta/dx = \{h_a(T-\theta) - G_a c_a dH/dx [h_{fg} + c_v(T-\theta)]\}/(G_p c_p + G_p c_v M) \quad (2)$$

$$dH/dx = -G_p/G_a \times dM/dx \quad (3)$$

$$\partial M/\partial t = 1/r^2 \partial(Dr^2 \partial M/\partial r)/\partial r \quad (4)$$

$$M = 1/R \int_0^R M dr \quad (5)$$

onde: T temperatura do ar, °C
x coordenada axial, m
h_a coef. transf. calor convectivo, kJ/s m² °C
θ temperatura do produto, °C
G_a vazão mássica do ar, kg/s
c_a calor específico do ar, kJ/kg °C
c_v calor específico do vapor, kJ/kg °C
c_v calor específico da água, kJ/kg °C
H umidade absoluta do ar, kg/kg
h_{fg} calor de vaporização, kJ/kg
G_p vazão mássica do produto, kg/s
c_p calor específico do produto, kJ/kg °C

M	umidade local no grão, base seca (decimal)
M	conteúdo umid. médio, base seca (decimal)
t	tempo, s
r	coordenada radial do grão, m
D	coeficiente de difusão efetiva, m ² /s
R	raio equivalente do grão, m

As equações (4) e (5) referem-se às taxas de secagem da partícula singular para a distribuição do teor de umidade no interior das partículas e para o teor de umidade médio, respectivamente. O valor do coeficiente de difusão efetiva é considerado para os diferentes componentes do grão de arroz (casca, endosperma e envólucro deste), a cujos componentes correspondem raios equivalentes, definidos como a metade da média da espessura e da largura do grão. Bakker-Arkema *et al.* (1983) adotam, para o tamanho médio de grão de arroz de raio equivalente $R = 0,00156$ m, os seguintes valores para os coeficientes de difusão (Steffe *et al.*, 1980) :

$$\begin{aligned}
 \text{Endosperma} & \dots\dots D = 2,57 \times 10^{-9} \exp(-2,88 \times 10^3/\theta) \\
 \text{Envólucro} & \dots\dots D = 7,97 \times 10^{-9} \exp(-5,11 \times 10^3/\theta) \quad (6) \\
 \text{Casca} & \dots\dots D = 4,84 \times 10^{-9} \exp(-7,38 \times 10^3/\theta)
 \end{aligned}$$

Os raios equivalentes para os componentes do grão de arroz de tamanho médio são :

$$\begin{aligned}
 \text{Endosperma} & \dots\dots R = 0,00139 \text{ m} \\
 \text{Endosperma + Envólucro} & \dots\dots R = 0,00146 \text{ m} \\
 \text{Endosperma + Envólucro + Casca} & \dots\dots R = 0,00156 \text{ m}
 \end{aligned}$$

O termo G_p , representando a vazão mássica efetiva das partículas através da área da seção transversal do secador rotativo de calor direto de corrente a favor, é igual ao produto da densidade do material da partícula (ρ_p) e da velocidade efetiva (V_p) das partículas ao longo do eixo do secador. Por sua vez, V_p é a relação do comprimento do secador pelo tempo de residência médio da partícula (t) no interior do secador. Em uma revisão recente da literatura, Baker (1983) constatou que não havia concordância entre os pesquisadores nas melhores expressões disponíveis para o valor do tempo de residência t em secadores rotativos. Para um secador rotativo de calor direto de corrente a favor, Baker calculou um desvio padrão de 86 % entre os valores previstos dados por nove expressões bem conhecidas para o tempo de residência. Em geral as equações para o cálculo de t são da forma (Saeman e Mitchell, 1954), (Kelly, 1984) :

$$t = L / [C_1 d N (\tan \alpha + C_2 V_a)] \quad (7)$$

onde : L comprimento do secador, m
d diâmetro efetivo do interior do secador, m
N rotação do cilindro, s^{-1}
 α inclinação do cilindro, graus($^{\circ}$)
 V_a velocidade do ar, m/s
 C_1, C_2 constantes dependentes do desenho das chicanas e do tipo de material a secar :
 $2 < C_1 < \pi$ (2 para carga leve e π para carga pesada no cilindro)
 $0,00328 \text{ s/m} < C_2 < 0,02625 \text{ s/m}$

Bakker-Arkema *et al.*, (1974) sugerem que a resolução numérica do modelo de secador rotativo de calor direto de corrente a favor, expresso pelas equações (1) a (6), pode ser efetivada através da técnica de integração padronizada de Runge-Kutta, conjugada com a solução, pelo método aproximativo das diferenças finitas, da equação (McAdams, 1954) :

$$Nu = 0,33 (Re)^{0,6} \quad (8)$$

Um roteiro bastante prático para um cálculo preliminar das dimensões de um secador rotativo de calor direto de corrente a favor é oferecido no texto especializado de secagem de sólidos de Nonhebel e Moss (1971), através do qual o cilindro de secagem é dividido em três zonas básicas : a) de pré-aquecimento ; b) de taxa de secagem constante ; c) de taxa de secagem decrescente. Este procedimento, embora trabalhoso, foi preparado em uma forma adequada para o "cálculo de mesa" ou para a elaboração de um programa de computador. Além deste roteiro, estes autores também sugerem uma fórmula para estimar a potência necessária para a rotação do cilindro, bem como outra para uma avaliação preliminar do custo de grandes secadores rotativos fabricados em aço carbono. Como um secador rotativo de grande escala pode requerer cerca de 300 kW para o seu acionamento, é importante que se possa dispor de um método de estimativa da potência de precisão razoável. A fórmula, que na opinião destes autores tem produzido resultados satisfatórios, é a seguinte :

$$\text{Potência(kW)} = 4,5 \times 10^{-4} W_1 v_r + 1,2 \times 10^{-4} B D_o f_r N_r$$

onde :

W_r = peso total das partes rotativas do secador, kg

v_r = velocidade periférica dos rolos de suporte, m/s

B = massa retida no secador rotativo, kg

D_r = diametro do secador rotativo, m

f_r = número médio de chicanas por rotação do cilindro

N_r = velocidade de rotação do cilindro, min^{-1}

A potência necessária para o ventilador do secador é determinada principalmente como função da perda de pressão através do equipamento de limpeza do gás (Stairmand, 1964).

Vários outros estudos de modelagem do desempenho de secadores rotativos contínuos de calor direto podem ser encontrados na literatura, os quais operam em corrente a favor ou em contra-corrente, em uma ampla faixa de aplicações com os mais diversos tipos de materiais, tais como areia, alfafa, fertilizantes, cavacos de madeira, grãos de cereais, minerais concentrados, carvão, etc. : (Baker, 1983 ; Brasil e Seckler, 1988 ; Hirose *et al.*, 1988 ; Hirose e Shinohara, 1978 ; Kamke e Wilson, 1986 ; Langrish *et al.*, 1988 ; Richard *et al.*, 1988 ; Riquelme e Navarro, 1986 ; Saeman, 1962 ; Wood e Sokhansanj, 1990).

O assunto é também tratado em textos clássicos de secagem, como os de Dascalescu (1969), Keey (1972 e 1978), Krischer e Kröll (1959).

O "American Institute of Chemical Engineers" edita uma série de cadernos técnicos sobre os procedimentos de teste padronizados de muitos equipamentos de processos unitários, entre estes, o de número 6 se refere aos secadores do tipo rotativo contínuo de calor direto (A.I.Ch.E. Standard Testing

Procedure, 1960). O propósito primário deste procedimento é o de prover orientações padronizadas para a condução e a interpretação dos testes de desempenho sobre estes tipos de secadores. Os objetivos específicos destes testes são o de obter dados de plena escala para : a) determinar o desempenho do equipamento; b) verificar os dados de projeto; c) prever as taxas de secagem; 4) acumular dados úteis para a operação do equipamento, tais como : tempo de residência do material no secador, consumo de potência, um balanço de calor e massa sobre o sistema inteiro ou partes selecionadas, limites de controle de temperatura sobre o sistema para materiais sensíveis ao calor, etc.; 5) preparar instruções de operação para o equipamento. Um propósito secundário deste procedimento é o de fornecer as instruções padronizadas para a condução de testes sobre tais secadores para fins de comparação com o desempenho previsto pelo fabricante. Não é intenção dos procedimentos estabelecer limites para os desvios permissíveis entre o desempenho do teste e aquele previsto pelo fabricante, ou avaliar a qualidade da fabricação além daquela que resulta aparente através do próprio teste. Quaisquer de tais limites ou detalhes construtivos devem ser especificados por ocasião do contrato de aquisição do equipamento. É desejável a condução de testes de desempenho sobre todo o equipamento. Os testes devem ser exaustivos, ou o teste pode somente se referir a itens de desempenho previamente especificados. O grau de complexidade do teste deve ser determinado pelas despesas envolvidas, pelo valor dos possíveis resultados e pelo valor do equipamento. As seções deste caderno de procedimentos dizem respeito à sua abrangência, às definições e descrições

de termos, às condições e aos dados do teste, aos métodos de medida, aos procedimentos gerais e ao procedimento específico para testes de aceitação, ao cálculo e à interpretação dos resultados. Finalmente o caderno inclui uma bibliografia de dezenove referências, aonde podem ser encontradas recomendações para procedimentos de teste detalhados e interpretações de resultados, embora a totalidade dos trabalhos citados já tenham mais de 30 anos.

3.2. Vantagens e Limitações deste Tipo de Secador

Sloan *et al* (1967) relacionam as seguintes características favoráveis e desfavoráveis dos secadores rotativos de calor direto :

Vantagens : (1) A ampliação de escala ("scale-up") a partir dos dados de laboratório ou de fábrica é simples e a prova de erros; (2) A umidade retida (umidade ligada dentro de uma partícula) é prontamente removida, porque qualquer tempo de residência razoável pode ser alcançado; (3) o custo do capital é razoável; (4) controle de temperatura razoavelmente preciso é possível, embora a este respeito o secador a leito fluidizado seja superior; (5) secagem e calcinação podem ser conduzidas sobre a mesma unidade; (6) o secador pode ser operado seja em corrente a favor, ou em contra-corrente, dependendo de qual condição produza a mais alta eficiência.

Desvantagens : (1) os secadores são difíceis de vedar; (2) os requisitos de espaço de solo e de edificação são

bastante grandes; (3) os materiais muito finos e pulverulentos são soprados para fora do secador e requerem equipamentos dispendiosos para a sua recuperação; (4) a carga estrutural dinâmica é elevada ; se o secador for montado sobre estrutura de aço, esta deverá ser bem reforçada.

4. DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE UM SECADOR ROTATIVO COMBINADO A RQUENTE/MICROONDAS DE OPERAÇÃO CONTINUA

4.1. Introdução

A idéia de se trabalhar com aplicações industriais das microondas no Departamento de Engenharia de Alimentos da FEA teve origem em Abril de 1983, quando aqui esteve, para ministrar um curso de extensão em microondas aplicadas ao processamento de alimentos, o Dr. Gordon E. Timbers, do Engineering and Statistical Research Institute, do AGRICULTURE CANADA, de Ottawa. Até então somente haviam sido estudados, na Faculdade de Engenharia de Alimentos, alguns casos específicos de processamentos com aplicação de microondas, pelo uso de fornos do tipo doméstico, tendo surgido como resultado teses de mestrado e doutorado versando sobre o assunto (Palermo, 1982), (Chang, 1982) e (Diaz, 1982). Alguns outros estudos tiveram seqüência a partir dessa época e novas teses foram desenvolvidas sobre o tratamento de produtos específicos neste tipo de forno (Martinez, 1984), (Wang, 1986) e (Campos, 1986). Todos estes trabalhos tratavam de diversos tipos de processamento de alimentos, submetidos ao campo das microondas, e buscavam correlacionar os efeitos obtidos nas cavidades dos fornos com as características de qualidade dos produtos resultantes, com pouca ou nenhuma referência ao desempenho do equipamento de microonda propriamente dito.

Em termos de pesquisas brasileiras neste campo, destaque-se o pioneirismo da equipe de trabalho da Escola de Engenharia Mauá, responsável por uma série de publicações, principalmente no final da década de setenta, através das

quais os autores apresentavam as potencialidades do emprego de microondas nas operações de cozimento, extração de sucos, esterilização e desidratação, tendo em vista a experiência acumulada da E.E.M.: (Andrade *et al.*, 1974), (Leonhardt *et al.*, 1978), (Senise e Perin, 1978), (Leonhardt, 1980), (Leonhardt *et al.*, 1980), (Senise, 1980), (Concone *et al.*, 1981) e (Fregni e Leonhardt, 1982). No entanto, nenhuma destas operações chegou a ser estabelecida em escala industrial, pois é "preciso lembrar que a implantação da tecnologia de microondas na indústria, como a implantação de qualquer tecnologia nova, exige um estudo cuidadoso, com experimentação prévia em escala de laboratório e em escala piloto, sem o que pode-se correr o risco de, no așodamento de querer queimar etapas, obter, já em escala industrial, resultados negativos que podem levar a fracassos econômicos e a conclusões erradas sobre a validade da nova tecnologia que se quis implantar" (Leonhardt, 1980).

Outro trabalho nacional digno de menção foi o que foi conduzido na Universidade Federal da Paraíba, desenvolvido entre 1971 e 1976, que tratava do projeto e desenvolvimento de um protótipo nacional de forno doméstico a microondas (Conforti, 1971) e (Conforti e Tejo, 1976).

Entre os vários trabalhos apresentados pela literatura estrangeira sobre as aplicações das microondas ao processamento dos alimentos, poucos se alinhavam entre aqueles que já representavam um exemplo bem sucedido da nova tecnologia, associada a uma adoção em escala ampla e econômica ao processamento industrial, e que pudessem ser considerados como um êxito comercial. A maior parte da referência bibliográfica diz respeito a experiências de

processamento por microondas que acabaram por ficar circunscritas ao domínio do laboratório e da usina piloto, por uma série de motivos, muitos dos quais já foram objeto de discussão em capítulos anteriores deste trabalho. Entre os poucos exemplos de sucesso encontrava-se o caso da secagem de massas alimentícias, em equipamento concebido a partir de modificações e adaptações do secador convencional a ar quente, o qual teve um de seus módulos redesenhado, passando a operar pelo modo "assistido por microondas" (Smith, 1979).

Foi pensando em proporcionar novos recursos em nosso meio para a condução de pesquisas no campo das aplicações das microondas aos processamentos industriais dos alimentos é que se elaborou, dentro do Departamento de Engenharia de Alimentos da FEA/UNICAMP, contando com a cooperação da Faculdade de Engenharia Elétrica/UNICAMP, o projeto denominado : "*Estudo de um processo combinado de secagem de alimentos granulados por microondas e ar quente em secador rotativo piloto de operação contínua*". Este projeto, cuja documentação técnica se compunha das justificativas da pesquisa, da metodologia experimental, dos cronogramas físico e financeiro, da equipe de trabalho envolvida, e dos equipamentos a serem empregados, tinha um valor global na época (Setembro de 1985) equivalente a US\$90.000,00, dos quais cerca de US\$35.000,00 correspondiam a equipamentos importados. O projeto, que compreendia igualmente uma contra-partida em recursos humanos, materiais e tecnológicos por parte da UNICAMP, foi submetido a um pedido de financiamento a fundo perdido ao FIPEC - Fundo de Incentivo à Pesquisa Técnico-Científica, do Banco do Brasil, e recebeu

aprovação em Dezembro de 1985, tendo sido iniciado em Janeiro de 1986, com uma duração prevista de 20 meses.

Fazia parte da contra-partida tecnológica prestada pela UNICAMP o estudo completo do desenvolvimento do aplicador de microondas, assim como a sua inserção em um sistema integrado de secagem e/ou aquecimento através de uma unidade do tipo rotativa contínua, com a participação do ar, aquecido ou não, como um meio coadjuvante de transferência de calor e massa. O desenvolvimento deste sistema combinado, que seria suprido energeticamente, por um lado, pelo gerador de microondas de 6 kW a 2450 MHz importado, e de outro lado, por um gerador/circulador de ar quente, de 24,3 kW, aquecido por resistências elétricas convencionais, foi-nos confiado e as etapas de desenvolvimento preliminar, teste e aprovação da configuração do aplicador, seguidas do projeto, construção, ensaios e ajustes finais do protótipo piloto, constituem a essência deste trabalho de tese. O secador rotativo aqui descrito é o primeiro projeto concreto advindo de uma cooperação interdisciplinar, dentro da UNICAMP, na área industrial de processamento de alimentos por microondas.

Cabe aqui ressaltar que, nas investigações realizadas sobre o estado da arte das aplicações das microondas aos processamentos industriais, nada foi encontrado a nível nacional ou internacional sobre as novas idéias aplicadas a este projeto, razão pela qual julgamos oportuno, apoiados por nosso orientador e orientador externo de tese, buscarmos proteger a autoria intelectual deste trabalho através da solicitação de uma patente de invenção junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), que foi requerida

a 10/7/1987 sob nºPI-8703812. De oportuno, compete-nos também comentar que, após a requisição da patente de invenção, também submetemos alguns trabalhos relacionados ao projeto à participação em alguns congressos científicos, sempre contando com a aceitação dos comitês julgadores e com o interesse do público (Marsaioli *et al.*, 1987,1989 e 1991).

4.2. Objetivos

Este trabalho teve por objetivo básico a idealização de um protótipo de equipamento, com corpo principal cilíndrico rotativo, o seu projeto, construção, funcionamento e avaliação, que possibilitasse o estudo das transformações sofridas por produtos granulados em escoamento contínuo, quando fossem submetidos, dentro dele, à aplicação controlada das microondas, para fins de aquecimento e/ou secagem, de uma forma combinada ou não com a ação de ar aquecido ou não, em corrente a favor ou em contra-corrente com o escoamento do produto.

Como objetivo primário, havia de ser testado "a priori" o princípio construtivo da cavidade de aplicação das microondas, ou aplicador, no sentido de se garantir a estrita observância dos dispositivos de segurança das instalações e, posteriormente, como objetivo complementar, comprovar o índice de desempenho do aplicador no que concerne ao aproveitamento da energia das microondas. Para atender ao objetivo primário, foi inicialmente construído um modelo do aplicador em tamanho reduzido, que foi submetido a uma série de ensaios em bancada de laboratório. Uma vez obtida a aprovação do modelo construtivo, sob o aspecto do

perfeito enquadramento do aplicador a um valor de vazamento de radiação inferior ao mínimo especificado nas normas de segurança, só então partiu-se para o desenvolvimento dos demais componentes do projeto, já dimensionados de acordo a uma escala piloto de processamento. Foram aplicados mais tarde, já sobre o protótipo piloto, os testes de avaliação de eficiência energética, não somente com o equipamento em vazio, como também na operação com alguns produtos.

Como um objetivo mais abrangente deste trabalho se coloca a oportunidade do estabelecimento de mais um núcleo de pesquisas e desenvolvimento de máquinas e equipamentos que contemplem a aplicação de uma forma de energia inovadora aos processamentos de produtos extrudados e/ou granulados, em especial alimentos. Convenientemente adaptado, o sistema projetado se presta à operação com gás inerte em circuito hermêticamente selado, útil no aquecimento ou secagem, eficiente e controlada, sem contato manual, em ambiente inerte, de produtos extremamente sensíveis e/ou perigosos e/ou tóxicos, mencionando-se como exemplo produtos químicos, biológicos, farmacêuticos, cerâmicos, nucleares, etc. O atual *Laboratório de Microondas* do DEA/FEA/UNICAMP representa o início da materialização deste núcleo proposto.

4.3. Concepção Geral e Especificações Preliminares

O Departamento de Engenharia de Alimentos da FEA/UNICAMP dispunha inicialmente de um equipamento modelo de secagem de fabricação americana "BENCO Bench Scale Rotary Dryer", que nada mais era senão um secador rotativo piloto convencional a ar quente, em escala de laboratório, com capacidade de

operar em regime contínuo na faixa de 5 kg/h de produto granulado, com recursos para funcionar com a circulação de ar em corrente a favor ou em contra-corrente, com possibilidade de variar a rotação do cilindro, a alimentação do produto e a temperatura do ar quente, e de ajustar de forma escalonada a vazão de ar em sete valores pré-estabelecidos. Pretendia-se de início estudar uma forma de projetar um aplicador de microondas, adaptando-o ao secador rotativo contínuo piloto e acoplando-o a um sistema gerador de microondas de potência variável. A idéia foi logo descartada, por se mostrar pouco prática, pois significava quase que o sacrifício de um equipamento em perfeito funcionamento, em troca de um resultado duvidoso. Além disso, uma outra questão surgia a respeito da dificuldade de ser conseguido um aplicador que pudesse ser desenhado dentro de um modelo absolutamente seguro do ponto de vista de eventuais vazamentos da energia das microondas. Outra deficiência evidente era a necessidade de se manter o tamanho da cavidade demasiadamente reduzido, o que tornava o conjunto de difícil manipulação experimental.

Decidiu-se por adotar uma concepção centralizada em torno de um aplicador totalmente novo, de corpo cilíndrico e de proporção diâmetro/altura dentro da faixa recomendada para um secador rotativo convencional, com as extremidades dimensionadas de modo a não impedir a livre entrada ou a saída do produto ou de ar em circulação na cavidade e, simultaneamente, bloqueando qualquer possibilidade de escape das microondas por estes extremos. Ao mesmo tempo deveria ser atendida a correta proporção da relação diâmetro/altura no sentido de favorecer a condição de ressonância das

microondas na cavidade (Puschner, 1966) e (Collin, 1979). Estavam, pois, estabelecidos os parâmetros iniciais para o correto dimensionamento do aplicador, restando ainda a concepção de filtros adequados para a função de confinamento das microondas ao interior da cavidade.

4.4.0 Problema da Filtragem da Microonda

Dois conjuntos de filtros de microondas foram projetados para o aplicador e são mostrados esquematicamente na Figura 17. Acham-se situados, respectivamente, nos lados opostos de entrada (1) e de saída (2) do produto, junto à cavidade cilíndrica, com aberturas que permitem a livre passagem do material em ambos os extremos, bem como a circulação do ar nesses locais, em qualquer dos sentidos, em corrente a favor ou em contra-corrente com o produto, impedindo ainda qualquer vazamento da energia das microondas ao exterior.

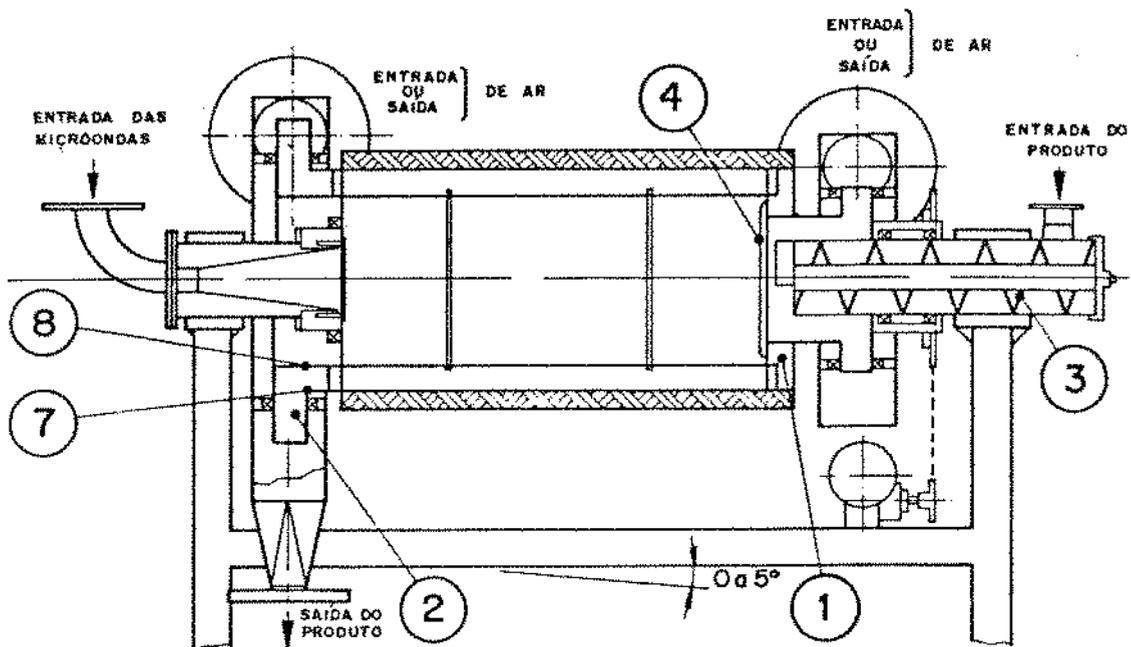


Figura 17 Esquema do aplicador com filtros nas extremidades

4.4.1. Filtro de Entrada

A solução construtiva adotada para assegurar a passagem do material no seu lado de carga ao aplicador, foi o emprego de um tubo metálico fixo, munido de rosca helicoidal (3) interna, para forçar a sua movimentação positiva horizontal, enquanto que outro tubo metálico, de maior diâmetro, concêntrico com o primeiro, porém solidário à cavidade rotativa, portanto móvel, foi utilizado para a entrada (ou saída) do ar. Estes tubos terminam próximos a um disco (4), concêntrico e ortogonal aos mesmos, que constitui a tampa da cavidade cilíndrica, e entregam o material ao interior da cavidade, permitindo a simultânea circulação do ar em qualquer dos dois sentidos, para o interior ou exterior da cavidade. Não foi possível, para as condições requeridas, projetar-se um único tubo (em condição de corte para a energia das microondas) de entrada do material e passagem do ar, pois deste modo os tubos concêntricos, ao atuarem como um cabo coaxial, tornariam possível o escape da energia das microondas. A colocação de aletas metálicas radiais, no sentido longitudinal, poderia ser uma solução de blindagem da energia eletromagnética, mas dadas as condições de projeto, isto não seria viável, pois o tubo interno é fixo e o tubo externo gira com a cavidade cilíndrica. Em vista destes condicionantes, optou-se por um filtro no interior da cavidade, com estrutura semelhante ao de uma roda dos antigos moinhos de água. O desenho do filtro de entrada do produto (1) consiste, pois, de uma estrutura obtida pela introdução de múltiplas lâminas metálicas recortadas em contorno retangular, dispostas radialmente, consecutiva e igualmente espaçadas, formando uma configuração periódica de

guias radiais, das quais somente quatro estão representadas (5) na Figura 18-a, que mostra uma disposição em perspectiva dos filtros. Levando-se em consideração a constante dielétrica do material, pode-se escolher um número

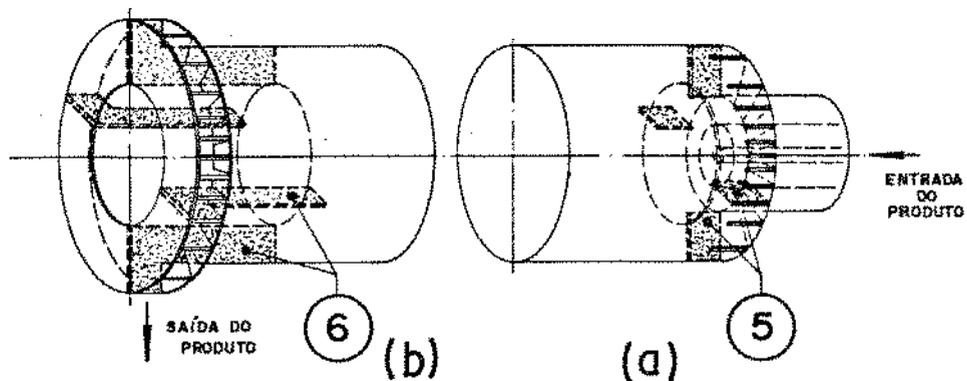


Figura 18 Perspectiva dos filtros do aplicador

suficientemente grande de aletas radiais e a distância entre as paredes metálicas suficientemente pequena de forma que a onda eletromagnética se torne evanescente no interior da estrutura de cada guia radial, de modo a não permitir sua fuga para o exterior da cavidade (Marcuvitz, 1951). A onda eletromagnética evanescente passa, em seu percurso, por uma estrutura que se assemelha a uma corneta de microondas, fechada no topo e com uma abertura lateral, por onde deverá ter acesso o material granulado e passar o ar em circulação. Esta corneta foi, portanto, projetada em corte, de forma a não permitir propagação de onda em seu interior, originando uma estrutura de onda evanescente, conforme Figura 19-a :

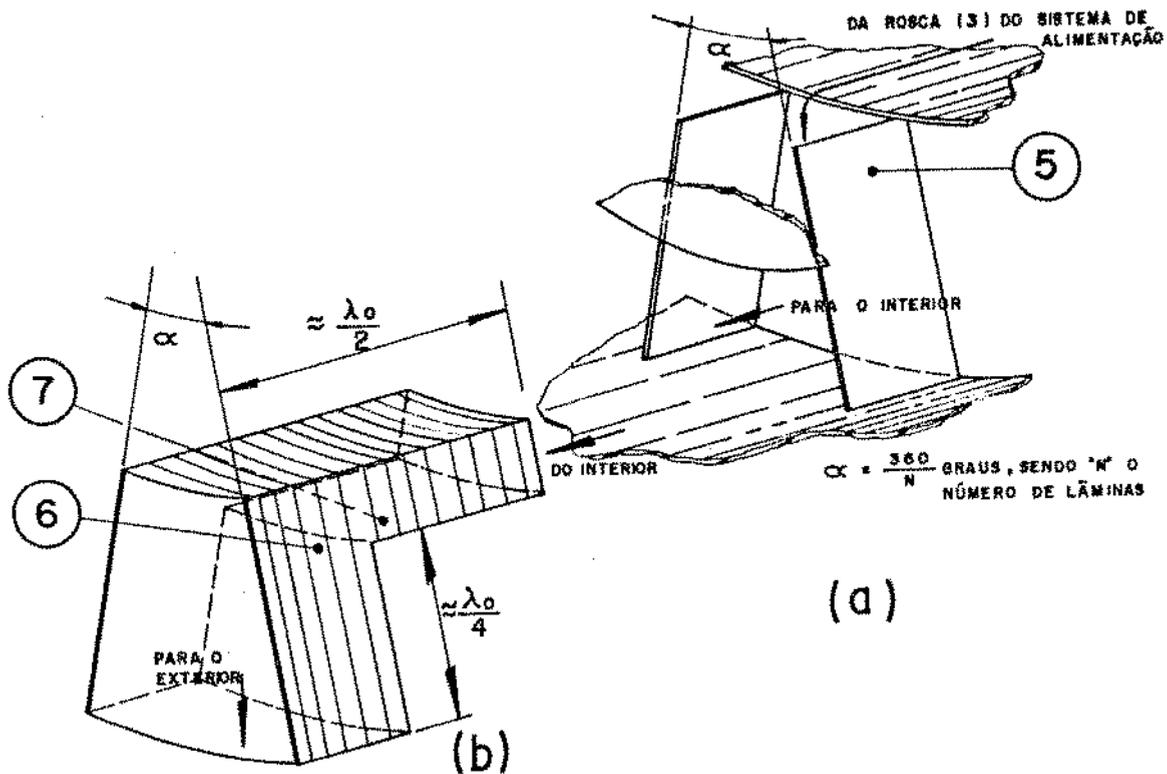


Figura 19 Segmentos $N^{\text{ésimos}}$ dos filtros do aplicador

4.4.2. Filtro de Saída

O conjunto de filtros (2) da Figura 17, na saída do produto, consiste de uma estrutura obtida pela introdução de múltiplas lâminas metálicas recortadas na forma de "L", mostrada em detalhe (6) na Figura 18-b, dispostas radial, consecutiva e igualmente espaçadas, das quais somente quatro aparecem na figura. O arranjo de cada par de lâminas segue o padrão da Figura 19-b. Estas lâminas formam uma configuração de ondas evanescentes que, na primeira parte do percurso, passam por uma estrutura de um guia cilíndrico não circular, composto de duas paredes planas formando ângulo $\alpha = (360/N)^{\circ}$ sendo N o número de lâminas "L", e duas paredes curvas, correspondentes uma à face interior da cavidade

cilíndrica-circular (7) da Figura 17, e outra a face exterior do corpo cilíndrico (8) da Figura 17. Este guia é projetado em corte para o modo fundamental e tem medida aproximadamente igual a $\lambda_0/2$. Figura 19-b, originando uma onda evanescente em seu interior; na segunda parte do percurso, tem-se uma estrutura semelhante a uma antena corneta de microondas; aqui também ela é projetada em corte para a frequência de operação, medindo cerca de $\lambda_0/4$, de modo a ampliar ainda mais a atenuação da onda evanescente

4.5. Ensaio Experimental de um Modelo Reduzido

Com a finalidade de testar o desempenho dos filtros descritos no item anterior, foi elaborado o desenho de um modelo cilíndrico isométrico da cavidade do secador, de tamanho reduzido. Seu diâmetro interno era de 73,2 mm, ou seja, de $300/73,2 = 4,1$ vezes menor que o diâmetro escolhido para o modelo piloto, com frequência de operação assumida como $300/73,2 \times 2450 = 10040,1$ MHz, de forma a torná-lo eletricamente semelhante ao original, porém de construção e custos reduzidos. A proporção adotada de diâmetro para altura foi também idêntica ao do protótipo piloto, ou seja, de aproximadamente 1 : 4,3. Os materiais construtivos escolhidos para o modelo foram tubo e chapas de latão, devido à pronta disponibilidade e facilidade de trabalho com os mesmos. Uma característica adicional introduzida no modelo foi o seu tipo construtivo tripartido, em dois planos ortogonais ao eixo do cilindro, a fim de permitir a sua desmontagem quando fosse necessária. As duas fotografias da Figura 20, na página seguinte, ilustram alguns pormenores

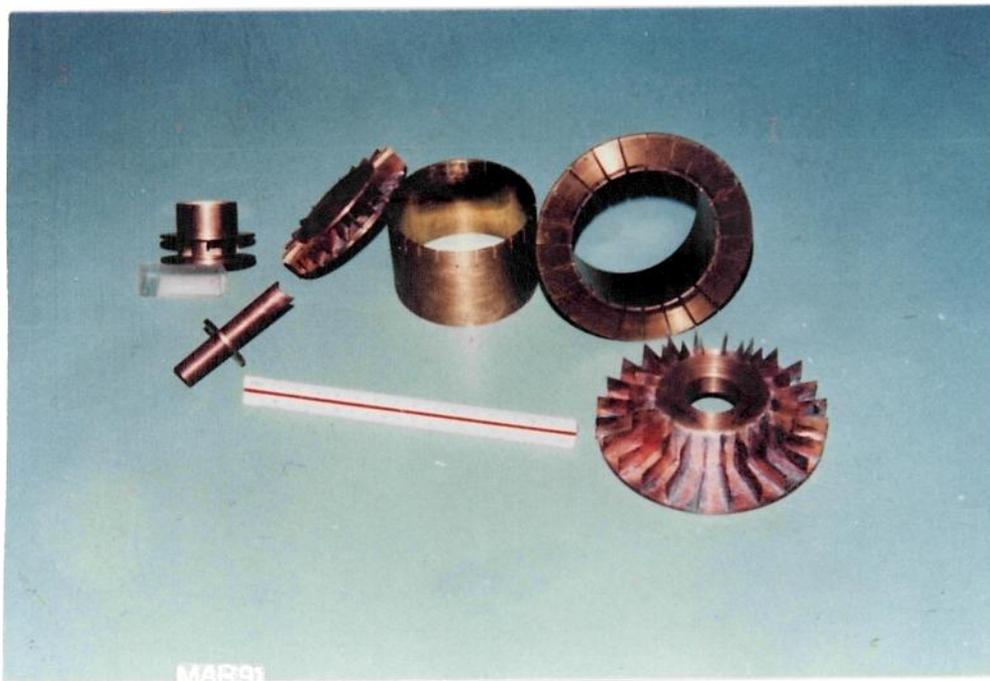
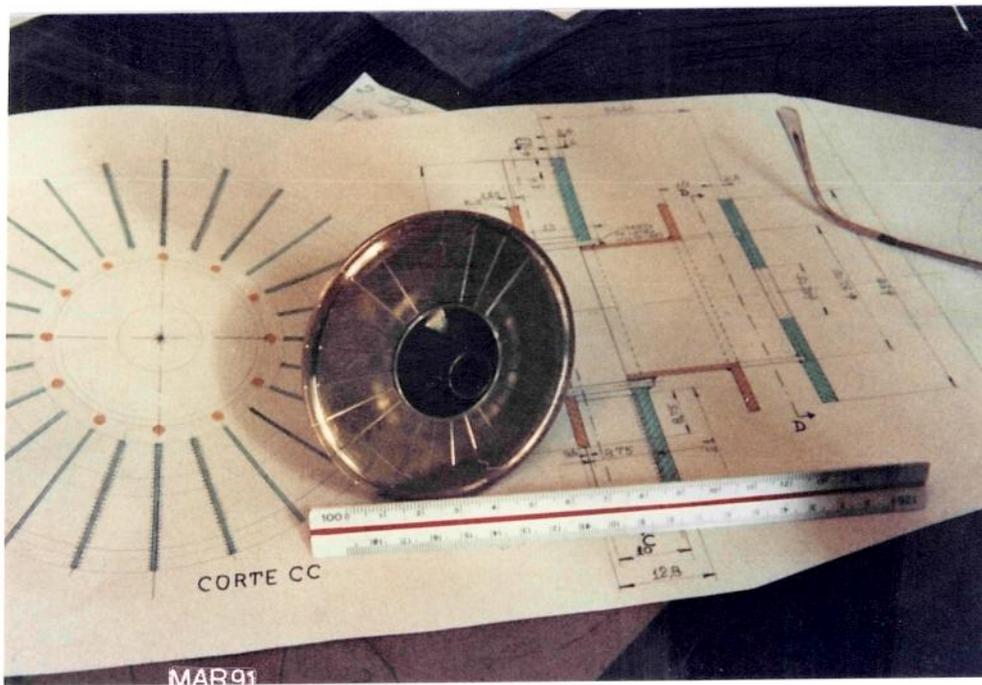


Figura 20 Vista de alguns pormenores construtivos do modelo isométrico da cavidade de aplicação das microondas

construtivos do interior do modelo isométrico, antes da soldagem das cabeceiras às extremidades cilíndricas. Percebe-se, na foto inferior, em primeiro plano, a estrutura multi-lâminas em "L" do filtro de saída do produto, em um número total de 24 lâminas, que correspondem ao valor calculado para N no protótipo original.

O objetivo dos ensaios com o modelo isométrico foi o de detectar os níveis de vazamento de energia quando o mesmo fosse submetido à uma alimentação da radiação das microondas pela extremidade prevista. Para isto, foi preparada, no LED-Laboratório de Eletrônica e Dispositivos da FEE-UNICAMP, uma montagem de bancada, com instrumentação apropriada, com uma fonte geradora de energia de microondas em baixa potência, de frequência ajustável, que alimentava, via um "tôco simples" de ajuste de impedâncias sobre um guia de onda padronizado do tipo WR90, a abertura flangeada, coaxial com o modelo, adaptada à extremidade do mesmo, correspondente ao lado de saída do produto.

Todos os instrumentos utilizados eram da marca Hewlett Packard, de fabricação americana, de acordo com o seguinte :

- 1.-Oscilador de varredura com unidade "plug-in"- Mod.86250D, para operar na faixa de frequências de 8,0 a 12,4 GHz.
- 2.-Frequencímetro de leitura direta - Mod.X532B, operando na faixa de 8,2 a 12,4 GHz.
- 3.-Analisador de circuitos com unidade "plug-in", em três módulos : "mainframe", conversor de frequência harmônica e "display" de fase e magnitude - Mods.8410B/8411A/8412A, operando na faixa de 0,11 a 12,4 GHz.
- 4.-Sensor de potência - Mod.8481A, operando na faixa de potência de $1\mu\text{W}$ a 100 mW, com frequência entre 10 MHz e

18 GHz.

5.-Sensor de potência - Mod.8484A, operando na faixa de potência de 0,1 nW a 10 μ W, com frequência entre 10 MHz e 18 GHz.

6.-Antena tipo corneta de 10 dB, acoplável aos sensores Mod.8481A ou Mod.8484A, para a frequência de 10 GHz.

7.-Sintonizador de parafuso, deslocável sobre o guia de onda ("tôco simples") - Mod. X870A, para a faixa de frequências entre 8,2 e 12,4 GHz, para guia de onda WR90.

8.-Medidor de potência a termistor (tipo bolômetro) - Mod.432A, operando com escalas de 10 μ W até 10 mW.

O esquema da Figura 21 indica os posicionamentos relativos

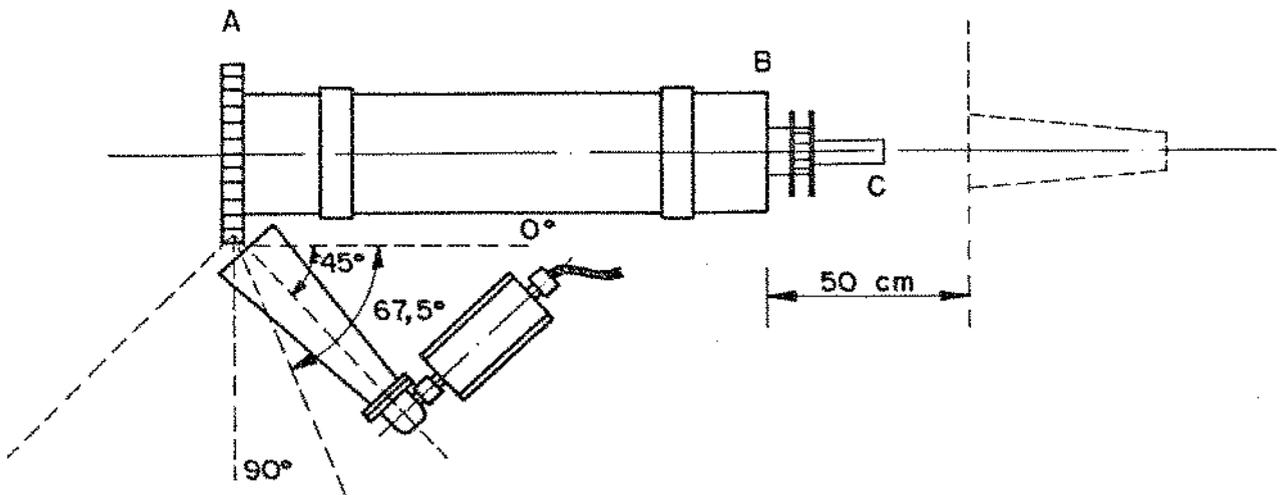


Figura 21 Posicionamentos do sensor em relação ao modelo

da antena tipo corneta do sensor para a captação das fugas de energia das microondas. Foram realizadas as seguintes medições :

Potência de entrada = $P_{in} = 2,3 \text{ mW}$

Fugas de potência :

-Sensor encostado (lado A) :

$P_{outA} = 0,3 \text{ nW}$ a uma inclinação de $22,5^\circ$

$$P_{outA} = 0,6 \text{ nW a uma inclinação de } 45^\circ \text{ (máxima)}$$

$$P_{outA} = 0,3 \text{ nW a uma inclinação de } 67,5^\circ$$

$$P_{outA} = 0,2 \text{ nW a uma inclinação próxima de } 0^\circ$$

$$P_{outA} = \text{desprezível, c/inclinação próx. de } 90^\circ$$

-Sensor afastado 50 cm (lado A) :

$$P_{outA} = 0,15 \text{ nW a uma inclinação de } 22,5^\circ$$

$$P_{outA} = 0,3 \text{ nW a uma inclinação de } 45^\circ \text{ (máxima)}$$

$$P_{outA} = 0,15 \text{ nW a uma inclinação de } 67,5^\circ$$

-Sensor afastado 50 cm (lado B) :

$$P_{outB} = 0,1 \text{ nW}$$

$$P_{outB} = 0,6 \text{ nW (sem tubo C)}$$

$$P_{outB} = 3 \text{ } \mu\text{W (sem cabeceira B)}$$

As medidas de vazamento de potência de microondas, pelas aberturas de entrada e de saída do produto e do ar, foram satisfatórias, tendo-se conseguido, na condição de vazamento máximo (sensor encostado no lado A, a 45°), com o modelo totalmente fechado, uma rejeição acima de 65 dB entre o campo interno e o externo à cavidade, o que deveria enquadrar o protótipo final perfeitamente dentro do tolerável, segundo as normas internacionais de segurança e homologação. Com base nos resultados conseguidos e relatados acima foi possível concluir pela viabilidade técnica da adoção deste tipo de filtragem para a cavidade da unidade piloto, e isto seria confirmado mais tarde através de novas medidas de vazamento sobre o próprio protótipo, já em início de operação, como será visto adiante sob o item 4.12 : "Testes Elétricos de Fugas de Radiação".

As fotos da página seguinte, da Figura 22, ilustram como estavam situados modelo e instrumental durante os ensaios.

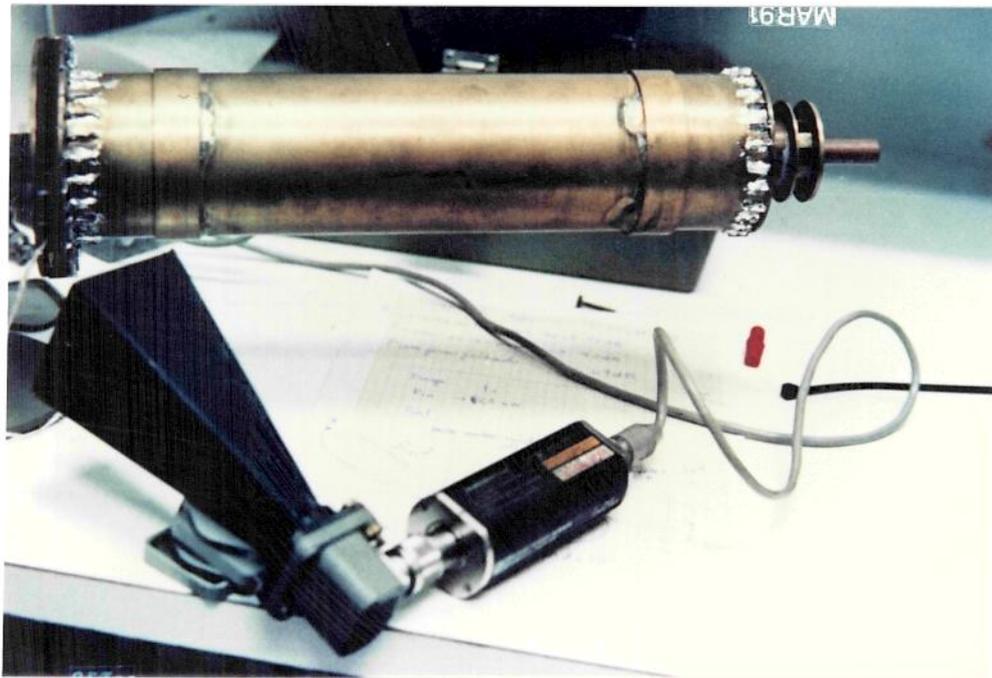
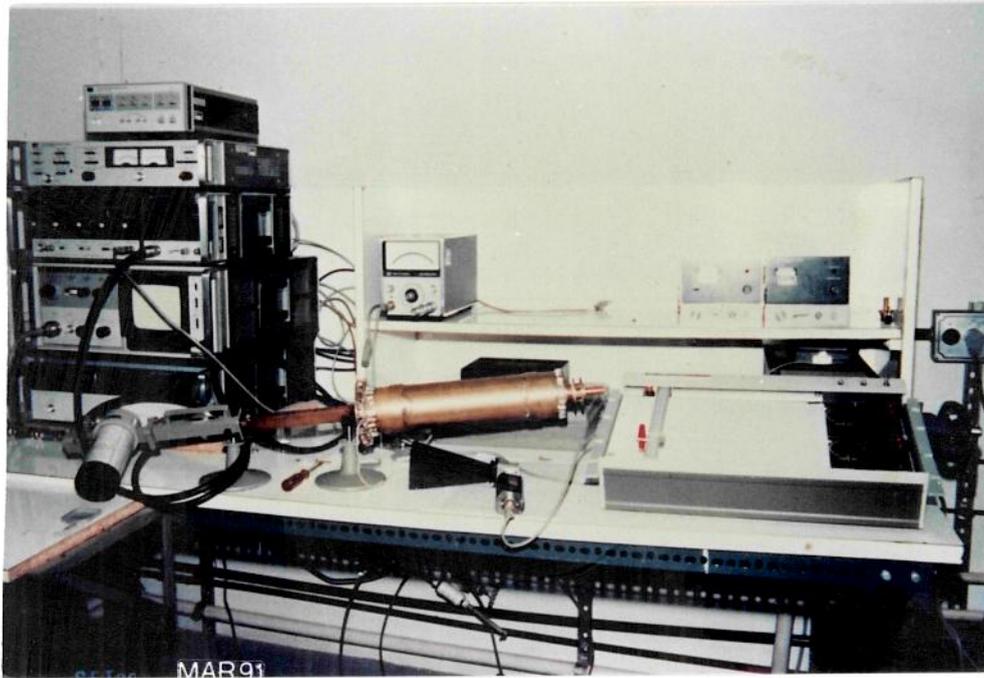


Figura 22 Arranjo do instrumental e do modelo durante a realização dos ensaios de vazamento

4.6. Desenvolvimento e Projeto do Protótipo

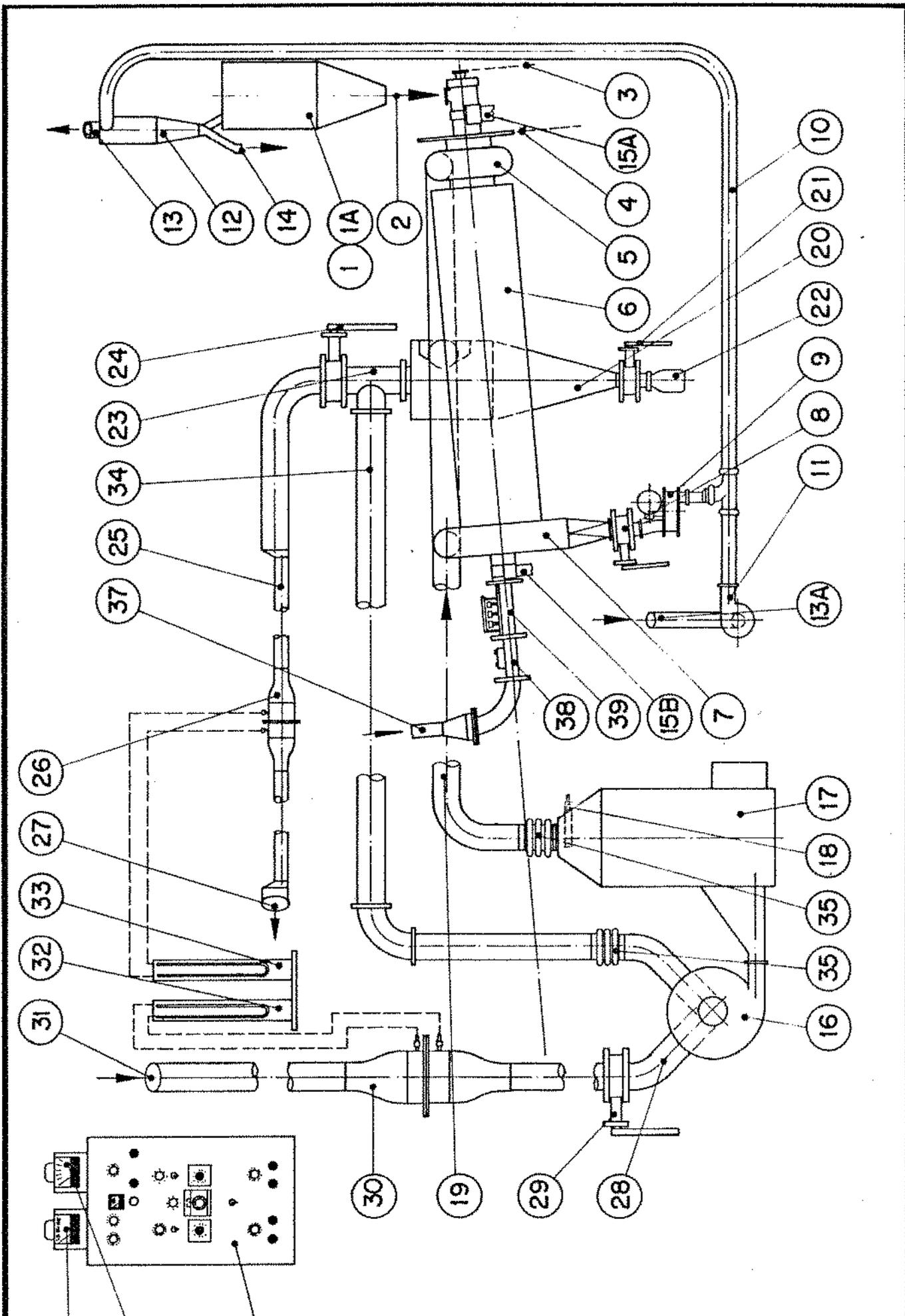
As etapas de desenvolvimento da idéia do protótipo, assim como de detalhamento do seu projeto construtivo, foram centradas sobre o desenho aprovado da cavidade de aplicação das microondas, ou aplicador, o qual, por seu tempo, foi redesenhado com a aplicação de outros materiais construtivos mais adequados a uma universalidade de emprego do equipamento piloto experimental, no seu contacto com os diversos produtos a processar.

A partir do desenho da cavidade cilíndrica, foram projetados os demais componentes do secador combinado e, em torno deste, encontrando-se o mesmo inserido dentro de um sistema, foram planejados todos os elementos da completa instalação.

Inicialmente foi considerado o sistema como um todo, e dele foram separados os componentes que seriam importados, procedendo-se a uma minuciosa especificação técnica para fins de solicitação de orçamento. O critério para tal especificação levou em conta a experiência prévia do candidato, que teve a oportunidade de participar de um programa de visitas e estágios em instituições congêneres de ensino e pesquisa do Canadá, em julho de 1985. Lá foi possível operar, naquela ocasião, um equipamento de processamento piloto de aquecimento contínuo de alimentos sólidos a microondas, para fins de inativação enzimática. O produto trabalhado foi semente de mostarda, e o sistema era constituído de um aplicador rotativo de ciclo contínuo, ao qual havia sido acoplada uma fonte geradora de microondas de 6 kW, com frequência de 2450 MHz, modelo S6F de fabricação

Cober, de procedência americana. A capacidade deste gerador poderia se encaixar bem às necessidades experimentais piloto do DEA; além disto, seu funcionamento era bastante estabilizado e confiável, razão pela qual passou-se a considerar tal modelo como uma provável opção de importação. Em busca de outras alternativas de fornecimento, no mercado internacional, de um equipamento de características similares ao americano, somente foi encontrado o modelo GHF 1212B, de 5 kW em 2450 MHz, de fabricação francesa da Thomson-CSF, que possui filial no Brasil. No entanto, além da potência ser levemente inferior, o gerador da Thomson-CSF era sensivelmente mais caro (cerca de 20 %). Os acessórios do sistema de microondas, tais como curvas 90 ° de guia de onda tipos "E" ou "H", guia de onda flexível, circulador de três portas, medidores de potência, detector de vazamento, e outros, quase não estavam disponíveis da firma francesa. Por isto julgou-se mais vantajoso optar pela importação do modelo S6F da Cober, juntamente com alguns acessórios. Foram preparadas as especificações dos componentes básicos do sistema a microondas, levando-se em conta suas necessidades mínimas operacionais e de proteção, compatíveis com um arranjo de componentes o mais simplificado possível. Foi também levado em conta que alguns componentes já podiam ser produzidos por fabricantes nacionais. Excluídos estes últimos, as especificações dos equipamentos sem similar nacional, previstos para serem importados, através do Setor de Importação da UNICAMP, foram preparadas como segue :

-1(um) Gerador a microondas modelo S6F, marca Cober, de procedência americana, potência de saída continuamente ajustável de 0,5 a 6 kW, frequência de 2450 MHz, potência de



DESCRIÇÃO Esquema da instalação do secador a microondas			CONVÊNIO FIEC - B.B. / UNICAMP - F.E.A	
ESCALA S/E	DES. Edson APROV.	DATA 12, 3, 91 DATA / /	DES. Nº FIGURA - 23	

entrada em 220 V, trifásica, 60 Hz, 44 A, conexão de saída para guia de onda padrão WR284, com flange UG-53/U, resfriamento com 6 l/min de água a $3,3 \text{ kg/cm}^2$, casamento de impedância da carga através de circulador de ferrite e sintonizador, equipado com detector de arco no guia de onda, armário de chapa dotado de juntas com acabamento segundo normas NEMA 12, de dimensões gerais : largura 914 mm, profundidade 457 mm, altura 1372 mm.

-1(um) Medidor de potência elétrica refletida Cober mod. PM-IR, portátil, equipado com cabo e conector para peça adaptadora sobre o guia de onda.

-1(um) Medidor de potência elétrica transmitida Cober mod. PM-IF, portátil, equipado com cabo e conector para peça adaptadora sobre o guia de onda.

-1(uma) Peça adaptadora para o guia de onda padrão WR284 com flanges UG-53/U, contendo dois conectores macho equipados com diodo retificador para a detecção dos sinais transmitido e refletido, respectivamente.

-1(um) Medidor de potência elétrica para detecção de vazamento em 2450 MHz, Cober ref. LDS-1, fabricação Holaday, mod. HI 1501, portátil, operado à bateria.

-1(um) Circulador de 3 portas para o sistema de aplicação de microondas, Cober mod. ST89-1021, com flanges padrão UG-53/U.

-1(uma) Carga resfriada a água para o sistema de aplicação de microondas, Cober mod. ST89-1019, com flange padrão UG-53/U.

-1(um) Monitor de temperatura infra-vermelho, Cober ref. PTM-1, fabricação Ircon, mod. *Modline 4*, escala 0 - 500°C , precisão $\pm 0,75 \%$ de fundo de escala, resolução 1°C .

-1(um) Guia de onda flexível, Cober mod. FWG24, comprimento 610 mm, elaborado com paredes metálicas de chapa de latão especial sanfonado, protegidas por revestimento externo de borracha vulcanizada, com flanges padrão UG-53/U.

-1(uma) Célula de fluxo laminar de fabricação Meriam mod. 50MC2-2, faixa de aplicação de 100 SCFM @ 8" de coluna d'água, com conexões do tipo mangueira.

Deve ser observado que o último item da relação acima, fora do sistema a microondas, teve sua importação incluída com a finalidade de ser utilizado na medição experimental de precisão da vazão do ar de circulação do secador. A par dos componentes que tiveram seus processos de importação acionados, foi dado início ao projeto detalhado da instalação, cujos elementos foram especificados para serem fabricados e/ou adquiridos de fornecedores nacionais.

Para isto foi inicialmente estabelecido um esquema genérico da instalação completa, cuja configuração geral acha-se representada na Figura 23 da página seguinte. Os itens nela indicados correspondem aos principais elementos de especificação individual e/ou conjuntos e sub-conjuntos do projeto, cuja relação seguinte acompanha a numeração adotada no desenho da Figura 23 :

- (1) - Depósito cônico, com tampa, construído de chapa de aço inoxidável, capacidade útil de 40 litros, saída com niple sanitário tipo abraçadeira de ϕ 38 mm.
- (1A)- Depósito opcional de seção quadrada, fundo piramidal, com tampa, construído de chapa de aço carbono, dotado de tampa de aço inoxidável, capacidade útil de 30 litros, saída circular de ϕ 100 mm lisa.
- (2) - Sistema de abastecimento do produto para a rosca de

- alimentação do secador, adequado a cada tipo de produto (válvula rotativa, calha vibratória, etc.)
- (3) - Sistema de acionamento da rosca de alimentação do secador, constituído de moto-variador-redutor de CC, transmissão final por corrente, comando remoto instalado no painel (36).
 - (4) - Sistema de acionamento do aplicador cilíndrico rotativo, constituído de moto-variador-redutor de CA, transmissão final por corrente, ajuste manual local.
 - (5) - Câmara estacionária de passagem de ar, lado de entrada do produto.
 - (6) - Aplicador cilíndrico rotativo.
 - (7) - Câmara estacionária de passagem de ar, lado de saída do produto.
 - (8) - Válvula-borboleta *Liess* modelo VF, diâmetro nominal de 2", para montagem entre flanges, acionamento manual.
 - (9) - Válvula rotativa de eixo vertical, desenho especial, acionamento direto por moto-variador-redutor de CC, com comando remoto instalado no painel (36).
 - (10)- Sistema de tubos e conexões de 2", de PVC, para o transporte pneumático do produto tratado em direção à saída (14).
 - (11)- Ventilador *Clements - Cadillac*, modelo AY-7, auxiliar, capaz de movimentar o ar no sistema pneumático a uma vazão acima de 70 m³/h, conexões rápidas de sucção e descarga de ϕ 2", ligado à rede elétrica monofásica de 220 V, 60 Hz, 1 A, chave de acionamento manual local.
 - (12)- Ciclone coletor de granulados, construção metálica em aço inoxidável, dotado de niples lisos de conexão do ar e de saída do produto de ϕ 38 mm, montado em nível

- superior ao dos depósitos (1/1A) para eventual recirculação do material.
- (13)- Saída de ar do ciclone (12), interligada, eventualmente, em circuito fechado, com a sucção (13A) do ventilador (11).
- (13A) Linha de aspiração do ventilador (11), que pode ser ligada, eventualmente, à saída de ar (13) do ciclone (12), para recirculação do ar do circuito pneumático.
- (14)- Saída de produto, no fundo do ciclone (12), móvel, que pode ser direcionada, seja para um recipiente sobre uma balança, ou de retorno para os depósitos (1) ou (1A), para recircular o material, se necessário.
- (15A) e (15B) - Suportes de aço, tipo berço, solidários à estrutura de sustentação do secador, colocados, respectivamente, no lado de entrada e de saída do produto, e que servem de apoio ao eixo do secador.
- (16)- Ventilador Asten, modelo VC280, de 0,75 CV, para ligação à rede elétrica trifásica de 220 V, 60 Hz, capacidade de $5,3 \text{ m}^3/\text{min}$ a uma pressão manométrica de 15,2 cm de coluna d'água, para alimentar o gerador elétrico de ar quente (17).
- (17)- Aquecedor de ar elétrico, constituído de uma câmara contendo três bancos de resistências elétricas blindadas, aletadas, cada um com capacidade de $9 \times 0,9 = 8,1 \text{ kW}$, para ligação triângulo em 220 V. Cada banco possui uma comutação independente, diretamente do painel (36), sendo que um deles inclui sistema automático, comandado termostaticamente, através do bulbo sensor (18).
- (18)- Bulbo sensor termostático, do tipo J (ferro-constantã)

- com cabo extensor de 3 m, conectado a um sistema indicador-controlador de temperatura eletrônico automático COEL modelo GMP-0, escala 0 - 300 °C, controle diferencial tipo "PD", com indicação de desvio, com montagem do instrumento no painel (36).
- (19)- Conjunto de tubulação e conexões de aço inoxidável de diâmetro externo ϕ 100 mm, do tipo de desmontagem fácil, sanitária, com sistema de abraçadeira ("clamp"), sem necessidade de ferramentas, de forma tal a permitir montagens alternativas, com o intercâmbio da posição de saída do ar quente do gerador (17), para entrar na câmara (5) ou na (7).
- (20)- Ciclone coletor de eventual produto arrastado, construído de chapa de aço inoxidável, dotado de niples de conexão de ar tipo sanitário de abraçadeira de ϕ 100 mm e de niple conector de saída do material coletado do tipo pestana com flange de ϕ 50 mm, com tampa removível superior ligada a um "T" (23), para direcionamento do ar segundo duas direções opcionais (exaustão direta ou recirculação). A saída inferior do material coletado é ligada à válvula (21).
- (21)- Válvula-borboleta *Liess* modelo VF, diâmetro nominal de 2", para montagem entre flanges, acionamento manual.
- (22)- Recipiente de vidro cilíndrico com tampa, para recolhimento do produto arrastado, ligado à válvula de descarga (21) do ciclone (20). A tampa permanece suspensa, encostada à válvula (21) pela flange inferior, para permitir troca periódica do frasco de vidro quando este estiver cheio de material.
- (23)- "T" tubular de aço inoxidável, diâmetro externo de ϕ

100 mm, com conexões tipo abraçadeira de desmontagem rápida, ligado pela válvula (24) à tubulação de exaustão e pela saída central à tubulação de recirculação (34).

- (24)- Válvula-borboleta *Liess* modelo VF, diâmetro nominal de 4", para montagem entre flanges, acionamento manual.
- (25)- Sistema de tubos de 2", de PVC, ligado por adaptador 4"x2" de PVC à tubulação de aço inoxidável de ϕ 4" de saída da válvula (24), para conexão e adaptação da célula de fluxo laminar (26), para regularização do fluxo de ar de saída para fins de medição da vazão.
- (26)- Célula de fluxo laminar *Meriam* mod. 50MC2-2, interligada por mangueiras flexíveis de tomada de pressão ao manômetro (33), com extremidades para conexão de 2", do tipo mangueira.
- (27)- Tubulação de aço inoxidável de diâmetro externo ϕ 100 mm, ligada do lado da saída da célula (26) através de um adaptador 4"x2" de PVC, para exaustão do ar para o exterior.
- (28)- Tubulação e conexões tipo abraçadeira, de aço inoxidável, de diâmetro externo ϕ 100 mm, para admissão de ar exterior, ligadas de um lado à sucção do ventilador (16) e de outro à válvula (29).
- (29)- Válvula-borboleta *Liess* modelo VF, diâmetro nominal de 4", para montagem entre flanges, acionamento manual.
- (30)- Célula de fluxo laminar *Meriam* mod. 50MC2-4, interligada por mangueiras flexíveis de tomada de pressão ao manômetro (32), com extremidades para conexão de 4", do tipo mangueira.
- (31)- Tubulação de PVC de diâmetro nominal ϕ 4", para

- interligação da célula (30), pelo lado da entrada de ar, à admissão de ar do exterior, e pelo lado da saída de ar, à válvula reguladora (29).
- (32)- Manômetro de coluna "U", de vidro, para funcionamento com água, com calibração elaborada a partir de curva fornecida pelo fabricante, com escala gravada de um lado de 0 a 12 m³/min, de outro de 0 a 200 mm de coluna d'água.
- (33)- Manômetro idêntico ao (32), exceto pelas escalas, de um lado de 0 a 3 m³/min, de outro de 0 a 200 mmca.
- (34)- Tubulação e conexões tipo abraçadeira, de diâmetro externo ϕ 100 mm, interligadas, de um lado, ao "T" (23) e, de outro, à aspiração do ventilador (16), para a função opcional de recirculação do ar de secagem.
- (35)- 2(duas) Sanfonas de proteção, em PVC flexível, diâmetro nominal de ϕ 100 mm, sendo uma ligada à saída do ar quente do gerador (17), e outra ligada à tubulação de recirculação (34), próximo à aspiração do ventilador (16), fixações à tubulação de aço inoxidável de ϕ 100 mm por meio de pares de abraçadeiras. Ambas as peças cumprem a função de permitir a compensação do posicionamento das interligações tubulares, devido à regulagem da inclinação do corpo rotativo do secador.
- (36)- Painel de comando elétrico e controle dos motores de acionamento e bancos de resistências de aquecimento do ar, projetado conforme as necessidades do sistema - vide esquema elétrico do painel no Apêndice C - equipado com chaves gerais, fusíveis, contactores, relés de proteção térmica, botoeiras, sinalizadores e

demais componentes, sendo o conjunto alojado em cofre metálico com grau de proteção conforme ABNT norma NB-119, grau IP 54.

- (37)- Guia de onda flexível Cober mod. FWG24, para a frequência de 2450 MHz, com flanges padrão UG-53/U.
- (38)- Peça adaptadora com detectores de sinais de microondas transmitido e refletido, que enviam os mesmos para os indicadores (40) e (41), respectivamente. Está equipada com flanges tipo UG-53/U, nas extremidades, para conexão com o guia de onda WR284, especificado para a frequência de microondas de 2450 MHz.
- (39)- Têco triplo para o casamento de impedâncias, equipado com flanges tipo UG-53/U, para conexão com o guia de onda WR284, especificado para a frequência de microondas de 2450 MHz do sistema.
- (40)- Medidor de potência elétrica transmitida Cober mod. PM-IF, portátil, equipado com cabo e conector para peça adaptadora (38).
- (41)- Medidor de potência elétrica refletida Cober mod. PM-IR, portátil, equipado com cabo e conector para peça adaptadora (38).
- (42)- 2(duas) Curvas de guia de onda padrão WR284 de 90° do tipo "H", dotadas de flanges tipo UG-53/U soldadas em ambas as pontas, fabricação em latão.
- (43)- 1(uma) Curva de guia de onda padrão WR284 de 90° do tipo "E", dotadas de flanges tipo UG-53/U soldadas em ambas as pontas, fabricação em latão.
- (44)- 1(um) Segmento reto de guia de onda padrão WR284, dotado de flanges tipo UG-53/U soldadas em ambas as pontas, comprimento total 710 mm, fabricação em latão.

4.7. Critérios de Escolha dos Materiais Aplicados, dos Principais Componentes e das Concepções Construtivas Adotadas

O projeto do protótipo levou em consideração, antes de tudo, que o equipamento deveria ser destinado a trabalhar prioritariamente com alimentos, portanto buscou-se adotar princípios de desenho que não conflitassem com as regras básicas de construção higiênico-sanitárias que devem prevalecer para esta classe de equipamentos.

Assim, pois, procurou-se enquadrar não apenas as idéias básicas da configuração do sistema, como também as soluções construtivas de cada conjunto e sub-conjunto e os critérios seletivos dos materiais aplicados, dentro dos chamados "sete princípios" para o projeto higiênico delineado no documento americano: "Projeto Sanitário", reproduzido no Apêndice D. Estes são preceitos que foram reunidos e apresentados pela primeira vez em 1964, sendo posteriormente adotados pelo Comitê Técnico Conjunto da FMA (Food Machinery Association) e da FMF (Food Manufacturers' Federation) da Inglaterra, em 1967, na edição das normas "Hygienic Design of Food Plant", incluído no apêndice da obra de Jowitt (1980).

Para o caso particular da cavidade de aplicação das microondas, o projeto do protótipo considerou, além da superposição dos critérios de dimensionamento sob os pontos de vista mecânico e eletromagnético citados no item 4.3, também a especificidade na aplicação dos materiais construtivos que compõem a mesma, diante das exigências operacionais e do melhor desempenho possível do processo eletromagnético. Um exemplo pode ser citado da escolha das régua e placas de "teflon" (PTFE - Politetrafluoretileno)

para a constituição das chicanas ou taliscas interiores do cilindro, para a movimentação e agitação do produto granulado : havia a necessidade de se especificar um material de baixa perda dielétrica na frequência de 2450. MHz, ou seja, literalmente transparente às microondas, ao mesmo tempo que apresentasse razoável resistência mecânica e térmica para suportar as condições de funcionamento do secador. Além disto, era necessário idealizar-se um sistema de fixação das chicanas à parede cilíndrica interior da cavidade, que fosse compatível com a exigência de um acabamento liso e polido da chapa metálica de constituição da mesma ; isto porque não pode haver pontos, arestas ou saliências na superfície metálica sob um campo eletromagnético intenso, sob pena de se provocar o surgimento de centelhas elétricas, que poderiam causar um efeito danoso ao produto ou ao equipamento. Foi então desenvolvida a idéia de se fixar as chicanas adotando-se um sistema de travamento individual longitudinal de cada unidade, aproveitando-se as lâminas dos filtros das extremidades, e de inter-travamento radial entre as chicanas, através do encaixe de cada uma, em posições situadas a $1/3$ e a $2/3$ do seu comprimento, a dentes de duas placas de "teflon" em forma de arruela estrelada(Figura 24).

Da proposta da Figura 24 foi eliminada a cunha (item 4), pois as réguas permaneceram travadas mesmo sem a presença de uma pressão longitudinal. O item 1 da Figura 24 é um disco de PTFE, de vedação da cavidade, que impede o escape de gases e produto pela janela circular na parede metálica da cavidade, que corresponde à abertura de admissão da radiação eletromagnética das microondas provenientes do guia de onda,

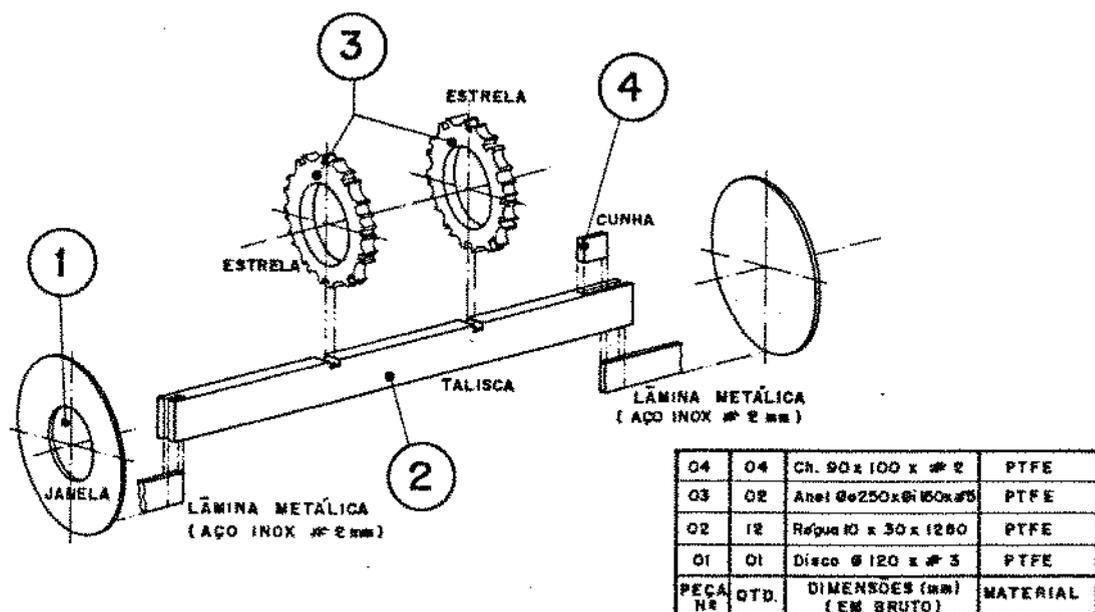


Figura 24 Componentes de PTFE utilizados no aplicador

a cuja radiação o PTFE é totalmente transparente.

Com respeito à determinação da quantidade de chicanas, o critério foi o de "incorporar um número máximo compatível com a não interferência de chicanas adjacentes no processo de coletar o material na base do tambor e também consistente com a não aglomeração das partículas, que podem estar úmidas e grudentas" (Kelly, 1987). Buscou-se também compatibilizar o número de chicanas com o de aletas dos filtros, mantendo-se a simetria da estrutura, e aproveitando-se as aletas como lâminas de encaixe para proporcionar alinhamento e sustentação às chicanas.

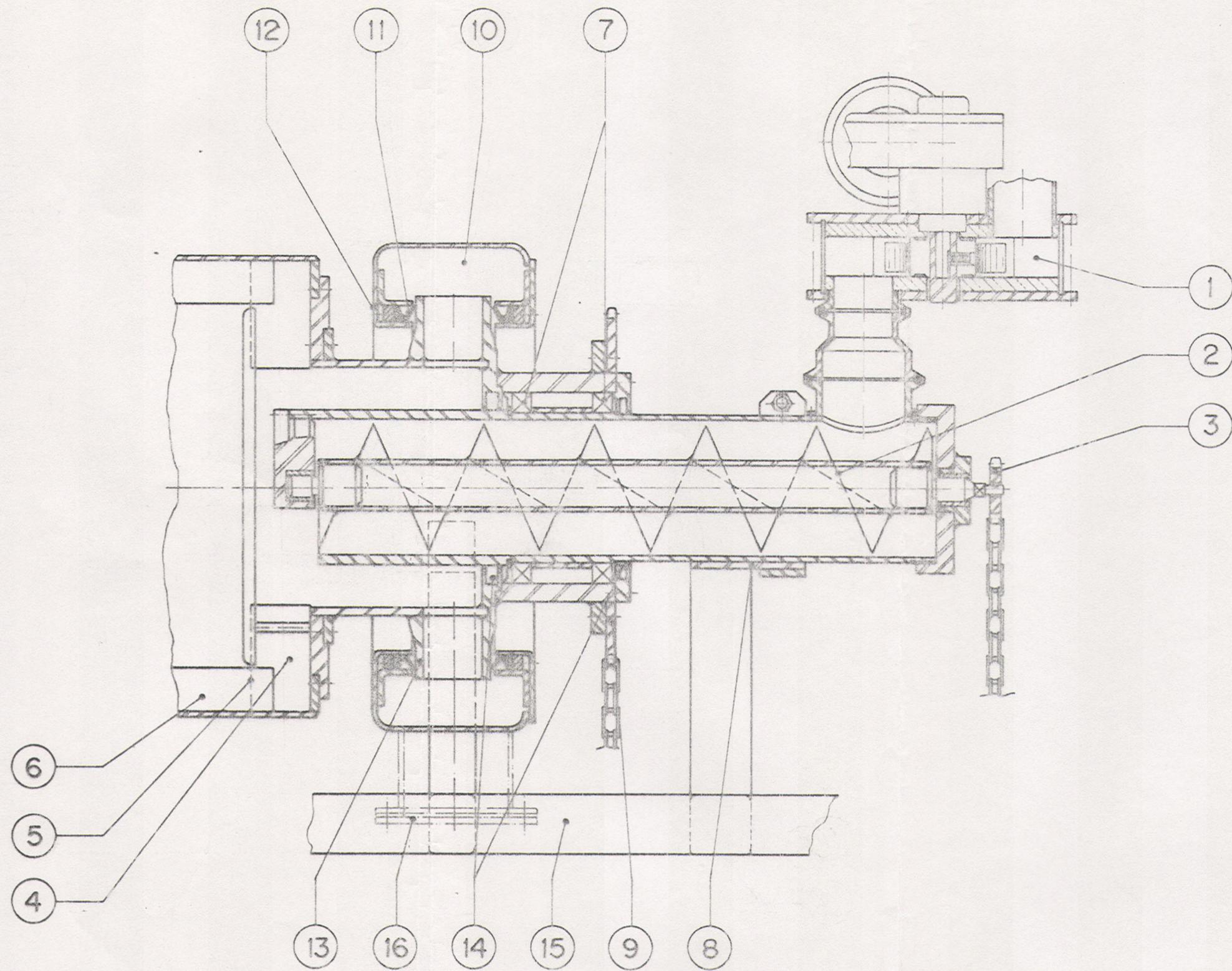
O material selecionado para a constituição das paredes da cavidade e das lâminas dos filtros foi o aço inoxidável de classificação ABNT 304, de aplicação consagrada em partes que entram em contacto com o alimento. Ele preenche de

maneira plena os requisitos exigidos dos materiais de construção contidos na mencionada norma inglesa referentes à inércia química, estabilidade mecânica, acabamento superficial, facilidade de ser trabalhado mecanicamente e de junção por soldagem. Este material também apresenta a característica de não ser magnético e de conduzir satisfatoriamente a corrente elétrica, o que vem favorecer a reflexão das microondas sem absorção e o confinamento do campo eletromagnético dentro do volume da cavidade.

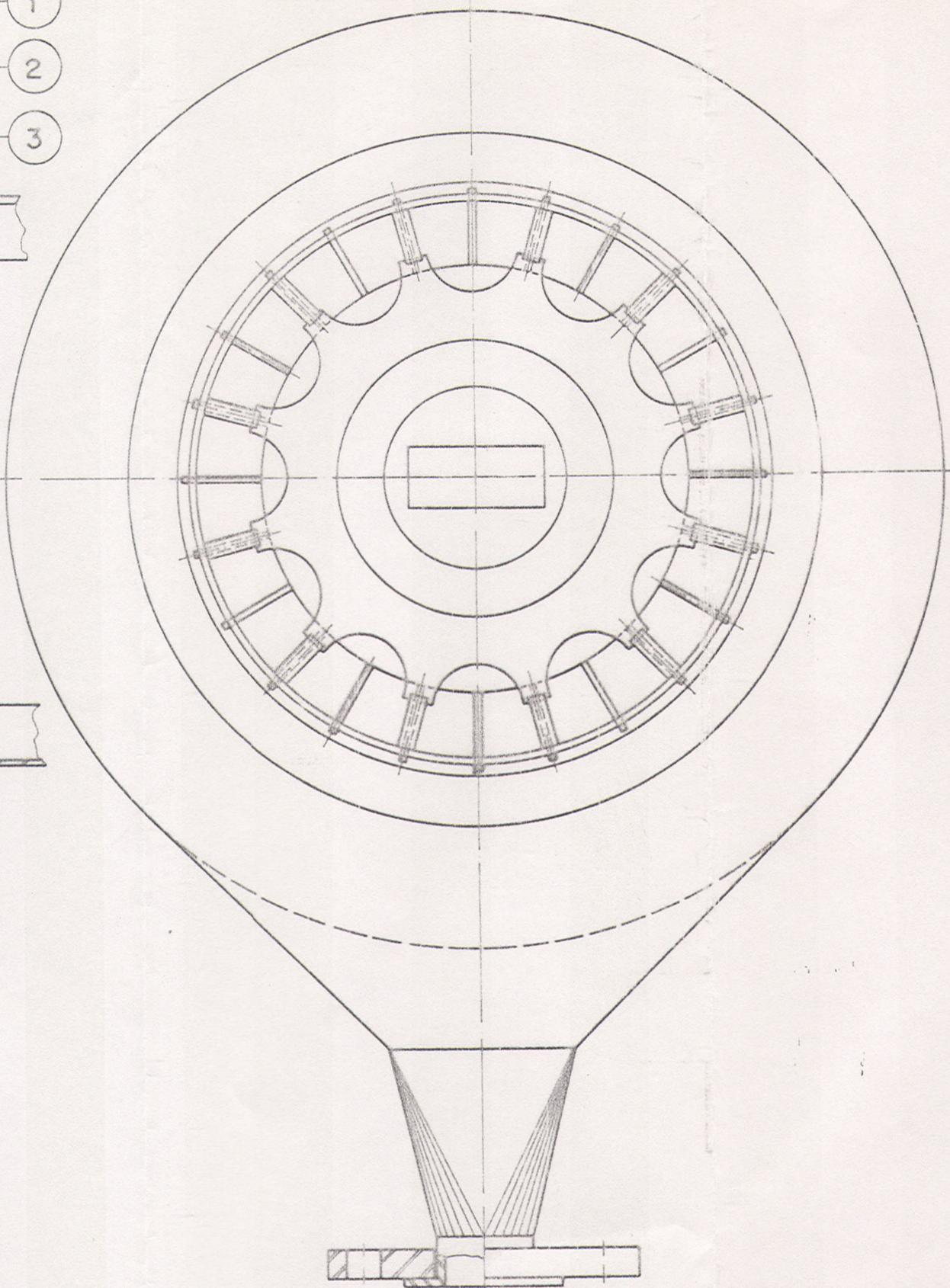
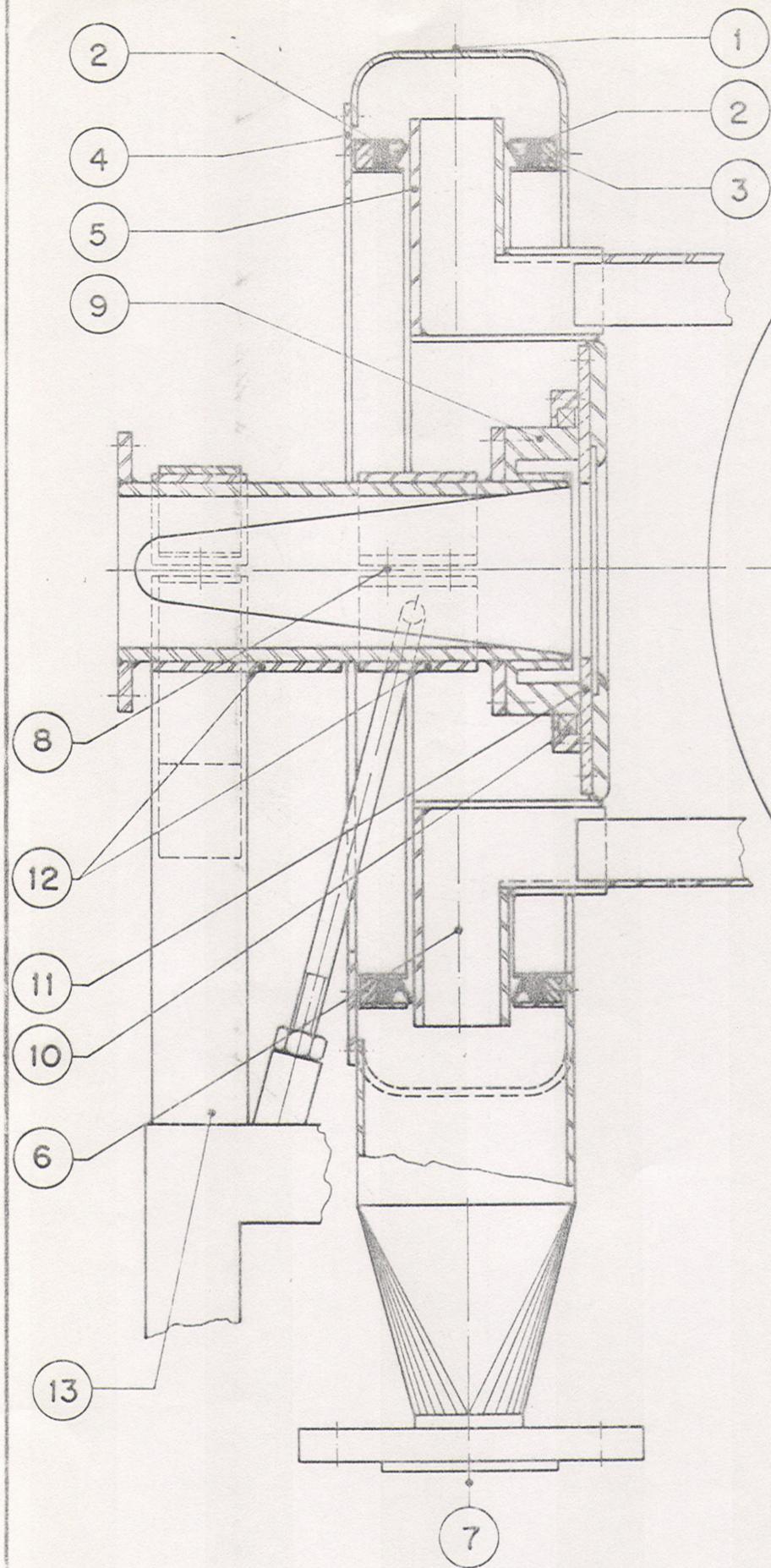
Nos compartimentos do secador exteriores à cavidade de aplicação das microondas, também foi escolhido o aço inoxidável ABNT 304 como o material básico de constituição de suas partes, bem como observadas, aonde pertinentes, as normas construtivas higiênico-sanitárias já mencionadas.

Os desenhos das Figuras 25 e 26 seguintes representam os detalhamentos das concepções construtivas originais das cabeceiras do lado da entrada e do lado da saída do produto, respectivamente, do corpo principal do secador.

A Figura 25 corresponde a um arranjo relativamente mais complexo, porque envolve a necessidade de manusear o produto granulado úmido de modo conveniente, simultaneamente com o direcionamento adequado do ar circulante, preservando-se a condição de estanqueidade do sistema em relação a possíveis escapes de ar ou gás ou mesmo produto para o exterior. Além disto os espaços junto à câmara estacionária de passagem de ar, lado de entrada do produto, são mais limitados, principalmente por exigências da montagem e desmontagem das partes, o que faz com que os dimensionamentos se tornem críticos. Assim, por exemplo, nos canais por onde circula o ar existem expansões e contrações em espaços muito curtos,



PROJETOU	NOME	DATA	CONVÊNIO FIPEC-BB/UNICAMP-FEA.
VERIFICOU			
DESENHOU			
ESC.	DESCRIÇÃO	EM SUBSTITUIÇÃO DE:	
	VISTA EM CORTE DA CABECEIRA DE ENTRADA DO PRODUTO NO SECADOR.	SUBSTITUIDO POR:	
		DESENHO Nº	
		FIGURA - 25	



PROJETOU	NOME	DATA	CONVÊNIO
VERIFICOU			FIPEC - B.B./UNICAMP - F.E.A.
DESENHOU			EM SUBST. DE
ESC.	DESCRIÇÃO		SUBST. POR
	VISTA EM CORTE DA CABECEIRA DE SAÍDA DO PRODUTO NO SECADOR		DESENHO Nº
			FIGURA - 25

que provocam, além de uma certa perda de carga no fluxo de ar, também turbulências que vão interferir com o escoamento do produto granulado. Isto, além de causar o arraste do produto por vias diferentes da entrada do aplicador, o qual pode ir parar até no ciclone coletor (posição 20 da Figura 23), também pode acarretar erros de medida da vazão mássica de alimentação do secador.

A válvula rotativa (item 9, Figura 23) pode ser utilizada, de forma alternativa, para alimentação da matéria-prima granulada (item 1, Figura 25). De fato, em função desta alimentação, ela foi dimensionada para proporcionar uma dosagem volumétrica de $367,23 \text{ cm}^3$ por rotação; o acionamento é feito por um moto-reductor de corrente contínua de 100 watts, diretamente acoplado, equipado com controlador que possibilita a variação da velocidade entre 1 e 119 RPM no eixo da válvula, de modo que o intervalo de dosagem está situado entre 0,367 e 43,70 litros/min. O controle é remoto, através de um botão controlador de escala percentual, de ajuste manual, situado no painel de controle, (item 36, Figura 23). Nesta opção ela encontra-se ligada à montante da rosca de alimentação (2), Figura 25. A rosca de alimentação foi dimensionada para proporcionar um deslocamento volumétrico de $241,28 \text{ cm}^3$ por rotação, para um grau de enchimento da mesma de 45 %. O acionamento da rosca é atualmente feito por um moto-reductor de corrente contínua de 736 watts, equipado também com controlador remoto a partir do painel de controle (36), Figura 23, que possibilita a variação da velocidade entre 0,1 e 78,9 RPM no eixo da rosca, através de transmissão (item 3, Figuras 23 e 25) por um par de engrenagens com

corrente de rolos, de modo que o intervalo de dosagem está situado entre 0,024 e 19,04 litros/min. Deve ser observado que a capacidade volumétrica máxima da rosca (2) de 19,04 litros/min representa apenas cerca de 44 % da capacidade da válvula rotativa (1), o que poderia se constituir em problema se o ajuste desta fosse para uma vazão mássica de produto maior do que a que a rosca (2) é capaz de absorver. No entanto, esta é uma hipótese que não tem chance de ocorrer, pois o intervalo de vazões mássicas de um universo de produtos granulados que poderiam ser processados no protótipo corresponde a deslocamentos volumétricos que se situam em valores bem inferiores ao limite dos 19,04 litros/min. A razão desta aparente discrepância de critérios nas especificações dos acionamentos da válvula (1) e da rosca (2) deveu-se mais à circunstância da falta de opções diante da não-disponibilidade de mais modelos de moto-variador-redutores por parte dos fornecedores nacionais. O produto úmido é descarregado pela rosca (2) junto às aberturas das aletas do filtro de microondas (4), através das quais ele escoar por gravidade até ganhar espaço nas aberturas de entrada do corpo cilíndrico (5), às cabeceiras das chicanas (6).

O tubo cilíndrico, dentro do qual gira a rosca transportadora (2), foi escolhido com espessura de parede compatível com a rigidez exigida para funcionar como um eixo de apoio, suportando o par de rolamentos (7), para permitir a rotação do aplicador, e de outro lado apoiando-se sobre o suporte (8) [ou (15A), Figura 23].

O sistema de acionamento do aplicador cilíndrico rotativo está constituído de moto-variador-redutor de CA, de

736 watts, 220 V, trifásico, 60 Hz, com transmissão final por corrente de rolos & engrenagem (9), Figura 25, que permite ajustar manualmente a rotação entre 7,3 e 36,5 RPM.

A mesma Figura 25 ilustra a câmara estacionária de passagem de ar (10), dentro da qual um par de anéis perfilados (11), alojados em canaletas circulares, exercem a função de vedadores dinâmicos contra o escape de ar ou gases ou partículas sólidas para o exterior e/ou contra a passagem de impurezas de fora para dentro do secador. O contacto dos anéis com as superfícies do rotor (13), assim como a regulagem da pressão do encosto, são feitos com o auxílio do anel metálico trazeiro dotado de múltiplas molas e parafusos de ajuste (12). Função similar é desempenhada pelos anéis de feltro (14), que impedem eventuais contaminações do alojamento dos rolamentos (7) pelo produto ou, vice-versa, evitando possíveis fugas de lubrificante que poderiam contaminar o produto ou vazar para o exterior. A câmara estacionária (10) está apoiada, em ambas as laterais, sobre uma armação (15), elaborada de perfil tubular de aço de seção quadrada, que serve de suporte para o corpo principal do secador. Na sua parte central inferior está prevista a construção de uma saída com portinhola de acesso (16) a fim de ser facilitada a limpeza e a manutenção do sub-conjunto.

A Figura 26 representa em detalhes as soluções adotadas na construção da cabeceira do secador, no lado da saída do produto. Percebe-se claramente a natureza distinta das exigências de projeto para este sub-conjunto, embora seja adotada, para o sistema de vedação dinâmica do ar dentro da câmara estacionária (1), a mesma solução construtiva daquele da Figura 25, descrito anteriormente, ou seja, com um par de

aneis (2) alojados nas canaletas (3) esfregando contra as superfícies frontais da flange da cavidade cilíndrica rotativa (5), com regulagem do aperto mediante os parafusos (4). O produto seco descarrega por gravidade, após atravessar os percursos em "L" das aberturas das aletas do filtro de microondas (6), em direção à saída afunilada dotada de válvula-borboleta (7).

A peça de bronze (8), de transição de guia de onda retangular para circular, tem rigidez suficiente para suportar a bucha de aço inoxidável (9), sobre a qual está montado o rolamento (10) de apoio da cavidade cilíndrica rotativa (5). A bucha (9) foi projetada com uma ranhura circular de profundidade tal que correspondesse a uma distância em "L" equivalente a $\lambda_g/4$, constituindo-se em uma estrutura de curto-circuito ("choke") da conexão rotativa formada pela junção da face da bucha (9) contra a placa de deslizamento de latão (11), solidária à cavidade cilíndrica rotativa (5). Isto evita qualquer fuga de microondas pela junta móvel (Collin, 1979). Na extremidade oposta em relação ao rolamento (10) a peça de transição (8) apoia-se sobre o suporte (12) [ou (15B), Figura 23], que é solidário com a estrutura perfilada (13) de sustentação do secador. No lado do guia retangular da peça de transição (8) encontra-se adaptada uma flange padronizada UG-53/U, a qual acha-se aparafusada ao tóco triplo (39), Figura 23.

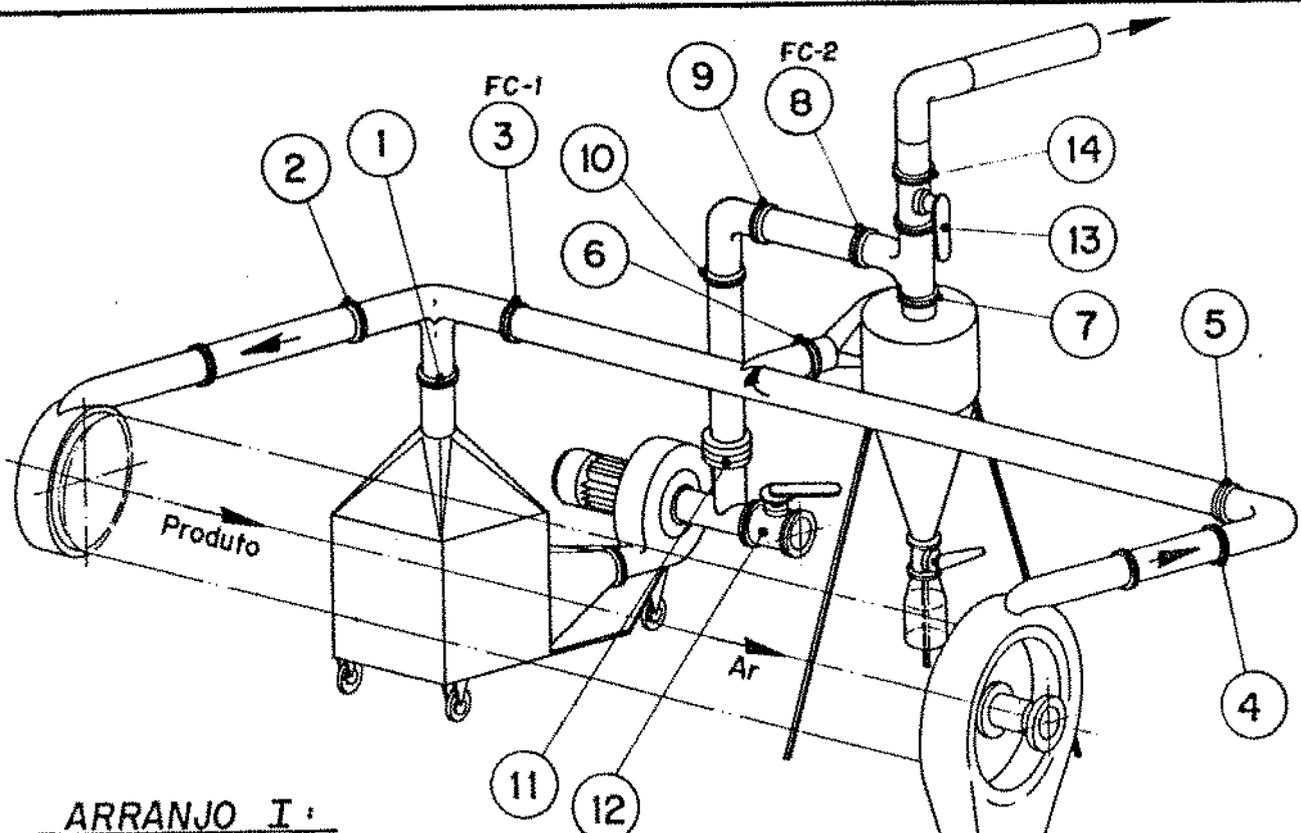
O arranjo dos componentes auxiliares em relação à estrutura principal do secador levou em conta a necessidade econômica do aproveitamento das mesmas partes constituintes para duas montagens distintas : escoamento do produto e fluxo de ar em corrente paralela (arranjo I - Figura 27), ou

em contra-corrente (arranjo II - Figura 27). Assim, pois, basta intercambiar as posições da curva 90° (1) e da curva 90° de 3 saídas (2) entre si, complementando com a mudança de posicionamento da flange cega FC-1 da posição 3 no arranjo I para a posição 2 no arranjo II. Uma outra flange cega FC-2 é normalmente utilizada na posição (8) quando não se deseja operar o sistema com recirculação do ar.

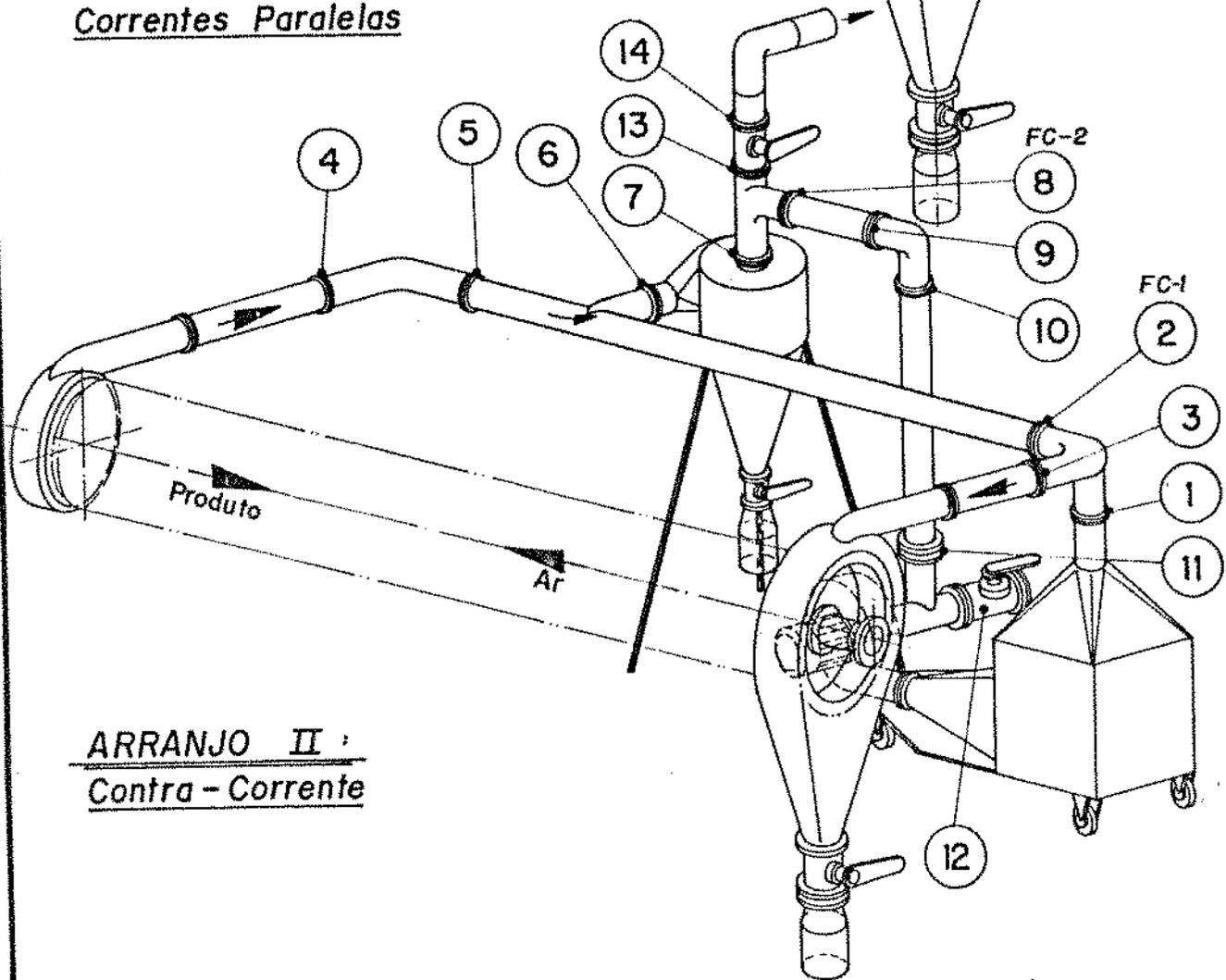
4.8. Construção e Instalação do Protótipo

Para a construção do protótipo foram elaborados todos os desenhos de cada peça individual, contendo as dimensões e, principalmente, as tolerâncias das medidas muito bem definidas. Isto porque, por conveniência da execução e devido à maior ou menor especialidade das oficinas para cada tipo de serviço, as partes ou sub-conjuntos do sistema foram distribuídos simultaneamente entre vários pequenos fabricantes, para finalmente todos os componentes serem reunidos na oficina de um dos escolhidos, para a montagem do conjunto, instalação e teste final antes da entrega.

Ficaram sob a nossa responsabilidade as especificações e aquisições dos inúmeros materiais de confecção das diversas peças, muito dos quais foram conseguidos graciosamente, extra-orçamento, a título de colaboração das firmas fornecedoras. À medida que iam sendo adquiridos, os materiais eram repassados para as oficinas responsáveis pela execução das partes. Muitas vezes as especificações e aquisições se referiam a componentes funcionais autônomos, segundo uma determinada padronização, como foram os casos das válvulas-borboleta, das flanges e pestanas, dos



ARRANJO I:
Correntes Paralelas



ARRANJO II:
Contra - Corrente

DESCRIÇÃO Configurações alternativas dos dutos de circulação de ar			CONVENIO FIPEC - B.B. / UNICAMP - F.E.A
ESCALA S/E	DES. Edson APROV.	DATA 12, 3, 91 DATA / /	DES. Nº FIGURA - 27

ventiladores, das resistências elétricas aletadas, dos moto-variador-redutores, dos rolamentos, etc.

Os serviços foram classificados genericamente como sendo dos tipos : usinagem, caldeiraria e montagem, e para cada um deles foi feito um rigoroso acompanhamento durante as etapas da sua execução. Exemplificando, muito foi discutido sobre o processo mais adequado para a usinagem parcial de certas partes que compõem o rotor ou aplicador cilíndrico rotativo, sua incorporação ao conjunto através de soldagem, seguida da usinagem final das partes, que deviam respeitar condições de concentricidade, ortogonalidade, alinhamento, etc., com o auxílio de dispositivos coadjuvantes da usinagem requerida.

A fabricação do painel elétrico foi encomendada a uma empresa especializada, após ter sido definido o esquema elétrico original, constante do Apêndice C, muito embora tivesse sido necessário proceder-se mais tarde a algumas modificações e/ou adaptações em relação à versão original.

Quanto à instalação do conjunto, a oficina encarregada da montagem final do aplicador e de todo o sistema gerador e circulador de ar quente, também procedeu a uma pré-instalação e funcionamento preliminar do conjunto, ligado pelo painel elétrico, antes dele deixar a fábrica.

4.9. Acoplamento à Fonte Geradora de Microondas

Mais tarde, após a entrega de todos os componentes do sistema, já tendo chegado também todos os itens importados, foi realizada a montagem *in loco* e procedida a instalação definitiva de todo o conjunto, incluindo o sistema gerador de microondas, dentro de um laboratório exclusivamente

destinado à finalidade, que recebeu a denominação de Laboratório de Microondas (LMO), do DEA/FEA/UNICAMP.

Um detalhe a mais, que foi necessário cuidar, refere-se à voltagem de alimentação do gerador de microondas Cober S6F, que era para funcionar em 480 V. Como fora especificada a voltagem local de 220 V, por ocasião da importação, aquele fabricante, para não alterar o seu padrão de fornecimento, houve por bem enviar um transformador trifásico auxiliar de 220 X 480 V, de capacidade 15 kVA. Foi preciso instalar este transformador, próximo ao quadro geral de distribuição de força do prédio do DEA, como elevador de tensão e de lá trazer um cabo trifásico ligado ao secundário de 480 V até junto ao lugar previsto para o gerador Cober S6F no LMO. Como medida de segurança, foi providenciada a instalação de um fio terra exclusivo para o LMO, para o aterramento de todos os itens de equipamentos elétricos.

Conforme requisitos do gerador Cober S6F, especificados à página 111, sob o item 4.6, foi necessário prever-se um ponto de abastecimento de água filtrada à razão de 6 l/min, a uma pressão de $3,3 \text{ kg/cm}^2$, dentro do LMO. Para isto foi adquirido um filtro Cuno Aqualar, com célula filtrante de celulose, capaz de tal desempenho e retendo toda e qualquer partícula de dimensão igual ou superior a 5μ . Outro ponto, independente do anterior, foi instalado posteriormente, para atender a necessidade de água para uma carga de água que seria utilizada mais tarde durante a etapa de "Ajustes Elétricos de Casamento de Impedâncias" (Item 4.13 adiante).

As fotos da página seguinte, da Figura 28, ilustram como foram instalados os principais componentes do sistema, inclusive instrumentação e controle (item 4.10 adiante).

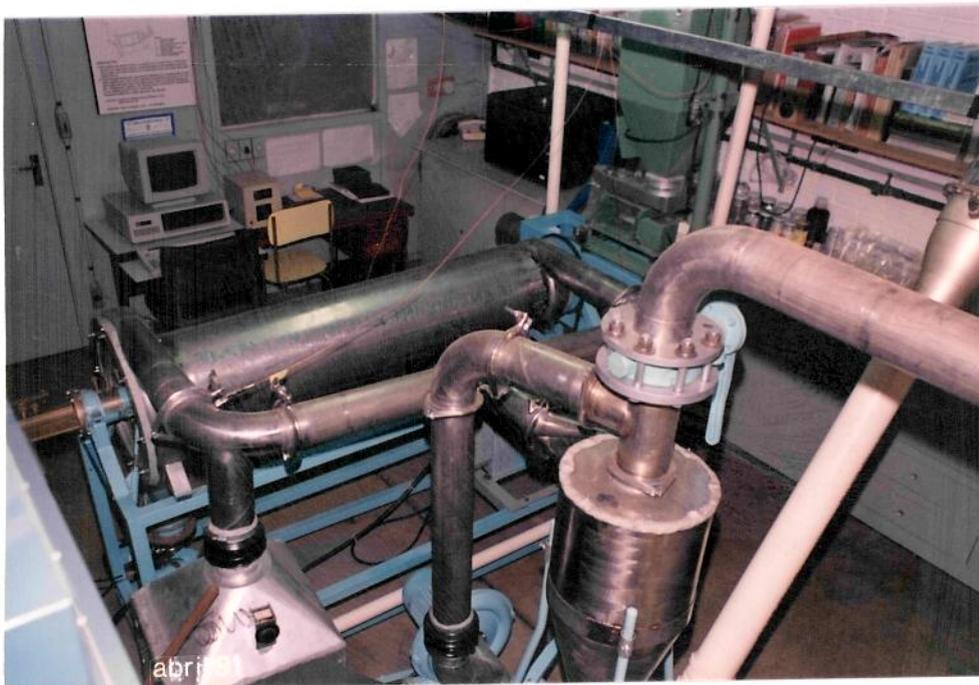


Figura 28 Arranjo dos principais componentes do sistema a microondas dentro do LMO do DEA/FEA

4.10. Provisão da Instrumentação e Controle do Sistema

A instrumentação mais singela que está presente neste protótipo de secador combinado microondas-ar quente é um sistema indicador-controlador de temperatura eletrônico COEL modelo GMP-0, automático, com bulbo sensor tipo "J", para controlar um dos três bancos de resistências elétricas aletadas de 8,1 kW do aquecedor de ar (17), Figura 23, conforme especificado anteriormente sob o item 4.6.

Além disto, foi prevista, em uma primeira etapa, a instalação de um certo número de pares termoelétricos, em pontos estratégicos, a fim de proporcionar a facilidade de monitoração da variável temperatura não somente em relação ao produto, como também no que concerne às condições do ar. Foram utilizados termopares blindados de isolação mineral, do tipo "T" (Cobre-Constantan), dotados de conectores compensados e ligados a fios de extensão tipo "TX", de fornecimento da empresa ECIL. Foram instalados em número de 7 (sete), para monitoração das seguintes temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) :

t_1 = temperatura do ar ambiente

t_2 = temperatura (úmida) do ar ambiente

t_3 = temperatura do produto (entrada)

t_4 = temperatura do produto (saída)

t_5 = temperatura do ar quente de secagem (entrada)

t_6 = temperatura do ar quente de secagem (saída)

t_7 = temperatura (úmida) do ar quente de secagem (saída)

Estes termopares foram ligados, através dos fios de extensão "TX", a uma placa de interface de entradas

analógicas ECI, por sua vez acoplada a uma expansão de um microcomputador PC/XT. Como os fios "TX" não possuíam blindagem de nenhum tipo, surgiram problemas de interferência motivados pela presença, ao ligar o gerador S6F, do campo eletromagnético de microondas de 2450 MHz.

Este mesmo tipo de fio de extensão foi enviado para um fabricante de condutores para recobrimento com uma trança de cobre, para fins de ser obtida uma blindagem contra os ruídos eletromagnéticos. Apesar destes esforços, não houve ainda, aparentemente, uma solução para este problema, provavelmente devido à impossibilidade de se anular os ruídos magnéticos, pelo fato de o fio não ter sido torcido, previamente ao recobrimento com a trança metálica (Paletta, 1988).

Além das dificuldades para serem superados os problemas dos ruídos eletromagnéticos, houve também descontinuidade de atendimento por parte de duas firmas nacionais fabricantes de placas conversoras A/D no sentido da provisão do "software" mais adequado para o correto funcionamento do sistema de aquisição de dados (temperaturas) proposto, o qual deverá ser oportunamente selecionado.

Uma isenção total de problemas de ruídos desta natureza poderia ser alcançada, opcionalmente, se fossem substituídos os termopares por sensores do tipo óptico, que estão completamente imunes à influência do campo eletromagnético das microondas. Esta é uma tecnologia que vem sendo aplicada há cerca de 10 anos a nível internacional (Cheng, 1981), e que começa a despontar nacionalmente (Soares e Dantas, 1990).

Outra alternativa para se escapar dos ruídos eletromagnéticos é através do emprego de uma outra categoria

de sensor óptico, ou seja, baseado na emissão de radiação infra-vermelha. Ele se mostra particularmente interessante quando se trata de medir a temperatura de um produto, submetido a tratamento de radiações eletromagnéticas, dentro da cavidade de aplicação das microondas. Foi com esta intenção que foi especificado e importado o monitor de temperatura infra-vermelho ref. PTM-1, da Cober, já descrito sob o item 4.6.

Uma possibilidade adicional para se conhecer o perfil de temperaturas no interior do aplicador das microondas, além dos métodos já citados no item 2.6 anterior, é através de uma lâmina plástica recoberta com cristal líquido, que possui a faculdade de assumir diferentes colorações de acordo com o nível energético (térmico) de cada ponto, decorrente da distribuição espacial do campo eletromagnético das microondas, conforme visto no item 2.3 deste trabalho. É o que se pretende explorar mais adiante face à necessidade de se mapear a distribuição das microondas na cavidade.

4.11. Ensaios Mecânicos e Medidas Corretivas

Quando o protótipo foi instalado no LMO do DEA, a primeira providência tomada foi a de proceder-se a uma exaustiva verificação das condições mecânicas do sistema, quando submetido a rigorosos testes de funcionamento, com produto ou em vazio, sob as mais diversas condições operacionais. Esta verificação preliminar objetivava não apenas estabelecer uma calibração geral do sistema no que respeita aos parâmetros ajustáveis, como também visava a detecção e correção, o mais cedo possível, de possíveis

irregularidades associadas ao funcionamento de uma ou mais das partes integrantes deste sistema. Com isto, diversos pequenos problemas foram surgindo no decurso da colocação em marcha do conjunto, os quais exigiriam, em maior ou menor grau, a implantação de medidas corretivas.

Entre as dificuldades encontradas, cabe destacar a questão do vazamento de ar ocorrida nos selos dinâmicos (item 11, Figura 25 e item 2, Figura 26) : A escolha inicial do elemento de vedação havia recaído sobre o feltro, como material de constituição do anel circular, que possuía secção transversal quadrada, com uma face esfregando contra a superfície do rotor. Buscando-se constatar se havia fuga de ar no trajeto desde a aspiração (item 31, Figura 23) até a descarga (item 27, Figura 23) foi idealizada a montagem representada no esquema da Figura 23, com duas células de fluxo laminar (itens 30 e 26) dispostas em série. As válvulas de aspiração (29) e de descarga (24) foram deixadas totalmente abertas, com o ar atravessando o sistema em uma única passagem, em contra corrente com o trajeto previsto para o produto, já que uma flange cega, à saída do "T" (23), impedia que houvesse recirculação através da tubulação (34). Os primeiros resultados das leituras de vazão nos manômetros (32) e (33) indicaram, para uma vazão aspirada de 2,477 m³/min, uma vazão de exaustão de 0,756 m³/min, mostrando um vazamento excessivo de mais de 69 % da vazão original! Foram detectadas perdas de ar através das vedações estáticas da porta do carrinho aquecedor de ar. Após uma aplicação de uma guarnição de borracha e uma cuidadosa calafetação com massa plástica sobre os pontos duvidosos, foram virtualmente eliminados os vazamentos do gerador de ar quente. Mas os

vazamentos dos selos dinâmicos permaneceram, acusando ainda uma fuga de ar de mais de 44 % da vazão original. Foi tentada, como medida corretiva, a substituição dos anéis de feltro por outros, também de seções quadradas, porém elaborados de cordoalha de "teflon" trançado, mas sem um resultado satisfatório. Pelo contrário, o torque necessário para manter razoavelmente apertados os anéis contra as correspondentes flanges do rotor, sem garantia da estanqueidade requerida, era excessivo, o que acabava por forçar um consumo de potência acima da capacidade do moto-variador-redutor que compunha o sistema de acionamento original (4) da cavidade rotativa (6). A solução encontrada foi a especificação de um outro tipo de anel, de seção perfilada especial, flexível, elaborado de borracha nitrílica. Trata-se do produto padronizado referência "V-Ring", modelo "L", da Vedabrás, de dureza 60 shore A, para pressão abaixo de $0,3 \text{ kg/cm}^2$, velocidade inferior a 40 m/s, próprio para operar dentro do intervalo de temperatura entre -50°C e $+110^\circ\text{C}$. A montagem dos anéis foi feita sobre a parede correspondente ao diâmetro interior da canaleta circular, com o aro de aço inoxidável que suporta os parafusos de regulagem da posição de encosto colocado entre o anel e o fundo da canaleta. O friso do anel era encostado sobre a face a vedar do rotor e daí eram ajustados os parafusos de regulagem (item 12, Figura 25 e item 4, Figura 26). É possível também a aquisição destes anéis fabricados em borracha de silicone, para poder funcionar a temperaturas mais altas, caso se faça necessário. Uma vez substituídos estes anéis, não houve praticamente mais nenhum vazamento de ar através dos selos dinâmicos testados. Outros pontos

críticos que podem estar sujeitos a vazamento de ar são as zonas de vedação estática entre as partes desmontáveis do cabeçote da cavidade rotativa, do lado da entrada do produto, que deverão ser reavaliados e convenientemente redesenhados em um projeto futuro. Por se tratar de um protótipo, buscou-se prevenir por enquanto a possibilidade de escapes de ar através da aplicação externa de massa plástica de calafetar junto a todos estes pontos críticos.

Outro problema que merece ser citado diz respeito a um caso de alimentação de um produto de natureza específica, a saber, arroz em casca hidratado, para o qual a válvula rotativa do ítem 1, Figura 25, não funcionou a contento, por causa de o produto apresentar tendências a grudar nas paredes do dispositivo. A dificuldade foi parcialmente superada por meio do emprego de um alimentador vibratório de grãos de construção padronizada modelo VE-15, adquirido do fabricante NORMA Automação Ltda., que dispunha de recurso de variação da intensidade de vibração através de um regulador de ajuste manual por botão. Para atender à exigência de alimentar o produto contra a pressão do ar de secagem, procedeu-se a uma adaptação do alimentador vibratório, mediante um elemento intermediário flexível de vedação da passagem do produto saindo da calha vibratória e entrando na extremidade da rosca helicoidal (ítem 2, Figura 25). Assim mesmo a alimentação do produto mostrou-se irregular, constituindo-se em fonte de erro de calibração da vazão mássica do produto à entrada do secador, que requer que outras providências sejam tomadas no futuro para sanar esta irregularidade. Foi observado também que o funcionamento da rosca helicoidal (ítem 2, Figura 25) foi bastante irregular

com este mesmo produto, arroz em casca hidratado, cujos grãos encunhavam entre a lâmina do helicóide e a parede cilíndrica envolvente da rosca, tendendo a aumentar o atrito e o torque necessário para o acionamento da rosca, assim como contribuindo para o crescimento do índice de quebra do produto. Para tentar sanar este problema, a rosca helicoidal foi substituída por um novo modelo de transportador horizontal, equipado com paletas impulsoras de aço inoxidável, com lâminas raspadoras de "teflon" nas extremidades, com possibilidade de ajustagem da folga dos raspadores mediante roscas e porcas de aperto (Figura 29).

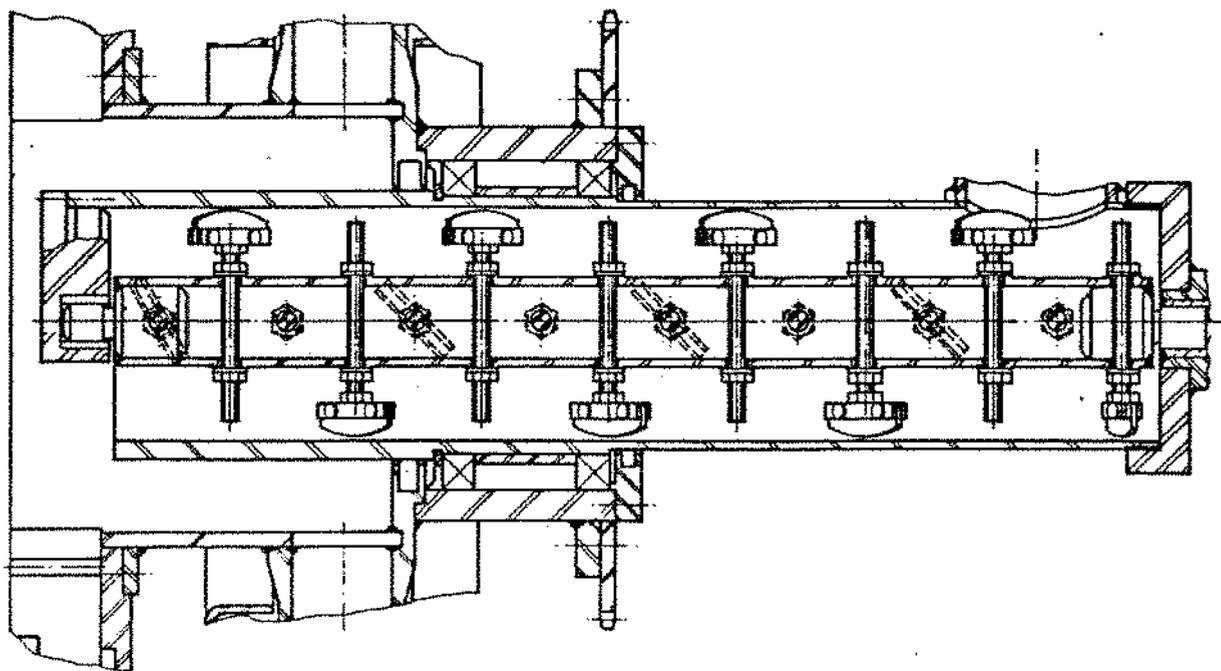


Figura 29 Transportador alternativo horizontal de paletas

Outra razão que conduziu à mudança para o transportador de paletas é que este é um tipo de impulsor de produtos

sólidos granulados de característica mais universal, atendendo a uma gama mais ampla de materiais, de natureza e de níveis de umidade mais diversificados.

Foi feita uma experiência com a válvula rotativa do item 1, Figura 25, a qual, quando testada com o produto seco, a saída da válvula de descarga (item 8, Figura 23), funcionou muito bem, regulando perfeitamente o escoamento do produto em direção ao sistema de descarregamento pneumático auxiliar esquematizado na Figura 23.

Finalmente, resta ser feito um comentário acerca da necessidade de ser prevista uma portinhola para inspeção e limpeza no fundo da câmara estacionária (5), Figura 23 (ou item 16, Figura 25). Isto viria facilitar a observação de qualquer acúmulo de produto nesta região, por deficiência de regulagem da vazão mássica do produto em relação à regulagem do fluxo de ar, principalmente quando se tratar de operação em contra-corrente, desde que a tampa da portinhola venha ser feita, logicamente, de um material transparente.

4.12. Testes Elétricos de Fugas de Radiação

Uma série de testes, similares aos descritos no item 4.5 : "Ensaio Experimental de um Modelo Reduzido", foram feitos, com a diferença que, nesta série, o instrumento utilizado foi um medidor de potência elétrica para detecção de vazamento de microondas em 2450 MHz marca Holaday mod. HI1501 do tipo portátil, operado à bateria.

Para este objetivo foi posto em funcionamento o gerador Cober S6F, alimentando o sistema até a potência máxima de 6 kW, tendo sido tomada na ocasião a precaução adicional de se

instalar um circulador de 3 portas (Cober ST89-1021) no guia de onda entre o gerador de microondas e o aplicador, devidamente conectado a uma carga resfriada a água (Cober ST89-1019), a fim de dar conta de absorver a potência de microondas refletida do sistema.

Ajustada a escala do instrumento no intervalo $0/2 \text{ mW/cm}^2$ não foi possível observar nenhuma fuga de radiação de microondas perceptível, a não ser quando o sensor do aparelho foi colocado próximo da junta rotativa (item 11, Figura 26). Neste caso o vazamento atingiu um valor médio de 1 mW/cm^2 , enquanto a cavidade cilíndrica girava com uma rotação ao redor de 15 RPM, embora um giro maior ou menor que este valor não tenha afetado esta média.

O resultado deste teste veio confirmar que o protótipo encontra-se perfeitamente enquadrado dentro das normas internacionais de segurança e homologação no que concerne à tolerância máxima de vazamento de radiação de microondas, como já foi discutido sob os itens 2.10 e 4.5 : "Dispositivos de Regulamentação da Segurança das Instalações" e "Ensaio Experimentais de um Modelo Reduzido", respectivamente.

4.13. Ajustes Elétricos de Casamento de Impedâncias

A impedância do gerador e a da carga são normalmente casadas com a impedância característica da linha transmissora de interconexão de modo a se obter a máxima transferência de potência para a carga. A impedância pode ser medida e calculada por meio de um guia fendido e uma carta de Smith (Decareau e Peterson, 1986). A ROE (Razão de Voltagens de Ondas Estacionárias), conforme já foi definida

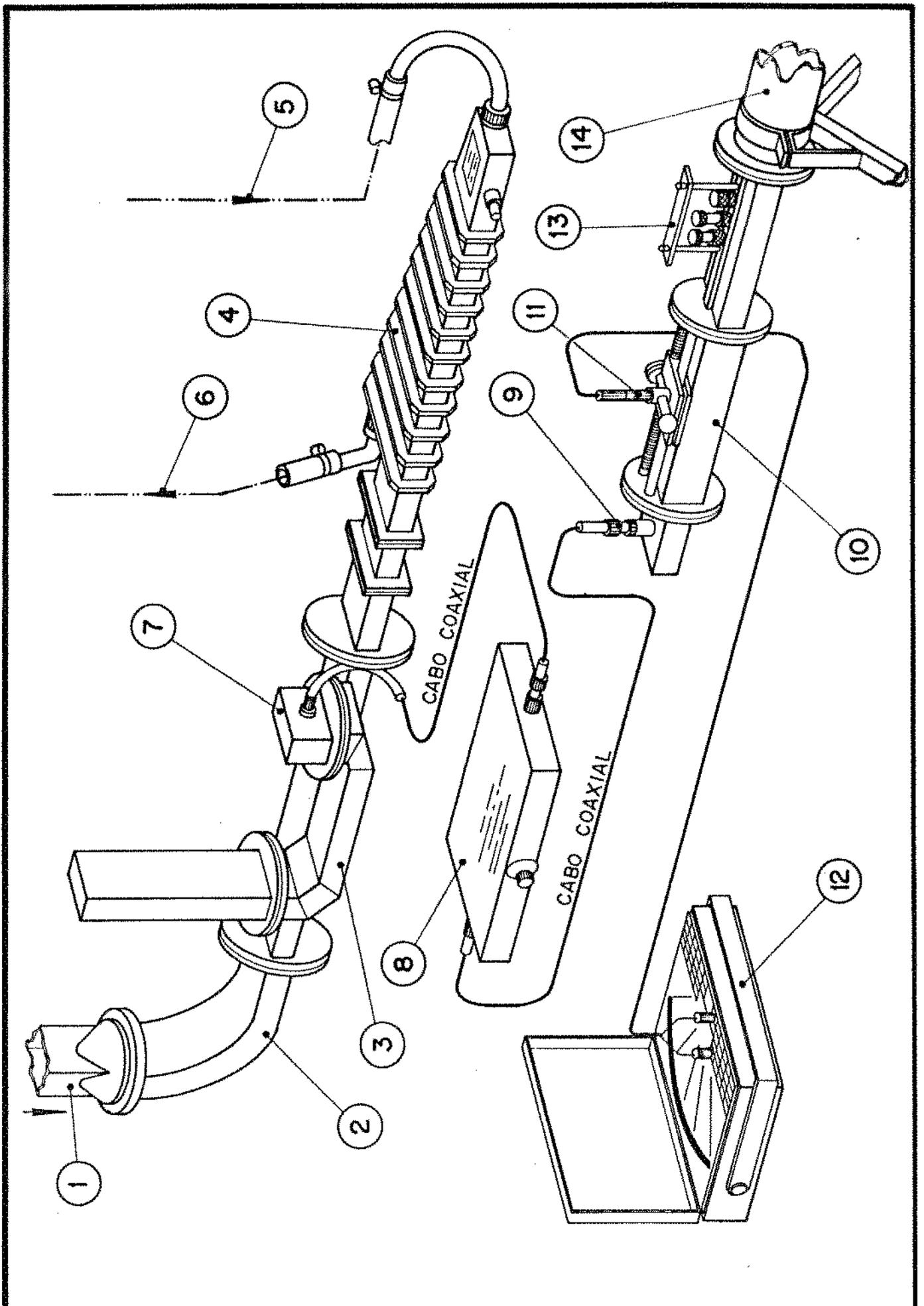
no item 2.3.3.: Ondas Estacionárias, e a distância de uma voltagem mínima da carga, são medidas com o guia fendido e os resultados são usados para calcular a impedância sobre a carta de Smith. Uma vez que os seus valores tenham sido identificados, as impedâncias podem ser casadas ou a falta de casamento pode ser compensada pela inserção de um dispositivo de casamento de impedância reativa em uma localização adequada do circuito.

Se as impedâncias do gerador e da carga são casadas à impedância característica Z_0 da linha, o gerador entregará a potência máxima para a carga, independentemente da extensão da linha. Se as impedâncias do gerador e da carga estiverem casadas entre si, mas não com a impedância característica da linha, a linha deverá ter uma extensão múltipla de meios comprimentos de onda (ressonante), de modo a ter a máxima transferência de potência.

A técnica utilizada neste trabalho para o casamento de impedâncias empregou o dispositivo chamado de "toco triplo", que são postes metálicos inseridos no guia de onda, de comprimentos ajustáveis, que introduzem uma impedância reativa no circuito.

A montagem do instrumental para os ajustes elétricos de casamento de impedâncias está esquematizada na Figura 30, cuja numeração de referência corresponde à instalação da seguinte aparelhagem :

- 1) Guia de onda flexível Cober mod. FWG24
- 2) Curva de guia de onda padrão WR284 de 90°-tipo "E"
- 3) Acoplador de guia de onda de 37 dB, com atenuador
- 4) Carga resfriada a água Thomson-CSF mod.TH20010
- 5) Entrada de água de resfriamento



DESCRIÇÃO Montagem do instrumen- tal p/ os ajustes elétricos de casamento de impedância.			CONVENIO FIPEC - B.D. / UNICAMP - F.E.A	
ESCALA S/E	DES. Edson APROV.	DATA 12, 3, 91	DES. Nº	FIGURA - 30

- 6) Saída de água de resfriamento
- 7) Adaptador coaxial Tipo N (transição)-Narda mod.614A
- 8) Atenuador Narda mod.791F/M
- 9) Adaptador coaxial Tipo N (transição)-MDL/284AC106-2E
- 10) Guia de onda com linha fendida, equipado com volante de ajuste da posição do carro do sensor
- 11) Sensor-detector de cristal Narda mod.503, com diodo 4824
- 12) Volt-miliamperímetro DC/AC analógico ICE mod.680R
- 13) Tóco triplo
- 14) Transição guia de onda retangular para circular

4.13.1. Teste em Vazio

Para o teste em vazio o gerador Cober foi ligado com uma potência de saída de 1000 watts, ajustando-se preliminarmente o atenuador do item 8, Figura 30, em 2 dB. A cavidade de aplicação das microondas foi mantida sem girar, porém foram estabelecidas 24 posições de referência da mesma, correspondendo às 24 aletas dos filtros de entrada e de saída, para fins de medições elétricas para cada posição.

O experimento consistiu na efetivação da medida de dois valores de voltagem, no instrumento (12), à medida que se deslocava o volante de ajuste (10) da posição do carro do sensor (11), para cada uma das 24 posições de giro do aplicador cilíndrico, e para cada ajuste tentativo das posições combinadas do grupo de 3 parafusos do tóco triplo (13). Estes dois valores medidos correspondiam às tensões máxima e mínima do percurso da sonda ao longo do guia fendido (10), sendo que a relação da tensão máxima e tensão mínima é a razão de voltagens de ondas estacionárias (ROE),

conforme foi descrito sob o item 2.3.3. Ondas Estacionárias :

$$ROE = V_{\max} / V_{\min}$$

A distância de máximo a máximo, ou de mínimo a mínimo é igual a $\lambda_g/2$. Os máximos ocorrem onde se somam as ondas incidentes e refletidas, os mínimos onde se subtraem, logo sendo ρ o coeficiente de reflexão, vale a equação já vista em 2.3.3. :

$$ROE = (1 + |\rho|) / (1 - |\rho|)$$

ou seja, tendo achado o ROE pelas medições acima, é possível calcular o coeficiente de reflexão ρ pela equação :

$$|\rho| = (ROE - 1) / (ROE + 1)$$

Como a potência é proporcional ao quadrado da voltagem, a potência refletida será igual a $|\rho|^2 P_o$, onde P_o é a potência incidente na entrada do aplicador. A potência transmitida é portanto dada por $P_t = P_o (1 - |\rho|^2)$.

Os valores de P_t/P_o , expressos percentualmente, foram calculados para diversas combinações de condições mencionadas acima, e encontram-se reunidos em tabela no Apêndice E. As representações gráficas de dois grupos destes valores tabelados do teste em vazio, para as condições do teco triplo 2-4-20, ou seja, primeiro parafuso (mais próximo da carga) a 2 mm para dentro do guia, segundo a 4 mm e terceiro a 20 mm, e 0-5,5-20, estão mostradas na Figura 31, condições (A) e (B), respectivamente. A média do caso (A) para a razão $P_t/P_o \times 100$ foi de 90,3 %, que subiu para 94,4 %

no caso (B), ou seja, melhorando o casamento de impedâncias do sistema em vazio pelo ajuste do tóco triplo de 2-4-20 para 0-5,5-20, mantidas as demais condições inalteradas.

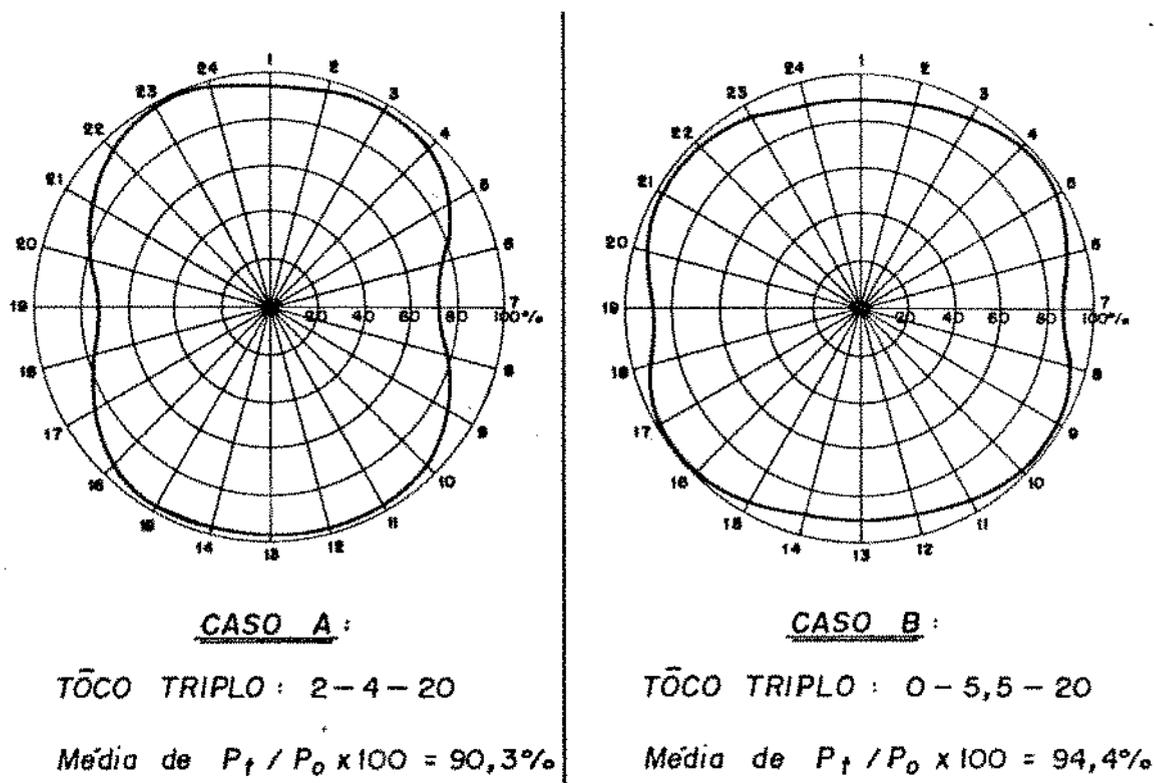


Figura 31 Casamento de Impedâncias - Teste em Vazio :

Variação da intensidade da potência transmitida em função da posição da cavidade, para duas condições de ajuste do tóco triplo.

4.13.2. Teste com Produto

O ensaio tal como descrito acima foi repetido, preenchendo-se a cavidade cilíndrica com 2 kg do produto arroz hidratado em casca (32,93 % bu), que ocupava 0,38 % do volume da mesma, para uma inclinação do cilindro de $1,48^\circ$, isto é, com uma quantia de produto equivalente a um tempo de residência aproximado de 4,5 minutos, na condição de 10 RPM de rotação da cavidade, com vazão mássica de 0,5 kg/min. O

resultado observado foi que, para o mesmo ajuste do tóco triplo de 0-5,5-20, a média da razão $P_1/P_0 \times 100$ foi reduzida drasticamente para 17,7 %, evidenciando que a presença de um material de valor dielétrico bastante distinto em relação ao valor para o ar altera completamente os requisitos para o casamento de impedâncias, requerendo um novo ajuste do tóco triplo. Os dados obtidos encontram-se também tabelados no Apêndice E, de onde foram selecionadas as duas condições representadas na Figura 32, que ilustram no caso (A) o tóco triplo ajustado em 0-5,5-20 e no caso (B) um novo ajuste de 0-0-17,7, que elevou a média para 91,2 %, melhorando o casamento de impedâncias, mantidas as demais condições inalteradas.

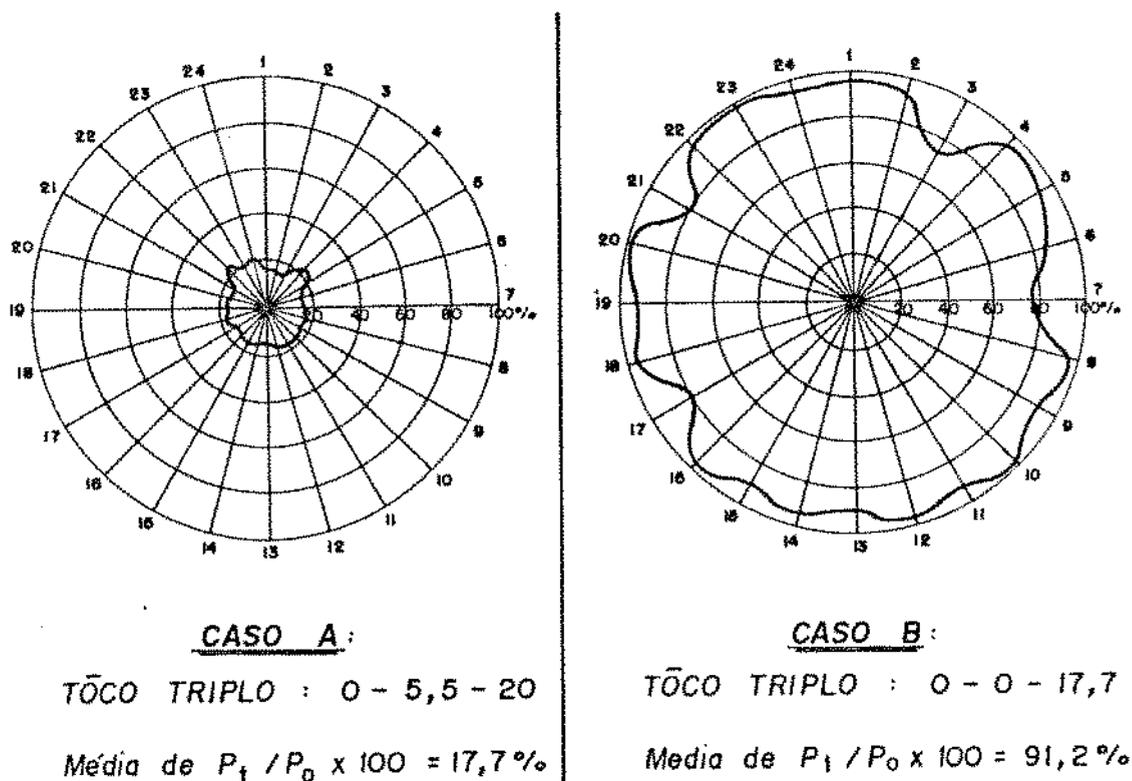


Figura 32 Casamento de Impedâncias - Teste com Produto :

Variação da intensidade da potência transmitida em função da posição da cavidade, para duas condições de ajuste do tóco triplo.

4.14. Avaliação Preliminar do Sistema com Produto

O primeiro produto escolhido para alguns testes preliminares, com a finalidade de avaliação do desempenho operacional do sistema, foi o arroz em casca natural, que havia sofrido um pré-tratamento de hidratação, semelhante àquele que é conduzido como uma das etapas de preparação do arroz parboilizado pelo processo convencional.

O procedimento de parboilização consiste, segundo a Portaria n^o 269, de 17/11/1988, da Secretaria Nacional de Abastecimento do Ministério da Agricultura, no processo hidrotérmico pelo qual o arroz em casca é imerso em água potável, a uma temperatura acima de 58^oC, seguido de gelatinização parcial ou total do amido e secagem.

O arroz em casca natural adquirido no comércio pertencia à classe longo, tipo 1, e era procedente do Rio Grande do Sul. Sua umidade foi determinada em 10,16 % na base úmida (bu). Com base nos dados experimentais de Martinez (1984), foi dada preferência à temperatura de 70 ^oC para a água potável de pré-hidratação do arroz em casca. Fixada esta temperatura, foi feito o levantamento da curva de hidratação do arroz, partindo-se de uma série de amostras de 100 g colocadas simultaneamente em saquinhos de tecido de polipropileno de malha fina, imergindo-os no banho de água potável a 70 ^oC, controlado termostaticamente, e pesando-se sucessivas amostras a cada 15 minutos, a partir de um tempo mínimo de 90 minutos de imersão. As umidades adquiridas pelas amostras correlacionaram bem com os tempos de imersão, e a melhor curva ajustada foi da forma exponencial ($r^2=0,97$), válida para a umidade inicial do arroz a 10,16 %(bu) e para

o intervalo de tempo de 90/200 minutos, conforme a equação :

$$m_2 = 21,243 \times e^{0,0022 t}$$

onde :

m_2 = umidade da amostra, %(bu), após o tempo t

t = tempo de imersão, min

Tendo-se tomado como referência a condição do processo de parboilização convencional recomendada (Martinez, 1984) correspondente a uma umidade mínima de hidratação do arroz em casca de 30 %(bu), foi adotado o tempo de 180 minutos para a pré-hidratação do arroz natural em casca, após o que a umidade do produto atingiu cerca de 32,4 %(bu). O produto foi então cuidadosamente drenado e ventilado para a secagem da umidade superficial da casca.

Antes da colocação em funcionamento do sistema de microondas, procedeu-se a uma calibração tentativa da vazão mássica do arroz pré-hidratado. Para isto foi considerado o limite máximo teórico aproximado de evaporação da umidade do produto pela aplicação da energia das microondas disponível do sistema, a um rendimento estimado de 70 %, como sendo de:

$$6 \text{ kW} \times 860 \text{ kcal/kWh} \div 574,2 \text{ kcal/kg} \times 0,7 \simeq 6,3 \text{ kg/h}$$

aonde foi desconsiderada qualquer parcela de contribuição de calor aportado pelo ar quente, assim como a parte relativa ao calor sensível necessário para a variação da temperatura do produto. Partindo-se de um produto com umidade inicial de 32,4 %(bu) e admitindo-se a umidade final do produto tratado como sendo de 13 %(bu), pode-se calcular as vazões mássicas

de alimentação do arroz :

$$P_e = \Delta M \cdot (1 - m_f) / (m_i - m_f) = 6,3 \times (1 - 0,13) / (0,324 - 0,13)$$

$\approx 28,3$ kg/h de arroz hidratado (máximo), ou seja :

$\approx 28,3 - 6,3 = 22$ kg/h de arroz parboilizado seco (máximo).

A partir dos cálculos de referência acima, optou-se por realizar a calibração da alimentação do arroz pré-hidratado em casca no intervalo de vazões mássicas de 0 a 30 kg/h. Conforme já comentado sob o item 4.11. "Ensaio Mecânicos e Medidas Corretivas", nenhum dos dispositivos instalados funcionou a contento, ou seja, tanto a válvula rotativa (item 1, Figura 25) quanto o alimentador vibratório NORMA - modelo VE-15 adaptado, que a substituiu, não se adaptaram à função de alimentar o produto regularmente para o interior da cavidade de aplicação das microondas. Foi igualmente verificada uma tendência de entupimento do tubo de descarga à saída de ambos os dispositivos, antes da entrada da rosca helicoidal (item 2, Figura 25), sugerindo a necessidade de ampliação do diâmetro deste trecho de passagem tubular como uma das medidas corretivas a serem tomadas em futuro breve. A rosca helicoidal também teve que ser substituída pelo transportador de paletas horizontal (Figura 29), conforme já discutido sob o mesmo item 4.11 anterior.

Mesmo enfrentando a dificuldade de se alimentar regularmente o sistema com produto, foi possível conduzir três ciclos operacionais, que foram diferenciados quase que exclusivamente pelas intensidades de aplicação da potência de microonda sobre o material. Uma quantidade pequena de ar

quente a 40 °C (0,5 m³/min) foi feita circular em contra corrente a fim de facilitar o arraste da umidade oriunda da secagem do produto.

Com exceção das vazões mássicas de alimentação do arroz pré-hidratado em casca, os demais parâmetros foram mantidos aproximadamente sem variação. Foram estudados basicamente os efeitos dos tratamentos por microondas, tendo-se observado, embora somente de um modo qualitativo, o grau de gelatinização do amido dos grãos, assim como os efeitos sobre a secagem do produto e o beneficiamento padronizado das amostras secas, mediante o processamento das mesmas em um beneficiador de laboratório marca Suzuki, modelo MT81.

A Tabela 1 abaixo resume não somente as condições operacionais dos três ciclos, como fornece também algumas indicações preliminares dos efeitos obtidos sobre as amostras tratadas :

Tabela 1 Dados experimentais preliminares de tratamento de arroz em casca pré-hidratado com microondas

Ciclo N ^o	VM kg/h	n min ⁻¹	PI kW	Tempo* min ⁻¹	RTR %	T, °C T ₁ /T ₂	m, %bu m ₂	QBF %
I	7,0	20	4	2	<10	18/40	19,7	11,44
II	<5,0	20	4	2	15-20	18/45	--	3,56
III	12,2	20	5	2	<10	18/46	13,1	4,76

VM = Vazão mássica

n = RPM da cavidade

PI = Potência incidente

Tempo* = Tempo de resid.

RTR = Razão de potência
reflet./transmit.

T = Temperatura
da amostra

m₁, T₁ = Antes do
tratamento

m₂, T₂ = Depois do
tratamento

m = Umidade da
amostra

bu = Base úmida

QBF = Quebra no
benefic.^{to}

Observações : 1) A unidade inicial do arroz constituinte das amostras era essencialmente $m_1 = 32,3 \% \text{ bu}$; 2) O tempo de residência médio teórico foi estimado em cerca de 2 minutos, através da aplicação da equação (7) da página 87, para a inclinação do cilindro de $2,87^\circ$, assumindo $V_a \cong 0$ e $C_1 = 2$ (carga leve).

Observa-se dos dados da Tabela 1 que os valores para o ciclo II não foram consistentes, devido a já apregoada dificuldade de controle da alimentação do produto, resultando inclusive no aumento da radiação refletida (RTR entre 15 e 20 %).

Por outro lado, pela observação da aparência dos grãos tratados, pôde ser constatado o aspecto de gelatinização quase total do amido do grão, notadamente com a amostra III, tratada a 5 kW, que redundou em um percentual de quebra bem baixo, conseqüentemente em um rendimento em grãos inteiros elevado, após o beneficiamento. O material, para este mesmo tratamento, mostrou-se com uma umidade final adequada para o beneficiamento posterior.

Pode ser concluído, com base nas evidências experimentais, que foram conseguidos, no sistema aplicador das microondas, os efeitos de gelatinização do amido dos grãos e a sua secagem a uma condição favorável para o beneficiamento.

O fato animador é que foi obtida a parboilização do arroz em um tempo significativamente mais curto que aqueles normalmente vigentes nos processos convencionais, ou seja, nesta nova proposta de processamento os tempos são da ordem de minutos, enquanto que nos processos convencionais tem-se ordens de grandeza de horas! Entretanto, muitos outros

aspectos restam ser estudados, para que se possa confirmar ainda a viabilidade técnica da parboilização do arroz pela aplicação desta nova tecnologia. Some-se ademais a necessidade de se complementar tais estudos técnicos com os aspectos económico-financeiros de uma eventual ampliação de escala para um modelo industrial.

5. VIABILIDADE OPERACIONAL DO SISTEMA NO ESTUDO DE UM CASO ESPECÍFICO :

5.1. Estudo da Substituição do Aquecimento Convencional por Microondas, na Inativação Enzimática de Grãos de Soja Integral, como Componente da Formulação de Rações Animais.

5.1.1. Aspectos Técnicos

A indústria de ração animal há muito vem empregando produtos extrudados de soja como um dos principais componentes das misturas enriquecidas com proteínas para a alimentação de aves, suínos, animais domésticos, etc. Sabe-se que a soja contém diversos fatores anti-nutricionais, manifestando atividades enzimáticas, o que requer um adequado tratamento térmico para a sua inativação (Mustakas *et al.*, 1964). Esta é uma etapa promovida durante o processamento dos grãos decorticados e triturados de soja, que usualmente antecede a fase de preparo das misturas formuladas. A extrusão é, na prática, o método de aquecimento mais utilizado para melhorar o valor nutricional e as propriedades organolépticas da soja, mediante a inativação de seus fatores inibidores e de diversos enzimas (Van Zuilichem e Stolp, 1987), (Wiedman e Strobel, 1987). Os processos de extrusão destinados a condicionar e aquecer a farinha desengordurada de soja (um sub-produto da indústria de extração do óleo de soja), ou a tratar termicamente os grãos de soja naturais decorticados e triturados, têm mostrado alguns inconvenientes : no primeiro caso o cozimento por extrusão exige a adição de água ao

longo do processo, a qual precisa ser evaporada mais tarde, além do que se necessita suplementar sempre o conteúdo de gorduras da mistura formulada final, após tê-la extraído originalmente dos grãos; no segundo caso, o elevado teor de gordura da soja torna a extrusão uma operação unitária difícil de ser controlada.

Dai se pensar que um método que funcionasse inteiramente sem aumentar o teor de umidade do produto, sem prejuízo também da preservação ou melhoramento do valor nutricional da soja, e ainda a um custo competitivo, seria bem vindo pela indústria. Este seria o principal objetivo deste estudo de viabilidade.

A. Método :

O equipamento utilizado neste estudo foi o protótipo de forno cilíndrico rotativo combinado a microondas e ar-quente, operando a 2450 MHz, cujo desenvolvimento e descrição foram apresentados anteriormente neste trabalho. Houve necessidade de proceder-se ao casamento de impedâncias do sistema com o produto objeto deste estudo, a fim de assegurar a melhor transferência de potência para a carga. Soja limpa obtida comercialmente, de variedade não identificada, foi armazenada no depósito 1A (Figura 23), a um teor de umidade inicial entre 11,15 e 12,33 % (bs). As taxas de alimentação variaram entre 0,360 e 0,514 kg/min, enquanto que os tempos de residência permaneceram entre 2,5 e 5 minutos. A potência das microondas foi aplicada a um nível de 4 a 6 kW. A temperatura do produto sem tratar foi lida a partir da indicação de um termopar. As amostras do

produto tratado eram recolhidas, imediatamente após o aquecimento pelas microondas, dentro de uma garrafa térmica, a fim de ser obtida a melhor precisão de leitura de suas temperaturas. O produto tratado era separado em amostras e resfriado à temperatura ambiente, sendo as amostras convenientemente preparadas para as determinações de umidade e outras análises, tais como teores de proteína e gordura, redução da urease e solubilidade da proteína. O teor de umidade foi obtido por perda de peso da amostra quando aquecida por 24 horas a 70° C, em estufa a vácuo. A proteína bruta foi determinada pela utilização de um digestor tipo Kjeldahl, enquanto que a solubilidade da proteína foi obtida com o emprego de uma solução de hidróxido de sódio a 0,1 %. Os níveis de atividade ureática foram estabelecidos através da mudança de pH e o teor de gordura determinado por extração com hexano seguida de uma hidrólise ácida. A Tabela 2 resume os principais dados do processamento experimental com soja :

Tabela 2 Dados preliminares do aquecimento de soja

Ciclo N°	VM kg/min	n_1 min ⁻¹	PI kW	PT kW	PR kW	RTR %	T, °C T_1/T_2	M, %bs M_1/M_2
1	0,439	16	5,00/4,55/0,675	14,8	22/103	11,15/9,225		
2	0,456	16	6,00/5,30/0,500	9,43	22/116	11,15/6,473		
3	0,476	10	4,00/3,70/0,175	4,73	19,3/110,5	12,26/9,125		
4	0,480	10	5,00/4,40/0,250	5,68	19,8/123	12,26/6,584		
5	0,360	10	4,50/4,05/0,163	4,02	22,5/118,5	12,33/7,706		
6	0,514	10	4,00/3,75/0,175	4,67	22,5/110,5	12,33/9,495		

$\nu = 1,48^\circ$ = Inclín. do cilindro n = Rot. do cilindro
 VM = Vazão mássica M, T = Umidade e temperatura da amostra
 M_1, T_1 = Antes do tratamento M_2, T_2 = Após o tratamento
 PI = Potência incidente PT = Pot. transm. PR = Pot. reflet.

A potência incidente total estava razoavelmente bem casada com a carga, produzindo como média das relações das potências refletidas para transmitidas (RTR) um valor de somente 7,23 %. A rotação (n) e a inclinação (ν) da cavidade cilíndrica foram ajustadas de tal forma a se obter um tempo de residência teórico (TRT), calculado através da fórmula adiante (Dascalescu, 1969), de :

$$TRT = K \cdot L_d / (n \cdot \tan \alpha \cdot D_d) \quad (\text{min})$$

onde $L_d = 1,3$ m é o comprimento e $D_d = 0,3$ m é o diâmetro da cavidade cilíndrica, $\tan \alpha = \sin \nu / \sin \varphi$, sendo $\varphi = 29^\circ$ o ângulo de repouso natural da soja (talude) e $K \cong 0,5$ é um coeficiente complexo, adimensional.

Com o objetivo de comparar as taxas de transferência de calor independentemente das condições de aplicação das microondas, a energia dissipada foi calculada a partir da elevação da temperatura e da perda de umidade, seguindo-se o procedimento dado no trabalho de Pour-El *et al.* (1981), que simplesmente considera a necessidade de calor, sem referência a qualquer eficiência do processo, de acordo com a equação :

$$EMA = c_p \cdot \Delta T + \lambda_{sm} \cdot \Delta M \quad (\text{cal/g})$$

onde : EMA = Energia mínima absorvida

$c_p = 0,39123 + 0,0046057 \cdot M$ (cal/g/°C), é o calor específico médio da soja, função da umidade M (%), na base seca (bs).

$\Delta T = T_2 - T_1$, (°C), é a diferença de temperatura

da amostra de após e antes do tratamento.

λ_{sm} = Calor latente de vaporização médio para a água da soja (cal/kg), calculado por :

$$\lambda_s = 539.(1 + 0,21624 \times e^{-0,06239.M}),$$

assumindo os valores dos teores de umidade da soja M_1 e M_2 .

$$\Delta M = (M_1 - M_2)/(M_2 + 100), \text{ é a perda de umidade.}$$

B. Resultados :

As análises das amostras de soja, bem como os valores calculados obtidos dos dados de cada ciclo pela aplicação das equações retro mencionadas, são apresentados na Tabela 3

Tabela 3 Resumo dos dados analíticos e dos valores calculados para a soja

Ciclo N ^o	VM kgmin ⁻¹	TRT min	Mz % bs	TG %	PB %	PS %	Ativ. ureat.	EMA Wh/kg
1	0,439	2,5	9,225	19,25	42,37	93,92	2,25	52,9
2	0,456	2,5	6,473	19,37	43,57	80,60	0,07	77,4
3	0,476	4,0	9,125	19,14	45,20	85,30	1,73	66,7
4	0,480	4,0	6,584	19,40	45,41	79,17	0,08	89,6
5	0,360	4,0	7,706	19,74	44,18	78,90	0,32	78,9
6	0,514	5,0	9,495	19,33	44,24	92,99	1,90	63,2

TG = Teor de gordura

PB = Teor de proteína bruta

PS = Teor de proteína solúvel

EMA = Energia mínima absorvida

Dados adequados das Tabelas 2 e 3 foram graficados para mostrar os efeitos dos tratamentos por microondas no teor de umidade, na temperatura da amostra e na atividade ureática, tal como está ilustrado nas Figuras 33 e 34 adiante :

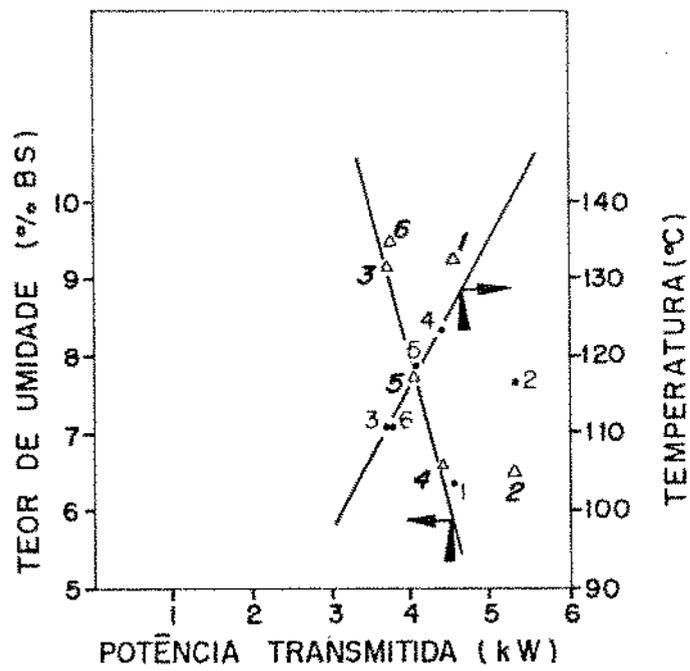


Figura 33 Efeito do aquecimento por microondas sobre a temperatura e perda de umidade da soja

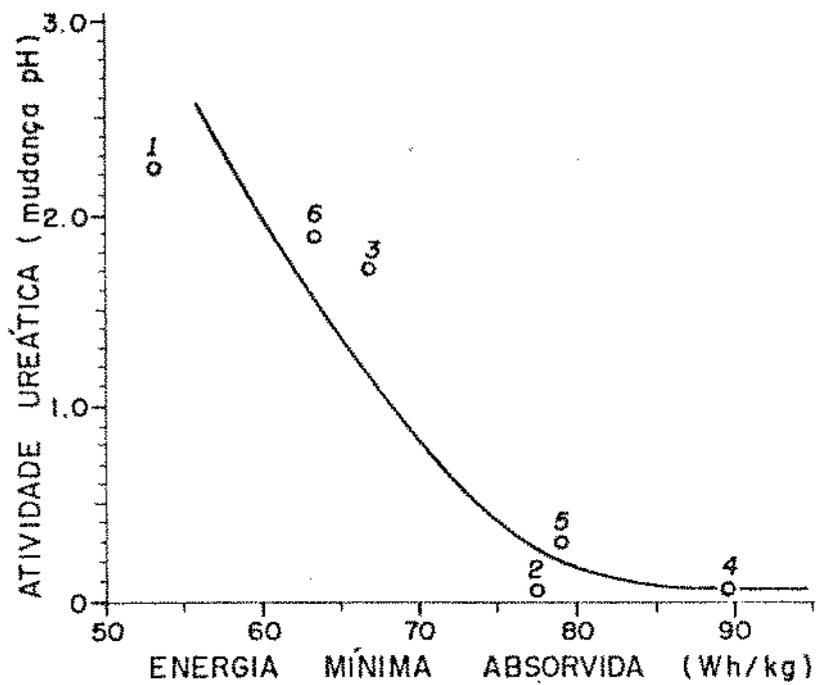


Figura 34 Efeito do aquecimento por microondas na redução da atividade ureática

A figura 33 mostra as leis lineares de variação PT vs M_2 e PT vs T_2 , aonde foram desconsiderados os pontos dos ciclos n°1 e n°2, em virtude de irregularidades durante a operação (RTR elevado no ciclo n°1 e erro de medida de PT no ciclo n°2). Estas variações podem ser representadas, respectivamente, pelas equações seguintes :

$$M_2 = 24,377 - 4,063.PT \quad (r^2=0,979)$$

$$T_2 = 40,4 + 18,92.PT \quad (r^2=0,986)$$

A Figura 34 mostra uma lei de potência na variação da atividade ureática AU (Δph) em função da EMA (Wh/kg), aonde também foram descartados os pontos 1 e 2, a qual pode ser representada pela equação seguinte :

$$AU = 2,02 \times 10^{17} \times (EMA)^{-0,4} \quad (r^2=0,985)$$

Pode ser observado que, aumentando a temperatura até 123°C, o produto processado tem a sua umidade reduzida até 6,584 % bs. O valor calculado da energia dissipada oscilou grosso modo entre 52 e 90 Wh/kg. As análises acima referidas foram executadas em conformidade com os procedimentos normais para o controle de qualidade adotados pela indústria, e os resultados foram comparados com os padrões vigentes para os produtos obtidos pela extrusão. Foi verificado que, para os tratamentos de EMA maiores do que 77 Wh/kg, as amostras satisfizeram os requisitos de controle de qualidade estabelecidos, ou seja, principalmente a atividade ureática foi reduzida a valores abaixo de 30 %. Além disto,

estas amostras mostraram-se superiores aos produtos obtidos através do processo de extrusão convencional face a ambos os aspectos técnico-operacionais :

- 1) o novo método funciona bem, a despeito do elevado teor de gordura da soja integral, sem ocorrência de qualquer dificuldade operacional, como é o caso no processo de extrusão ;
- 2) a vantagem econômica advinda do fato que o produto pode ser obtido no seu teor de umidade final, sem qualquer adição de umidade intermediária, evitando-se assim a necessidade de evaporar quantidades adicionais de água.

Uma observação a mais, de caráter apenas qualitativo, foi feita no sentido de se estimar o efeito das microondas na remoção do desagradável "sabor de feijão cru" dos grãos de soja : tal como já havia sido avaliado organolèpticamente por Klinger e Decker (1989), a efeito do tratamento das amostras por microondas sobre o forte sabor de feijão encontrado na soja, devido a oxidações enzimáticas induzidas da gordura e aos fatores inibidores da tripsina, foi no sentido de alterar o sabor para uma característica de neutralidade. Não foram obtidas amostras com sabores tendentes para o tipo tostado, já que os tratamentos foram relativamente moderados no que concerne a EMA (< 90 Wh/kg).

5.1.2. Aspectos econômicos

Com base nas informações do fabricante da unidade geradora Cober modelo S6F (Cober Electronics Inc., 1986), foi suposto que a razão de transformação da potência

elétrica para potência de microondas é de 55 %. Considerando ainda como válido, a partir de medidas reais, uma eficiência média da dissipação energética da ordem de 70 %, o consumo de energia elétrica total, calculado conservativamente a partir da EMA de 77 Wh/kg, pode ser estimado em 200 Wh/kg, ou seja, 0,2 kWh/kg. Considerando um custo médio equivalente da energia elétrica para consumo industrial de US\$0,035/kWh, o custo operacional devido à energia elétrica vai a US\$7,06 por tonelada de produto. Por outro lado, o consumo total de energia elétrica para o processo de extrusão convencional em uma linha de 3 t/h, incluindo a secagem do produto, porém sem a moagem, é de 435 kWh, isto é, o equivalente a 145 Wh/kg, produzindo um custo operacional devido à eletricidade de US\$5,12/t. Mas existe outro custo operacional envolvido no processo de extrusão, que se refere ao consumo de vapor, de 0,2 e 0,5 tonelada de vapor por tonelada de produto, para o extrusor e o secador, respectivamente, perfazendo um total de 0,7 t de vapor/t de produto. A um custo de US\$12,24/t de vapor, o custo energético devido ao vapor representa US\$8,57 por tonelada de produto, perfazendo um custo operacional total devido às energias do vapor e da eletricidade de US\$13,69/t.

O custo estimado do investimento em um sistema de microondas com 100 kW de potência, capaz de processar 909 kg/h de soja integral, é de US\$285.000,00, para um equipamento industrial completo instalado, incluindo o aplicador. Deve ainda ser considerado um custo adicional de $2 \times \text{US\$}8.000,00 \times 6.000/8.000 = \text{US\$}12.000,00$, relativo ao custo de reposição de duas válvulas "magnetron" de 50 kW (915 MHz), operando 6.000 horas por ano, assumindo-se uma

alcançada pelo tratamento a microondas. No entanto, são ainda necessários mais dados, não somente dos aspectos técnicos, mas também sob os pontos de vista econômicos. As demandas do mercado devem igualmente ser pesquisadas e analisadas, de forma a se poder avaliar com mais segurança as possibilidades de competição desta nova tecnologia em estudo.

5.1.3. Conclusões sobre o estudo específico

Uma nova opção de tratamento térmico industrial da soja para a fabricação de rações animais está sendo proposta. Ela apresentou características técnicas operacionais e de qualidade favoráveis quando comparada ao processo convencional por extrusão hoje adotado pela indústria.

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

Um secador a microondas para produtos sólidos granulares possuindo uma cavidade cilíndrica rotativa, dotado de recursos adicionais para operar com ar quente, de funcionamento contínuo, foi apresentado neste trabalho.

Um modelo da cavidade de aplicação das microondas, reduzido isometricamente, foi construído preliminarmente, a fim de testar e verificar qualquer ocorrência de vazamento de radiação através de filtros de microondas, que foram desenhados segundo uma nova concepção.

Uma verificação minuciosa em torno do protótipo foi conduzida à procura de eventuais vazamentos de potência, com o auxílio de um medidor adequado, confirmando a correção do

desenho dos filtros e atendendo às disposições estabelecidas na regulamentação internacional sobre vazamento de microondas.

Ciclos experimentais preliminares foram conduzidos, de modo a comprovar as condições operacionais de tratamento de dois produtos granulares, arroz em casca e soja integral, sob a ação das microondas a 2450 MHz, no intervalo de 0 a 6 kW de potência, com a ação coadjuvante do ar quente, para a remoção da umidade separada do produto em tratamento.

Do ponto de vista técnico-operacional, não foi ainda possível avaliar com precisão a eficiência energética do sistema e buscar meios para a sua melhoria sob as diversas situações operacionais que se apresentaram com os produtos trabalhados. A este respeito, faz-se necessário estabelecer as faixas de condições operacionais sob as quais o funcionamento do sistema pode ser otimizado, explorando para cada situação a melhor relação de aplicação energética combinada microondas/ar quente, reservando para a atuação das microondas somente aquelas fases do ciclo operacional que, pelas propriedades do material tratado e/ou por alguma peculiaridade do processo, possa melhor aproveitar suas vantagens específicas.

É recomendável, dentro de uma programação prioritária de atividades para um futuro próximo, que sejam concebidos métodos de visualização da distribuição do campo eletromagnético dentro da cavidade de aplicação das microondas, como uma ferramenta auxiliar de remanejamentos e eventuais correções construtivas da mesma, com o objetivo de aperfeiçoar o seu desempenho sob o ponto de vista elétrico.

Recomenda-se ainda que, a par dos tratamentos que

serviram de exemplo neste trabalho para ilustrar o processamento por microondas de aplicação industrial, sejam procedidos novos estudos de forma a explorar as demandas de mercado potenciais mais recentes de processamentos por microondas, principalmente em se tratando de produtos de consumo humano de alto valor agregado, sejam eles de natureza alimentar, farmacêutica ou semelhantes.

Para finalizar, deve ser lembrado que o sistema aqui apresentado pode, convenientemente adaptado, se prestar para operar com gás inerte em circuito hermeticamente selado, que torna-se de utilidade no aquecimento e/ou secagem eficiente e controlada, sem contato manual, em ambiente inerte, de produtos altamente sensíveis e/ou perigosos e/ou tóxicos, ampliando ainda mais o leque das aplicações potenciais desta instalação pelo uso das microondas.

APENDICE A

Tabela I PROPRIEDADES DIELETRICAS DE ALGUNS
SÓLIDOS E LÍQUIDOS *

Produto	T °C	m %bu	ϵ_r	915 MHz tan δ	ϵ_r	2450 MHz tan δ
Porcelana	25	-	8,93	$9 \cdot 10^{-4}$	8,90	$1,1 \cdot 10^{-3}$
Teflon	22	-	2,1	$1,4 \cdot 10^{-4}$	2,1	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Vidro	25	-	3,85	$6,0 \cdot 10^{-4}$	3,84	$6,8 \cdot 10^{-4}$
Polietileno	23	-	2,26	$1,1 \cdot 10^{-3}$	2,25	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Etanol	-	-	-	-	6,5	$25 \cdot 10^{-2}$
Metanol	-	-	-	-	24	$64 \cdot 10^{-2}$
Poliamida (Nylon)	25	-	3,06	$1,4 \cdot 10^{-2}$	3,02	$1,2 \cdot 10^{-2}$
Tetracloroeto de carbono	-	-	-	-	2,17	$4 \cdot 10^{-4}$
Borracha natural	25	-	2,85	$2,4 \cdot 10^{-2}$	2,80	$1,8 \cdot 10^{-2}$
Neoprene	25	-	-	-	4,0	$3,4 \cdot 10^{-2}$
Agua destilada	25	-	77,5	$1,5 \cdot 10^{-2}$	76,7	$15,7 \cdot 10^{-2}$
Gelo puro	-12	-	-	-	3,2	$9 \cdot 10^{-4}$

APENDICE A (continuação)

Tabela II PROPRIEDADES DIELETRICAS DE ALGUNS ALIMENTOS *

Produto	T °C	m %bu	ϵ_r	915 MHz tan δ	ϵ_r	2450 MHz tan δ
Carne cozida	20	68	-	-	41,6	0,31
Carne crua	-20	74	-	-	4,6	0,11
Bife cru	-15	-	5,0	0,15	-	-
Carne gorda	-10	-	2,4	0,1	-	-
Oleo de milho	25	-	-	-	2,53	0,06
Oleo de soja	25	-	2,61	0,06	2,51	0,06
Manteiga	0	17	-	-	4,05	$9,6 \cdot 10^{-2}$
Batata branca crua	25	81	70,3	0,37	62,9	0,27
Espinafre fervido	23	-	34,0	0,80	-	-
Trigo em grão	24	11	2,8	0,11	-	-
Semente de alfafa	24	4,9	-	-	2,6	0,05
Leite em pó	30	3,3	-	-	2,29	$2,1 \cdot 10^{-2}$
Soro de leite em pó	30	4,8	-	-	2,04	$1,2 \cdot 10^{-2}$

* (Metaxas e Meredith, 1983), (Nelson, 1973), (RDRE, 1968).

APENDICE B

ONDAS ELETROMAGNÉTICAS : AS EQUAÇÕES DE MAXWELL

Já foram definidas no Capítulo 2 várias grandezas elétricas, entre elas sete das oito seguintes :

$$E \text{ e } D, H \text{ e } B, J \text{ e } \sigma_c, \epsilon^* \text{ e } \mu^*$$

onde σ_c é uma densidade de carga elétrica, C/m³

Estas grandezas estão relacionadas entre si por equações fundamentais, as equações de Maxwell :

$$\nabla \times H = J + \partial D / \partial t \quad (1)$$

$$\nabla \times E = - \partial B / \partial t \quad (2)$$

$$\text{div } D = \sigma_c \quad (3)$$

$$\text{div } B = 0 \quad (4)$$

Porém, da lei da conservação das cargas elétricas, σ_c e J se relacionam através da equação :

$$\text{div } J + \partial \sigma_c / \partial t = 0 \quad (5)$$

Combinando as equações (3) e (5), obtém-se :

$$\text{div } J + \partial \text{div } D / \partial t = 0$$

ou seja :

$$\text{div} (J + \partial D / \partial t) = 0 \quad (6)$$

O termo $J + \partial D / \partial t$ que aparece na equação (6) corresponde a uma corrente global, aonde o primeiro termo é a corrente de condução clássica, e a segunda uma corrente, dita de deslocamento, que não existe em regime contínuo, e que pode eventualmente se propagar sem suporte material : trata-se de uma corrente transportada pela onda. Ao contacto com uma antena receptora, $\partial D / \partial t$ se transforma em uma corrente de condução J .

As equações aqui apresentadas traduzem matematicamente uma realidade física, a onda eletromagnética, isto é, um campo eléctrico e um campo magnético associados, propagando-se no espaço e variando no tempo (Thuery, 1983).

B.1.- PROPAGAÇÃO LIVRE

B.1.1.- Equação de propagação

A partir das equações de Maxwell, obtém-se para um meio perfeitamente dieléctrico, e para E variando harmonicamente com o tempo :

$$\nabla^2 E - \epsilon^* \mu^* \partial^2 E / \partial t^2 = 0 \quad (7)$$

$$\nabla^2 H - \epsilon^* \mu^* \partial^2 H / \partial t^2 = 0 \quad (8)$$

$$\partial^2 E / \partial t^2 = - \omega^2 E \quad (9)$$

$$\partial^2 H / \partial t^2 = - \omega^2 H \quad (10)$$

As equações (7) e (8) são as equações de onda do campo eletromagnético. Pode-se ainda simplificá-las assumindo que os vetores de campo E e H dependem somente de x e t, ou seja

$$\partial E/\partial y = \partial E/\partial z = \partial H/\partial y = \partial H/\partial z = 0 \quad (11)$$

Verifica-se que é fácil retornar mais tarde à solução geral partindo-se deste caso especial. As equações de onda tornam-se então :

$$\partial^2 E/\partial x^2 = \epsilon^* \mu^* \partial^2 E/\partial t^2 \quad (12)$$

$$\partial^2 H/\partial x^2 = \epsilon^* \mu^* \partial^2 H/\partial t^2 \quad (13)$$

A solução destas equações diferenciais corresponde a uma onda plana,

$$E = E_0 e^{j\omega t - \gamma x} \quad (14)$$

$$H = H_0 e^{j\omega t - \gamma x} \quad (15)$$

variando periodicamente no tempo com a frequência :

$$f = \omega / 2\pi \quad (16)$$

e avançando na direção +x através do espaço com um fator de propagação complexo :

$$\gamma = j\omega \sqrt{\epsilon^* \mu^*} = \alpha + j\beta \quad (17)$$

sendo α o fator de atenuação, e β o fator de fase da onda. Introduzindo estes fatores, pode-se escrever as equações (14) e (15) na forma :

$$E = E_0 e^{-\alpha x} e^{j2\pi(ft - \beta x/2\pi)} \quad (18)$$

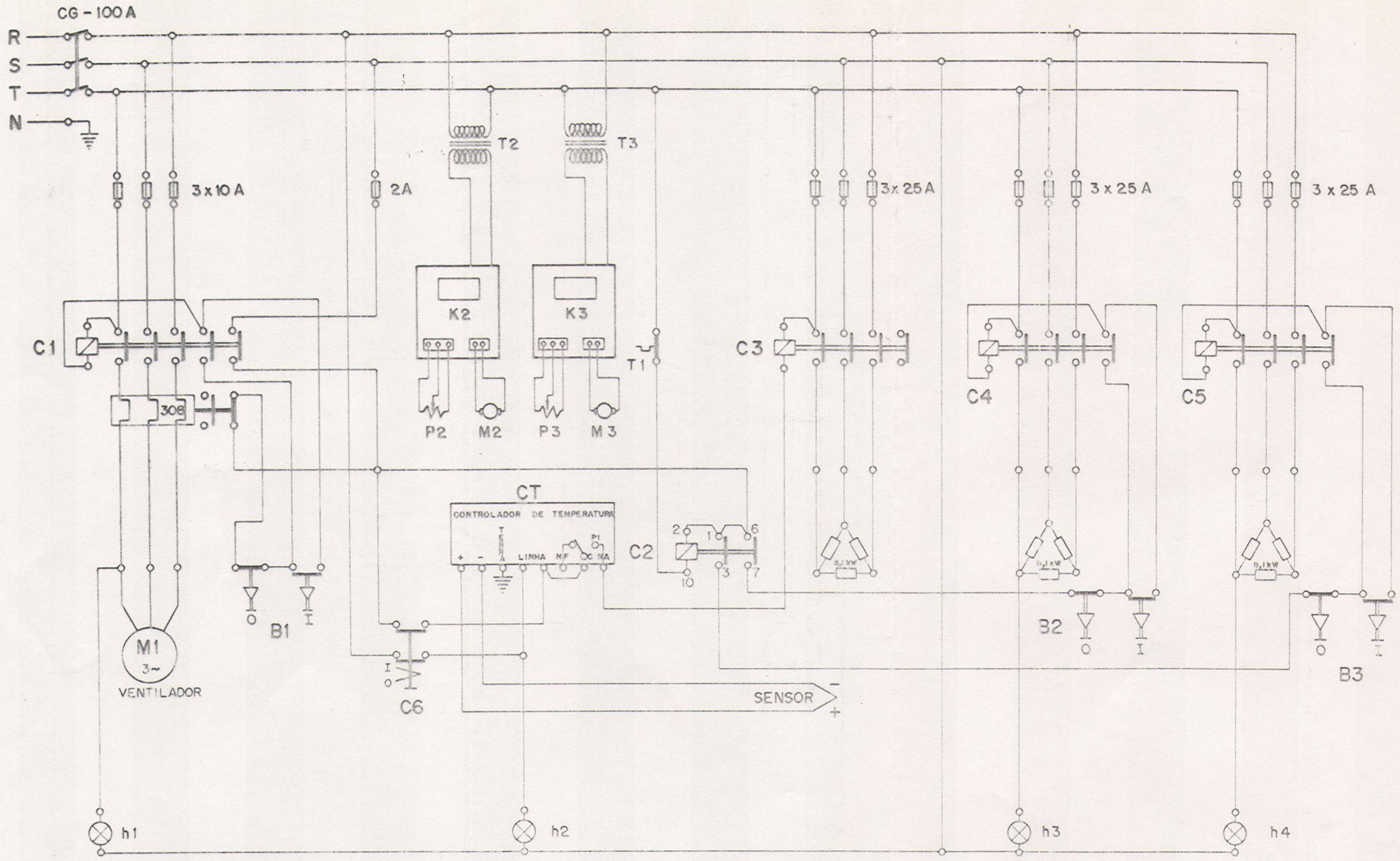
$$H = H_0 e^{-\alpha x} e^{j2\pi(ft - \beta x/2\pi)} \quad (19)$$

Os dois campos da onda plana são perpendiculares entre si e conduzidos por um plano perpendicular à direção de propagação x (Figura 1). Esta onda é denominada de transversal eletromagnética (TEM), para a qual pode ser demonstrado que existe entre os campos a relação simples :

$$|E|/|H| = \sqrt{\mu/\epsilon} = \eta$$

onde η tem a dimensão de uma impedância e denomina-se impedância característica do meio. Para o ar ou o vácuo ela vale, conforme já visto no item 2.3.4, página 25 :

$$\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\epsilon_0} = 120 \pi \cong 377 \Omega$$



PROJETOU	NOME	DATA	CONVÊNIO FIPEC - B.3./UNICAMP-F.E.A.
VERIFICOU			
DESENHOU	EDSON	14 / 3 / 91	
ESC.	DESCR. ESQUEMA ELÉTRICO DO PAINEL DE COMANDO.		EM SUBST. DE SUBST. POR DES. Nº APÊNDICE - C

APENDICE D

PRINCÍPIOS APLICÁVEIS AO PROJETO SANITÁRIO DE EQUIPAMENTOS PARA O PROCESSAMENTO DE ALIMENTOS

1.- Todas as superfícies em contacto com o alimento devem ser inertes ao mesmo sob as condições de uso e não devem migrar para e/ou serem absorvidas pelo mesmo.

2.- Todas as superfícies em contacto com o alimento devem ser lisas e não-porosas, de forma que partículas minúsculas de alimento, bactérias e ovos de insetos não sejam retidos em cavidades superficiais microscópicas, tornando-se difíceis de serem desalojadas, constituindo-se assim em fonte de contaminação potencial.

3.- Todas as superfícies em contacto com o alimento devem ser visíveis à inspeção e acessíveis à limpeza. Caso isto não ocorra, o equipamento deve ser facilmente desmontável para tal fim, ou deve ficar demonstrado que os procedimentos rotineiros de limpeza eliminam qualquer possibilidade de contaminação através de bactérias ou insetos.

4.- Todas as superfícies em contacto com o alimento devem ser prontamente acessíveis à limpeza manual. Caso isto não ocorra, o equipamento deve ser facilmente desmontável para tal fim, ou se a técnica de limpeza automática ou no local ("cleaning-in-place" ou "CIP") for utilizada, deve-se obter os mesmos resultados como se a

limpeza fosse feita manualmente.

5.- Todas as superfícies interiores do equipamento em contacto com o alimento devem estar dispostas de forma que o mesmo seja auto drenante, ou seja, o escoamento do produto se faça espontaneamente, sem deixar resíduos.

6.- O equipamento deve ser desenhado de forma a proteger o seu conteúdo de qualquer contaminação externa.

7.- O exterior do equipamento e as suas superfícies que não estiverem em contacto com o alimento devem estar arrançadas de forma a evitar o alojamento de insetos ou germes e o acúmulo de líquidos ou sujeiras sobre o mesmo.

APENDICE E

CASAMENTO DE IMPEDANCIAS - TESTE EM VAZIO

Ajuste do toco triplo : 2 - 4 - 20

Ale tão n	V_{max} x V_{min} (mV)	P_t/P_o %	Ale tão n	V_{max} x V_{min} (mV)	P_t/P_o %	Ale tão n	V_{max} x V_{min} (mV)	P_t/P_o %
1	54 32,5	93,82	2	50,5 35	96,71	3	46 36,5	98,67
4	45,5 32	96,97	5	50,5 25,5	89,18	6	60 21,5	77,68
7	62,5 19	71,51	8	58 22	79,75	9	52 25,5	88,31
10	48,5 33,5	96,65	11	44 38,5	99,56	12	47,5 36,5	98,29
13	49,5 36	97,51	14	47,5 36,5	98,29	15	46,5 37	98,71
16	48,5 30,5	94,81	17	54,8 24,7	85,66	18	60,5 21	76,51
19	65 19,5	71,01	20	61 22,5	78,74	21	58,5 27,5	87,01
22	52,5 33,5	95,12	23	45,5 36	98,64	24	47,5 38	98,77

Ajuste do toco triplo : 0 - 5,5 - 20

Ale tão n	V_{max} x V_{min} (mV)	P_t/P_o %	Ale tão n	V_{max} x V_{min} (mV)	P_t/P_o %	Ale tão n	V_{max} x V_{min} (mV)	P_t/P_o %
1	50 28	89,95	2	55 29	90,42	3	50,5 32,5	95,30
4	36 33	99,81	5	46,5 36	98,38	6	53 30	92,32
7	56 27	87,79	8	52 31,3	93,82	9	47,5 37,5	98,62
10	45 40	99,65	11	53 34,5	95,53	12	57 30	90,37
13	56,5 29,5	90,14	14	55,5 30,5	91,55	15	50 33	95,80
16	42,5 38	99,69	17	45,5 35,5	98,48	18	51,5 29,5	92,62
19	56,5 28	88,62	20	52 32	94,33	21	47 38	98,88
22	45,5 36	98,64	23	52,5 32,5	94,46	24	56,5 29,5	90,14

APENDICE E (continuação)

CASAMENTO DE IMPEDANCIAS - TESTE COM PRODUTO

Ajuste do toco triplo : 0 - 5,5 - 20

Ale tag n	$V_{max} \times V_{min}$ (mV)	P_t/P_o %	Ale tag n	$V_{max} \times V_{min}$ (mV)	P_t/P_o %	Ale tag n	$V_{max} \times V_{min}$ (mV)	P_t/P_o %
1	61,5 2,5	15,01	2	61 2,7	16,24	3	64 2,5	14,47
4	58,5 3,8	22,91	5	58,2 3,5	21,40	6	62,5 2,5	14,79
7	62,4 2,8	16,44	8	62 2,8	16,54	9	62 2,8	16,54
10	59,8 3,0	18,20	11	60 3,0	18,14	12	60,5 3,0	18,00
13	61,5 2,7	16,11	14	61 2,8	16,78	15	61,5 2,8	16,66
16	61,4 2,7	16,14	17	64,2 2,6	14,96	18	60,2 3,0	18,09
19	62 3,0	17,61	20	60 3,0	18,14	21	62,3 2,8	16,46
22	58 4,0	24,14	23	60,3 3,3	19,68	24	59,6 3,4	20,42

Ajuste do toco triplo : 0 - 0 - 17,7

Ale tag n	$V_{max} \times V_{min}$ (mV)	P_t/P_o %	Ale tag n	$V_{max} \times V_{min}$ (mV)	P_t/P_o %	Ale tag n	$V_{max} \times V_{min}$ (mV)	P_t/P_o %
1	32 21,2	95,88	2	33,5 19,6	93,15	3	43,5 14	73,68
4	32,5 20,5	94,87	5	33,8 19,3	92,54	6	38 17,4	86,17
7	41,4 14,3	76,33	8	31,4 20,6	95,69	9	33,8 18	90,70
10	29,5 21,8	97,75	11	34 18	90,53	12	31,5 21	96,00
13	35,5 17,7	88,81	14	33,5 19,8	93,39	15	35,3 18	89,46
16	32 20,6	95,30	17	40 15	79,34	18	31,5 20,7	95,72
19	33,2 19	92,60	20	29,8 22,5	98,05	21	40,8 15,3	79,34
22	27,5 24	99,54	23	28 23,8	99,34	24	32 20,7	95,40

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A.I.Ch.E.- Standard Testing Procedure (1960) : DRYERS (Rotary Continuous Direct-Heat Dryers) - American Institute of Chemical Engineers, New York.

Andrade, A.O.M., Caputo, J.R.L. e Senise, J.T. (1974). Ensaio mecânicos em corpos de prova de cimento e concreto curados com o auxílio de microondas. Resultados preliminares (comunicação na reunião anual da S.B.P.C., 1974). *Ciência e Cultura*, 26 (suplemento), nº 7, julho 1974.

Anônimo, (1977). Save energy - use more electricity. *Processing Report. Processing* (4), 65.

Baker, C.G.J. (1983). Cascading rotary dryers. In : "Advances in drying", edited by A.S. Mujumdar, Hemisphere Pub. Corp., Washington, v.2, 1-51.

Bakker-Arkema, F.W. (1986). Heat and mass transfer aspects and modeling of dryers - a critical evaluation, in "Concentration and Drying of Foods", edited by D. MacCarthy, Elsevier App. Sci. Pub., London, 165-202.

Bakker-Arkema, F.W., Fontana, C., Brook, R.C., and Westelaken, C.M. (1983). Concurrent flow rice drying. *Drying Technology* 1 (2), 171-191.

Bakker-Arkema, F.W., Lerew, L.E., DeBoer, S.F., and Roth, M.G. (1974). Grain dryer simulation. Research Report 224, Agr.

Exp. Sta., Mich. St. Univ., East Lansing, MI.

Bengtsson, N.E., and Risman, P.O.(1971). Dielectric properties of foods at 3 GHz as determined by a cavity perturbation technique. II. Measurements on food materials. *J. Microwave Power* 6 (2), 107-123.

Brasil, G.C., and Seckler, M.M.(1988). A model for the rotary drying of granular fertilizers, in "Proceedings of the 6th. International Drying Symposium - IDS'88, vol. I, Versailles, 247-255.

Brennan, J.G., Butters, J.R., Cowell, N.D. and Lilly, A.E.V.(1976). "Food Engineering Operations", 2nd. Ed., App. Sci. Pub. Ltd., London.

Campos, M.S.(1986). Influência da energia de microondas na qualidade tecnológica de trigo. Tese de Mestrado apresentada à UNICAMP.

Carpenter, R.L., and Van Ummersen, C.A.(1968). The action of microwave radiation on the eye. *J. Microwave Power* 3 (1), 3-19.

Chamberlain, N.(1975). Microwave energy in baking of bread. *Food Trade Rev.* 43 (9), 8-12.

Chang, Y.K.(1982). Efeito de branqueadores e da radiação de microondas na qualidade tecnológica do arroz integral. Tese de Mestrado apresentada à UNICAMP.

Cheng, A.F.(1981). Fluoroptic Thermometry. *Measurements & Control*, 15 (2), 115-117.

Cober Electronics, Inc.: "Cober Model S6F - Industrial Microwave Generator Technical Manual", 1986.

Collie, C.H., Hasted, J.B., and Ritson, D.M.(1948). The dielectric properties of water and heavy water. *Proc. R. Soc. London* 60, 145-160.

Collin, R.E.(1979). "Engenharia de Microondas", Editora Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro.

Concone, R.B.V., Senise, J.T., Moraes, V.L.V., Andrade, A.O.M. e Perin, A.H.(1981). "Microwave heating : application in the cooking-dextrinization of starchy materials". 2nd. World Congress of Chemical Engineering, Montreal, 1981.

Conforti, E.(1971). Acoplamento e modos TM_{01m} em cavidades cilíndricas. Tese de Mestrado apresentada à UFPb, C. Grande.

Conforti, E., e Tejo, F.A.F.(1976). "Desenvolvimento de um Forno a Microondas para Fins Domésticos e Comerciais." Convênio MIC-STI Atecil, Projeto 15.02.01, Relatório Final.

Copson, D.A.(1975). "Microwave Heating". The AVI Pub. Co. Inc.

Cross, M., Gibson, R., and Young, R.(1979). Pressure gradients generated during the drying of porous shapes. *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 22 (6), 827-830.

Cross, A.D., Jones, P.L., and Lawton, J.(1982). Simultaneous energy and mass transfer in radio frequency fields. *Trans. I. Chem. E.*, 60 (2), 67-74.

Dascalescu, A.(1969). "Le séchage et ses applications industrielles." Dunod, Paris.

Decareau, R.V.(1985). "Microwaves in the Food Processing Industry." Academic Press, London.

Decareau, R.V., and Peterson, R.A.(1986). "Microwave Processing and Engineering." VCH, W.Germany and Ellis Horwood, England.

de Loor, G.P., and Meijboom, F.W.(1966). The dielectric constant of foods and other materials with high water contents at microwave frequencies. *J Food Technol.* 1 (4), 313-322.

Diaz, N.M.(1982). Efeito do processamento convencional e do tratamento térmico por microondas sobre o teor de nutrientes e qualidade tecnológica do pão. Tese de Doutorado apresentada à UNICAMP.

Elder, R.L., Eure, J.A., and Nicolls, J.W.(1973). Radiation leakage control of industrial microwave power devices. *Trans. Int. Microwave Power Inst.* 1, 74-85.

Freedman, G.(1972). The future of microwave power in industrial applications. *J. Microwave Power* 7 (4), 353.

Fregni, L.E. e Leonhardt, G.F.(1982). Secagem de soja em

secador a microondas : resultados preliminares. *Cienc. Tecnol. Aliment.* 2 (2), 151-163.

Goldblith, S.A., and Decareau, R.V.(1973). "An Annotated Bibliography on Microwaves." MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

Hasted, J.B., Ritson, D.M., and Collie, C.H.(1948). Dielectric properties of ionic solutions. Parts 1 and 2. *J. Chem. Phys.* 16, 1-21.

Hirosue, H., Yamada, N., Abe, E., and Shinohara, H.(1988). Analysis of volumetric heat transfer coefficient and simulation of particles drying in a rotary dryer, in "Proceedings of the 6th. International Drying Symposium - IDS'88, vol. I, Versailles, 241-246.

Hirosue, H., and Shinohara, H.(1978). Volumetric heat transfer coefficient and pressure drop in rotary dryers and coolers, in "Proceedings of the 1st International Symposium on Drying", 152-159.

Holman, J.P.(1976). "Heat Transfer." 4th ed. McGraw-Hill, New York.

Jolly, J.A.(1972). Financial techniques for comparing the monetary gain of new manufacturing processes such as microwave heating. *J. Microwave Power* 7 (1), 5.

Jolly, J.A.(1976). Economics and energy utilisation aspects of

the application of microwaves: a tutorial review. *J. Microwave Power* 11 (3), 233.

Jowitt, R.(1980), ed., "Hygienic Design and Operation of Food Plant", The AVI Publishing Co.,Inc., Westport, Connecticut.

Kamke, F.A., and Wilson, J.B.(1986). Computer simulation of a rotary dryer. Part I : Retention time; Part II : Heat and mass transfer. *A I Ch E Journal* 32 (2), 263-275.

Keey, R.B.(1972). "Drying : principles and practice." Pergamon Press, Oxford.

Keey, R.B.(1978). "Introduction to industrial drying operations." Pergamon Press, Oxford.

Kelly, J.J.(1987). Rotary drying, in "Handbook of Industrial Drying", edited by A.S. Mujumdar, Marcel Dekker, New York, 133-154.

Klingler, R.W. and Decker, D.(1989).Microwave heating of soybeans on laboratory and pilot scale. *Proceedings of the 5th.ICEF - International Congress on Engineering and Food*, held between May 28 and June 3 in Cologne, Federal Republic of Germany and published at vol.2 of the book edited by W.E.L.Spiess and H.Schubert : *Engineering and Food - Preservation Processes and Related Techniques*, Elsevier App. Sci., London and New York, 1990, 259-269.

Krischer, O., und Kröll, K.(1959). "Trockner und

Trocknungsverfahren", Springer-Verlag, Berlin.

Kudra, T.(1981)."Microwave Drying of Some Food Products."
Proc. 8th Annual Research Meeting , Heriot-Watt University,
Edinburgh.

Kudra, T.(1989).Dielectric drying of particulate materials in
a fluidized state. *Drying Technology* 7 (1), 17-34.

Langrish, T.A.G., Whalley, P.B., Reay, D., and Bahu,
R.E.(1988). Heat transfer in cascading rotary dryers, in
"Proceedings of the 6th. International Drying Symposium -
IDS'88", vol. I, 233-239.

Leniger, H.A. and Beverloo, W.A.(1975)."Food Process
Engineering".D. Reidel Pub. Co.

Leonhardt, G.F., Gomes, A.M.F., Borzani, W. and Torloni,
M.(1978).Microwave drying of microorganisms.II.The use of
microwave oven for the determination of moisture content of
pressed yeast. *Journal of Microwave Power*, 13 (3), 235-237.

Leonhardt, G.F.(1980). Extração de suco de banana em forno de
microondas. Trabalho apresentado no IV Congresso Brasileiro de
Ciência e Tecnologia de Alimentos, realizado no Rio de Janeiro
de 05 a 08 de outubro de 1980.

Leonhardt, G.F.(1980). Emprêgo de microondas na indústria de
alimentos : a experiência da Escola de Engenharia Mauá.
Alimentação, 50 (6), 8-13.

Leonhardt, G.F., Bastos Neto, A.O. e Pinto, A.G.(1980). Esterilização de farinha de milho pré-cozida em forno de microondas. Trabalho apresentado no IV Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia de Alimentos, realizado no Rio de Janeiro de 05 a 08 de outubro de 1980.

Luter, L., Wyslouzil, W. and Kashyap, S.C.(1982). The Destruction of Aflatoxins in Peanuts by Microwave Roasting. *Can. Inst. Food Sci. Technol. J.*, 15 (3), 236-238.

Lyons, D.W., Hatcher, J.D., and Sunderland, J.E.(1972). Drying of a porous medium with internal heat generation. *Int. J. Heat Mass Transfer*, 15 (5), 897-905.

Marcuvitz, N.(1951), ed., "Waveguide Handbook", McGraw-Hill Book Co., New York.

Marsaioli Jr., A., Conforti, E. e Kieckbusch, T.G.(1987). A combined hot air and microwave rotary cylindrical oven for continuous drying of granular foods. Trabalho apresentado no SBMO International Microwave Symposium realizado no Rio de Janeiro, de 27 a 30 de julho de 1987.

Marsaioli Jr., A., Conforti, E. e Kieckbusch, T.G.(1989). A prototype of a combined hot air and microwave rotary cylindrical oven for continuous drying of granular products. Trabalho apresentado no 5th. ICEF-International Congress on Engineering and Food, realizado em Colônia, Alemanha Ocidental, de 28 de maio a 03 de junho de 1989 e publicado no vol.2 do "Proceedings" editado por W.E.L.Spiess e H.Schubert,

Elsevier App. Sci.: *Engineering and Food - Preservation Processes and Related Techniques*, London and New York, 1990, 679-685.

Marsaioli Jr., A., Conforti, E., Jorge Neto, G. e Kieckbusch, T.G.(1991). Heating of soybeans by a continuous microwave rotary cylindrical oven. Trabalho apresentado no III World Congress of Food Technology, realizado em Barcelona de 20 a 23 de fevereiro de 1991.

Martens, T.(1980). Mathematical model of heat processing in flat containers. Ph.D Thesis, Catholic University, Louvain, Belgium.

Martinez, E.S.M.(1984). Efeito de algumas variáveis operacionais nas características de qualidade de arroz parboilizado convencionalmente e por microondas. Tese de Mestrado apresentada à UNICAMP.

Maurer, R.L., Tremblay, M.R. and Chadwick, E.A.(1971). Microwave Processing of Pasta. *Food Technology* 25 (12), 32-35.

Maxwell, J.C.(1881). "A Treatise on Electricity and Magnetism." 2d ed. Oxford Univ. Press (Clarendon), London and New York.

McAdams, W.H.(1954). "Heat Transmission", 3rd. ed., McGraw-Hill, New York.

Metaxas, A.C.(1981). Radio frequency and microwave techniques

in the manufacturing industry. *Speciality Chemicals* 1 (1), 27-30.

Metaxas, A.C., and Meredith, R.J.(1988). "Industrial Microwave Heating." Peter Peregrinus Ltd, United Kingdom.

Mudgett, R.E., and Nash, J.(1980). Phase impedance mismatch effects in dielectric heating of composite food systems. *Proc. Symp. Int. Microwave Power Inst., 15th, 1980*, 125-129.

Mudgett, R.E.(1982). Electrical properties of foods in microwave processing. *Food Technol.* 36 (2), 109-115.

Mudgett, R.E.(1986). Electrical Properties of Foods, in "Engineering Properties of Foods," edited by M.A.Rao and S.S.H.Rizvi, Marcel Dekker, New York, 329-390.

Mustakas, G.C., Griffin Jr., E.L., Allen, L.E. and Smith, O.B.(1964). Production and nutritional evaluation of extrusion-cooked full-fat soybean flour. *The Journal of the American Oil Chemists' Society*, 41 (9), 607-614.

Nelson, S.O.(1973). Electrical properties of agricultural products - A critical review. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 16 (2), 384-400.

Nelson, S.O.(1980). Microwave dielectric properties of fresh fruits and vegetables. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 23 (), 1314-1317.

Nonhebel, G., and Moss, A.A.H.(1971). "Drying of Solids in the Chemical Industry", Butterworths, London.

Ohlsson, T., Bengtsson, N.E., and Risman, P.O.(1974). The frequency and temperature dependence of dielectric food data as determined by a cavity perturbation technique. *J. Microwave Power* 9 (), 129-145.

Ohlsson, T., and Bengtsson, N.E.(1975). Dielectric food data for microwave sterilization processing. *J. Microwave Power* 10 (), 93-108.

Ohlsson, T., and Risman, P.O.(1978). Temperature distribution of microwave heating spheres and cylinders. *J. Microwave Power* 13 (4), 303-310.

Palermo, J.R.(1982). Gelatinização de amido e grão de sorgo pela radiação de microondas. Tese de Mestrado apresentada à UNICAMP.

Paletta, F.C.(1988). Termometria - Princípios e Aplicações. Editado pelo CETECIL :Centro de Treinamento Técnico ECIL S/C Ltda., S.Paulo.

Perkin, R.M.(1979). Prospects of drying with radio frequency and microwave electromagnetic fields. *J. Separation Process Technol.* 1 (1), 14.

Perkin, R.M.(1980). The heat and mass transfer characteristics of boiling point drying using radio frequency and microwave

electromagnetic fields. *Int. J. Heat Mass Transfer* 23 (5), 687-695.

Perkin, R.M.(1983). The Drying of Porous Materials with Electromagnetic Energy Generated at Radio and Microwave Frequencies. *Report ECRC/M1646*, Capenhurst, England.

Perry, J.H.(1984), ed., "Chemical Engineers' Handbook", 6th. ed., 20-29 to 20-42, McGraw-Hill, New York.

Polley, S.L., Snyder, O.P., and Kotnour, P.(1980). A compilation of thermal properties of foods. *Food Technol.* 34 (11), 76-90.

Pour-El, A., Nelson, S.O., Peck, E.E., Tjho, B. and Stetson, L.E.(1981). Biological Properties of VHF- and Microwave Heated Soybeans. *J. Food Sci.* 46 (3), 880-885.

Püschner, H.(1966). "Heating with Microwaves", Philips Technical Library, The Netherlands.

RDRE, 1968. "Reference Data for Radio Engineers", 5th. ed., H.W. Sams, N. York.

Richard, A., Tomczak, M., Aubrun, M., and Ronat, E.(1988). An approach to automation of rotary drum dryers. Comparative study of industrial applications, in "Proceedings of the 6th. International Drying Symposium - IDS'88", vol. I, 225-232.

Riedel, L.(1969). Measurements of thermal diffusivity of

foodstuffs rich in water. *Kaeltechnik* 21 (), 315.

Riquelme, G.D., and Navarro, G.(1986). Analysis and modeling of rotatory dryer. Drying of copper concentrate, in "Drying of solids-Recent International Developments", edited by A.S. Mujumdar, John Wiley & Sons, 46-53.

Roebuck, B.D., and Goldblith, S.A.(1975). Dielectric properties at microwave frequency of agar gels-similarity to the dielectric properties of water. *J. Food Sci.* 40 (5), 899-902.

Rudolf, M.F. (1989). Comunicação pessoal e fotografia autorizada durante visita ao "Bundesforschungsanstalt für Ernährung", 75 Karlsruhe 1, Engesserstr. 20, Rep. Fed. da Alemanha, em junho de 1989.

Saeman, W.C., and Mitchell, T.R.(1954). Analysis of rotary drier and cooler performance. *Chem. Eng. Progress* 50 (), 467-475.

Saeman, W.C.(1962). Air solids interaction in rotary dryers and coolers. *Chem. Eng. Progress* 58 (6), 49-56.

Senise, J.T. e Perin, A.H.(1978). Realização de um forno contínuo de microondas com transporte por esteira. *S.B.P.C.*1978, (comunicação).

Senise, J.T., Concione, B.R.V., Moraes, V.L.V., Doin, P.A., Medugno, C.C., Andrade, A.O.M., Perri, E.B. e Perin,

A.H.(1980). Microwaves and the Industrial Production of Ethanol. Trabalho apresentado no IV Simpósio Internacional sobre Tecnologia dos Alcoois como Combustível, realizado no Guarujá, SP, de 05 a 08 de outubro de 1980.

Senise, J.T.(1985). A utilização de rádio-freqüência e microondas na eletrônica industrial. *Rev. Bras.Eng. Quím.*,8 (1), 51-61.

Singh, R.P.(1982). Thermal diffusivity in food processing. *Food Technol.* 36 (2), 87-91.

Skilling, H.H.(1948). "Fundamentals of Electric Waves." 2nd ed. Wiley, New York.

Sloan, C.E., Wheelock, T.D., and Tsao, G.T.(1967). Drying : systems and equipment, theory and calculations. *Chem. Eng.* 74 (6), 167-214.

Smit, J.(1987). "Microondas." Livros Érica Editora Ltda., S.Paulo.

Smith, F.J.(1979). Microwave-hot air drying of pasta, onions and bacon. *The Microwave Newsletter, Energy Applications*, 12 (6), 6-14.

Soares, E.A. e Dantas, T.M.(1990). Sistema de Fibras Ópticas para Medida da Temperatura. Trabalho apresentado no IV Simpósio Brasileiro de Microondas, realizado em São Carlos, SP, de 25 a 27 de julho de 1990.

Stairmand, C.J.(1964).*Gas Purification Processes*. Chapter 12, (ed.G. Nonhebel), George Newnes Ltd., London.

Steffe, J.F., Singh, R.P., and Miller, G.E.(1980). Harvest, drying and storage of rough rice, in "Rice : Production and Utilization", edited by B.S. Luh, AVI Publ.Co.Inc., Westport,CT.

Strumillo, C., and Kudra, T.(1986). "Drying : Principles, Applications and Design." Gordon and Breach Science Publishers, England.

Thuery, J.(1983). "Le Micro-ondes et leurs Effets sur la Matière : applications industrielles, agro-alimentaires et médicales". Technique et Documentation, Paris.

To, E.C.H.(1974). Dielectric Properties of Meats. Ph.D. Thesis, MIT, Cambridge, Massachusetts.

To, E.C.H., Mudgett, R.E., Wang, D.I.C., Goldblith, S.A., and Decareau, R.V.(1974). Dielectric properties of food materials. *J. Microwave Power* 9 (4), 303-316.

Vankoughnett, A.L.(1972). Fundamentals of microwave heating. *Int. Microwave Power Inst.* Short Course and Workshop for Users of Microwave Power.

Van Zuilichem, D.J. and Stolp, W.(1987). "Survey of the Present Extrusion Cooking Techniques in the Food and Confectionery Industry", in *Extrusion Technology for the Food*

Industry, edited by Colm O'Connor, Elsevier Applied Science.

von Hippel, A.R.(1954). "Dielectrics and Waves." MIT Press, Cambridge, Massachusetts.

Wang, S.H.(1986). Tratamento do grão de soja com radiação de microondas e seus efeitos no sabor, extração e algumas propriedades nutricionais do leite de soja. Tese de Doutorado apresentada à UNICAMP.

Wiedman, W. and Strobel, E.(1987). "Processing and Economic Advantages of Extrusion Cooking in Comparison with Conventional Processes in the Food Industry", in *Extrusion Technology for the Food Industry*, edited by Colm O'Connor, Elsevier Applied Science.

Williams, D.B., Monahan, J.P., Nicholson, W.J., and Aldrich, J.J.(1956). Biologic effects studies on microwave radiation : Time and power thresholds for the production of lens opacities by 12.3 cm microwaves. *IRE Trans. Med. Electron.* PGME-4, 17-22.

Wood, H.C., and Sokhansanj, S.(1990). Heat treatment of chopped alfafa in rotary drum dryers. *Drying Technology* 8 (3), 533-541.

Wyslouzil, W.(1984). "Operating and Service Manual - Rotary Microwave Processor". Division of Electrical Engineering, National Research Council of Canada. Não publicado.