

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**DESENVOLVIMENTO DE TAMBOR ROTATIVO PARA  
MICRO-ONDAS E APLICAÇÃO NO PROCESSAMENTO DE  
BATATA-DOCE**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

*Juliano Antônio Sebben*

**Porto Alegre**

**2015**



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**DESENVOLVIMENTO DE TAMBOR ROTATIVO PARA  
MICRO-ONDAS E APLICAÇÃO NO PROCESSAMENTO DE  
BATATA-DOCE**

*Juliano Antônio Sebben*

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia

*Área de concentração:* Pesquisa e Desenvolvimento de Processos

*Linha de Pesquisa:* Projeto, Simulação, Modelagem, Controle e Otimização de Processo Químicos e Bioprocessos.

**Orientador:**  
**Prof. Dr. Jorge Otávio Trierweiler**

**Porto Alegre**

**2015**



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação *Desenvolvimento de Tambor Rotativo para Micro-ondas e Aplicação no Processamento de Batata-doce*, elaborada por Juliano Antônio Sebben, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia.

Comissão Examinadora:

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Aline Schilling Cassini

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Fernanda Cabral Borges

---

Prof. Dr. Ronaldo Hoffmann



## Resumo

A tecnologia das micro-ondas tem sido amplamente utilizada em processos de aquecimento, secagem, esterilização e pasteurização. Além disso, o aquecimento por micro-ondas tornou-se popularmente conhecido no processamento de alimentos devido à capacidade de aumentar a taxa de aquecimento com significativa redução no tempo de cozimento, manuseio seguro, fácil operação e baixa necessidade de manutenção. Além disso, a aplicação das micro-ondas vem sendo explorada em diferentes áreas, transformando-a num dos verdadeiros trunfos da química verde. Contudo, a distribuição não homogênea das micro-ondas, a dificuldade na medição e o controle de temperatura, limitam o aproveitamento dessa tecnologia, sendo a homogeneidade do aquecimento um dos maiores desafios na sua aplicação. A fim de solucionar parcialmente os desafios encontrados no aquecimento de alimentos e materiais sólidos em micro-ondas, foi projetado e confeccionado um tambor rotativo de acrílico que promovesse a movimentação das partículas ao longo da cavidade interna do forno. Combinando as informações obtidas dessas ondas eletromagnéticas com o conhecimento pela crescente demanda por alimentos convenientes e saudáveis, verificou-se que formas desidratadas de batata-doce têm potencial para serem usadas como ingredientes funcionais em alimentos processados. Assim, estudou-se o método de secagem de batata-doce em micro-ondas. Realizou-se a caracterização das farinhas produzidas por MEV, EDS e análise bromatológica. Posteriormente, utilizou-se o tambor rotativo com aquecimento por micro-ondas para a realização de experimentos de desidratação. Para isso, foi realizado um Delineamento do Composto Central Rotacional (DCCR) a fim de avaliar a influência das variáveis: tempo, velocidade rotacional e quantidade mássica, na redução do teor de umidade das amostras. Quanto aos resultados referentes à cinética de secagem, a taxa de secagem foi maior para o método com micro-ondas que para o método por estufa com circulação de ar. Já a composição das farinhas produzidas foi semelhante para ambos os métodos. Os resultados pertinentes a desidratação da batata-doce com o protótipo desenvolvido mostraram que a velocidade de rotação não é uma variável significativa a partir de 8 rpm, para a quantidade de amostra estudada. A movimentação no interior do forno favoreceu o não superaquecimento das amostras, o que é importante para a manutenção dos componentes funcionais da batata-doce.



## Abstract

The microwave technology has been widely used in heating, drying, sterilization and pasteurisation. In addition, the microwave heating has become popularly known in food processing due to its ability to increase the heating rate with a significant reduction in cooking time, safe handling, easy operation and low maintenance required. In addition, the application of microwaves has been explored in different areas, making it one of the real trumps of green chemistry. However, the inhomogeneous distribution of the microwaves and the difficulty in measuring and temperature controlling limit the use of this technology. The inhomogeneity of heating is one of the main challenges in its implementation. In order to partially solve challenges faced in the heating solid food materials in a microwave oven was designed and built an acrylic rotating drum. This promotes the movement of particles in the inner cavity of the oven. Combining information from these heating method with the knowledge of the increasing demand for convenient and healthy food, it was found that sweet potato dehydrated forms have a potential to be used as functional ingredients in processed foods. The method of drying sweet potato in a microwave was studied. The characterization of the flour was performed by SEM, EDS and bromatologic analysis. Subsequently, it was used rotary drum heating by microwave for holding orange-fleshed sweet potato dehydration experiments. For this, it was elaborated that was done a central composite rotational design in order to evaluate the influence of the variables: time, rotational speed and mass quantity, in reducing the moisture content of the samples. The drying rate was higher for microwave method than for air circulation oven method. Compositions of flours were similar for both methods. Pertinent results dehydration sweet potato with the developed prototype showed that the rotational speed is not a significant variable from 8 rpm to the amount of sample. Movement in the oven favored the not overheating sample, which is important for maintenance of the functional components of sweet potatoes.



*“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém  
ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”.  
(Arthur Schopenhauer)*



## Agradecimentos

À minha família, em especial aos meus pais Olinto e Jení, que sempre confiaram nas minhas decisões, às minhas irmãs Juliane, Gisele e Elisandra e aos meus cunhados Ramón, Valmir e Mairon por todo o apoio ao longo dessa etapa e o incentivo nas horas mais difíceis.

Ao Prof. Dr. Jorge, pelos seus ensinamentos, oportunidades, paciência, manifestação do caráter e toda a orientação disponibilizada e à Prof<sup>a</sup>. Dr. Luciane pelas contribuições com esse trabalho.

Aos meus colegas do grupo GIMSCOP: Cristiane, Nelzy, Lucas Raymundo, Bruno e Rômulo, pelas dúvidas sanadas, ensinamentos estatísticos, análises químicas e toda a ajuda regada com parceria e bom-humor. À Fernanda pelo acolhimento no grupo de pesquisa, ensinamentos que delinearam caminhos futuros e à Juliana pelas demais contribuições prestadas.

Aos meus amigos que tive a oportunidade de conhecer através do mestrado, por todos os momentos que sorri e que me fizeram refletir, deixando a vida mais leve e tranquila; por toda a jornada de estudos e também pelos cafés, bares, shows, festas e churrascos, que fortaleceram essa amizade.

Ao Eng. Eletricista Lennon pelo suporte no projeto eletrônico e mecânico do sistema de rotação.

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Departamento de Engenharia Química pela possibilidade da realização desse trabalho.

À CAPES pela bolsa de Mestrado.

E principalmente, a Deus e aos meus mentores, pela vida, pela proteção e por colocar em meu caminho as pessoas certas e os desafios necessários. Obrigado por tudo.



## SUMÁRIO

<b>Capítulo 1 – Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação.....	1
1.2 Objetivos do trabalho.....	3
1.3 Estrutura da dissertação .....	3
<b>Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>5</b>
2.1 Fundamentos do aquecimento dielétrico em um forno de micro-ondas .....	5
2.2 Mecanismos de aquecimento dielétrico.....	7
2.3 Definição das propriedades dielétricas.....	8
2.3.1 Propriedades dielétricas dos alimentos .....	9
2.3.2 Propriedades dielétricas de cerâmicas e polímeros.....	11
2.4 Secagem com micro-ondas .....	12
2.5 A termometria em fornos de micro-ondas .....	13
2.6 Tecnologia de tambor rotativo .....	14
2.6.1 Influência das chicanas .....	14
2.6.2 Movimentação transversal da carga no interior de um cilindro rotativo .....	15
2.7 Secadores rotativos com aquecimento por micro-ondas.....	18
2.8 A batata-doce .....	20
2.8.1 Batata-doce da polpa alaranjada.....	23
2.8.2 Farinha de batata-doce.....	24
<b>Capítulo 3 – Mapeando o Aquecimento em Micro-Ondas.....</b>	<b>25</b>
3.1 Materiais e métodos .....	26
3.1.1 Preparo das amostras.....	26
3.1.2 Desenvolvimento do método de aquecimento.....	26
3.2 Resultados e discussões .....	28
3.3 Conclusões.....	31
<b>Capítulo 4 – Secagem de Batata-doce para a Produção de Farinha .....</b>	<b>32</b>
4.1 Materiais e métodos .....	32
4.1.1 Materiais.....	32
4.1.2 Equipamentos.....	33
4.1.4 Cinética de Secagem.....	36
4.1.5 Caracterização da farinha.....	37
4.2 Resultados e discussões .....	39
4.2.1 Cinética de secagem .....	39
4.2.2 Caracterização das farinhas.....	42
4.1 Conclusões.....	49
<b>Capítulo 5 – Projeto do Sistema de Tambor Rotativo para Micro-ondas.....</b>	<b>50</b>
5.1 Projeto do tambor rotativo .....	50
5.2 Sistema de movimentação .....	53
5.3 Sensor para medição de rotação .....	54
5.4 Resultados e discussões .....	55
5.4.1 Constatações relatadas.....	58
<b>Capítulo 6 – Desidratação de Batata-doce utilizando Tambor Rotativo Combinado com Micro-ondas .....</b>	<b>60</b>
6.1 Materiais e métodos .....	60
6.1.1 Planejamento experimental .....	60

6.2	Resultados e discussões .....	62
6.2.1	Influência das variáveis no processo de desidratação parcial de batata-doce .....	62
6.2.2	Consumo energético.....	71
6.3	Conclusões.....	72
<b>Capítulo 7 –</b>	<b>Considerações Finais .....</b>	<b>74</b>
7.1	Conclusões.....	74
7.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	75
7.3	Aspectos sócio-econômicos relacionados à dissertação .....	75
<b>Referências</b>	<b>.....</b>	<b>77</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Regiões do espectro eletromagnético com escalas aproximadas, bem como suas aplicações químicas para o comprimento de onda selecionado (adaptado de (Leonelli, Veronesi e Cravotto, 2013)).	6
Figura 2.2: Constante dielétrica de alimentos a 25 °C (adaptado de Sahin e Sumnu (2006)).	10
Figura 2.3: Fator de perda dielétrica de alimentos a 25 °C (adaptado de Sahin e Sumnu (2006)).	10
Figura 2.4: Configurações típicas de aletas (adaptado de Green e Perry, 2007).	15
Figura 2.5: Forma de movimentação transversal de carga sólida em cilindro rotativo (adaptado de Mellmann, 2001).	16
Figura 2.6: Diagrama esquemático da seção transversal do cilindro com carga (extraído de (Araujo, 2011)).	17
Figura 2.7: Esquema de um secador estilo tambor rotativo com aquecimento híbrido (adaptado de Wang <i>et al.</i> , 2009).	19
Figura 2.8: Percentuais da quantidade produzida de batata-doce no Brasil, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação produtoras – 2012; Fonte: IBGE (2013).	22
Figura 2.9: Rendimento médio em quilogramas de batata-doce por hectare, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação Produtoras – 2012; Fonte: IBGE (2013).	22
Figura 3.1: Ilustração do posicionamento dos planos no interior do forno.	27
Figura 3.2: Ilustração da cavidade interna de um forno de micro-ondas dividida nas diferentes regiões experimentais. (a) Plano 1; (b) Plano 2 e (c) Plano 3.	27
Figura 3.3: Quantidade de amostras que absorveram energia suficiente para estourar nas 27 regiões da cavidade ressonante. Entende-se <i>x</i> como a posição frontal, onde fica a porta, e <i>y</i> da parede direita do forno: (a) Plano 3 – superior; (b) Plano 2 – intermediário e (c) Plano 3 – inferior.	30
Figura 4.1: Batata-doce da polpa alaranjada utilizada nos experimentos.	32
Figura 4.2: Forno de micro-ondas utilizado nos experimentos de secagem.	33
Figura 4.3: Estufa de secagem com circulação e renovação de ar.	34
Figura 4.4: Moinho de lâminas tipo Willey – De Leo.	34
Figura 4.5: Fluxograma de produção da farinha de batata-doce.	35
Figura 4.6: Disposição dos discos de batata-doce de polpa alaranjada crua sobre o prato de vidro utilizado no forno de micro-ondas.	36
Figura 4.7: Sistema de Weende proposto por Henneberg em 1864.	37
Figura 4.8: Relação entre o teor de umidade da batata-doce da polpa alaranjada e o tempo de secagem; (a) secagem com micro-ondas; (b) secagem em estufa com circulação de ar (60°C).	40
Figura 4.9: Curvas da taxa de secagem da batata-doce da polpa alaranjada; (a) Secagem com micro-ondas; (b) Secagem em estufa com circulação de ar (60°C).	41
Figura 4.10: Efeito da diferença do método de secagem no teor de umidade.	42
Figura 4.11: Farinha de batata-doce de polpa alaranjada; (a) processada em estufa e (b) processada em micro-ondas.	43
Figura 4.12: Análise de <i>Mapping</i> de diferentes elementos para a farinha seca através de micro-ondas.	46
Figura 4.13: Análise de <i>Mapping</i> de diferentes elementos para a farinha processada a partir de estufa com circulação de ar (60°C).	47
Figura 4.14: MEV das farinhas de batata-doce secas com: A – micro-ondas; B – estufa com circulação de ar a 60°C.	48

Figura 5.1: Representação em três dimensões do tambor rotativo: 1 – Flange; 2 - Parede do tambor; 3 – Aleta; 4 - Tampa.....	52
Figura 5.2: Desenho do tambor com tampa. Vista lateral à esquerda e vista superior à direita.....	52
Figura 5.3: Dimensionamento das partes complementares ao tambor: .....	53
a) Flange; b) Chicana. ....	53
Figura 5.4: Representação do tambor rotativo com chicanas e tampa:.....	53
a) vista lateral; b) vista superior com indicação do eixo central; c) corte da seção interna. ....	53
Figura 5.5: Princípio de funcionamento de uma chave óptica interruptiva. ....	55
Figura 5.6: Tambor de acrílico. ....	56
Figura 5.7: (a) Chave óptica interruptiva e (b) motorreductor.....	56
Figura 5.8: (a) Forno de micro-ondas com as adaptações externas; (b) controlador de rotação; (c) <i>driver</i> de acionamento manual/automático.....	57
Figura 6.1: Esquema de tambor rotativo com micro-ondas com batata-doce. ....	63
Figura 6.2: Diagrama de pareto – DCCR .....	65
Figura 6.3: Superfície de resposta para o modelo ajustado de remoção de umidade em função da velocidade rotacional e do tempo de aquecimento. ....	66
Figura 6.4: Superfície de resposta para o modelo ajustado de remoção de umidade em função da quantidade mássica e do tempo de aquecimento. ....	66
Figura 6.5: Superfície de resposta para o modelo ajustado de remoção de umidade em função da velocidade rotacional e da quantidade mássica. ....	67
Figura 6.6: Diagrama de pareto para a taxa de remoção de umidade. ....	68
Figura 6.7: Superfície de resposta para o modelo ajustado de taxa de remoção de umidade em função da velocidade rotacional e da quantidade mássica. ....	69
Figura 6.8: Superfície de resposta para o modelo ajustado de taxa de remoção de umidade em função do tempo de aquecimento e da velocidade rotacional. ....	69
Figura 6.9: Superfície de resposta para o modelo ajustado de taxa de remoção de umidade em função do tempo de aquecimento e da quantidade mássica.....	70

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1: Propriedades dielétricas de alguns materiais cerâmicos na frequência de 1 MHz (adaptado de Mehdizadeh (2010)).	11
Tabela 2.2: Componentes presentes da batata-doce e suas funções fisiológicas (adaptado de Ray e Tomlins (2010)).	21
Tabela 3.1: Análise de variância para o fator posição.	28
Tabela 3.2: Quantidade média de amostras transformadas e agrupamento das regiões.	29
Tabela 4.1: Identificação do forno de micro-ondas e características técnicas:	33
Tabela 4.2: Composição centesimal média da farinha da batata-doce.	43
Tabela 4.3: Teores dos minerais da farinha de batata-doce identificados por EDS.	44
Tabela 5.1: Dimensionamento do tambor rotativo em milímetros.	51
Tabela 5.2: Especificações técnicas do motorreductor tipo CHP.	54
Tabela 5.3: Características de operação da chave óptica à temperatura de 25 °C.	55
Tabela 6.1: Valores utilizados no DCCR para a desidratação da batata-doce.	61
Tabela 6.2: Planejamento experimental para os três fatores.	62
Tabela 6.3: Matriz do planejamento experimental e resultados da remoção de umidade.	63
Tabela 6.4: Coeficientes de regressão para a remoção de umidade	64
Tabela 6.5: Anova para a remoção de umidade.	65
Tabela 6.6: Coeficientes de regressão para a taxa de remoção de umidade	68
Tabela 6.7: Remoção de umidade para diferentes velocidades de rotação com 100 gramas de batata-doce e aquecimento mantido em 105 segundos.	70
Tabela 6.8: Consumo de energia por unidade de água evaporada sob potência de operação de 820 W.	72



## NOTAÇÃO E SIMBOLOGIA

$\epsilon_r$	Permissividade relativa
$\epsilon_r'$	Constante dielétrica
$\epsilon_r''$	Fator de perda dielétrica
$\tan \delta$	Tangente de perda dielétrica
$\epsilon_0$	Permissividade no espaço livre
$C_p$	Calor específico
$\rho$	Massa específica
$E$	Intensidade do campo elétrico
$f$	Frequência
$d_p$	Profundidade de penetração
$\lambda_0$	Comprimento de onda no espaço livre
$Fr$	Número de Froude
$\omega$	Velocidade angular
$R$	Raio interno
$g$	Aceleração gravitacional
$n_c$	Velocidade rotacional
$D$	Diâmetro interno
$S$	Largura da superfície exposta da carga
$r$	Raio do tambor
$h$	Altura máxima da carga
$\alpha$	Ângulo do setor circular
$A_c$	Área do segmento circular
$A$	Área da seção cilíndrica
$f$	Grau de enchimento
$rpm$	Rotações por minuto
$\mu A$	Microampere
$V$	Volts
$W$	Watts
$\mu s$	Microsssegundos
$nm$	Nanometros
$X(b.s)$	Teor de umidade em base seca
$X(b.u)$	Teor de umidade em base úmida
$CEU$	Consumo de energia por unidade de massa de água evaporada

$P$	Potência
$M_{H_2O}$	Massa de água evaporada
$\phi$	Diâmetro externo

# Capítulo 1 – Introdução

## 1.1 Motivação

Promover mecanismos de movimentação de carga no interior de um forno de micro-ondas doméstico é uma tarefa que ainda pode ser aperfeiçoada. Sabe-se que muitos materiais sólidos, principalmente alimentos, necessitam de agitação mecânica para que possa ser efetuada a homogeneização de seus componentes. Esses materiais, além da agitação, requerem aquecimento para serem processados. No entanto, os casos de geração de calor mais utilizados se baseiam em métodos convencionais, como fornos, estufas e secadores a ar quente, os quais requerem um período relativamente longo de tempo para alcançar a temperatura necessária para o processo. Assim, vislumbra-se no aquecimento através da radiação das micro-ondas, uma alternativa vantajosa para o processamento de alimentos.

Comercialmente os fornos de micro-ondas são fabricados com um motor que promove a rotação de um prato-giratório, horizontalmente sobre seu eixo, na base do forno. Contudo, quando o produto é colocado sobre o prato, ele somente irá girar ao longo da parte inferior do forno, para absorver a radiação em diferentes pontos do interior da cavidade. Essa movimentação, de fato, não proporciona uma mistura do conteúdo do produto. Então, uma das alternativas seria criar impelidores que promovessem a agitação do conteúdo juntamente com o movimento giratório do mesmo. Porém, do ponto de vista de engenharia, devido às limitações construtivas do forno e do campo eletromagnético gerado, instigam-se outros métodos para sanar esse desafio, sendo a tecnologia de tambores rotativos uma possibilidade para tal.

Tecnologias de processamento para a produção de farinhas de batata-doce têm sido desenvolvidas em diferentes países (China, Índia, Brasil) através da secagem convencional. Neste trabalho, também se analisa o processo com aquecimento por fluxo contínuo de micro-ondas como uma grande oportunidade para a indústria produzir alimentos a partir de batata-doce, mantendo as características nutricionais. Essa farinha de batata-doce produzida pode ser facilmente inserida na alimentação escolar de diversas instituições através da simples adição nas mais variadas refeições, o que é facilitado, por se tratar de um alimento saudável e de rápido preparo.

Uma nutrição adequada compreende diferentes aspectos biológicos e comportamentais. A fim de que o corpo humano não sinta deficiência nutricional, faz-se

necessária uma alimentação que contenha todos os nutrientes em quantidade adequada. Contudo, não são todos os nutrientes que estão disponíveis para a população, ou então, nem todas as pessoas têm acesso a eles. Isso se deve não somente a questões econômicas, mas também de hábito e educação alimentar (Silva, 2011).

A batata-doce é um dos super alimentos do mundo (Tudor, 2014). Apesar de extremamente rica nutricionalmente, por causa do seu nome enganoso, ela sofre o estigma de ser doce, entendida como açúcar e uma batata e, infelizmente, acaba sendo subestimada pela população. Contudo, as qualidades nutricionais desse alimento têm sido apontadas em diversas pesquisas científicas, devido aos benefícios que trazem para a saúde humana.

Segundo (Tudor, 2014), existem 8 razões principais para se comer batata-doce:

- 1) contém mais vitamina A que a maioria das frutas e vegetais;
- 2) contém elevada quantidade de vitamina E e antioxidantes que ajudam no combate aos radicais livres;
- 3) apresenta mais fibras por porção que a aveia, sendo que as fibras fornecem a sensação de saciedade e ajudam na digestão;
- 4) é uma das melhores fontes de betacaroteno biodisponível;
- 5) além de ser naturalmente doce, ela é formada por carboidratos complexos, cuja digestão ocorre lentamente sem que haja a formação de picos de açúcar na corrente sanguínea;
- 6) contém proteínas, que quando digeridas, são utilizadas como anti-inflamatório no corpo humano e ajudam a reparar as células danificadas;
- 7) o *Center for Science in Public Interest* (CSPI) elegeu a batata-doce como a número 1 em nutrição, estando mais que 100 pontos à frente do espinafre e do brócoli;
- 8) paladar atrativo, uma vez que um pedaço de batata-doce apresenta um sabor adocicado, tanto quanto de um delicioso bolo.

A batata-doce é um alimento de fácil cultivo, bastante popularizado e altamente nutricional. No entanto, para que a população possa ter acesso rápido aos nutrientes presentes nesse alimento, especialmente da batata-doce de polpa alaranjada, que é rica em pró-vitamina A, vislumbra-se a necessidade da fabricação de um produto que prolongue o tempo de vida de todo o conteúdo nutricional do produto. Nesse caso, encontra-se na farinha de batata-doce uma solução para esses desafios, além disso, essa farinha pode substituir parcialmente a farinha de trigo na produção de bolos, biscoitos e outros produtos utilizados na alimentação escolar.

Segundo Ray e Tomlins (2010) os pós e purês de batata-doce podem ser utilizados como espessantes e gelificantes para conferir propriedades texturais desejadas, melhorar os valores nutricionais, a atividade antioxidante e a cor natural de vários produtos

alimentares. Além disso, os ingredientes da batata-doce podem ser usados como alternativa aos produtos de trigo para indivíduos com diagnóstico de doença celíaca.

## **1.2 Objetivos do trabalho**

O obtivo geral deste trabalho é desenvolver um tambor rotativo para micro-ondas e aplicar o aparato desenvolvido no processamento de batata-doce.

Os objetivos específicos são elencados na sequência:

- estudar a dissipação das ondas eletromagnéticas no interior de uma cavidade ressonante utilizando grãos de milho pipoca;
- investigar a secagem por micro-ondas, como método de conservação, para a elaboração de formas estáveis de farinha de batata-doce, que possam ser utilizadas na elaboração de produtos alimentícios;
- projetar e construir um sistema de movimentação de partículas sólidas, estilo tambor rotativo, adaptado em um forno de micro-ondas doméstico, resistente aos efeitos gerados pelas ondas eletromagnéticas;
- avaliar o efeito das variáveis independentes no processo de desidratação de batata-doce através de um sistema de tambor rotativo combinado com aquecimento por micro-ondas.

## **1.3 Estrutura da dissertação**

Nesta breve introdução foi realizada a apresentação geral deste trabalho, juntamente com os principais objetivos e motivações para o desenvolvimento do mesmo.

O capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica referente aos conceitos e informações que serviram como alicerce para o andamento da pesquisa.

Esta dissertação, diferentemente do modelo clássico, está constituída por capítulos que individualmente apresentam o desenvolvimento completo do trabalho, incluindo a metodologia utilizada e os resultados alcançados. A opção por essa forma de estruturação foi feita a fim de facilitar a fluidez da leitura, visto que diferentes abordagens referentes ao tema central desse trabalho foram estudadas em momentos específicos da pesquisa.

O capítulo 3 inicia com o desenvolvimento de um mapeamento do padrão de aquecimento no interior da cavidade ressonante de um forno de micro-ondas através de partículas estáticas.

O capítulo 4 aborda o processo de secagem de batata-doce. Num primeiro momento são comparados os métodos de secagem com ar quente e micro-ondas para a produção de farinha de batata-doce.

O capítulo 5 detalha o projeto construtivo do sistema de movimentação de um tambor rotativo para um forno de micro-ondas doméstico, bem como o formato final obtido. Esse sistema será avaliado em etapas que complementam os trabalhos desenvolvidos no capítulo 6.

O capítulo 6 analisa o efeito de algumas variáveis no processo de desidratação da batata-doce com o sistema de tambor rotativo combinado ao aquecimento por micro-ondas e uma breve avaliação energética.

O capítulo 7 apresenta as conclusões finais, sugestões para trabalhos futuros e aspectos sócio-econômicos relacionados à dissertação.

## Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

Este capítulo é constituído por um levantamento bibliográfico dos principais assuntos necessários para o desenvolvimento desse trabalho. O capítulo está dividido em 8 subseções. Inicialmente serão abordados os fundamentos e mecanismos de aquecimento por micro-ondas, as definições das propriedades dielétricas dos alimentos e materiais e o processo de secagem utilizando essa radiação. Na sequência é realizado um levantamento sobre a tecnologia de tambores rotativos e os secadores rotativos com aquecimento por micro-ondas existentes. Por último, são apresentados os aspectos principais da batata-doce e sua farinha.

### **2.1 Fundamentos do aquecimento dielétrico em um forno de micro-ondas**

Definem-se micro-ondas como as ondas eletromagnéticas com frequências entre 0,3 e 300 GHz e comprimentos de onda entre 0,001 e 1 m. São, portanto, ondas que estão entre a região das ondas de rádio e a região do infravermelho no espectro das ondas eletromagnéticas, conforme mostra a Figura 2.1. A maioria dos reatores de micro-ondas para síntese química e fornos de micro-ondas domésticos opera a uma frequência de 2,45 GHz, o que corresponde a um comprimento de onda de 12,25 cm (Schimink e Leadbeater, 2011).

A formação das micro-ondas ocorre devido à interação de dois componentes perpendiculares, o campo elétrico e o campo magnético. Sendo que o aquecimento de determinadas substâncias é baseado na capacidade que as mesmas têm em absorver a energia das micro-ondas e, efetivamente, converter a energia eletromagnética em calor (Motasemi e Afzal, 2013). De acordo com a interação da radiação das micro-ondas com o material, existem três maneiras nas quais esses materiais podem ser caracterizados: (1) transparentes, que são os materiais pelos quais as micro-ondas atravessam sem que haja perdas, como teflon, quartzo e cerâmicas; (2) absorvedores, os que permitem a absorção das micro-ondas, como água e óleo, e (3) condutores, onde as micro-ondas não conseguem penetrar e, por isso, são refletidas, a exemplo dos metais (Motasemi e Afzal,

2013). Demais considerações sobre a interação da micro-ondas com os materiais serão abordadas no item 2.3.2.

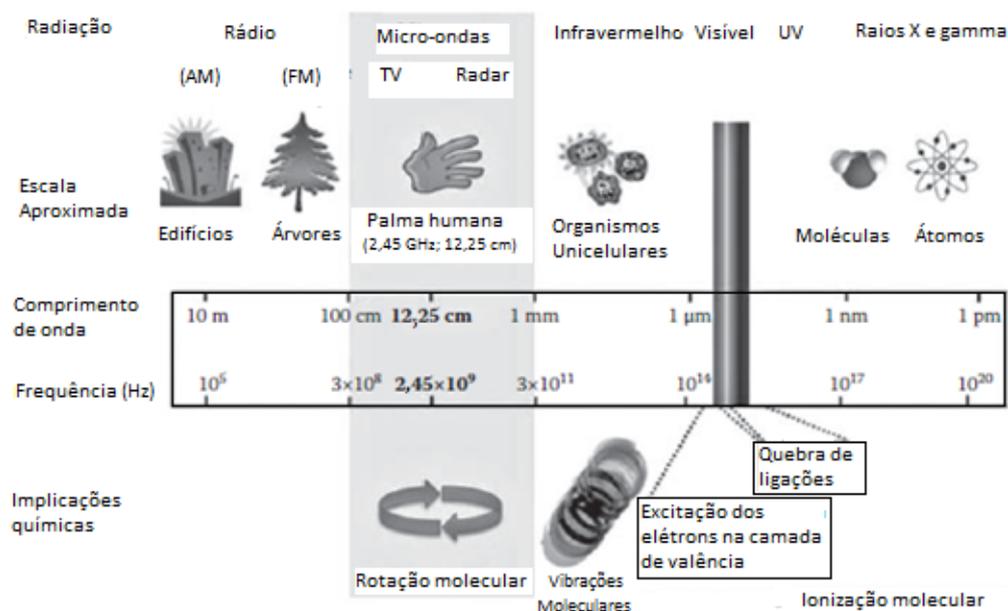


Figura 2.1: Regiões do espectro eletromagnético com escalas aproximadas, bem como suas aplicações químicas para o comprimento de onda selecionado (adaptado de (Leonelli, Veronesi e Cravotto, 2013)).

Conforme Mai, Balzaretto e Schmidt (2008), ondas confinadas entre paredes, como as micro-ondas na cavidade ressonante, sofrem reflexões que fazem com que haja ondas se deslocando em sentidos opostos. Estas ondas, de mesma frequência, mesma amplitude, mesma velocidade, mesma direção e sentidos opostos se sobrepõem. A superposição pode formar um padrão de ondas estacionárias, dependendo da relação entre o comprimento de onda e da distância entre as extremidades.

Sabe-se que onda transporta energia, mas no caso das ondas estacionárias isso não ocorre, pois os nodos não vibram, portanto, não transportam energia. Nesse caso, a energia fica confinada nas regiões de vibração ocorrendo, periodicamente, conversões de energia cinética em energia potencial elástica e vice-versa. Por isso, num forno de micro-ondas, a câmara de cozimento é dimensionada de maneira que as suas paredes sempre coincidam com os nós das micro-ondas. Assim, praticamente não haverá absorção das ondas pelas paredes do forno, proporcionando reflexões próximas à condição ideal de formação de onda estacionária. Por consequência, normalmente o alimento é colocado sobre um prato giratório para garantir uma distribuição uniforme de energia, pois se o alimento permanecesse estático, ter-se-iam pontos frios que coincidiriam com os nodos das ondas estacionárias (Mai, Balzaretto e Schmidt, 2008), e *hot spots* nos pontos de maior intensidade do campo eletromagnético.

Com o intuito de comprovar a teoria das micro-ondas com a verdadeira distribuição de energia em um forno, Mehdizadeh (2010) estudou a capacidade que o método dos elementos finitos (FEM) tem em prever o comportamento do aquecimento pelas micro-ondas em uma cavidade ressonante. Sua metodologia consistiu na inserção de uma camada resistiva composta por material polimérico coberto por carbono, com geometria retangular e as mesmas dimensões internas do forno, o qual operou com a frequência de 2450 MHz fornecida pelo magnetron. Em seu experimento, o autor utilizou uma folha de papel térmico de fax, a qual foi depositada acima da camada resistiva, sendo ambas envolvidas por duas finas camadas de vidro para assegurar um íntimo contato entre a camada resistiva e o papel térmico. Posteriormente, este aparato foi posicionado a uma altura de 5 cm da base inferior da cavidade interna do aparelho. Assim, com a mudança na coloração do papel, pode-se visualizar o padrão de aquecimento obtido. Os resultados alcançados por Mehdizadeh (2010) foram comparados com os obtidos pela modelo FEM simulado em COMSOL pelo mesmo autor, e, portanto, foi possível perceber a concordância parcial entre a localização dos *hot spots* – pontos de maior aquecimento - e os procedimentos realizados.

## 2.2 Mecanismos de aquecimento dielétrico

Existem diversos mecanismos pelos quais os materiais são aquecidos por micro-ondas (Lam e Chase, 2012). Os três mecanismos principais que surgem a partir do deslocamento de uma partícula carregada, quando exposta à radiação de micro-ondas são:

- Polarização de dipolo: substâncias contendo componentes polares são fortemente aquecidas via este mecanismo, quando submetidas à radiação por micro-ondas (Lam e Chase, 2012). Pois conforme Fernández, Arenillas e Menéndez (2010), o dipolo pode ser temporariamente induzido pela presença de um campo elétrico externo, através da distorção de uma nuvem eletrônica de moléculas não polares ou de átomos. Em algumas substâncias, como exemplo da água, dipolos permanentes existem devido à assimetria da distribuição das cargas na molécula (Lam e Chase, 2012). No entanto, o componente de campo elétrico das micro-ondas faz com que ambos os dipolos permanentes e induzidos rotacionem de modo a tentarem se alinhar com o campo eletromagnético alternado. Esse movimento molecular gera atrito entre as moléculas de rotação e, subsequentemente, a energia gerada é dissipada na forma de calor (Menéndez *et al.*, 2010).
- Polarização Interfacial ou de Maxwell-Wagner: esta polarização resulta de um acúmulo de carga nas áreas de contato entre diferentes componentes de um sistema heterogêneo. A polarização é criada devido às diferenças de condutividade e constante dielétrica das substâncias na interface, sendo que o acúmulo de cargas na fronteira entre os materiais conduz a distorções de campo e de perda dielétrica, que contribuem para os efeitos de aquecimento (Lam e Chase, 2012).
- Mecanismos de condução: quando um material eletricamente condutivo é exposto à radiação eletromagnética, há a geração de corrente elétrica devido ao movimento das partículas carregadas ou transportadores (elétrons, ions, etc.) pelo material. Logo, sob a influência de um campo eletromagnético aplicado externamente ao material, haverá a formação de caminhos condutores. Assim, o

material acaba sendo aquecido com esse mecanismo porque a potência gerada pelo fluxo forçado de elétrons é convertida em calor (Lam e Chase, 2012).

### 2.3 Definição das propriedades dielétricas

As propriedades dielétricas dos materiais que são de interesse na maioria das aplicações podem ser definidas em termos da sua permissividade relativa. A permissividade é utilizada para descrever as propriedades dielétricas que influenciam na reflexão das ondas eletromagnéticas sobre a interface dos materiais e da atenuação da energia no seu interior (Sosa-Morales *et al.*, 2010). O complexo de permissividade relativa é descrito pela equação 2.1:

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

onde  $\epsilon_r'$  e  $\epsilon_r''$  são chamados de constante dielétrica e fator de perda, respectivamente. A parte real, a constante dielétrica ( $\epsilon_r'$ ), descreve a capacidade que um material tem em armazenar energia quando submetido a um campo elétrico e também influencia na distribuição do campo elétrico e na fase da onda que percorre o material. Já a parte imaginária, o fator de perda dielétrica ( $\epsilon_r''$ ), influencia tanto na absorção como na atenuação de energia e representa a capacidade de dissipação de energia quando aplicado um campo elétrico ou vários mecanismos de polarização, o que geralmente resulta na geração de calor. Por conseguinte, a quantidade de energia eletromagnética convertida em térmica nos alimentos é proporcional ao valor do fator de perda ( $\epsilon_r''$ ) (Sosa-Morales *et al.*, 2010).

Segundo Mehdizadeh (2010), o fator de perda ( $\epsilon_r''$ ) também é chamado de fator de dissipação, podendo apresentar outras designações em diferentes indústrias. Já as perdas dielétricas são algumas vezes caracterizadas pela tangente de perda, representada pela razão entre a parte imaginária e a parte real, conforme mostrado na equação (2.2). Consequentemente, quanto maior a magnitude dessa tangente, maior será o aquecimento do material. O ângulo  $\delta$  representa a fase *lag* entre a polarização do material e o campo elétrico aplicado (Kitchen *et al.*, 2014).

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \quad (2.2)$$

O fator de perda dielétrica é fortemente influenciado pelos mecanismos de condutividade iônica e rotação dos dipólos (equação 2.3)

$$\epsilon_r'' = \epsilon_d'' + \epsilon_\sigma'' = \epsilon_d'' + \frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \quad (2.3)$$

sendo que  $d$  e  $\sigma$  simbolizam a contribuição devido à rotação dos dipólos e à condutividade iônica, respectivamente,  $\omega$  a frequência angular e  $\epsilon_0$  a permissividade do espaço livre ( $8,854 \times 10^{-12} \text{ F m}^{-1}$ ) (Sosa-Morales *et al.*, 2010).

Materiais com propriedades dielétricas, assim como os alimentos, quando submetidos a frequências de micro-ondas ou radiofrequência, convertem a energia elétrica em calor.

Além disso, o aumento na temperatura de um material devido ao aquecimento dielétrico pode ser calculado por:

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = 55,63 \times 10^{-12} f E^2 \varepsilon_r'' \quad (2.4)$$

onde  $C_p$  é o calor específico do material,  $\rho$  é a massa específica do material,  $E$  é a intensidade do campo elétrico,  $f$  é a frequência e  $dT/dt$  é a variação de temperatura com o tempo. Além do mais, pode-se concluir através da equação 2.4 que o aumento na temperatura é proporcional ao fator de perda do material, à intensidade do campo elétrico, à frequência e ao tempo de aquecimento (Sosa-Morales *et al.*, 2010).

Para materiais que apresentam elevado fator de perda, a taxa de calor gerado diminui rapidamente e, portanto, a energia das micro-ondas não penetra profundamente neles. Por isso, um parâmetro é necessário para indicar a distância que as micro-ondas irão penetrar no material (Sahin e Sumnu, 2006). Logo, um parâmetro definido como profundidade de penetração ( $d_p$ ) é calculado pela equação 2.5:

$$d_p = \frac{\lambda_0 \sqrt{\varepsilon'}}{2\pi \varepsilon_r''} \quad (2.5)$$

onde  $\lambda_0$  é o comprimento de onda no espaço livre (para 2,45 GHz,  $\lambda_0 = 12,25$  cm) (Sosa-Morales *et al.*, 2010).

### 2.3.1 Propriedades dielétricas dos alimentos

As propriedades dielétricas são as propriedades físicas mais importantes associadas ao aquecimento de alimentos pela absorção de energia através de radiofrequência ou frequências de micro-ondas, pois o comportamento dielétrico dos alimentos afeta diretamente as características do seu aquecimento (Sosa-Morales *et al.*, 2010). Além disso, para muitas operações realizadas no processamento de alimentos, assim como, reaquecimento, pré-cozimento, secagem, pasteurização e esterilização, torna-se significativa a determinação das propriedades dielétricas a fim de conhecer o perfil de aquecimento dos alimentos em fornos de micro-ondas (Sahin e Sumnu, 2006).

A constante dielétrica e o fator de perda dielétrica de vários alimentos podem ser visualizados nas Figuras 2.2 e 2.3, respectivamente. Percebe-se através destas figuras, que as propriedades dielétricas do óleo de cozinha apresentam valores muito baixos, devido à característica apolar desse composto. No entanto, substâncias como a água e alimentos com alto teor de umidade, assim como, frutas, vegetais e carnes, contêm propriedades dielétricas com valores elevados, em virtude da rotação dos dipolos. Além disso, os maiores fatores de perda dielétrica são encontrados em alimentos com alto teor de sal, por exemplo, o presunto (Sahin e Sumnu, 2006).

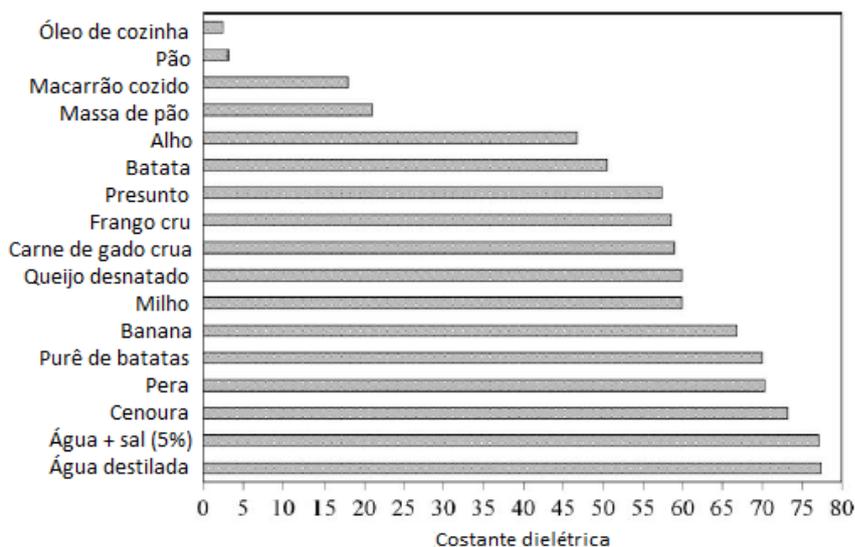


Figura 2.2: Constante dielétrica de alimentos a 25 °C (adaptado de Sahin e Sumnu (2006)).

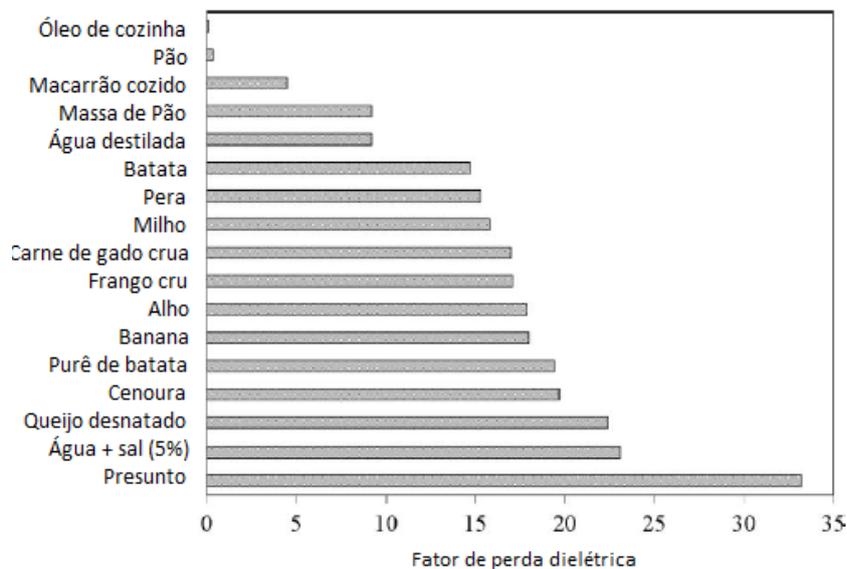


Figura 2.3: Fator de perda dielétrica de alimentos a 25 °C (adaptado de Sahin e Sumnu (2006)).

A água, que é uma molécula altamente polar, tem elevada permissividade e fator de perda dielétrica ao ser comparada com a maioria das substâncias. Por isso, a ampla presença de água em materiais orgânicos como alimentos e tecidos biológicos, impacta significativamente nas propriedades dielétricas do meio onde a água está contida (Mehdizadeh, 2010). Além disso, a maioria dos produtos agrícolas e alimentares é higroscópica, no caso dos grãos, por exemplo, as propriedades dielétricas são essencialmente proporcionais à massa de água presente nas amostras, visto que a

constante dielétrica da água livre é cerca de 80, enquanto que a matéria de grão de seco é inferior a 3 (Sacilik e Colak, 2010).

É importante destacar que as propriedades dielétricas dos alimentos dependem fortemente do teor de umidade, da temperatura e da composição dos alimentos. Além disso, a frequência do forno também interfere nessas propriedades (Sahin e Sumnu, 2006).

### 2.3.2 Propriedades dielétricas de cerâmicas e polímeros

O requisito principal para o uso de materiais cerâmicos e vidros em aplicações que envolvem alta frequência é o fato de portarem uma baixa perda dielétrica. A vantagem do uso desses materiais é a de que se evitam perdas de energia e transmissão de sinal, aproveitando-se das propriedades mecânicas ou térmicas desejáveis da cerâmica. Existem também, cenários onde materiais cerâmicos são processados em campos de alta frequência, como por exemplo, a sinterização de cerâmicas por micro-ondas (Mehdizadeh, 2010).

A Tabela 2.1 mostra alguns exemplos de vidros e materiais cerâmicos listados em ordem da menor para a maior perda dielétrica.

Tabela 2.1: Propriedades dielétricas de alguns materiais cerâmicos na frequência de 1 MHz (adaptado de Mehdizadeh (2010)).

Material	Constante Dielétrica ( $\epsilon_r'$ )	Fator perda Dielétrica ( $\epsilon_r''$ )	Resistência Dielétrica (KV/mm)
Nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ )	6,1	0,0006	20
Nitreto de alumínio (AlN)	8,8-8,9	0,001	15
Quartzo ( $\text{SiO}_2$ )	3,8-5,4	0,0015	15-25
Nitreto de Boro (BN)	4,2	0,004	36,5-55,4
Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )	8,8-10,1	0,003-0,02	10
Vidro ( $\text{Na}_2\text{O}.\text{CaO}.\text{SiO}_2$ )	4,0-8,0	0,0005-0,01	7,8-13,2
Mulita	6,2-6,8	0,03-0,034	7,8
Zircônia ( $\text{ZrO}_2$ )	12,0	0,12	5

Sob alta frequência, o fator de perda dielétrica dos polímeros depende acima de tudo da polaridade molecular. Em polímeros polares, dipolos são criados por um desequilíbrio na distribuição dos elétrons. Quando expostos a um campo elétrico, esses dipolos tentarão se mover para que haja o alinhamento com o campo. Dessa forma, haverá a polarização do dipolo do material. Alguns exemplos de polímeros polares são o *nylon*, o polimetacrilato de metila (PMMA) e o policloreto de vinila (PVC) (Mehdizadeh, 2010).

Já os plásticos apolares são verdadeiramente covalentes e geralmente têm moléculas simétricas. Nesses materiais, há a presença de dipolos apolares e a aplicação de um campo elétrico não atua sobre o alinhamento dos dipolos. Exemplos de plásticos apolares são o politetrafluoroetileno (PTFE) e muitos outros fluoropolímeros. Materiais como esses, constituídos de moléculas apolares, apresentam baixo fator de perda dielétrica, o

que os tornam adequados para serem utilizados como estruturas de suporte ou isolamento em cavidades de alta frequência (Mehdizadeh, 2010).

## 2.4 Secagem com micro-ondas

De acordo com Foust *et al.* (1982), a secagem é um dos métodos mais antigos de preservação dos alimentos.

O mecanismo de secagem por micro-ondas é diferente dos métodos convencionais de secagem, devido às características próprias de aquecimento. No processo convencional, o transporte de umidade através do material é controlado pela difusão da água até a superfície, impulsionada pelo interior úmido e a superfície seca. Além disso, a diferença de temperatura entre o interior frio e a superfície aquecida é o que promove a transferência de energia entre a superfície e o interior do material. Todo esse processo acaba se tornando um processo lento de transferência de calor e massa e requer altas temperaturas externas. Já com a utilização de micro-ondas, através da geração de calor interno, a transferência de massa ocorre devido ao aumento da pressão interna como consequência da rápida geração de vapor no interior do material. Grande parte da umidade é evaporada antes de deixar o material. Isso faz com que a água seja forçada para a superfície na forma de vapor. Assim, a secagem se torna rápida sem que haja o superaquecimento da superfície, além de diminuir o aquecimento excessivo do material (Rosa, 2010).

A aplicação de micro-ondas para a secagem oferece outra vantagem: a absorção de energia é proporcional ao teor de umidade residual. As proteínas, os lipídios e os componentes também podem absorver a energia de micro-ondas, mas são relativamente menos sensíveis.

Mais uma vantagem da aplicação de micro-ondas para secagem de vegetais é o processo interno de aquecimento. Em um sistema de secagem com micro-ondas, as ondas podem facilmente penetrar as camadas secas inertes e são absorvidos diretamente pela umidade. A absorção de energia rápida provoca a evaporação rápida da água, criando um fluxo de vapor para o exterior. Além de melhorar a taxa de secagem, este fluxo para o exterior pode ajudar a evitar o colapso (encolhimento) da estrutura do tecido, o que prevalece na maioria das técnicas convencionais de secagem por ar. Então, melhores características de reidratação podem ser esperadas em produtos secos por micro-ondas (Rosa, 2010).

A secagem com micro-ondas tem ocorrido em associação a outras formas, como, por exemplo, vácuo ou convecção forçada. Segundo Wang, Xiong e Yu (2004), a secagem com micro-ondas envolvendo dois estágios, inicialmente por convecção forçada de ar seguido de secagem por micro-ondas é um método que proporciona um produto com melhor qualidade e com considerável economia de tempo e energia.

Conforme Yan *et al.* (2013), a utilização de micro-ondas tem sido estudada como uma alternativa para melhorar a qualidade dos produtos desidratados. Porém, o principal inconveniente da secagem com micro-ondas é o aquecimento desuniforme causado pela distribuição desigual das ondas eletromagnéticas no interior da cavidade secadora, o que

faz com que o excessivo aquecimento leve a produtos com baixa qualidade. Problema esse, que pode ser solucionado utilizando um secador por micro-ondas com pressão interna reduzida e sistema de agitação.

Em trabalhos que envolvem a desidratação de alimentos, avalia-se a cinética de secagem, que é a relação estabelecida entre a umidade do material e o tempo. É através dela que são descritos os mecanismos macro e microscópicos de transferência de calor e de massa envolvidos nesse processo (Rosa, 2010).

## **2.5 A termometria em fornos de micro-ondas**

A medição de temperatura é um dos frequentes desafios encontrados no aquecimento eletromagnético. O mais comum e versátil sensor de temperatura é provavelmente o termopar. No entanto, o uso de termopares na presença de campo eletromagnético tem sido debatido, pois a natureza metálica dos elementos que compõem este sensor e seu revestimento, geralmente induz a perturbações na distribuição do campo eletromagnético. Conseqüentemente, estas distorções do campo podem provocar a formação de faíscas e interferir no sinal do termopar, fazendo com que os fios deste atuem como uma antena, transmitindo a interferência para outros instrumentos (Leonelli, Veronesi e Cravotto, 2013).

Assim, a utilização de termopares, ou elementos metálicos em geral, não é a melhor opção, sendo preferível, se possível, o uso de fibras ópticas não perturbativas e métodos sem contato. O uso de métodos sem contato, como por exemplo, pirômetros ópticos, apresentam a desvantagem de que somente a temperatura da superfície do material é mensurada, além de não permitir a medição de um ponto, mas sim a média de uma superfície a qual aumenta quanto mais distante o sensor estiver do que está sendo medido. Sendo assim, são ótimos para obter uma média de uma região em lugar de medidas pontuais. A principal vantagem dos pirômetros de infravermelho é permitir a medição não invasiva da temperatura, contornando os problemas oriundos dos outros métodos. Por exemplo, erros graves de medição surgem de efeitos causados pelo termopar, como a intensificação das micro-ondas em uma extremidade do sensor. Já as fibras ópticas também apresentam características negativas, tais como a delicadeza da fibra, a sensibilidade à degradação, à contaminação da sonda, além das limitações para altas temperaturas. Por esta razão, os pirômetros de infravermelho têm sido amplamente usados para acompanhar o aquecimento de materiais com micro-ondas ((Leonelli, Veronesi e Cravotto, 2013); (Luo *et al.*, 2013)).

Se a temperatura no volume da carga deve ser conhecida, uma possível opção é o uso de fibras ópticas. Estes sensores são usualmente disponíveis para uma ampla faixa de temperatura, iniciando abaixo do ponto de congelamento da água, alcançando até 2000 K. Porém, uma simples fibra óptica não é capaz de cobrir uma faixa inteira de temperatura. Logo, múltiplas fibras ópticas e controladores são requisitados (Leonelli, Veronesi e Cravotto, 2013).

A desvantagem dos sensores de temperatura descritos é que nenhum fornece a distribuição de temperatura completa no volume total da amostra. Ou a temperatura é avaliada num ponto, ou na superfície. Dessa forma, percebe-se que a zona para medição de temperatura deve ser cuidadosamente escolhida, possivelmente com a ajuda de simulações numéricas ou outras ferramentas, a fim de prever quais regiões da cavidade ressonante de um forno de micro-ondas terá a maior incidência de radiação. Em vista

disso, percebe-se que outro desafio da termometria no aquecimento eletromagnético é que a medição de temperatura em uma localização específica não garante necessariamente que a temperatura em outros locais seja equivalente, a menos que se tenha o cuidado de conhecer o perfil de temperatura previamente (Leonelli, Veronesi e Cravotto, 2013).

## 2.6 Tecnologia de tambor rotativo

Segundo Geng *et al.* (2013), os tambores rotativos têm sido amplamente empregados nas indústrias químicas, metalúrgicas e de processamento de alimentos, tabaco e minerais auxiliando nas operações de mistura, secagem, aquecimento e reações químicas. Além disso, a dinâmica de mistura em um tambor rotativo é um importante processo em indústrias de particulados, sendo um dos princípios responsável pela taxa de transferência de calor entre os sólidos.

Geng *et al.* (2013) investigou a dinâmica de mistura de partículas filamentosas flexíveis em um tambor rotativo, avaliando o grau de mistura das partículas, as influências da velocidade rotacional, da altura das aletas internas e do grau de enchimento na dinâmica de mistura das partículas.

A principal preocupação na elaboração de um tambor rotativo é a movimentação do sólido no seu interior, pois desempenha um papel importante nos fenômenos de transferência de calor e massa (Grajales *et al.*, 2012). Essa movimentação é uma função de determinadas variáveis operacionais, tais como características das partículas (esféricidade, consistência e viscosidade), elementos internos do tambor rotativo, o número de Froude e o grau de preenchimento (Grajales *et al.*, 2012).

### 2.6.1 Influência das chicanas

Tambores ou secadores rotativos são comumente utilizados para promover a secagem de material granular em grandes quantidades. Com a finalidade de proporcionar uma melhor movimentação da carga sólida contida no tambor, estes equipamentos são constituídos de barreiras especialmente projetadas para elevar o material sólido continuamente até o momento de despencamento. Essas barreiras também são denominadas de aletas ou chicanas (Sunkara *et al.*, 2013).

Em geral, existem diferentes configurações de chicanas. Entre elas estão as retangulares, as angulares e as que se estendem circularmente ao longo do tambor, também chamadas de chicanas espirais. Cada uma dessas formas deve-se melhor adequar às determinadas tarefas executadas pelos seus respectivos equipamentos, cuja operação torna-se comprometida pela dificuldade de manuseio de pós e materiais viscosos (Sunkara *et al.*, 2013).

Conforme Green e Perry (2007), os secadores rotativos de aquecimento direto são equipados com aletas no seu interior, as quais contribuem com o levantamento da carga e o despencamento da mesma através do gás de secagem que escoar pelo interior do cilindro. O formato das aletas depende, sobretudo, das características de manuseio do sólido. Para materiais de fluxo livre, aletas radiais com abas de 90 graus são empregadas.

Já para materiais viscosos, aletas radiais planas e sem abas são utilizadas. Quando as características dos materiais variam durante a secagem, o formato das aletas também é alterado ao longo do comprimento do secador. Alguns padrões de secadores são projetados dividindo o comprimento do cilindro em três partes, sendo que na primeira parte são empregadas aletas radiais planas sem abas, aletas com abas de 45 graus na posição do meio e por fim, aletas com abas de 90 graus na última secção do cilindro. Alguns exemplos das mais comuns formas de aletas são mostrados na Figura 2.4.

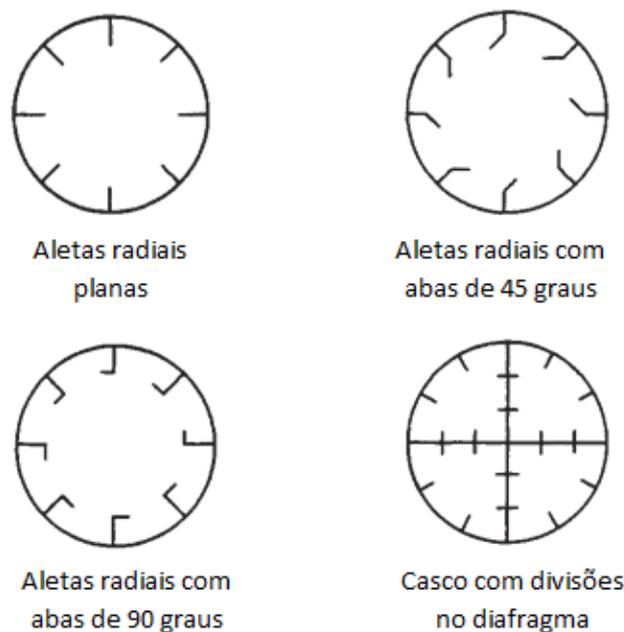


Figura 2.4: Configurações típicas de aletas (adaptado de Green e Perry, 2007).

### 2.6.2 Movimentação transversal da carga no interior de um cilindro rotativo

Conforme Mellmann (2001), existem diferentes modos de movimentação da carga no interior de um cilindro rotativo. Estes exibem diferenças significativas quanto à capacidade de mistura da carga e podem ser subdivididos em três formas básicas de movimentação:

- movimento por escorregamento
- movimento por queda
- movimento por catarata

A movimentação da carga depende da velocidade rotacional do tambor e normalmente é expressa como uma função do número de Froude. O número de Froude,  $Fr$ , é um parâmetro adimensional resultante da razão entre a força centrífuga pela aceleração gravitacional e pode ser calculado usando a equação 2.6;

$$Fr = \frac{\omega^2 R}{g} \quad (2.6)$$

onde  $\omega$  é a velocidade angular do tambor,  $R$  é o seu raio interno e  $g$  representa a aceleração gravitacional (Mellmann, 2001).

A velocidade rotacional crítica ( $n_c$ ), expressa pela equação 2.7, é atingida quando o número de Froude for igual a 1, ou seja, quando a força centrífuga que age sobre uma partícula no interior do tambor rotativo for equivalente à aceleração gravitacional (Mellmann, 2001), sendo  $D$  o diâmetro interno do tambor. Conforme Mitchell *et al.* (2006), a velocidade crítica de rotação é definida como a velocidade para que as partículas sejam mantidas contra o interior da parede do tambor, sob ação centrífuga.

$$n_c = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad (2.7)$$

Os modos de movimentação da carga são delimitados por parâmetros especificados como o grau de preenchimento do cilindro e a faixa do número de Froude (Mellmann, 2001). As diferentes formas de movimentação podem ser visualizadas no esquema apresentado na Figura 2.5. Dependendo da velocidade rotacional e do tamanho da partícula, três estados de movimentação por queda são possíveis: avalanche, rolamento e cascata (Mellmann, 2001).

Forma básica	Escorregamento		Queda			Catarata	
Subtipo	Constante	Intermitente	Avalanche	Rolamento	Cascata	Catarata	Centrifugação
							
Nº de Froude [-]	$0 < Fr < 10^{-4}$		$10^{-5} < Fr < 10^{-3}$	$10^{-4} < Fr < 10^{-2}$	$10^{-3} < Fr < 10^{-1}$	$0,1 < Fr < 1$	$Fr \geq 1$
Grau de preenchimento [-]	$f < 0,1$	$f > 0,1$	$f < 0,1$	$f > 0,1$		$f > 0,2$	
Aplicação	-----		Fornos e reatores rotativos; secadores e resfriadores rotativos			Moinho de bolas	-----

Figura 2.5: Forma de movimentação transversal de carga sólida em cilindro rotativo (adaptado de Mellmann, 2001).

Segundo Hartke (2007), as formas de movimentação por escorregamento acontecem quando o coeficiente de atrito entre as paredes do cilindro e a carga é muito pequeno. No escorregamento intermitente existe um coeficiente de atrito suficiente para a carga permanecer junto à parede por alguns graus de rotação, antes que a mesma escorregue novamente. Já no escorregamento constante, o qual é um modo de movimentação extremo de escorregamento, a carga fica totalmente despreendida das paredes do cilindro com um ângulo de repouso pequeno e bem definido, escorregando constante e livremente. Independente do modo de movimentação por escorregamento, ambos não apresentam alguma mistura das partículas da carga, reduzindo drasticamente a qualidade dos processos de mistura e de queima em fornos rotativos. Portanto, esses processos devem ser evitados sempre que possível. Recomenda-se então, aumentar a velocidade de rotação dos cilindros, adicionar aletas laterais para segurar a carga até maiores ângulos de rotação e utilizar paredes com alta rugosidade a fim de escapar do modo de movimentação por escorregamento.

O modo de movimentação por queda é identificado por um movimento contínuo de mistura da carga. Isso se torna possível, devido ao atrito capaz de manter a adesão entre as paredes e a carga (Hartke, 2007).

A movimentação por queda em avalanche ocorre em velocidades rotacionais baixas e baixos níveis de preenchimento do cilindro, proporcionando a formação de sucessivas avalanches intermitentes da parte mais alta da carga sobre o seu leito fixo e sua vizinhança. Já o estado de movimentação por queda em rolamento é definido pelo escoamento constante e uniforme de uma camada de carga rolando sobre seu leito fixo. Neste caso, as velocidades de rotação são relativamente maiores, assim como o nível de preenchimento do cilindro. O modo de movimentação por queda em rolamento é considerado o estado que mais favorece a mistura da carga, no entanto, também pode ocasionar a segregação das partículas que compõem a carga, se estas apresentarem uma grande distribuição de tamanhos (Hartke, 2007).

Na operação com velocidade de rotação mais elevadas, há a movimentação por queda em cascata, a qual fornece um escoamento constante, porém não uniforme. A partir do momento em que a velocidade rotacional torna-se muito alta, há a formação do modo de movimentação por catarata, o qual é caracterizado por partículas de leito arremessadas por todo o espaço do cilindro. Em caso de velocidades extremas, o material sólido fica em contato com a parede do cilindro como uma película uniforme, alcaçando-se assim, o modo de movimentação por centrifugação (Mellmann, 2001).

Segundo Hartke (2007), os modos de movimentação por queda são os mais utilizados em fornos rotativos, sendo o modo de movimentação por queda em rolamento aquele que proporciona melhor mistura e homogeneização da carga.

Outro número adimensional necessário para avaliar a movimentação das cargas é o grau de enchimento ( $f$ ), o qual é definido como a razão entre a área do segmento circular ocupado pelas partículas no cilindro pela área da seção transversal do cilindro (Salles, 2013). A área do segmento circular ocupado pode ser calculada através da subtração da área setor circular pela área do triângulo formado, como mostra a Figura 2.6.

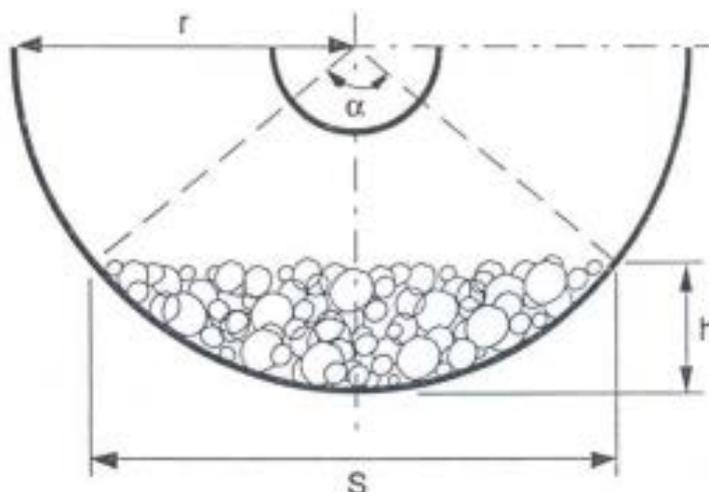


Figura 2.6: Diagrama esquemático da seção transversal do cilindro com carga (extraído de (Araujo, 2011)).

Segundo (Araujo, 2011), as equações (2.8) a (2.13) são utilizadas para calcular o grau de enchimento da seção cilíndrica.

$$S = 2 \cdot r \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (2.8)$$

$$h = r(1 - \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)) \quad (2.9)$$

$$r = \frac{h}{2} + \frac{S^2}{8h} \quad (2.10)$$

$$A_c = \frac{h}{6S} (3h^2 + 4s^2) \quad (2.11)$$

$$A = \pi r^2 \quad (2.12)$$

$$f = \frac{A_c}{A} \quad (2.13)$$

Onde:

S = largura da superfície exposta da carga (m);

r = raio do tambor (m), interno ao revestimento;

h = altura máxima da carga (m);

$\alpha$  = ângulo do setor circular formado pela superfície da carga (°);

$A_c$  = área do segmento circular do tambor ocupado pela carga (m<sup>2</sup>);

A = área da seção cilíndrica (m<sup>2</sup>);

f = grau de enchimento (--)

## 2.7 Secadores rotativos com aquecimento por micro-ondas

O trabalho desenvolvido por Wang *et al.* (2009) propõe uma abordagem alternativa para a secagem de partículas grosseiras através de um secador rotativo com aquecimento por micro-ondas e com a injeção forçada de uma corrente de ar. Em seu estudo foram investigados os efeitos da taxa de fluxo de ar, da velocidade rotacional do tambor, da

potência de operação do magnetron sobre a cinética de secagem e a fração de sementes danificadas de soja.

Um forno de micro-ondas doméstico operado a 2400 MHz foi utilizado como fonte de energia de micro-ondas. Um tambor rotativo feito de um material acrílico transparente, também conhecido por *Plexiglass*, foi confeccionado com 150 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento. No interior do tambor foram dispostas 6 aletas com dimensões de 200 mm de comprimento e 5 mm de altura, as quais foram simetricamente posicionadas em relação ao eixo. Na parede do tambor foram realizadas perfurações para possibilitar a descarga da umidade contida no interior para o ambiente. O cilindro ainda foi acoplado ao eixo de um motor controlado por um conversor. Para os experimentos, o ar a temperatura ambiente foi introduzido no tambor rotativo através de um compressor (Wang *et al.*, 2009). Um desenho que representa o esquema descrito pode ser visualizado na Figura 2.7.

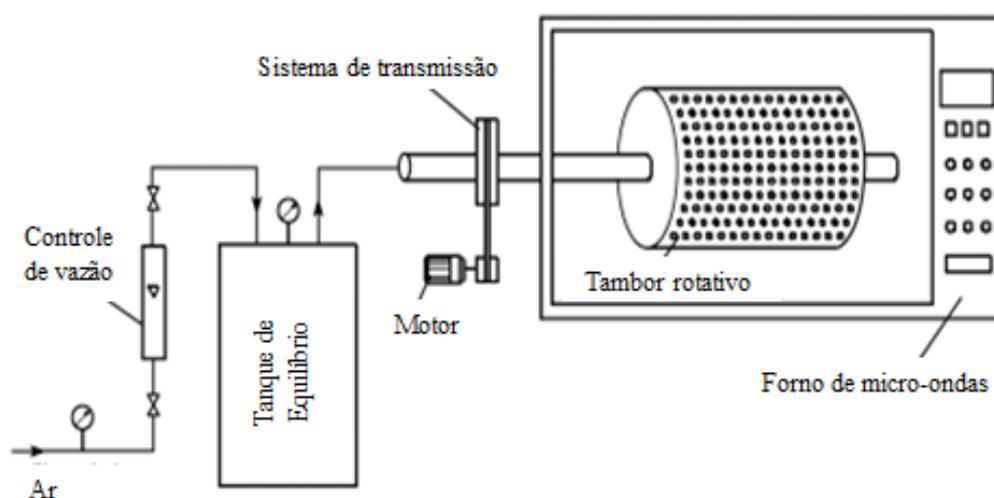


Figura 2.7: Esquema de um secador estilo tambor rotativo com aquecimento híbrido (adaptado de Wang *et al.*, 2009).

Segundo Wang *et al.* (2009) para velocidades de rotação do tambor entre 15 e 20 rotações por minuto existe uma baixa relação de sementes danificadas, e ainda, a cinética de secagem das sementes permanece inalterada para essas velocidades. Além disso, a adição de ventilação forçada consegue aumentar a remoção de umidade dos grãos de soja em comparação ao aquecimento realizado unicamente por micro-ondas. Contudo, uma consequência insatisfatória é encontrada quando utilizadas altas taxas de fluxo de ar, sendo o elevado teor de sementes rachadas e quebradas o impedimento encontrado.

Outro trabalho, desenvolvido por Jeni, Yapa e Rattanadecho (2010), estudou o aquecimento por micro-ondas combinado a um sistema de vácuo para a secagem de biomateriais. Nesse estudo, o autor buscou avaliar a viabilidade de um secador com aquecimento por micro-ondas – vácuo para secar folhas de chá, explorando diferentes condições de secagem, as quais incluem o tempo de radiação das micro-ondas, potência fornecida e o nível de vácuo.

Nesse mesmo estudo, o sistema de fornecimento das micro-ondas foi possível pela utilização de dois magnetrons com potência ajustada individualmente em 800 W e

frequência de operação de 2450 MHz. As micro-ondas foram encaminhadas, através de uma série de guias de onda, para uma cavidade metálica a vácuo com volume de 0,13 m<sup>3</sup>. Dentro desta cavidade foi acoplado um tambor rotativo feito de polipropileno com dimensões aproximadas em 30 cm de raio e 50 cm de comprimento e velocidade de rotação controlada em 10 rpm, a fim de alcançar a máxima interação entre as micro-ondas e a carga dielétrica.

Os experimentos de Jeni, Yapa e Rattanadecho (2010) foram realizados para dois níveis de potência de micro-ondas (800 W, quando acionado apenas um magnetron, e 1600 W, a partir do acionamento de dois magnetrons) e dois níveis de pressão de vácuo (535 mmHg e 385 mmHg). Além disso, o sistema pode ser operado de modo contínuo ou pulsado em cada experimento. Com os resultados desse estudo, ficou evidente que o perfil de umidade média das amostras em relação ao tempo, é dependente do modo de operação e dos níveis de pressão de vácuo. Ainda, através das curvas de secagem obtidas, verificou-se que o tempo de secagem das folhas de chá, quando utilizada a menor pressão, ou seja, pressão de vácuo mais forte (385 mmHg), foi menor que o tempo obtido quando operado com a maior pressão (535 mmHg), mantendo-se a mesma potência. A uma pressão de vácuo mais intensa, o tempo de secagem é menor devido à redução da temperatura de ebulição das amostras secas, o que leva a aumentar o transporte de umidade nessas amostras (Jeni, Yapa e Rattanadecho, 2010).

## 2.8 A batata-doce

A batata-doce (*Ipomoea batatas L.*) é uma raiz tuberosa que pertence à família *convolvulácea* e pode ser classificada segundo seu formato, tamanho, cor da polpa, doçura, precocidade e cor das folhas (Mirasse, 2010). Segundo Burri (2011), a batata-doce é um alimento nutricional com baixo teor de gorduras e proteínas, porém rico em carboidratos. As folhas e o tubérculo da batata-doce são fontes de fibras, minerais, vitaminas e antioxidantes, assim como ácidos fenólicos, antocianinas, tocoferol e betacaroteno (Teow *et al.*, 2007).

Ao lado da mandioca, a batata-doce é a sétima mais importante cultura alimentar entre as raízes e tubérculos cultivados no mundo. Além disso, ela é um alimento básico em muitos países em desenvolvimento, sendo consumida tanto na forma natural quanto processada. Também é utilizada como ração animal e tem um grande potencial como matéria-prima na produção de uma vasta gama de produtos industriais, tais como amido, glicose líquida, ácido cítrico e etanol (Ray e Tomlins, 2010).

A batata-doce é um carboidrato complexo de baixo índice glicêmico, o que significa que sua absorção é mais lenta pelo organismo animal, liberando glicose na corrente sanguínea aos poucos. É um alimento rico em fibras, sendo uma importante fonte de ferro, potássio e vitaminas. Por essas e outras razões, a batata-doce tem sido componente indispensável da dieta de muitos atletas (Tudor, 2014).

Outras funções fisiológicas pertinentes ao consumo da batata-doce são visualizadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Componentes presentes da batata-doce e suas funções fisiológicas (adaptado de Ray e Tomlins (2010)).

<b>Função</b>	<b>Componentes relacionados</b>
Antioxidação	Polifenol, antocianina
Antimutagenicidade	Polifenol, antocianina
Anticarcinogênese	Polifenol, antocianina
Anti-HIV	3,4,5-triCQA (3,4,5-tri-O- cafeoilquínicos ácido)
Anti doença de Alzheimer	diCQA (di-O-cafeoilquínicos ácido)
Antimelanogênese	Polifenol
Redução de lesão hepática	Antocianina
Anti-hipertensão	Polifenol, antocianina
Atividade antibacteriana	Fibras, polissacarídeos tipo pectina
Promoção do crescimento de <i>Bifidobacterium</i>	Fibras
Diminuição do nível de colesterol	Fibras
Antidiabetes	Polifenol, antocianina
Proteção ocular	Luteína, betacaroteno

A batata-doce é cultivada em locais de climas diversos como o da Cordilheira dos Andes; em regiões de clima temperado, como no Rio Grande dos Sul; clima tropical, como na Amazônia e até desértico, como na costa do Pacífico. No Brasil a batata-doce é cultivada em todas as regiões. Inclusive, ela tem sido cultivada de forma empírica pelas famílias rurais, paralelamente a diversas outras culturas, visando à alimentação da família, principalmente na primeira refeição diária (Giori, 2010).

Dados da pesquisa Produção Agrícola Municipal – PAM, referentes ao ano de 2012, fornecem a quantidade produzida e o rendimento médio por hectare de batata-doce no Brasil, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação Produtoras nesse mesmo ano. A PAM é uma pesquisa conduzida pela Coordenação de Agropecuária do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e investiga os principais produtos oriundos de lavouras temporárias e permanentes da agricultura nacional, com detalhamento municipal. A escala percentual da quantidade de batata-doce produzida por regiões da nação no ano de 2012 pode ser visualizada na Figura 2.8.

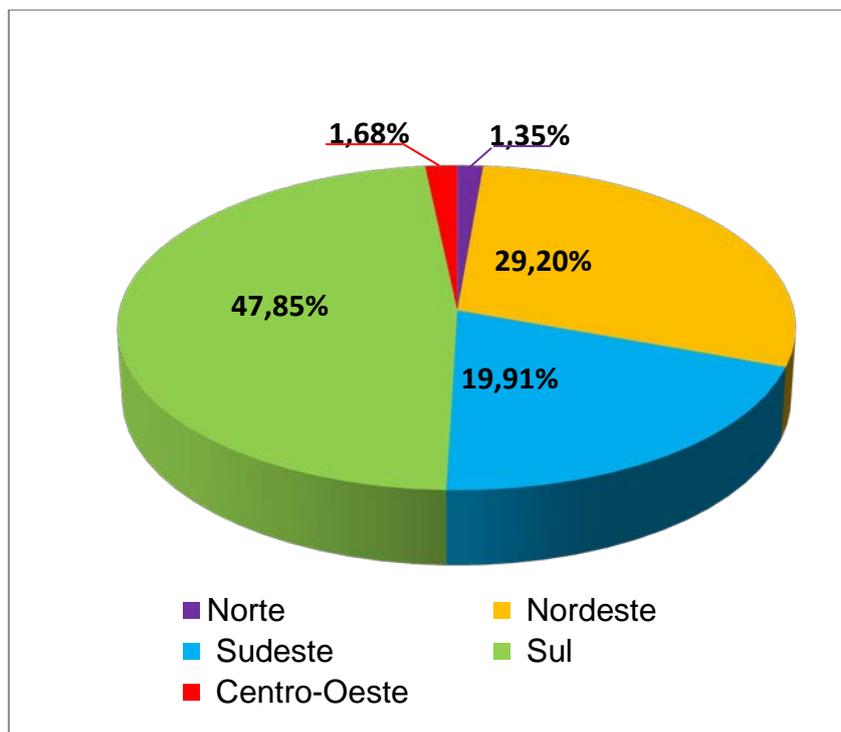


Figura 2.8: Percentuais da quantidade produzida de batata-doce no Brasil, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação produtoras – 2012; Fonte: IBGE (2013).

No ano de 2012 a região Sul foi a maior produtora do país, com uma produção de 229.425 toneladas de batata-doce, no entanto foi na região Centro-Oeste que se alcançou o maior rendimento médio, totalizando 27.986 quilogramas por hectare, como mostra a Figura 2.9.

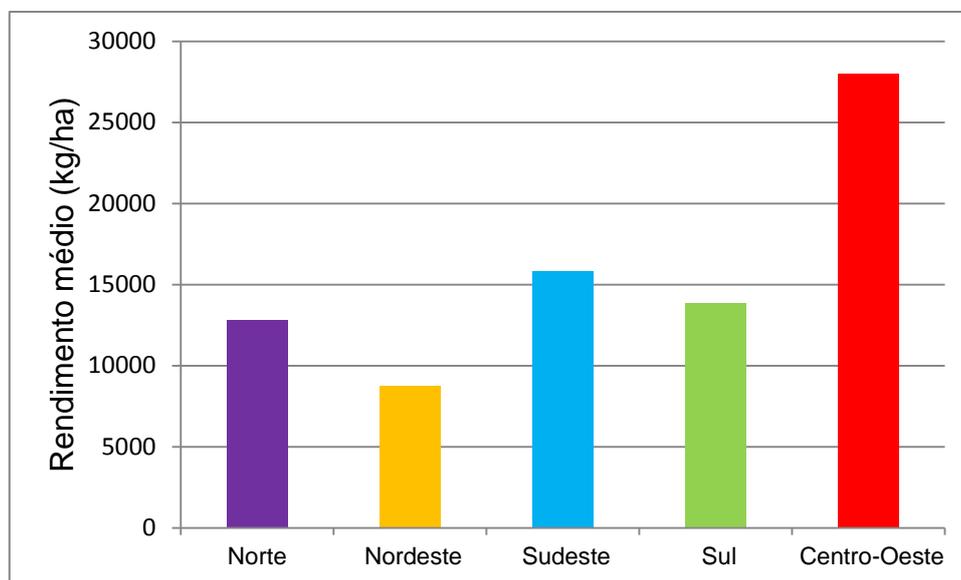


Figura 2.9: Rendimento médio em quilogramas de batata-doce por hectare, segundo as Grandes Regiões e as Unidades da Federação Produtoras – 2012; Fonte: IBGE (2013).

Apesar do baixo rendimento médio nas regiões norte e nordeste do Brasil, são nesses locais que a cultura da batata-doce assume maior importância social, por se tratar

de um alimento altamente energético e possuir um importante teor de vitaminas e proteína.

O melhoramento do conteúdo nutricional de cultivos tais como: milho, feijão, mandioca, arroz e batata-doce têm sido feito em zonas em desenvolvimento como, por exemplo, a região nordeste. Esta é frequentemente castigada pelos longos períodos de estiagem, o que limita a produção de alimentos (Giori, 2010).

Segundo Giori (2010), os cultivos biofortificados são produzidos através de técnicas de fitomelhoramento e apresentam maiores conteúdos de nutrientes e melhores características agronômicas. Esta técnica proporciona variedades com alto teor de micronutrientes e envolvem a realização de cruzamento de linhagens com características nutricionais melhoradas, livre polinização (hibridização), utilização do solo com alto conteúdo mineral e a engenharia genética. Dessa forma, o projeto de Biofortificação, conduzido pela Embrapa Hortaliças, tem procurado realizar o melhoramento convencional de espécies de batata-doce regionais, com o objetivo de obter variedades com alto teor de betacaroteno.

Produtos biofortificados vêm sendo desenvolvidos no Brasil e em países da América Central, da África e da Ásia com o objetivo de combater o que é denominado “fome oculta”, que é a carência de micronutrientes (vitamina A, ferro e zinco), que são indispensáveis para a saúde (Van Jaarsveld *et al.*, 2006).

Na Índia, por exemplo, foram evidenciados resultados favoráveis na redução da cegueira, a partir do fornecimento de 100 g/dia de batata-doce de polpa alaranjada para crianças até 5 anos (Silva, 2011).

### 2.8.1 Batata-doce da polpa alaranjada

Segundo Cornejo *et al.*, (2011), os cultivares de batata-doce que predominam no Brasil são variedades de polpa branca ou amarela, as quais contêm baixas quantidades de pró-vitamina A. No entanto, admite-se que as variedades de polpa alaranjada sejam uma das opções mais econômicas e abundantes em betacaroteno disponível durante todo o ano para as populações carentes. Por isso, se os agricultores e consumidores adicionassem às suas dietas as variedades de polpa alaranjada, esta ação provocaria um grande impacto aos níveis dessa vitamina na população.

A batata-doce de polpa alaranjada é uma hortaliça de fácil produção, durável e de fácil preparo. Sendo que, devido ao seu alto teor de carotenoides e suas qualidades nutricionais, ela tem sido utilizada em diversos estudos em pequena escala, a fim de aumentar o status de vitamina A (Burri, 2011). Essa vitamina é um nutriente essencial necessário em pequenas quantidades para o funcionamento normal do sistema visual, para a manutenção das funções das células de crescimento, integridade epitelial, produção das células vermelhas do sangue, imunidade e reprodução. A baixa ingestão de vitamina A durante períodos da vida com alta demanda nutricional, como a infância, gestação e lactação, aumenta muito o risco de consequências para a saúde, como os distúrbios causados pela sua carência no metabolismo humano (Who, 2009).

Apesar de todos os benefícios descritos para a saúde humana com a ingestão desse alimento, essa variedade de batata-doce apresenta alto teor de umidade e por isso, a textura da polpa desse tubérculo deve ser modificada, a fim de melhorar as suas condições sensoriais, resistência a contaminantes e, conseqüentemente, a vida útil da farinha.

### 2.8.2 *Farinha de batata-doce*

A produção de farinha a partir de batata-doce aumenta a vida útil do produto e facilita sua incorporação e combinação com outros alimentos. A farinha, quando elaborada a partir de raízes com alto teor de betacaroteno, é uma fonte rica de pró-vitamina A, que apresenta efeitos benéficos na saúde humana, como melhoria da imunidade e diminuição de doenças degenerativas como o câncer, doenças cardiovasculares, catarata e degeneração macular. Contudo, existe a necessidade de otimizar as condições de processo e estocagem da farinha, a fim de diminuir a perda de carotenoides (Rodriguez-Amaya, Nutti e Viana De Carvalho, 2011) e demais nutrientes.

Alves *et al.* (2012) estudou a estabilidade da farinha de batata-doce de polpa alaranjada biofortificada, avaliando a influência de diferentes tipos de embalagens que são utilizadas para o armazenamento de produtos similares no mercado. Com base nos resultados alcançados por Alves *et al.* (2012), foi verificado que após um período de 360 dias de armazenamento da farinha de batata-doce biofortificada (a 25°C e 75 % UR) houve a redução de 50% dos carotenoides, utilizando embalagens de PETmet (metalizado)/PEBD e PET [Poli(tereftalato de etileno)]/Al (folha de alumínio)/ PEBD (polietileno de baixa densidade) com vácuo.

Esses sistemas/materiais de acondicionamento citados, os quais são comumente usados nas embalagens de café torrado e moído e de leite em pó, apresentam fatores determinantes para a preservação do teor de carotenoides por períodos superiores a 3-4 meses, como a redução do teor de oxigênio no espaço livre da embalagem por meio de aplicação de vácuo e a utilização de materiais com características de barreira ao oxigênio, umidade e luz (Alves *et al.*, 2012).

## Capítulo 3 – Mapeando o Aquecimento em Micro-Ondas

Devido às contribuições do aquecimento por micro-ondas, também chamado de aquecimento dielétrico, nos processos industriais, instigou-se aprofundar os conhecimentos já existentes referentes a esta tecnologia. Sendo a não homogeneidade da distribuição de energia no interior de uma cavidade ressonante de um forno de micro-ondas uma das motivações para a realização desta pesquisa. Assim, o objetivo da mesma é mapear o padrão de aquecimento na cavidade. Visto que, este estudo contribui para o desenvolvimento de um forno comercial para processamento térmico de outros materiais, onde é adaptado um tambor rotativo, e portanto a análise do ponto de melhor aproveitamento energético.

Conhecendo as limitações existentes para o melhor aproveitamento energético em vários pontos da cavidade interna de um forno de micro-ondas, buscou-se uma alternativa eficiente para a realização da mesma. Assim, encontrou-se nos grãos de milho pipoca uma possível solução para o problema aqui descrito, uma vez que os grãos podem ser tratados como integradores energéticos, não estáticos, possibilitando a realização de análises quantitativas do poder de absorção das micro-ondas pelas amostras.

O milho pipoca (*Zea mays* L.) é um tipo de milho que tem como principal característica grãos pequenos e duros, que apresentam a capacidade de estourar devido a uma pressão de aproximadamente 9 kPa formada dentro do grão quando aquecidos em torno de 177 °C (Hoseney, Zeleznak e Abdelrahman, 1983). Além disso, a expansão ocorre devido à resistência do pericarpo associado ao teor de umidade e teor de óleo do grão. Quando submetido ao calor, o amido presente no milho pipoca expande-se, e a água contida no interior do grão vaporiza, aumentando gradualmente a pressão interna do grão, até que a casca não aguenta a pressão e ocorre a explosão.

### 3.1 Materiais e métodos

#### 3.1.1 Preparo das amostras

Utilizou-se no experimento, milho para pipoca Tipo 1 da Yoki Alimentos Ltda. O teor de umidade médio dos grãos comercializados está entre 10 e 15 %.

Um pré-tratamento das amostras foi realizado a fim de padronizar o teor de umidade contido nas amostras utilizadas no experimento. Para esse fim, foram adicionados 200 mL de água à temperatura de 23 °C em um recipiente contendo 500 grãos de milho-pipoca. Foi estabelecido o tempo de 60 minutos de imersão dos grãos, sem agitação e aquecimento.

Para determinar o teor de umidade dos grãos pré-tratados, utilizou-se a pesagem de amostras compostas por 100 grãos, as quais foram acondicionadas em estufa à temperatura de 105 °C por um período de 24 h. Percebeu-se que este tempo foi suficiente, pois a partir de tal, não houve mais variação de massa nas amostras. Um teor de umidade de  $22,9 \pm 0,55$  % foi obtido a partir de três repetições, sendo esse valor utilizado para a realização dos experimentos de mapeamento de radiação na cavidade ressonante.

#### 3.1.2 Desenvolvimento do método de aquecimento

Para a realização dos experimentos de aquecimento dielétrico, foi utilizado um forno de micro-ondas da marca LG classe Intellwave Grill modelo MB-274PL, com frequência operacional de 2450 MHz e potência de consumo elétrico de aquecimento por micro-ondas de 1050 W. As dimensões internas do forno são 30 cm de largura; 19,5 de altura e 28,5 cm de profundidade.

A sistemática desenvolvida para mapear o padrão de aquecimento dielétrico no interior da cavidade ressonante de um forno de micro-ondas doméstico consistiu da divisão do interior da cavidade ressonante em 27 regiões distintas. Primeiramente, foram estabelecidos 3 planos na horizontal, diferenciados verticalmente pela altura em relação à base, como pode ser visualizado pelo desenho da Figura 3.1. O plano 1, refere-se à base inferior da cavidade, já o plano 2, à parte intermediária, distando 6 cm da base e, por último, na parte superior, o plano 3, com uma distância de 13 cm da base da cavidade. Posteriormente cada um dos planos foi dividido em 9 regiões denominadas de 11 à 39, referindo-se o primeiro algarismo ao nível do plano e o segundo às posições, conforme mostrado nos esquemas da Figura 3.2.

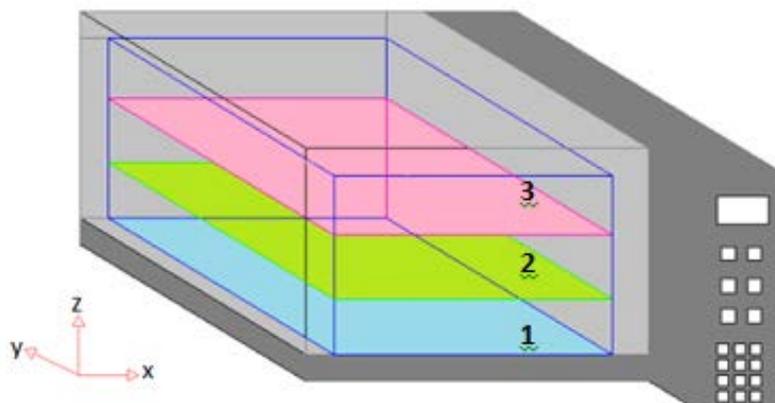


Figura 3.1: Ilustração do posicionamento dos planos no interior do forno.

Cada uma das 27 regiões definidas continham igualmente  $63 \text{ cm}^2$ , sendo que, em cada uma delas, foi adicionado um suporte plástico subdividido em quatro compartimentos de igual tamanho. Então, em cada um desses compartimentos foram alocados 25 grãos pré-tratados, e como são quatro compartimentos por região, totalizou-se uma quantidade de 100 amostras por região.

O aquecimento por micro-ondas foi acionado em potência máxima, permanecendo ligado por um período de 5 minutos. Ao término do aquecimento, contabilizou-se o número de grãos de milho-pipoca não estourados. Os ensaios foram realizados para cada região individualmente e, por se tratar de um experimento com diversos fatores que influenciam na confiabilidade dos resultados, os experimentos foram realizados em triplicata.

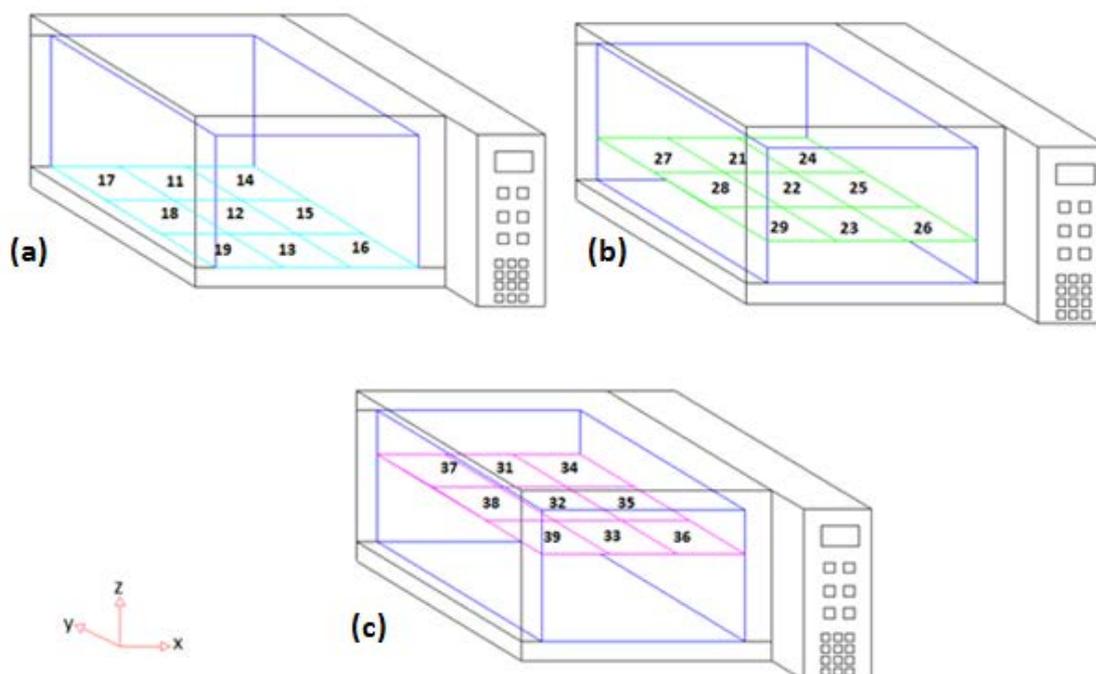


Figura 3.2: Ilustração da cavidade interna de um forno de micro-ondas dividida nas diferentes regiões experimentais. (a) Plano 1; (b) Plano 2 e (c) Plano 3.

Devido à natureza explosiva da amostra quando ocorre a ruptura de sua parede, o procedimento foi cuidadosamente acompanhado, a fim de que todos os grãos não estourados permanecessem na sua posição de origem.

Após a realização dos experimentos, realizou-se uma análise de variância (ANOVA), a qual é um teste estatístico que mostra se existe alguma diferença significativa entre diferentes grupos. Na ANOVA realizada neste trabalho, utilizou-se o método de Tukey, o qual é um teste de causa e efeito para determinar quais grupos são significativamente diferentes entre si. Os componentes de uma tabela ANOVA são os graus de liberdade de cada fonte (DF), a soma dos quadrados entre as regiões e os erros (SS), a média dos quadrados encontrada pela divisão da soma dos quadrados pelos graus de liberdade (MS), a divisão da variância entre as regiões pela variância entre os erros (F) e o valor para determinar a significância do fator (P).

### 3.2 Resultados e discussões

Com o auxílio de software estatístico Minitab 16, realizou-se uma análise de variância para o fator posição, com o objetivo de testar a equabilidade das médias categorizadas por um único fator. Os resultados desta análise podem ser visualizados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Análise de variância para o fator posição.

Fonte	DF	SS	MS	F	P
<b>Região</b>	26	35033,6	1347,4	20,38	0,00000
<b>Erros</b>	54	3570,7	66,1		
<b>Total</b>	80	38604,2			

Obs: 27regiões -1 = 26 ; Erros: 27x2=54

O valor P de 0,00000 indica que o fator região é significativo e que as diferenças entre os resultados são reais e dependem unicamente dos mesmos.

A Tabela 3.2 fornece a informação de agrupamento usando o método de Tukey e 95,0% de confiança. Também são fornecidos os valores médios das amostras que estouraram nas respectivas posições.

O agrupamento obtido significa que as regiões que apresentam a mesma letra são semelhantes entre si. Por exemplo, todas as regiões que possuem a letra A,B,C,D,E,F,G,H ou I no seu agrupamento são similares e ainda, no caso das regiões 28, 12, 29 e 25, o mesmo agrupamento ABC gerado pela análise, permite afirmar que não há diferenças significativas entre as mesmas.

Tabela 3.2: Quantidade média de amostras transformadas e agrupamento das regiões.

Região	Média	Desvio Padrão	Agrupamento	Região	Média	Desvio Padrão	Agrupamento
<b>38</b>	90,000	7,550	A	<b>19</b>	41,667	9,866	C D E F G
<b>11</b>	72,000	4,359	A B	<b>35</b>	36,333	1,155	D E F G
<b>28</b>	66,333	5,033	A B C	<b>14</b>	35,333	8,021	E F G H
<b>12</b>	65,667	17,098	A B C	<b>15</b>	28,333	2,082	F G H I
<b>29</b>	64,667	7,506	A B C	<b>22</b>	24,333	2,517	G H I
<b>25</b>	64,667	6,658	A B C	<b>39</b>	24,000	7,000	G H I
<b>18</b>	62,000	19,079	B C D	<b>16</b>	22,667	0,577	G H I
<b>27</b>	58,333	1,528	B C D E	<b>36</b>	21,000	3,464	G H I
<b>31</b>	56,000	13,115	B C D E	<b>21</b>	21,000	5,292	G H I
<b>37</b>	55,667	7,506	B C D E	<b>24</b>	20,000	7,211	G H I
<b>13</b>	54,333	11,719	B C D E	<b>23</b>	18,667	5,686	G H I
<b>26</b>	48,000	2,646	B C D E F	<b>33</b>	9,333	0,577	H I
<b>34</b>	42,667	9,074	C D E F G	<b>32</b>	8,333	3,055	I
<b>17</b>	42,333	11,846	C D E F G				

Conforme o agrupamento obtido, pode-se perceber que as regiões que compõe o grupo A (38, 11, 28, 12, 29 e 25) correspondem às zonas onde houve a absorção da energia necessária para o rompimento dos grãos para uma maior quantidade de amostras, portando, supõe-se que sejam as regiões de maior incidência de micro-ondas no interior da cavidade ressonante. O contrário pode ser dito para o grupo I, composto pelas regiões 15, 22, 39, 16, 36, 21, 24, 23, 33 e 32.

As comparações e a quantificação do número de grãos estourados podem ser vistas na Figura 3.3. Nesta figura, a posição das colunas condiz com a posição das regiões conforme apresentado na Figura 3.2. Logo, entende-se que as posições da porta e da parede direita do forno, estejam representadas pelas letras x e y respectivamente.

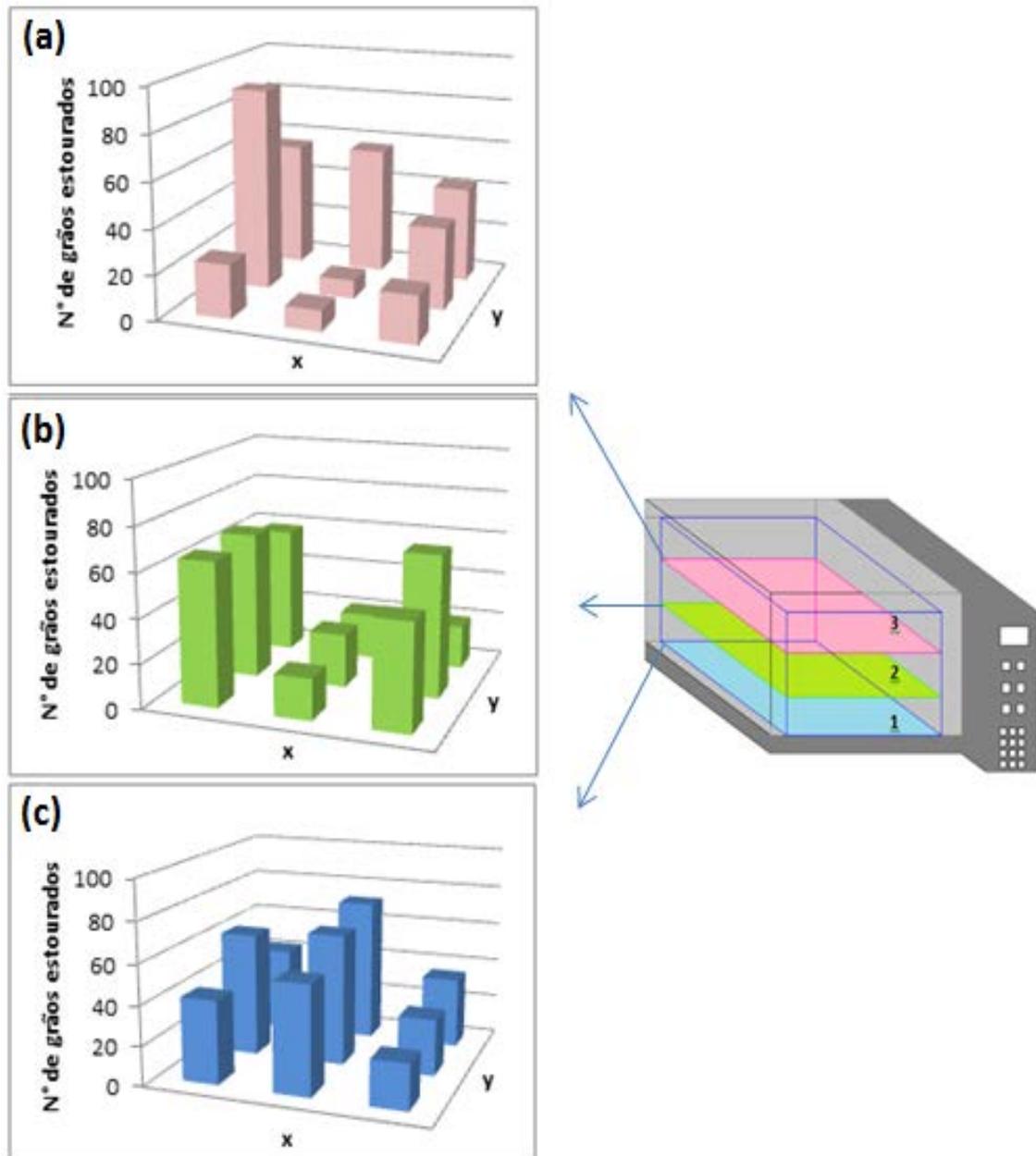


Figura 3.3: Quantidade de amostras que absorveram energia suficiente para estourar nas 27 regiões da cavidade ressonante. Entende-se  $x$  como a posição frontal, onde fica a porta, e  $y$  da parede direita do forno: (a) Plano 3 – superior; (b) Plano 2 – intermediário e (c) Plano 3 – inferior.

Com os resultados apresentados, percebe-se a não homogeneidade do aquecimento na cavidade ressonante. O que confirma que, mesmo com as mesmas condições de geração de calor no interior da caixa metálica retangular, haverá uma diferença discrepante de temperatura em pontos próximos.

Um dos resultados obtidos neste estudo, que é o potencial de absorção de energia de partículas diferentes posições da cavidade interna de um forno retangular, também pode ser comparado ao perfil de distribuição de micro-ondas demonstrada por Medizadeh (2010). Em seu trabalho, o autor conclui que a uniformidade da densidade de energia é

muito baixa, pois em poucos centímetros esta densidade passa de um valor máximo a um valor mínimo. No entanto, apesar da semelhança entre as conclusões obtidas no referido trabalho verificou-se que a estratégia de adotar grãos de milho pipoca como integradores energéticos é um diferencial e apresenta vantagens aos demais métodos, como o derretimento de porções de manteiga, aquecimento de cubos de batata ou ainda a aplicação de sensores interruptivos de temperatura. Visto que, a metodologia aqui proposta permite realizar estudos envolvendo partículas em movimento dentro do forno, como no caso de se utilizar o tambor rotativo. Desta forma, a natureza não estática dos grãos e a possibilidade da quantificação dos resultados de maneira rápida, fácil e dinâmica permite que estudos envolvendo partículas em movimento possam ser realizados.

### **3.3 Conclusões**

Com a metodologia desenvolvida se pode atestar que a distribuição da energia das micro-ondas na cavidade interna de um forno de micro-ondas doméstico é realmente irregular. A utilização de grãos de milho de pipoca, cuja peculiar transformação na sua estrutura física ocorre devido ao processo de absorção de energia, mostrou-se uma alternativa rápida, visual e coerente para relacionar as diferentes posições na cavidade ressonante com o potencial de aquecimento local. A principal vantagem da metodologia desenvolvida é que ela permite que se estude o efeito de partículas em movimento no processo de aquecimento com micro-ondas. Essa característica é fundamental quando se quer estudar o processo de aquecimento em sistemas não estáticos, como no caso de leitos fluidizados ou tambores rotativos. Nessas situações, técnicas clássicas não seriam capazes de determinar esse efeito de aquecimento. Outra vantagem da presente proposta consiste na dimensão das partículas, as quais também são adequadas para o estudo de partículas em movimento.

## Capítulo 4 – Secagem de Batata-doce para a Produção de Farinha

Com o intuito de preservar as propriedades da batata-doce de polpa alaranjada, de modo que seus componentes sejam mantidos, tem-se como objetivo neste capítulo, investigar métodos de conservação, como a secagem, para elaboração de formas estáveis de farinha que possam ser utilizadas na elaboração de produtos alimentícios. Para tanto, deseja-se avaliar o método de secagem de batata-doce em fornos de micro-ondas, sendo este um processo que apresenta fácil operação e resulta em custo acessível às populações de baixa renda.

### 4.1 Materiais e métodos

#### 4.1.1 *Materials*

A batata-doce utilizada nos ensaios de secagem foi a de polpa alaranjada (Figura 4.1), cultivada na zona rural do município de São Miguel do Oeste - SC. O cultivar utilizado é do genótipo *Beauregard*. Estas raízes tuberosas foram colhidas no estágio final de maturação, no mês de novembro de 2014. Antes da realização dos experimentos, as batatas-doces foram acondicionadas em geladeira.



Figura 4.1: Batata-doce da polpa alaranjada utilizada nos experimentos.

### 4.1.2 Equipamentos

Os equipamentos utilizados para a realização da secagem das batatas-doces e elaboração da farinha foram todos utilizados nos Laboratórios LACIP I e II, no Departamento de Engenharia Química da UFRGS. Já as análises necessárias para a caracterização dos produtos foram realizadas no Laboratório de Nutrição Animal do Departamento de Zootecnia e no Centro de Microscopia Eletrônica, ambos na UFRGS.

Para efetuar a desidratação das batatas foram utilizados, separadamente, dois equipamentos diferentes: Um forno de micro-ondas doméstico (Figura 4.2) operado na frequência máxima de 820 W, com especificações técnicas listadas na Tabela 4.1 e uma estufa de secagem com circulação forçada de ar.



Figura 4.2: Forno de micro-ondas utilizado nos experimentos de secagem.

Tabela 4.1: Identificação do forno de micro-ondas e características técnicas:

<b>Marca</b>	Brastemp
<b>Linha</b>	Micro-ondas
<b>Modelo</b>	BMS45BBANA
<b>Características</b>	Cavidade Pintada, Acabamento externo pintado, comando eletrônico, micro-ondas tipo bancada
<b>Capacidade (L)</b>	30
<b>Versão</b>	Segunda Versão
<b>Cor</b>	Branca
<b>Tensão (V)</b>	127
<b>Frequência (Hz)</b>	60
<b>Oscilações Permissíveis de Tensão (V)</b>	108~132
<b>Frequência de Operação (MHz)</b>	2450
<b>Chave Disjuntora Térmica (A)</b>	20
<b>Potência Útil – Micro-ondas (W)</b>	820
<b>Consumo no modo Micro-ondas (W)</b>	1350

A estufa de secagem de alimentos (Marca SOLAB, Modelo SL 102/100), mostrada na Figura 4.3, é composta por sensor e controle de temperatura e sistema de proteção de superaquecimento por termostato analógico. O equipamento tem capacidade de 100 litros e a potência de operação é 1500 W.



Figura 4.3: Estufa de secagem com circulação e renovação de ar.

Uma balança analítica foi utilizada para a pesagem das amostras de batata-doce antes, durante e após as secagens. Também se fez o uso de um dessecador com cristais de sílica para acondicionar as amostras após a retirada dos fornos e estabilizar a massa das amostras. Além desses, um laminador de alimentos foi utilizado para o corte homogêneo das batatas-doces.

A moagem foi realizada após a remoção da umidade das amostras de batata-doce utilizando um moinho tipo Willey (Figura 4.4) com câmara de moagem em aço inox de 15 cm de diâmetro, 04 navalhas fixas e 04 móveis.



Figura 4.4: Moinho de lâminas tipo Willey – De Leo.

Peneira com abertura em 300  $\mu\text{m}$  (48 mesh) foi utilizada para a separação das frações da farinha obtida.

#### 4.1.3 Preparo das amostras

A Figura 4.5 mostra o fluxograma do processo de produção da farinha de batata-doce de polpa alaranjada.

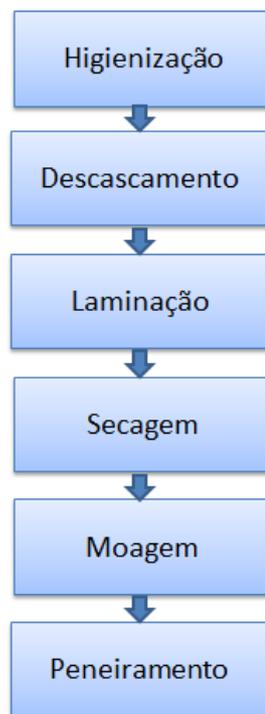


Figura 4.5: Fluxograma de produção da farinha de batata-doce.

1. Inicialmente a batata-doce com casca foi higienizada através de sua lavagem com água corrente à temperatura ambiente para a remoção de terra e focos de contaminação.
2. Na sequência, foi realizado o descascamento manual desse tubérculo.
3. A batata descascada sofreu laminação, o que pode ser possível com a utilização de um laminador de alimentos doméstico, com o qual se consegue a produção de discos de batata-doce com a mesma espessura.
4. Foi realizada a secagem de 150 gramas de discos de batata-doce com 2 mm de espessura, através de duas maneiras, a fim de comparar os resultados alcançados por ambos os métodos. Na desidratação desse alimento com micro-ondas, os discos úmidos foram postos diretamente sobre o prato giratório de vidro (Figura 4.6) na cavidade interna do forno de micro-ondas, seguido do acionamento do magnetron. Para que houvesse a evacuação do vapor gerado para o meio externo, a porta do forno era aberta a cada 30 segundos, aguardando pelo tempo de 20 segundos para reiniciar o aquecimento. O processo foi encerrado quando se evidenciou a massa constante das amostras, o que confere à remoção total da umidade. A pesagem foi realizada em balança analítica, verificando a massa de todos os discos de batata-doce antes e após o aquecimento.



Figura 4.6: Disposição dos discos de batata-doce de polpa alaranjada crua sobre o prato de vidro utilizado no forno de micro-ondas.

Já o método de secagem convectiva foi realizado da seguinte forma: as lâminas de batata-doce foram dispostas em uma forma de alumínio retangular sobre folhas de papel dispostas na superfície da forma. Levou-se a forma para o interior da estufa secadora de alimentos com circulação forçada de ar, cuja temperatura programada era de 60°C, temperatura esta, bastante indicada na literatura para desidratação de hortaliças. Nesse caso, a secagem também foi finalizada quando se constatou a desidratação completa da batata. Em ambos os métodos de secagem, por micro-ondas ou convectivo, os discos de batata-doce foram alocados sobre as superfícies não iguais, prato giratório ou forma de alumínio, respectivamente, sem que houvesse a sobreposição dos discos, a fim de proporcionar maior transferência de massa entre o material e o meio.

5. Quando toda a umidade livre foi removida das amostras, os discos de batata-doce secos foram moídos em um moinho de facas, por tempo variável.
6. Para a homogeneização do tamanho dos grãos de farinha produzidos após a moagem, foi realizado o peneiramento optando-se pela granulometria de 48 *mesh*. Logo, a farinha analisada foi a que não ficou retida nesta peneira citada.

#### 4.1.4 Cinética de Secagem

Após a disposição dos discos sobre o prato de vidro no interior do forno de micro-ondas, iniciou-se o processo de aquecimento. A cada 30 segundos após o início do aquecimento, o funcionamento do forno era interrompido para que todas as amostras fossem retiradas, sendo estas amostras quentes, colocadas em dessecador para a remoção da umidade superficial, por um período de 30 minutos. Em seguida, as amostras eram retiradas do dessecador e pesadas em balança analítica, computando-se uma massa constante para o determinado tempo de secagem. Assim, novamente os discos eram

levados ao interior do forno e o processo se repetia. Essa metodologia foi repetida até a verificação do peso constante das amostras, evidenciando a secagem completa.

O experimento em estufa por convecção forçada foi realizado a temperatura de 60 °C. A pesagem das amostras foi realizada seguindo o modelo do método anterior, no entanto, com a diferença que os intervalos para a pesagem das amostras foram de 30 minutos.

Com os pontos experimentais da massa mensurada nos períodos determinados ao longo das secagens, foram construídas as curvas de secagem e da taxa de secagem. O teor da umidade em equilíbrio em base seca é calculado conforme a equação 4.1:

$$X(b.s) = \frac{\text{Massa de água}}{\text{Massa de matéria seca}} \quad (4.1)$$

As curvas de taxa de secagem foram obtidas a partir da derivação das respectivas curvas de secagem pelo método das diferenças finitas centradas, ou seja,  $\Delta X / \Delta t$ , obtendo-se o valor da umidade nos pontos originalmente utilizados na construção das curvas de secagem.

#### 4.1.5 Caracterização da farinha

As duas farinhas produzidas foram caracterizadas através de análise bromatológica, química e física.

##### Análise bromatológica

A identificação da composição química é um fator essencial para se determinar o valor nutritivo de um alimento. Dessa forma, foi realizada a análise bromatológica no Laboratório de Nutrição Animal do Departamento de Zootecnia da UFRGS, para identificar o valor nutritivo das farinhas de batata-doce secas em micro-ondas e em estufa em termos de grupos de compostos químicos, como por exemplo, matéria seca, matéria orgânica, proteína bruta, fibra bruta, extrato etéreo, cinzas, extrato não nitrogenado.

O método usado para essa análise é chamado de Weende, proposto por Henneberg em 1864 (Giger-Reverdin, 1995). Esse método segue o esquema mostrado na Figura 4.7. Foi baseado nesse esquema que a Estação Experimental de Weende propôs a Análise Aproximativa do Alimento, também conhecida como Composição Centesimal.



Figura 4.7: Sistema de Weende proposto por Henneberg em 1864.

A matéria seca representa o peso de um material analisado totalmente livre de água, a qual é extraída num processo de secagem. Os valores de matéria seca facilitam a comparação qualitativa dos diversos nutrientes, entre alimentos diferentes (Giger-Reverdin, 1995).

A cinza de um alimento é o resíduo inorgânico que permanece após a queima da matéria orgânica. Este resíduo não é necessariamente da mesma composição que a matéria mineral presente originalmente no alimento, devido a volatilização ou reação entre os constituintes da amostra. O teor de cinzas é utilizado para estimar a fração bruta de minerais do alimento (Giger-Reverdin, 1995).

A fibra bruta corresponde às frações de celulose e lignina insolúveis em álcali, hemicelulose e proteínas desnaturadas pelo calor. Já a proteína bruta inclui vários compostos químicos, sendo os mais comuns os aminoácidos. Está implícito que toda substância contendo nitrogênio, presente no alimento, aparecerá nos resultados da análise como proteína, porém como isso não é totalmente verdade, tem-se a denominação proteína bruta (Giger-Reverdin, 1995).

O extrato etéreo ou gordura bruta inclui os ácidos graxos, saturados e insaturados, além de outros compostos solúveis em solventes orgânicos, como ceras e pigmentos (Giger-Reverdin, 1995).

O extrato não nitrogenado representa os carboidratos de mais fácil digestão como açúcares e amidos. Esse grupo inclui também, pectinas, frutanas, resinas, taninos, pigmentos, algumas vitaminas hidrossolúveis, traços de celulose, hemicelulose e lignina solúvel em álcali (Giger-Reverdin, 1995).

Também foi determinado o valor energético das farinhas, sendo que o valor da energia bruta foi avaliado através do calor produzido pela combustão das farinhas em uma bomba calorimétrica. Essa determinação é importante para avaliar os valores de energia metabolizável do alimento.

### Análise Química

Os elementos presentes na farinha de batata-doce de polpa alaranjada foram mensurados a partir da técnica de *Energy-dispersive X-ray spectroscopy* (EDS). O equipamento utilizado foi um microscópio eletrônico de varredura JSM-5800 com detector de EDS da NORAN, instalado no Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS. O software usado para as análises foi o *NORAN System Six*. As amostras de farinha foram fixadas sobre um suporte de alumínio (*stub*) com uma fita de carbono dupla face. Em seguida, recebeu uma fina camada de grafite para tornar a farinha condutora utilizando o *Sputter Coater SCD 050*, da BALTE.

Utilizou-se a tensão de 10 kV para diminuir o espalhamento dos elétrons na amostra, logo, diminuir o erro. O tempo de captura das contagens de fótons foi de 100 segundos e *dead time* (DT) aproximadamente 30. A quantificação ocorreu com os fótons na camada K (nível eletrônico) de cada elemento.

### Análise Física

A morfologia dos grânulos das amostras de farinha foi observada ao microscópio eletrônico de varredura (MEV) (Marca JEOL, Modelo JSM-5800), sob voltagem de 10 kV. A montagem das amostras foi realizada em suportes de alumínio (*stubs*) com fita adesiva de carbono dupla face, onde as farinhas foram fixadas e cobertas com uma fina camada de carbono.

## **4.2 Resultados e discussões**

Nessa seção serão mostradas as curvas de secagem da batata-doce pelos métodos de desidratação por micro-ondas e por estufa com circulação de ar, os resultados obtidos pelas análises de caracterização das farinhas processadas.

### *4.2.1 Cinética de secagem*

As batatas-doces de polpa alaranjada utilizadas nos experimentos apresentaram um teor de umidade na faixa de 80% em base úmida, ou seja, em torno de 400 % em base seca. A Figura 4.8 (a) e (b) apresentam a cinética de secagem em micro-ondas e em estufa com circulação de ar de lâminas com 2 mm de espessura de batata-doce, respectivamente. Ambas as curvas foram construídas considerando o teor de umidade em base seca. Para o experimento efetuado com micro-ondas foi usada uma batata-doce com umidade livre inicial de 4,41 g H<sub>2</sub>O / g sólido seco e para o realizado em estufa, uma umidade livre inicial de 3,17 g H<sub>2</sub>O / g sólido seco. Verifica-se na Figura 4.8 (b) que a partir de 175 minutos a umidade livre, presente na batata-doce seca em estufa com circulação de ar, tende a ficar constante. Destaca-se que nas Figuras 4.8 (a) e (b) é atingido o valor de zero na umidade livre, pois não há mais a variação de massa das amostras nas pesagens posteriores.

Com micro-ondas, a vaporização da umidade ocorre mais rapidamente e a diferença de pressão estabelecida é maior. É essa diferença de pressão a força motriz que leva a umidade, em forma de vapor, para a superfície da batata.

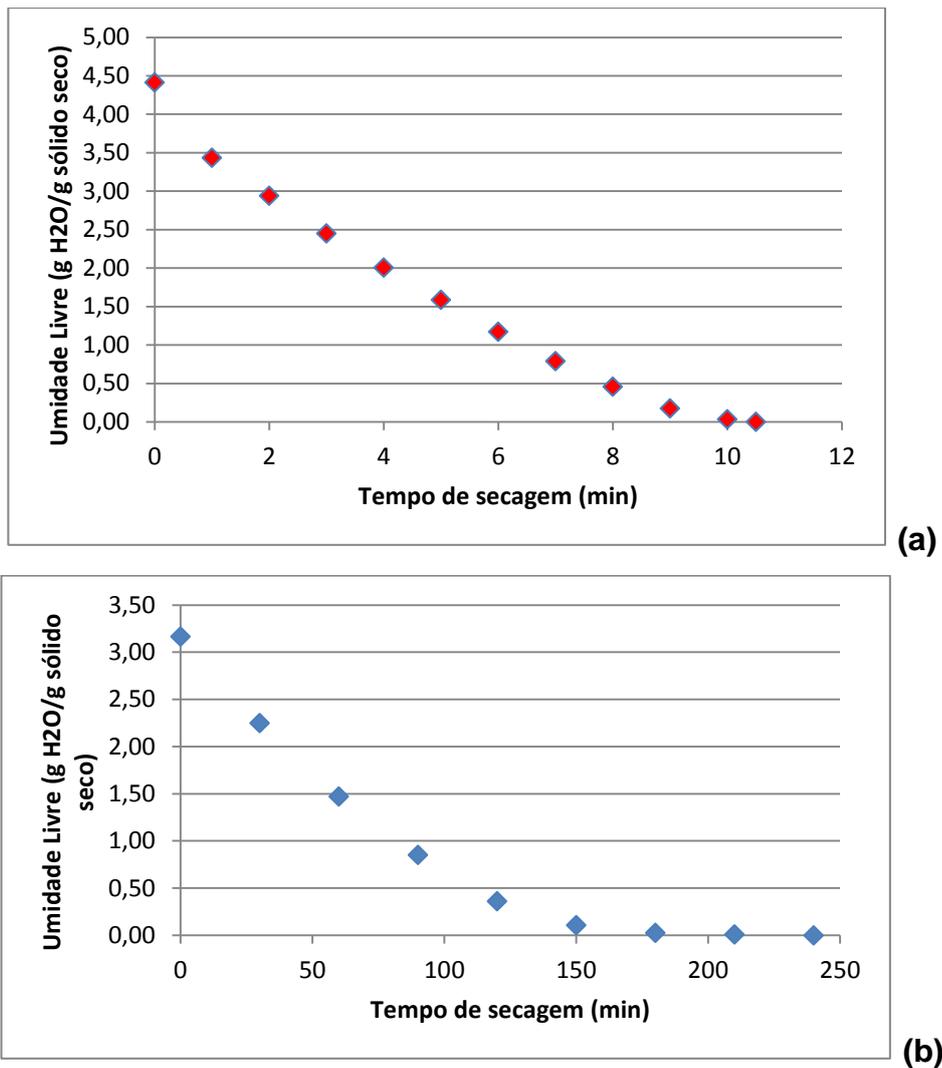


Figura 4.8: Relação entre o teor de umidade da batata-doce da polpa alaranjada e o tempo de secagem; (a) secagem com micro-ondas; (b) secagem em estufa com circulação de ar (60°C).

A Figura 4.9 apresenta as curvas da taxa de secagem tanto para micro-ondas, como para estufa com circulação de ar.

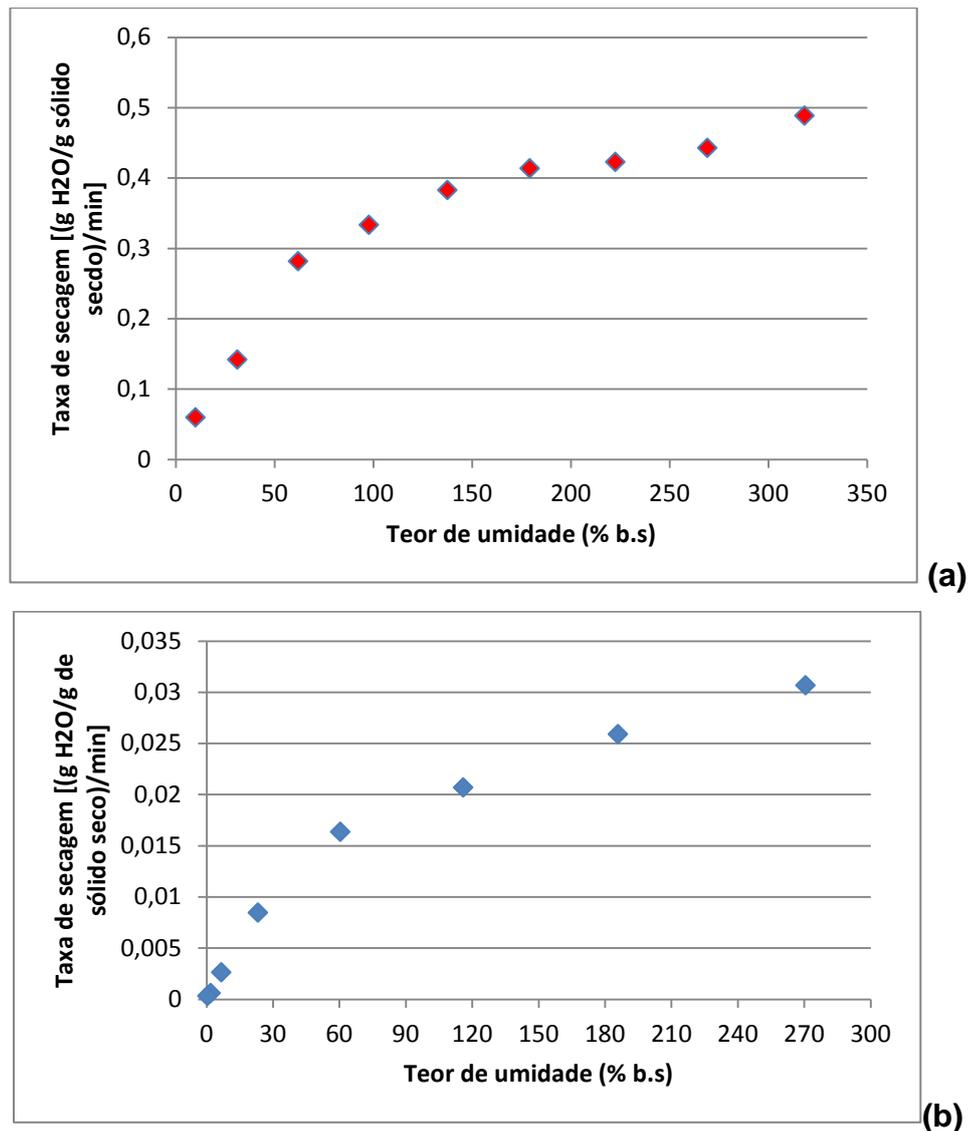


Figura 4.9: Curvas da taxa de secagem da batata-doce da polpa alaranjada; (a) Secagem com micro-ondas; (b) Secagem em estufa com circulação de ar (60°C).

Observa-se na Figura 4.9 que as curvas de taxa de secagem apresentam somente a formação de um período decrescente. Provavelmente, nesses casos, toda a água livre presente na superfície da batata-doce, evapora rapidamente e o processo é controlado pela difusão interna. Verifica-se que a taxa de secagem inicial foi de 0,49 (g H<sub>2</sub>O/g sólido seco) min<sup>-1</sup> com micro-ondas e 0,03 (g H<sub>2</sub>O/g sólido seco) min<sup>-1</sup> para estufa com circulação de ar. Isso mostra que a incidência de micro-ondas intensifica a transferência de calor e massa. Nota-se também que com micro-ondas a taxa de secagem é maior durante toda a secagem.

Na Figura 4.10, comparam-se os perfis de secagem para os dois métodos estudados e verificasse que, para o processamento com micro-ondas, as 150 gramas iniciais de batata-doce secaram em 10 minutos e 30 segundos, já para o processo convectivo, realizado em estufa com circulação de ar, o tempo necessário para que a massa das amostras permanecesse constante foi de 240 minutos (4 horas). Resultados de cinética semelhantes foram obtidos por Yan *et al.* (2013), que secou batata-doce em micro-ondas e estufa com circulação de ar.

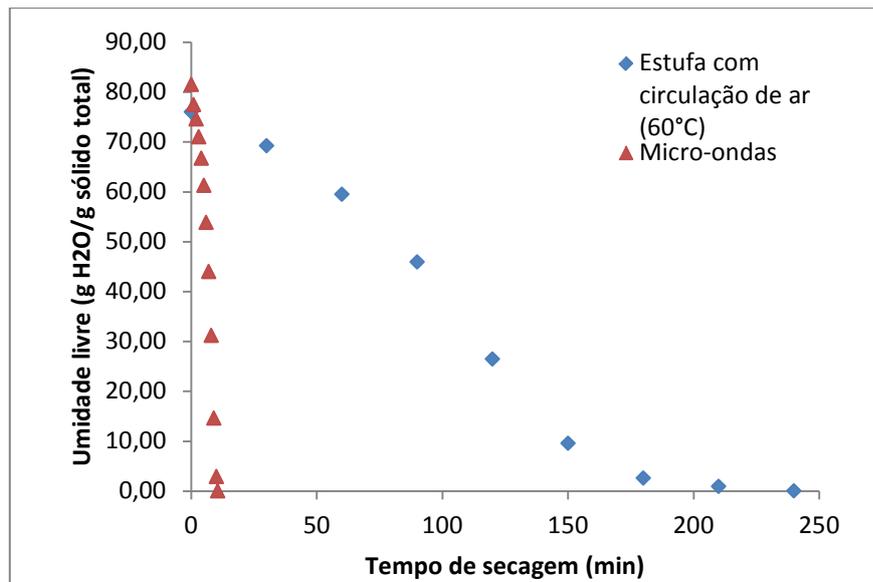


Figura 4.10: Efeito da diferença do método de secagem no teor de umidade.

A secagem com micro-ondas é considerada muito útil durante um período de taxa decrescente. Uma vez que, durante um período de taxa decrescente a difusão é a limitadora da taxa, resultando num encolhimento da estrutura e redução no teor de umidade superficial. Porém, na secagem com micro-ondas, devido ao aquecimento volumétrico, os vapores são gerados no interior do alimento, o que ocasiona um gradiente de pressão interna que força o deslocamento da água para fora. Assim, foi possível observar visualmente, que o encolhimento das lâminas de batata-doce foi evitado na secagem com micro-ondas. As alterações estruturais causadas pelo encolhimento podem estar relacionadas aos principais fatores de perda de qualidade dos alimentos desidratados (Rosa, 2010).

#### 4.2.2 Caracterização das farinhas

Os métodos de secagem utilizados no processamento da batata-doce de polpa alaranjada influenciaram significativamente na aparência das farinhas obtidas, como mostra a Figura 4.11. Percebe-se que a farinha obtida utilizando micro-ondas apresenta uma coloração mais escura que a processada em estufa com circulação de ar (60°C).



Figura 4.11: Farinha de batata-doce de polpa alaranjada; (a) processada em estufa e (b) processada em micro-ondas.

A composição centesimal média das farinhas foi obtida através da análise bromatológica e os resultados podem ser visualizados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Composição centesimal média da farinha da batata-doce.

Parâmetro	Composição (%)	
	<i>Micro-ondas</i>	<i>Estufa com circulação de ar (60°C)</i>
<b>Matéria Seca</b>	100,00	100,00
<b>Matéria Orgânica</b>	95,90	96,86
<b>Proteína Bruta</b>	5,75	5,23
<b>Fibra Bruta</b>	3,46	3,20
<b>Extrato Etéreo</b>	1,82	1,64
<b>Cinzas</b>	4,10	3,14
<b>Extrato Não Nitrogenado</b>	84,87	86,32

Constata-se que os valores obtidos para ambas as metodologias são semelhantes, não havendo discrepâncias significativas dos resultados.

Os lipídios são os constituintes mais susceptíveis a degradação química, sendo influenciado pela temperatura de secagem. Pelos resultados obtidos de extrato etéreo, as farinhas de batata-doce possuem um baixo teor de lipídios, isso confere a possibilidade de utilizar esse produto na formulação de alimentos para pessoas que necessitam restringir esse componente na alimentação.

O valor de energia bruta na a farinha processada em micro-ondas foi de 18,72 MJ/kg, que é superior em 7% ao valor obtido para a farinha processada em estufa, 17,48 MJ/kg. O maior valor calórico pode ser atribuído ao maior teor de proteínas, lipídios e carboidratos presentes nesse produto.

Resultados divulgados por Ray e Tomlins (2010) para o conteúdo nutricional de purês dos genótipos *Beauregard* e *Covington* (ambos com a polpa alaranjada), apresentaram valores de proteína e lipídios de 0,4 e 0,1%, respectivamente, para uma base seca média de 19,4% e cinzas em 0,75%. Possíveis perdas ou ganhos de nutrientes entre a batata-doce fresca e a seca poderiam ser relacionadas fixando alguns parâmetros. No entanto, não está no escopo desse trabalho.

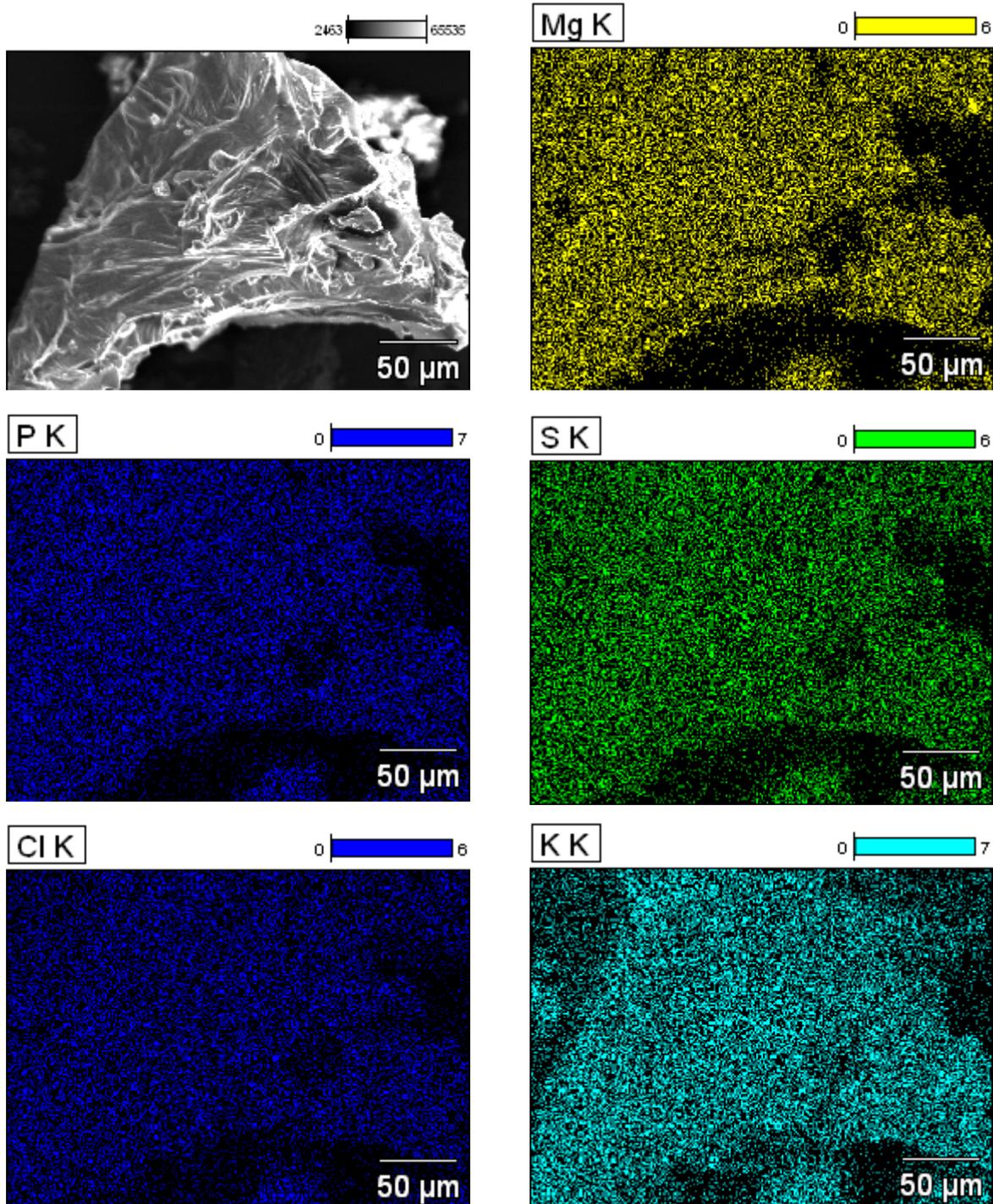
Verificou-se através da técnica de EDS a presença e quantidade de elementos disponíveis em cada farinha (Tabela 4.3). Essa técnica permite analisar de que maneira os elementos estão distribuídos na amostra, seja como grãos, cujo tamanho é possível estimar através das imagens geradas, ou espalhado de forma homogênea.

Como mostra na Tabela 4.3, a farinha obtida por micro-ondas apresenta 5,74% de potássio, valor próximo ao da casca da farinha de batata-doce de polpa branca obtido por (Risso, 2014), que equivale a 5,4%. Nota-se também 0,65% de enxofre na farinha produzida por micro-ondas e 0,35% na farinha a partir de estufa com circulação de ar. Logo, o enxofre foi o único elemento que apresentou composição maior na farinha de micro-ondas. Contudo, as percentagens de composição sejam bastante próximas para ambas as farinhas. Segundo Ray e Tomlins (2010) a farinha de batata-doce fornece de 20 – 39% da ingestão dietética de referência, para o potássio.

Tabela 4.3: Teores dos minerais da farinha de batata-doce identificados por EDS.

Elemento - Linha	Composição (%)	
	<i>Micro-ondas</i>	<i>Estufa com circulação de ar (60°C)</i>
<b>K - K</b>	5,74	5,77
<b>Mg - K</b>	0,17	0,21
<b>P - K</b>	0,25	0,69
<b>S - K</b>	0,65	0,35
<b>Cl - K</b>	0,36	0,58
<b>Ca - K</b>	(apenas qualitativo)	
<b>Fe - K</b>	(apenas qualitativo)	
<b>Zn - K</b>	(apenas qualitativo)	

Perante esses resultados, selecionou-se o modo *Mapping* do EDS para que fosse possível investigar a distribuição dos elementos nos pontos onde a análise foi realizada. Dessa forma, evidenciou-se a presença de minerais que não haviam sido identificados pela quantificação realizada com EDS nos pontos fixos escolhidos na amostra, tais como, Ca, Fe e Zn. A Figura 4.12 mostra os resultados obtidos pela análise de *Mapping* para a farinha processada através de micro-ondas, já a Figura 4.13 traz os resultados para a farinha processada com estufa com circulação de ar (60°C).



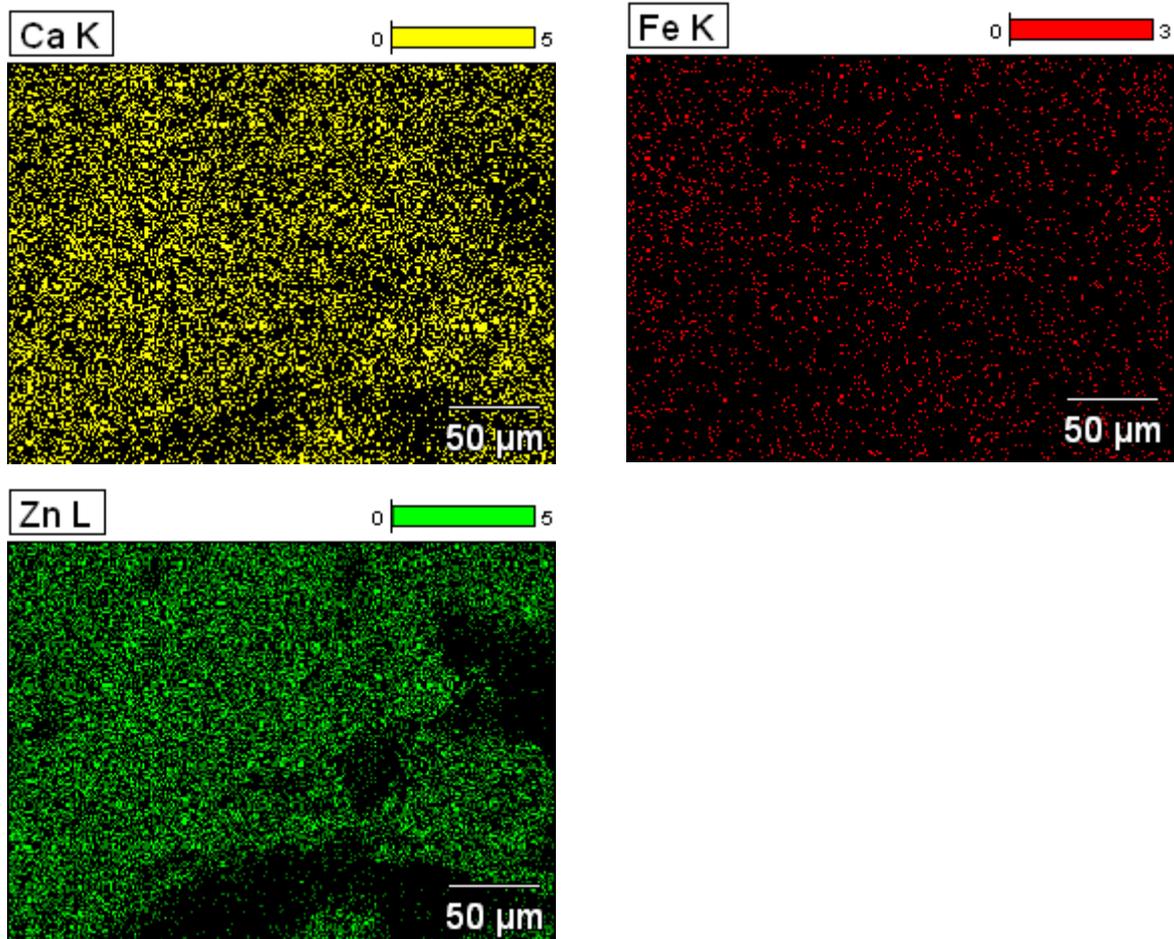
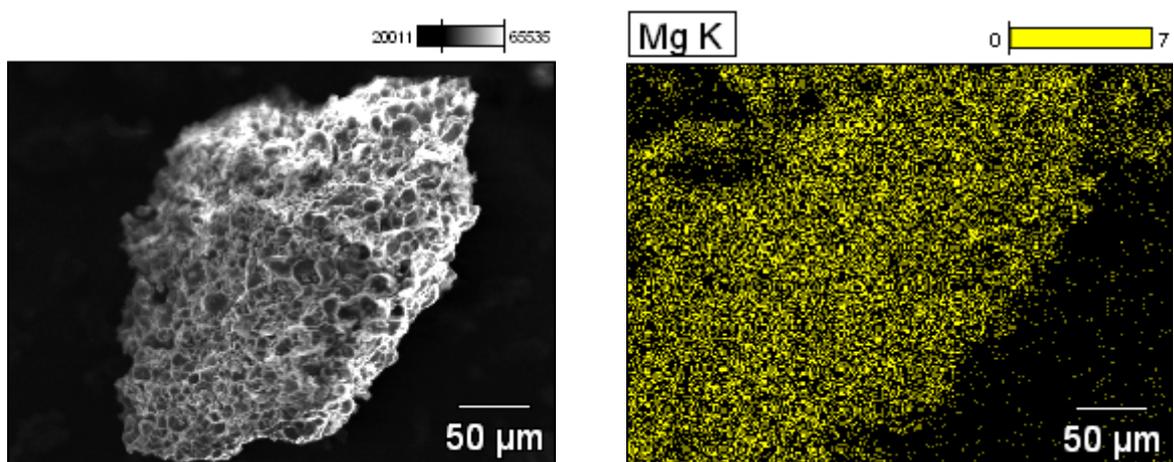


Figura 4.12: Análise de *Mapping* de diferentes elementos para a farinha seca através de micro-ondas.

As imagens geradas pela análise de *Mapping* permitem investigar a distribuição dos elementos nos pontos onde a análise foi realizada. Na Figura 4.12 fica destacado que existem regiões de maior concentração em Mg, S, P, K, Cl, Ca e Zn. Embora, um olhar minucioso nessa figura, permite dizer que o elemento Fe se mantém de forma mais dispersa.



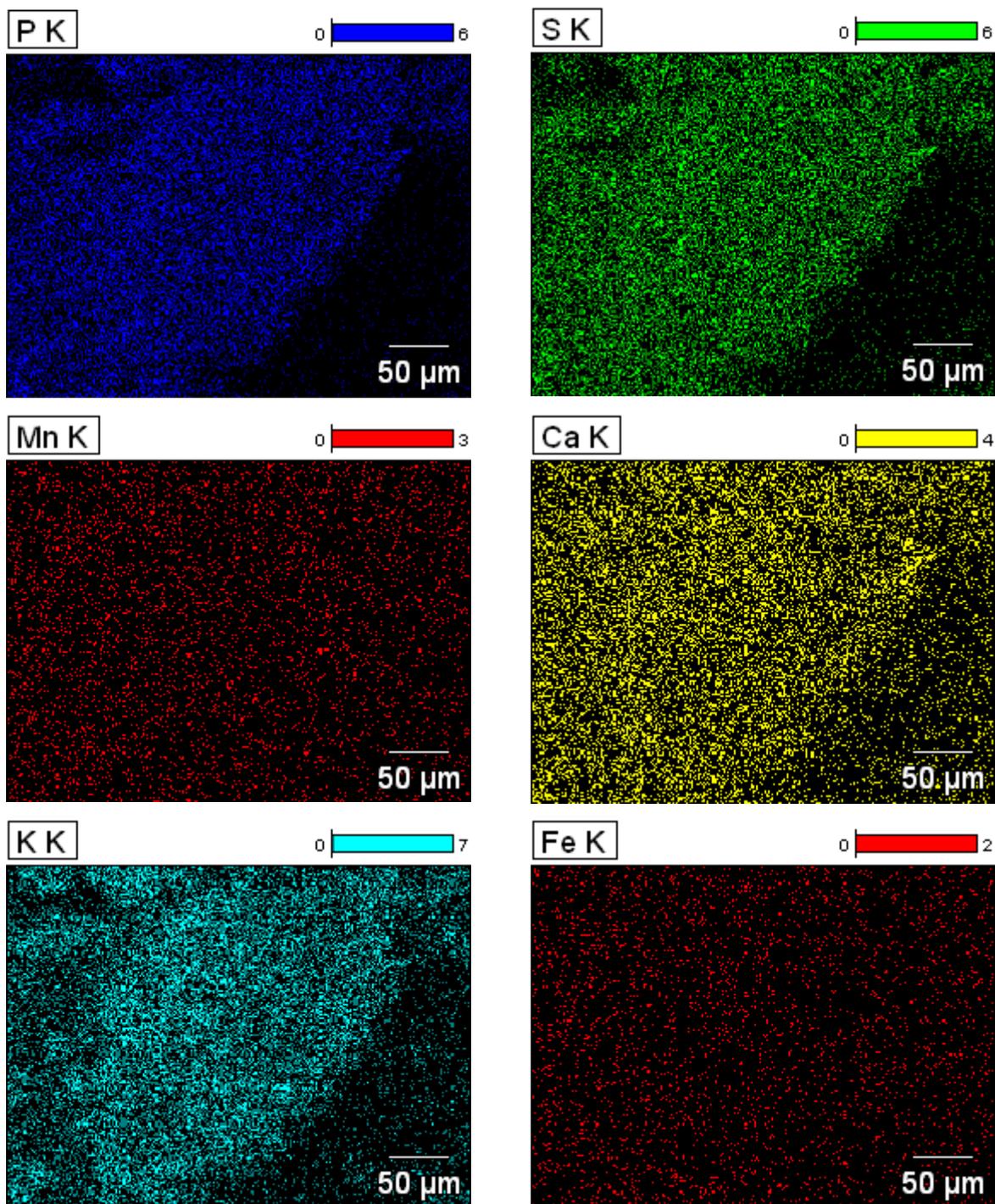


Figura 4.13: Análise de *Mapping* de diferentes elementos para a farinha processada a partir de estufa com circulação de ar (60°C).

Na Figura 4.13, destacam-se regiões de maior concentração principalmente em de Mg e K, já os elementos Fe e Mn apresentam-se de forma mais dispersa.

Para investigar os efeitos causados pelo processo de secagem na estrutura física da farinha de batata-doce, foi analisada através de imagens de microscopia eletrônica de varredura em tensão de 10 kV, a morfologia de cada farinha. As fotomicrografias geradas são mostradas na Figura 4.14.

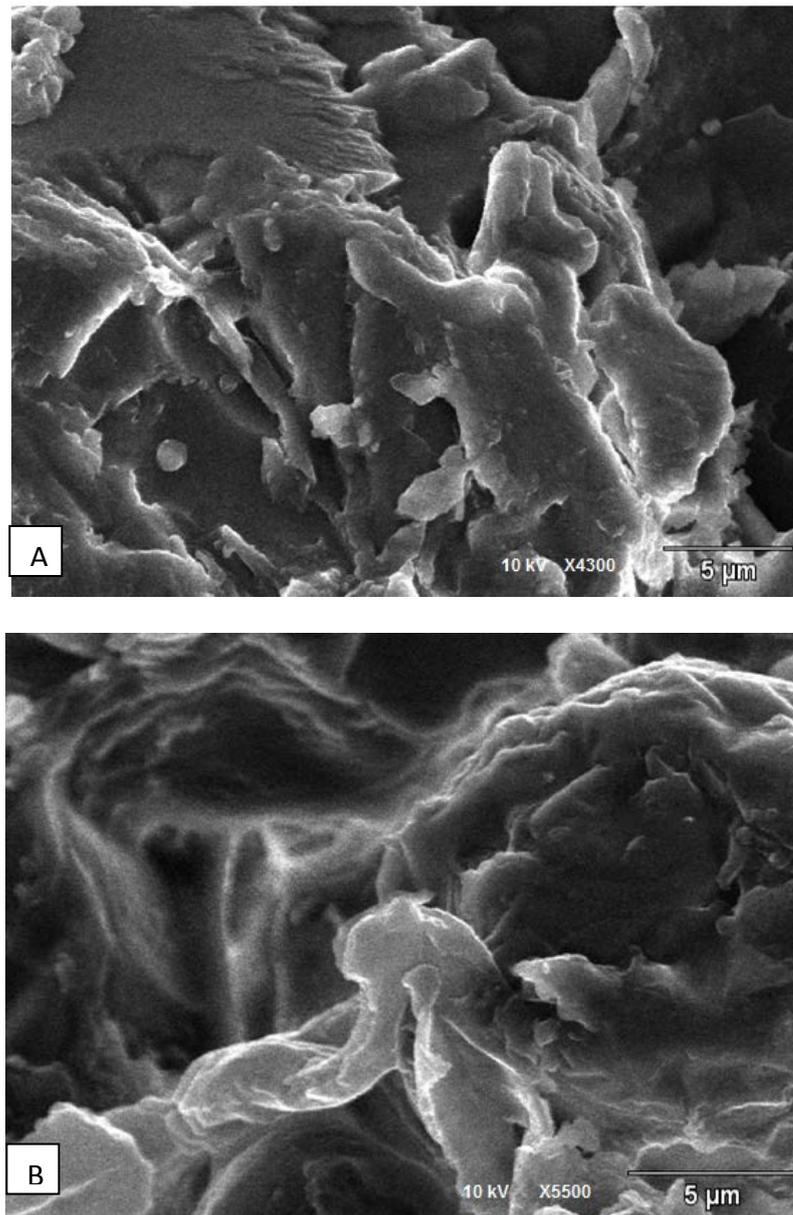


Figura 4.14: MEV das farinhas de batata-doce secas com: A – micro-ondas; B – estufa com circulação de ar a 60°C.

Na Figura 4.14 é possível observar a ruptura dos grânulos secos em forno de micro-ondas, provavelmente causadas pela alta taxa de aquecimento. É provável que a energia de micro-ondas vibre também as moléculas de água presentes nas regiões cristalinas dos grânulos de amido, e como consequência, há a destruição dos cristais de amilopectina em pouco tempo.

Risso (2014) avaliou a eficiência da hidrólise enzimática na farinha de batata-doce seca por 6 diferentes métodos e obteve a melhor eficiência justamente com a farinha seca em micro-ondas, onde também foram observadas fissuras na sua morfologia. Também foi relatada a aparência de grânulos de amido da batata-doce com formatos redondos, ovalados e poligonais.

## 4.1 Conclusões

O emprego de micro-ondas para a secagem de batata-doce apresentou maior rapidez para a geração de um produto isento de água livre do que o processo de secagem por estufa com circulação de ar à 60 °C. Devido às características de difusão interna das amostras, as taxas de secagem, para ambos os métodos, apresentaram apenas um período decrescente.

No que diz respeito à caracterização das farinhas produzidas, constatou-se que a composição centesimal média das mesmas foi semelhante para ambos os métodos de preparação. Observou-se que o valor da energia bruta da farinha processada em micro-ondas foi 7 % superior ao da processada em estufa. Além disso, destacou-se o elemento potássio perante aos demais elementos identificados por EDS. Já as micrografias forneceram imagens, cujas fissuras dos grânulos indicam a provável ocorrência da destruição de cristais de amilopectina e perda de antioxidantes.

## Capítulo 5 – Projeto do Sistema de Tambor Rotativo para Micro-ondas

Nesse capítulo são abordados os detalhes de elaboração de um sistema de aquecimento por micro-ondas com adaptação para um tambor rotativo capaz de promover o movimento transversal da carga contida em seu interior. O protótipo desenvolvido tem como base um forno de micro-ondas doméstico, que além de ser um aparelho com baixo custo de aquisição, tem dimensões que possibilitam experimentos em escala laboratorial.

### 5.1 Projeto do tambor rotativo

O material utilizado para a confecção do tambor foi o polimetil-metacrilato (PMMA), comumente conhecido como acrílico. Este polímero é um material termoplástico rígido e incolor que apresenta alta resistência, ponto de fusão entre 130 e 140 °C, leveza e facilidade para ser moldado a diferentes formas. O acrílico é muitas vezes utilizado para substituir o vidro em situações onde se necessita de um material com características semelhantes, porém com maior praticidade de manuseio e menor custo.

No dimensionamento do tambor foram consideradas as dimensões da cavidade interna de um forno de micro-ondas com capacidade de 30 L. Dessa forma, as dimensões do cilindro foram determinadas como mostra a Tabela 5.1.

Para auxiliar a movimentação da matéria sólida no interior do tambor durante o rotacionamento, foram anexadas às paredes do tambor seis chicanas radiais planas de acrílico, com as dimensões discriminadas na Tabela 5.1. Um ângulo de 60° foi formando entre duas chicanas consecutivas, pois a distribuição das aletas no cilindro fez com que houvesse um espaçamento igual entre elas.

Tabela 5.1: Dimensionamento do tambor rotativo em milímetros.

---

<b>Comprimento do cilindro</b>	150
<b>Diâmetro externo do cilindro</b>	240
<b>Diâmetro interno do cilindro</b>	237
<b>Diâmetro das tampas</b>	270
<b>Espessura da parede do cilindro</b>	3
<b>Espessura dos flanges</b>	4
<b>Espessura das tampas</b>	4
<b>Comprimento das chicanas</b>	150
<b>Altura das chicanas</b>	25
<b>Espessura das chicanas</b>	3

---

A fixação das tampas do tambor com os flanges anexados nas extremidades do cilindro foi realizada com o auxílio de parafusos e roscas de acrílico. Além disso, cada tampa continha em seu eixo central, um furo circular com 5 mm de diâmetro. Este furo, por sua vez, foi criado para proporcionar a evacuação dos vapores gerados no interior do tambor para o meio externo.

Um esquema ilustrativo do tambor rotativo com todos os seus componentes principais pode ser visualizado na Figura 5.1.

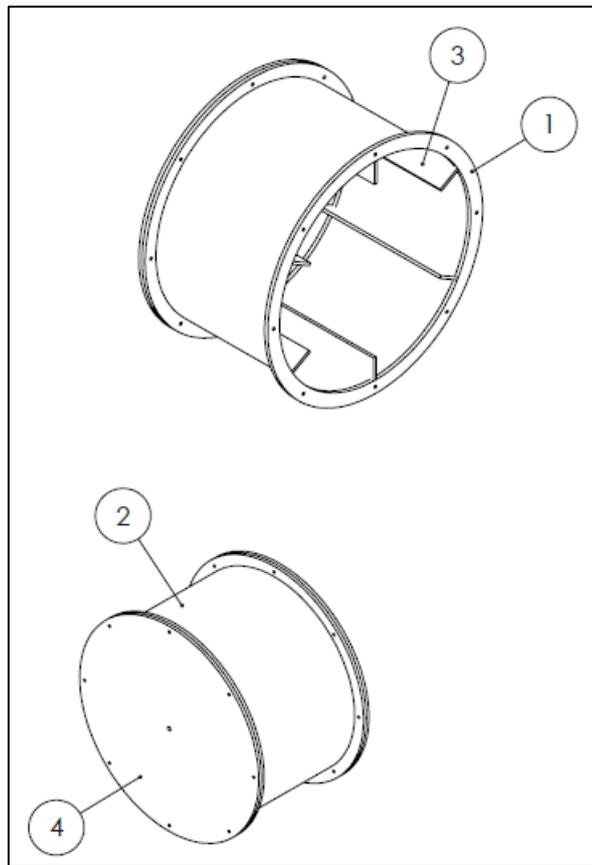


Figura 5.1: Representação em três dimensões do tambor rotativo:  
1 – Flange; 2 - Parede do tambor; 3 – Aleta; 4 - Tampa.

Da mesma forma, a Figura 5.2 apresenta as vistas lateral e superior do aparato dimensionado e construído neste trabalho.

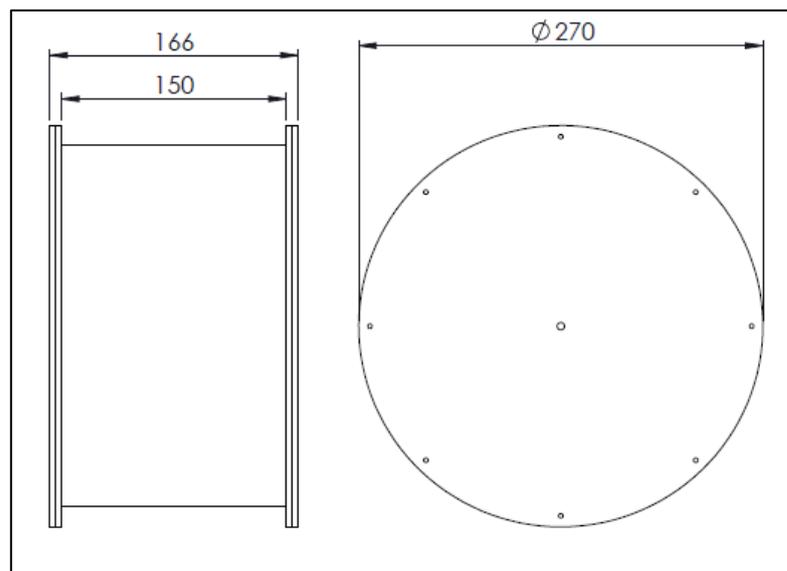


Figura 5.2: Desenho do tambor com tampa. Vista lateral à esquerda e vista superior à direita.

Na Figura 5.3 está desenhada a geometria das partes complementares ao tambor, como os flanges e chicanas. Já a Figura 3.4 ilustra o projeto gerado com sombreamento.

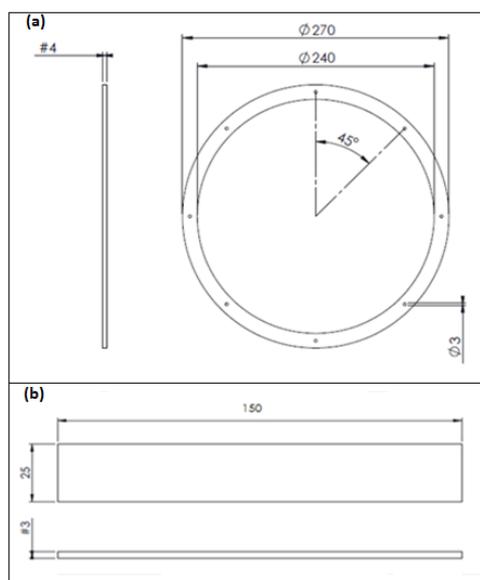


Figura 5.3: Dimensionamento das partes complementares ao tambor: a) Flange; b) Chicana.

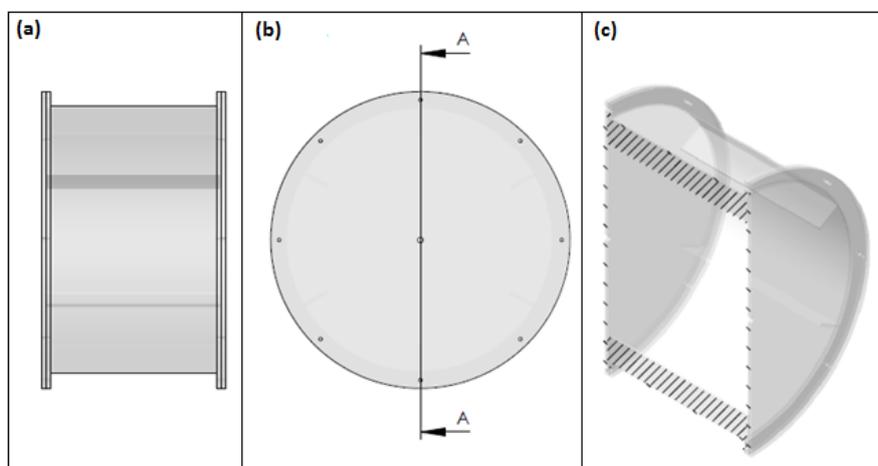


Figura 5.4: Representação do tambor rotativo com chicanas e tampa: a) vista lateral; b) vista superior com indicação do eixo central; c) corte da seção interna.

## 5.2 Sistema de movimentação

O sistema de movimentação do tambor é composto por um par de engrenagens cilíndricas retas e um motor. As engrenagens foram cuidadosamente moldadas para transmitir um movimento uniforme e contínuo, e para isso, uma das engrenagens foi fixada numa das laterais de uma das tampas do tambor, concêntrica à tampa (Figura 5.6), sendo a outra posicionada na extremidade de um bastão maciço de acetal que prolonga o eixo do motor. A transmissão da rotação entre os eixos paralelos foi possível com essas engrenagens, que apresetam 20 dentes e diâmetro externo de igual tamanho.

O motor elétrico selecionado foi um Motoredutor Tipo CHP com as características descritas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Especificações técnicas do motorreductor tipo CHP.

<b>Tensão do Motor</b>	12 VCC
<b>Consumo Nominal</b>	3 A
<b>Torque/Opções</b>	7 a 14 Nm
<b>Sentido de Giro</b>	L/R
<b>Velocidades</b>	1 ou 2
<b>Rotações: Máximo</b>	75 rpm

O motor utilizado é acionado com 12 ou 24 V, é compacto e resistente o suficiente para o que se propõe o experimento. Esse motor foi posicionado ao lado externo do aparelho de micro-ondas, sendo suportado por uma estrutura metálica fixada na carcaça externa do forno.

Foi adicionado a esse sistema um variador de frequência compatível ao motor escolhido, executando os requisitos pretendidos, como diminuir a velocidade do motor, ao fazer variar a frequência da corrente elétrica de alimentação do motor.

No “*display*” frontal é possível efetuar e visualizar alterações ao estado do motor elétrico, como regular a sua velocidade de rotação.

### 5.3 Sensor para medição de rotação

Nas aplicações de controle e transmissão de informações os dois tipos mais importantes de dispositivos utilizados são os acopladores e as chaves ópticas.

Neste projeto optou-se pelo uso de uma chave óptica interruptiva como sensor de medição de rotação. Esse dispositivo apresenta a vantagem de ter um baixo custo, quando comparado a demais sensores de rotação. Além disso, a escolha do mesmo foi realizada considerando as propriedades do objeto de detecção pretendido e as condições do seu ambiente.

A chave óptica consiste de um componente constituído por um emissor e um detector de luz. O acionamento desse dispositivo é feito por algum tipo de objeto que se interpõe ao feixe de luz que vai do diodo emissor de luz (LED) ao elemento detector (fototransistor), como mostra na Figura 5.5.

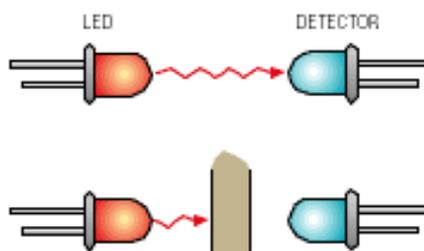


Figura 5.5: Princípio de funcionamento de uma chave óptica interruptiva.

A luz do elemento emissor (LED) incide no elemento sensor através de uma abertura. Quando um objeto interrompe o feixe de luz, um sinal de comando é produzido no sensor. Nesse projeto, a passagem dos dentes de uma engrenagem pela fenda produz uma sequência de pulsos e assim é possível determinar a velocidade de rotação do eixo.

As características de operação da chave óptica interruptiva com abas – Tipo “T” selecionada estão descritas na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Características de operação da chave óptica à temperatura de 25 °C.

	Item	Mínimo	Típico	Máximo	Unidade
<b>Emissor</b>	Tensão direta		1,2-1,4	1,3-1,6	V
	Corrente reversa			10	μA
<b>Sensor</b>	Corrente coletor (escuro)			0,1	μA
	Comprimento de onda (dominante)		940		nm
<b>Conjunto</b>	Corrente coletor (claro)	300			μA
	Tempo de Resposta		20		μs

## 5.4 Resultados e discussões

O tambor de acrílico constituído de seis chicanas radiais planas (Figura 5.6) se mostrou resistente ao aquecimento até 80 °C, de fácil manuseio, com manutenção necessária. Em uma de suas tampas foi fixado uma engrenagem de acrílico com pigmentação roxa, a qual é peça fundamental para a movimentação deste aparato. No centro dessa engrenagem há uma abertura com diâmetro de 5 mm. Essa, por sua vez, tem o objetivo tanto de interligar o meio interno com meio o externo da cavidade do forno, para promover a evacuação do vapor de água, possibilitar a conexão com bombas de vácuo ou ainda a adaptação de sensores de temperatura, como fibra óptica ou termopar.



Figura 5.6: Tambor de acrílico.

Como mostrado na Figura 5.7(a) o sensor de rotação adotado é composto por uma chave óptica interruptiva, já o objeto sensor é uma engrenagem de acrílico dentada, com a superfície exposta ao lado do elemento emissor, coberto por uma película de cor preta. Este, por sua vez, está fixado ao prolongamento do eixo do motorreductor mostrado na Figura 5.7(b).



Figura 5.7: (a) Chave óptica interruptiva e (b) motorreductor.

No projeto desenvolvido, optou-se pela posição do forno de micro-ondas invertida, como mostrada na Figura 5.8(a). Nessa situação, as ondas eletromagnéticas são irradiadas de baixo para cima, visto que a válvula magnetron e o guia de onda permanecem na parte inferior do forno. Essa posição foi escolhida para se assemelhar a um projeto já existente no laboratório.

O controlador de rotação que recebe o sinal do sensor óptico é mostrado na Figura 5.8(b). Antes de iniciar a operação, deve-se fixar a velocidade através das setas indicativas

ao lado do *display*, cuja função é mostrar a velocidade rotacional desenvolvida no tambor.

O sistema eletrônico ainda é composto por um *driver* de acionamento automático ou manual (Figura 5.8 (c)). Na opção manual, o tambor irá rotacionar quando apertado o botão amarelo, porém o acionamento do magnetron somente irá ocorrer quando solicitado no próprio painel do micro-ondas, ou seja, os comandos são efetuados separadamente. Além disso, a opção manual é indicada pelo sinalizador com luz vermelha. Já na opção automática, indicada pela luz verde do sinalizador, o acionamento do mecanismo de rotação e funcionamento do magnetron irá iniciar conjuntamente. Esse último modo está apto para a inserção de um controle de temperatura interna do forno, ou seja, o aquecimento é acionado em 5V e quando ultrapassa a temperatura limite, cai para 0 V, buscando atingir a temperatura setada.

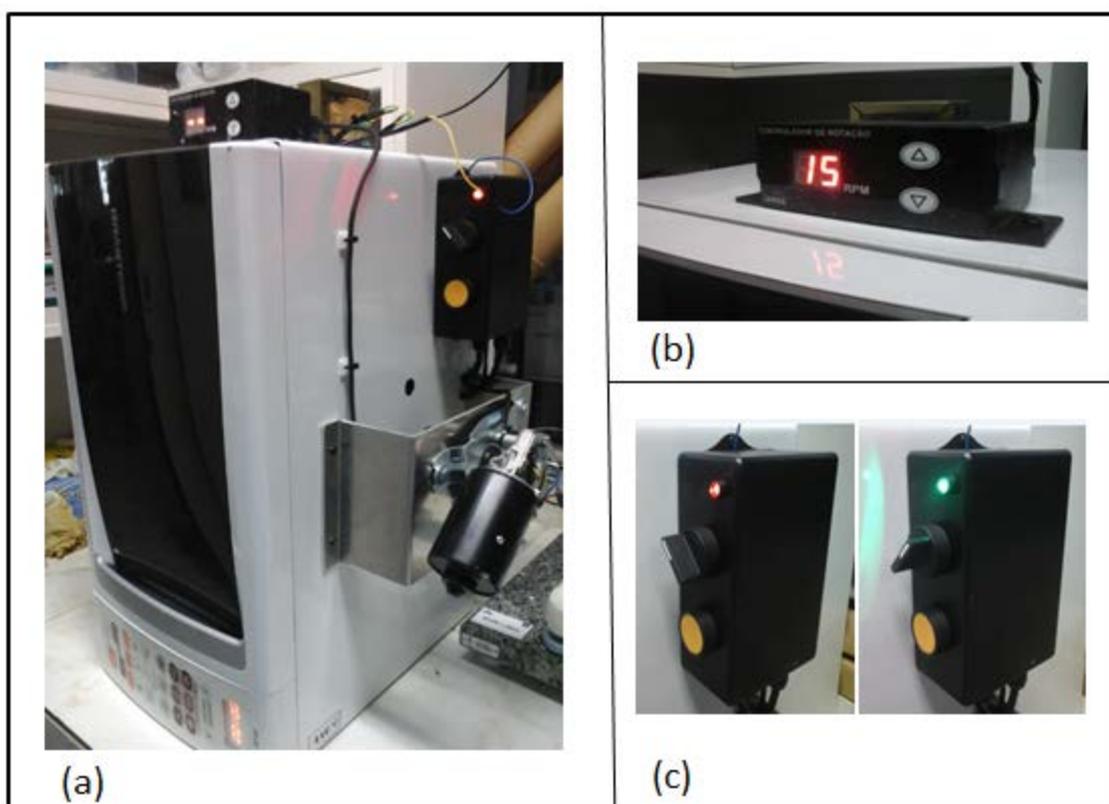


Figura 5.8: (a) Forno de micro-ondas com as adaptações externas; (b) controlador de rotação; (c) *driver* de acionamento manual/automático.

O forno de micro-ondas utilizado e que aparece na Figura 5.8 é da marca Brastemp, modelo BMS45BBANA. Outras características técnicas desse aparelho podem ser visualizadas na seção 4.1.2.

O controle de temperatura a partir de sensores interruptivos em fornos de micro-ondas está em fase de desenvolvimento pelo grupo de pesquisa em que faz parte o autor deste trabalho. Portanto, não será objeto de estudo para essa dissertação.

Embora alguns testes tenham sido feitos com um sensor de temperatura termopar tipo K, em outro forno de micro-ondas doméstico adaptado com um reator de quartzo para reações de pirólise rápida, tornava-se necessário um conhecimento melhor da distribuição de energia dentro desses modelos de forno. Constatou-se que a medição de

temperatura em diversos pontos de uma cavidade retangular com um volume de aproximadamente 30L, tornaria-se muito difícil de ser realizada com os sensores de temperatura convencionais e disponíveis no mercado. Contudo, a partir de um experimento basicamente estatístico com partículas vegetais, conseguiu-se realizar um mapeamento da intensidade de energia em diferentes pontos de uma cavidade ressonante. Esse estudo será apresentado no capítulo seguinte.

#### 5.4.1 *Constatações relatadas*

Como em todos os projetos de engenharia, uma ideia inicialmente concebida pode sofrer inúmeras alterações até o resultado final, ainda mais quando se trata de um assunto com características inovadoras. Assim, algumas constatações foram obtidas ao longo dos 6 meses necessários para a conclusão desse projeto:

- materiais metálicos, como parafusos de aço ou alumínio, quando não forem bem aterrados à carcaça metálica do forno, transformam a mesma em uma antena condutora de micro-ondas, irradiando-as para o meio externo. Esse fato é extremamente relevante, pois um vazamento dessa radiação põe em risco a segurança do operador;
- por mais que materiais de origem polimérica, como o acrílico e o poliacetal, não devam absorver as ondas eletromagnéticas, por apresentarem baixo fator de perda dielétrica, ainda assim pode ocorrer a danificação de peças, como a ruptura do bastão que prolonga o eixo do motor, em função de um superaquecimento em posições específicas do forno;
- o cabo de transmissão do sensor de rotação para o controlador deve ser blindado e conduzido pela parte externa da cavidade, para não sofrer interferências;
- a interdisciplinaridade para a constituição desses tipos de projeto é primordial. Fundamentos de física, eletrônica e mecânica ainda são, de modo geral, assuntos limitados no que contempla as capacidades do engenheiro químico. Por isso, a procura por informações, através de muita leitura e o auxílio de profissionais com conhecimentos específicos da área, torna-se essencial;
- não se pode subestimar a sensibilidade do campo eletromagnético a quaisquer perturbações.



## Capítulo 6 – Desidratação de Batata-doce utilizando Tambor Rotativo Combinado com Micro-ondas

Após ter realizado a produção da farinha de batata-doce a partir da secagem por micro-ondas, avaliado o processo e caracterizado o produto, verificou-se a necessidade de estudar uma alternativa para otimizar a prática como é feito esse procedimento de desidratação. Principalmente, porque como já abordado anteriormente, as lâminas de batata estáticas sobre o prato giratório, estão mais propensas a sofrerem um superaquecimento, queimando partes do produto. Além disso, muitas vezes é requerido que se alterne o lado com que as lâminas de batata ficam expostas para cima e se abra a porta do forno para proporcionar a remoção do vapor de água gerado a cada fração de tempo.

### 6.1 Materiais e métodos

Nessa seção, será avaliada a remoção de água da batata-doce de polpa alaranjada, utilizando o tambor rotativo combinado com micro-ondas. Destaca-se que não são utilizados tempos longos de aquecimento, pois não se pretende chegar ao ponto do alimento seco. Nesse caso, a operação de desidratação será avaliada somente no primeiro estágio de perda de umidade, fase em que a água é evaporada.

Para a realização dos experimentos dessa abordagem, foram utilizadas batatas-doces de polpa alaranjada, as quais foram adquiridas no Mercado Público Municipal de Porto Alegre. Estas batatas foram higienizadas, descascadas e cortadas em cubos com aproximadamente 5 mm de aresta. A geometria cúbica foi escolhida por facilitar a movimentação da carga no interior do tambor.

#### 6.1.1 *Planejamento experimental*

A fim de avaliar os efeitos das variáveis independentes sobre as respostas num processo, faz-se necessário planejar um procedimento consciente dos experimentos. Um planejamento experimental reduz o número de experiências ou repetições e melhora a

qualidade da informação obtida através dos resultados, contribuindo para uma sensível diminuição de trabalho, de tempo e de custos (Rodrigues e Lemma, 2009).

A escolha do planejamento adequado depende principalmente do número de variáveis independentes ou fatores que se deseja estudar, da disponibilidade de matéria-prima, da viabilidade do número de ensaios que podem ser realizados e do conhecimento prévio do processo. Assim, a estratégia experimental adotada para este estudo foi o Deliniamento Composto Central Rotacional (DCCR).

#### DCCR: Fatores de influência

As variáveis de interesse analisadas foram: velocidade rotacional, tempo de aquecimento e quantidade mássica. Assim, realizou-se um fatorial completo  $2^3$ , incluindo 3 repetições no ponto central e 6 pontos axiais, totalizando 17 ensaios.

Os pontos centrais (0) servem para estimar o erro experimental e determinar a precisão da equação polinomial. Os pontos axiais ( $\alpha$ ) são utilizados para estender o modelo linear, tornando-o um modelo quadrático. O valor de  $\alpha$  é a função do número de variáveis independentes (K), sendo definido pela Equação (6.1) (Rodrigues e Lemma, 2009).

$$\alpha = F^{1/4} \quad (6.1)$$

Sendo  $F = 2^K$  e  $K = 3$ , tem-se que:  $\alpha = (2^3)^{1/4} = \pm 1,68$ .

A Tabela 6.1 apresenta os valores utilizados no planejamento.

Tabela 6.1: Valores utilizados no DCCR para a desidratação da batata-doce

<b>Váriáveis independentes</b>	<b>Código</b>	<b>-1,68</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>1,68</b>
<b>Velocidade (rpm)</b>	$x_1$	5	8	15	22	25
<b>Tempo (s)</b>	$x_2$	30	45	75	105	120
<b>Massa (g)</b>	$x_3$	80	100	125	150	170

Apesar de o tambor rotativo apresentar chicanas internas que facilitam muito a movimentação da carga, os valores limites determinados para as variáveis massa e velocidade levaram em consideração o grau de enchimento (Equação 2.13) e número de Froude (Equação 2.6), respectivamente. A faixa em que esses parâmetros se encontram, quando combinados, precisa atender o tipo de movimentação por queda, especificamente no modo rolamento, o qual é aconselhável para operações de secagem em secador rotativo. Pois nessa faixa ocorre o deslocamento da carga sem danificá-la. Já para a variável tempo foi escolhida uma amplitude pequena entre 30 segundos e 2 minutos, a fim de permanecer no estágio inicial de desidratação para todos os ensaios.

A ordem da execução foi aleatória, permitindo que os efeitos dos fatores não controlados se distribuíssem em média sobre todas as respostas.

O valor dos pontos axiais foi definido devido às condições operacionais do experimento. Os valores codificados para os três fatores estão descritos na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Planejamento experimental para os três fatores.

Ensaio	Variáveis codificadas			Variáveis reais		
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	Velocidade (rpm)	Tempo (segundos)	Massa (g)
1	-1	-1	-1	8	45	100
2	1	-1	-1	22	45	100
3	-1	1	-1	8	105	100
4	1	1	-1	22	105	100
5	-1	-1	1	8	45	150
6	1	-1	1	22	45	150
7	-1	1	1	8	105	150
8	1	1	1	22	105	150
9	-1,68	0	0	5	75	125
10	1,68	0	0	25	75	125
11	0	-1,68	0	15	75	125
12	0	1,68	0	15	30	125
13	0	0	-1,68	15	120	80
14	0	0	1,68	15	75	170
15	0	0	0	15	75	125
16	0	0	0	15	75	125
17	0	0	0	15	75	125

A análise dos resultados foi realizada por meio dos softwares Minitab®16 e STATISTICA Six Sigma, sendo utilizada uma Análise de Variância (ANOVA) para estimar os parâmetros estatísticos e avaliar a predição ou não do modelo matemático. Nesse caso, as variáveis independentes analisadas foram a remoção de umidade e a taxa de remoção de umidade.

## 6.2 Resultados e discussões

### 6.2.1 Influência das variáveis no processo de desidratação parcial de batata-doce

Os ensaios de desidratação foram realizados utilizando a combinação de tambor rotativo com aquecimento por micro-ondas, como mostra a Figura 6.1. O magnetron operou numa potência de 820 W, equivalente à potência máxima do forno de micro-ondas.



Figura 6.1: Esquema de tambor rotativo com micro-ondas com batata-doce.

Os resultados obtidos de remoção do teor de umidade das batatas-doces para os dezessete experimentos propostos pelo DCCR realizado, que inclui como variáveis independentes a velocidade de rotação do tambor, o tempo de aquecimento e a quantidade mássica, são apresentados na Tabela 6.3.

Tabela 6.3: Matriz do planejamento experimental e resultados da remoção de umidade.

<i>Ensaio</i>	<i>Velocidade (rpm)</i>	<i>Tempo (s)</i>	<i>Massa (g)</i>	<i>Remoção de umidade (%)</i>	<i>Taxa de remoção de umidade (s<sup>-1</sup>)</i>
1	8	45	100	<b>5,390</b>	<b>0,0012</b>
2	22	45	100	<b>6,350</b>	<b>0,0014</b>
3	8	105	100	<b>10,500</b>	<b>0,0010</b>
4	22	105	100	<b>13,730</b>	<b>0,0013</b>
5	8	45	150	<b>2,820</b>	<b>0,0006</b>
6	22	45	150	<b>4,000</b>	<b>0,0009</b>
7	8	105	150	<b>6,860</b>	<b>0,0007</b>
8	22	105	150	<b>6,827</b>	<b>0,0007</b>
9	5	75	125	<b>7,248</b>	<b>0,0010</b>
10	25	75	125	<b>6,024</b>	<b>0,0008</b>
11	15	30	125	<b>6,400</b>	<b>0,0021</b>
12	15	120	125	<b>11,736</b>	<b>0,0010</b>
13	15	75	80	<b>8,413</b>	<b>0,0011</b>
14	15	75	170	<b>5,565</b>	<b>0,0007</b>
15	15	75	125	<b>5,952</b>	<b>0,0008</b>
16	15	75	125	<b>5,360</b>	<b>0,0007</b>
17	15	75	125	<b>5,728</b>	<b>0,0008</b>

A média de remoção de umidade das batata-doces de polpa alaranjada foi de 7%, esse valor relativamente baixo é condizente aos valores obtidos na seção 4.3.1, onde foi realizado o aquecimento com micro-ondas de lâminas sem agitação, na faixa de tempo determinada. Foi obtida uma taxa média de remoção de umidade de 0,001 s<sup>-1</sup>.

Os cubos de batata-doce foram adicionados ao interior do tambor, ambos a temperatura ambiente, em torno de 23°C. Verificou-se que após transcorridos 30 segundos de aquecimento a temperatura média medida na superfície das amostras, com o auxílio de um pirômetro óptico, foi de 30 °C. Já em 120 segundos de aquecimento, a temperatura medida variava entre 50-55°C. Destaca-se que esses valores foram obtidos com a utilização de um pirômetro óptico, logo, a medição foi efetuada de forma pontual na superfície de amostras aleatórias e não representa a temperatura em todo o volume de controle.

A partir dos resultados obtidos foi possível determinar os coeficientes de regressão de um modelo de segunda ordem para as variáveis codificadas e verificar a validade do modelo de remoção de umidade em função das variáveis estudadas através da análise de variância (ANOVA).

Para a elaboração de um modelo adequado optou-se pela eliminação de um dos pontos do planejamento, o ensaio de número 5, pois esse ponto não contribui para um ajuste que correlacione adequadamente as variáveis estudadas.

O modelo de segunda ordem codificado para o percentual de remoção de umidade em função da velocidade rotacional ( $x_1$ ), tempo ( $x_2$ ) e quantidade mássica ( $x_3$ ) na faixa estabelecida na Tabela 6.1, é dado por:

$$\begin{aligned} \text{Remoção de umidade}[\%] &= 5,7279 - 0,2905x_1 + 2,5579x_2 - 1,8080x_3 + 0,7634x_1^2 \\ &+ 3,2088x_2^2 + 1,1696x_3^2 + 1,9022x_1x_2 - 2,9213x_1x_3 \\ &- 3,9381x_2x_3 \end{aligned} \quad (5.1)$$

O valor de  $R^2$  obtido foi de 0,9801, o que possibilita afirmar que aproximadamente 98% da variabilidade na resposta conseguem ser explicadas pelo modelo ajustado. Esse valor obtido é considerado adequado para um modelo válido e útil para fins preditivos. A Tabela 6.4 descreve os coeficientes do modelo de regressão a partir da matriz codificada.

Tabela 6.4: Coeficientes de regressão para a remoção de umidade

<i>Fatores</i>	<i>Coefficiente de regressão</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>T(7)</i>	<i>P</i>
Constante	5,7279	0,3284	17,44	0,000
Velocidade	-0,2905	0,2692	-1,079	0,322
Tempo	2,5579	0,2769	9,237	0,000
Massa	-1,808	0,3043	-5,941	0,001
Velocidade <sup>2</sup>	0,7634	0,4528	1,686	0,143
Tempo <sup>2</sup>	3,2088	0,464	6,916	0,000
Massa <sup>2</sup>	1,1696	0,4915	2,379	0,055
Velocidade x tempo	1,9022	0,5225	3,641	0,011
Velocidade x massa	-2,9213	0,627	-4,659	0,003
Massa x tempo	-3,9381	0,6584	-5,982	0,001

Na Tabela 6.5 é apresentada a análise de variância para remoção de umidade considerando todos os termos da equação do modelo.

Tabela 6.5: Anova para a remoção de umidade

Fonte de variação	Graus de liberdade	Soma dos quadrados	Quadrado médio	F	P
Regressão	9	99,8	11,09	32,83	0,00
Resíduo	6	2,03	0,34		
Total	15	101,83			

A Figura 6.2 ilustra os dados da tabela ANOVA através do diagrama de Pareto, o qual permite visualizar os fatores, segundo sua representatividade, ordenados de maneira decrescente, começando pelos mais significativos.

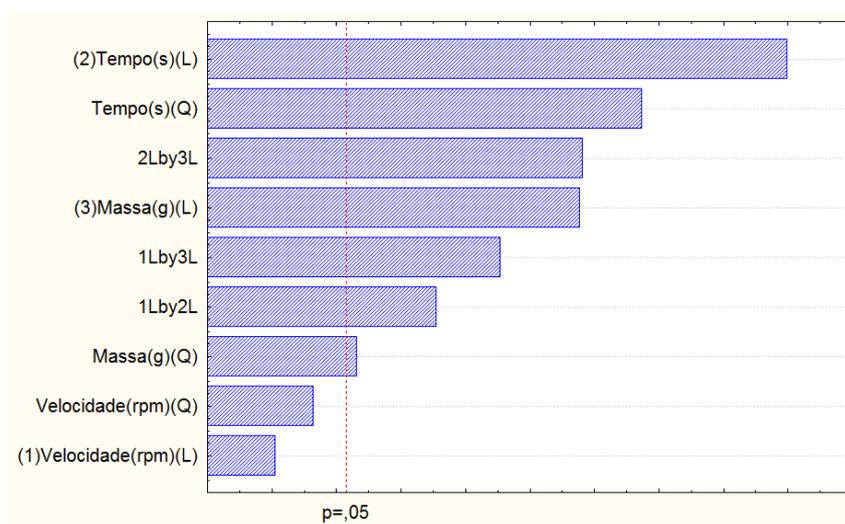


Figura 6.2: Diagrama de pareto – DCCR

Através do diagrama de Pareto é possível perceber que as variáveis significativas na remoção de umidade foram o tempo de aquecimento (principalmente com comportamento linear), a quantidade mássica, a interação entre essas duas variáveis e dessas com a velocidade. Nota-se que a velocidade rotacional com comportamento linear e quadrático não foi significativa isoladamente perante a remoção de umidade.

As superfícies de resposta do modelo ajustado são apresentadas nas Figuras 6.3, 6.4 e 6.5.

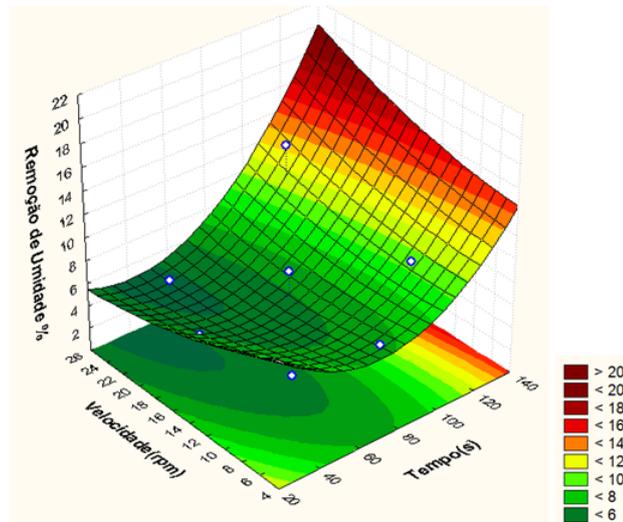


Figura 6.3: Superfície de resposta para o modelo ajustado de remoção de umidade em função da velocidade rotacional e do tempo de aquecimento.

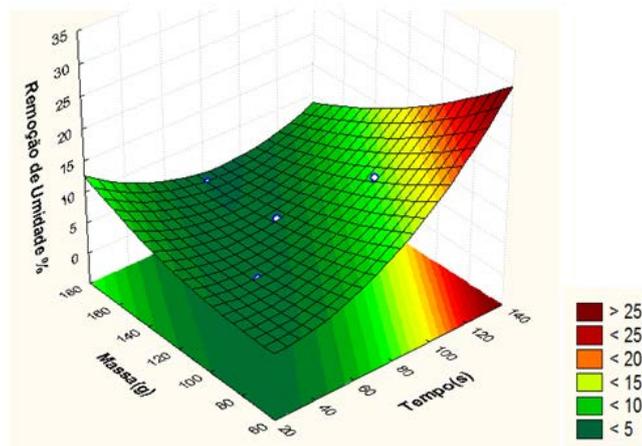


Figura 6.4: Superfície de resposta para o modelo ajustado de remoção de umidade em função da quantidade mássica e do tempo de aquecimento.

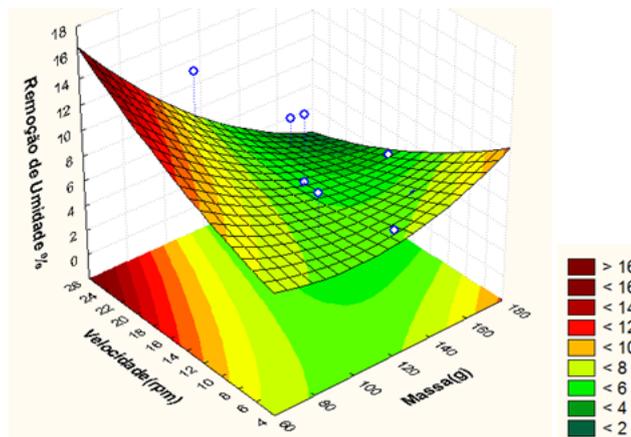


Figura 6.5: Superfície de resposta para o modelo ajustado de remoção de umidade em função da velocidade rotacional e da quantidade mássica.

Percebe-se pelas superfícies de resposta das Figuras 6.3 a 6.5, que quando avaliadas conjuntamente as variáveis, quanto maior o tempo de aquecimento e menor a massa de batata-doce processada, maior será a remoção de umidade. O que comprova a localização do ponto ótimo para a maximização da remoção de umidade, sendo este situado em uma das extremidades, onde os valores das variáveis são equivalentes a 25, 120 e 80, para velocidade, tempo e massa respectivamente. A otimização realizada prevê uma remoção de umidade máxima igual a 23%.

Para validar o modelo criado, um novo ensaio no ponto ótimo para maximização de remoção de umidade foi realizado, sendo o valor experimental obtido de 12%. Valor esse, abaixo do estimado pelo modelo ajustado. Contudo, um valor alto perante os resultados alcançados experimentalmente.

A estimação dos pontos ótimos de operação é importante e bastante coerente. Contudo, é necessário avaliar um processo eficiente com o menor gasto energético. Para isso, é avaliada a taxa de remoção de umidade, a qual é calculada pela divisão da umidade removida pelo tempo de processamento.

Uma avaliação de todos os pontos experimentais foi efetuada para elaboração de um modelo para a taxa de remoção de umidade. Contudo o modelo quadrático gerado apresenta  $R^2$  igual a 0,72, indicando que apenas 72% da variabilidade na resposta podem ser explicadas por esse modelo. Os coeficientes de regressão do modelo são mostrados na Tabela 6.6.

Tabela 6.6: Coeficientes de regressão para a taxa de remoção de umidade

<i>Fatores</i>	<i>Coefficiente de regressão</i>	<i>Erro padrão</i>	<i>T(2)</i>	<i>P</i>
Constante	0,000809	0,000022	36,027	0,001
Velocidade	0,000091	0,000023	3,947	0,058
Tempo	-0,000078	0,000030	-2,644	0,118
Massa	-0,000359	0,000023	-15,942	0,004
Velocidade <sup>2</sup>	0,000538	0,000028	19,456	0,003
Tempo <sup>2</sup>	-0,000384	0,000021	-18,337	0,003
Massa <sup>2</sup>	0,000015	0,000021	0,744	0,534
Velocidade x tempo	-0,000043	0,000028	-1,518	0,268
Velocidade x massa	-0,000065	0,000028	-2,323	0,146
Massa x tempo	0,000022	0,000028	0,791	0,511

No diagrama de pareto para a taxa de remoção de umidade (Figura 6.6), obtido a partir da análise de variância, constata-se apenas das variáveis tempo e massa como significativas na construção do modelo.

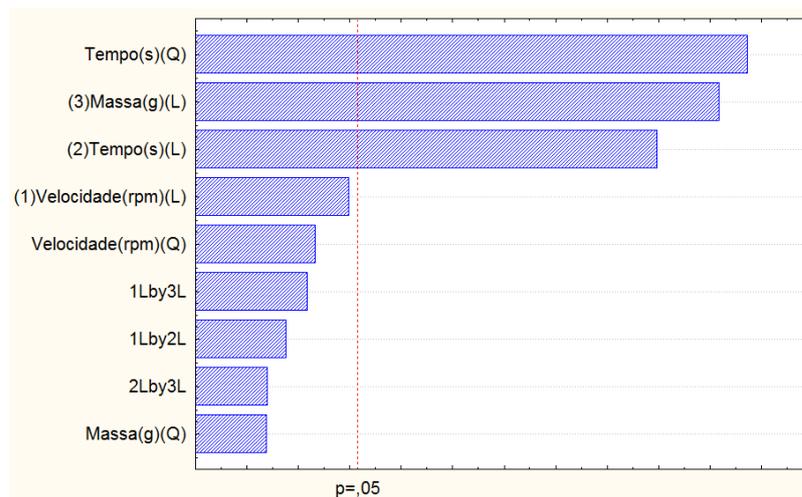


Figura 6.6: Diagrama de pareto para a taxa de remoção de umidade.

As superfícies de resposta para a taxa de remoção de umidade são apresentadas nas Figuras 6.7, 6.8 e 6.9.

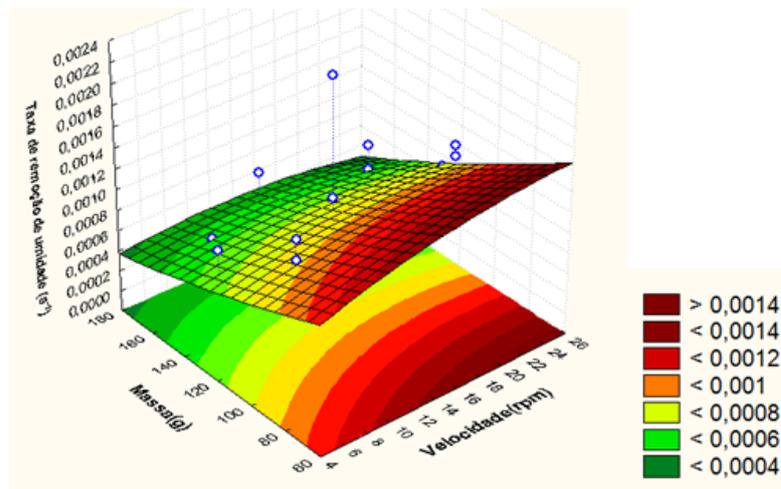


Figura 6.7: Superfície de resposta para o modelo ajustado de taxa de remoção de umidade em função da velocidade rotacional e da quantidade mássica.

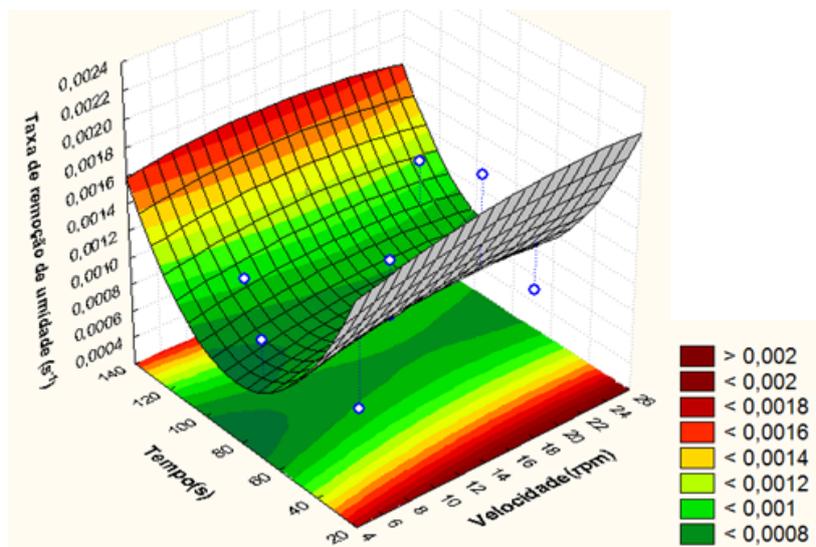


Figura 6.8: Superfície de resposta para o modelo ajustado de taxa de remoção de umidade em função do tempo de aquecimento e da velocidade rotacional.

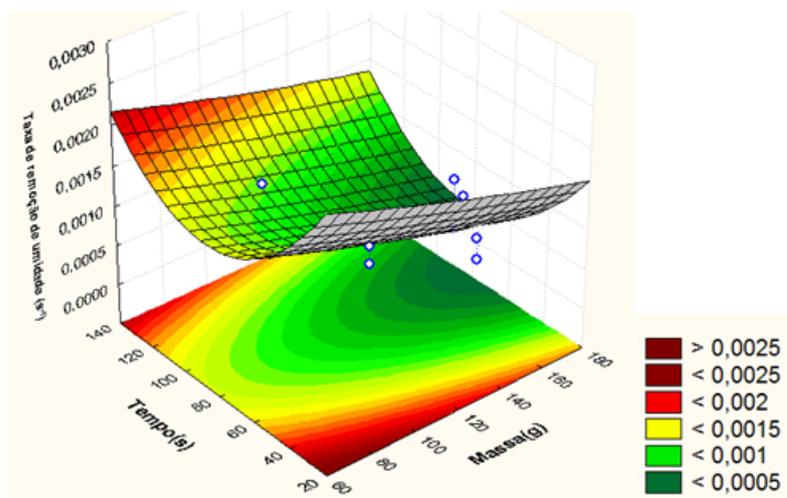


Figura 6.9: Superfície de resposta para o modelo ajustado de taxa de remoção de umidade em função do tempo de aquecimento e da quantidade mássica.

Avaliando a influência da velocidade rotacional para uma determinada massa fixa, constata-se que quanto maior for a velocidade aplicada, a taxa de remoção de umidade tenderá a ser maior. Esse fato pode ser explicado pela contribuição da agitação que acelera o fenômeno de transferência de massa. Na Figura 6.7, por exemplo, com uma massa de amostra fixada em 100 gramas, a partir de uma velocidade de aproximadamente 15 rpm, já é possível obter uma taxa de remoção de umidade satisfatória. Contudo, como mostra a Figura 6.8 não foi possível visualizar algum efeito significativo da velocidade na taxa de remoção de umidade em diferentes tempos de aquecimento.

O comportamento da rotação sobre a remoção de água das amostras também foi estudado mantendo-se constante o peso das batatas-doces e o tempo de aquecimento. Como pode ser visto na Tabela 6.7, o estudo foi realizado para quatro diferentes velocidades rotacionais e para as partículas sem movimentação, adicionadas no interior do tambor, que permaneceu estático.

Tabela 6.7: Remoção de umidade para diferentes velocidades de rotação com 100 gramas de batata-doce e aquecimento mantido em 105 segundos.

Velocidade rotacional (rpm)	Remoção de umidade (%)
sem rotação	17,25 ± 0,45
8	10,88 ± 0,58
15	10,93 ± 1,96
22	11,67 ± 2,06
30	11,06 ± 1,76

A partir dos dados da Tabela 6.7, percebe-se que não houve diferenças significativas na remoção de umidade a partir da velocidade de 8 rpm até 30 rpm. Os experimentos foram realizados em duplicata e são estatisticamente semelhantes. Os valores próximos

possibilitam afirmar que a rotação não implicou significativamente para a desidratação de uma massa de 100 gramas de batata-doce em um tempo de 105 segundos. Os valores das taxas de remoção de umidade desses resultados podem ser comparados aos obtidos pelas superfícies de resposta apresentadas nas Figuras 6.7 e 6.8. Segundo essas imagens, a taxa de remoção de umidade seria suavemente inferior para uma velocidade de rotação abaixo de 8 rpm, mantendo-se massa e tempo constantes.

Uma característica que pode ser relevante para os resultados obtidos é a presença de chicanas no interior do tambor rotativo. Como a massa de sólido é relativamente baixa perante a capacidade volumétrica do tambor, o movimento de queda acontece independente da velocidade. Porém, à medida que ocorre o aquecimento, a baixas velocidades, em torno de 5 rpm, por exemplo, a maior parte da carga permanece aderida nas paredes do tambor. Dessa forma, não há força centrípeta suficiente para promover a queda e, conseqüentemente, romper a adesão entre a superfície úmida aquecida dos cubos de batata-doce com parede acrílica do tambor.

Nos estudos realizados por Wang *et al.* (2009) foi constatado que é difícil notar algum efeito da velocidade de rotação sobre a cinética de secagem. Contudo, ainda em seu trabalho, a variação da velocidade apresentou influência sobre a integridade física do material a ser seco, no caso, grãos de soja.

Outra abordagem que deve ser considerada a partir dos resultados apresentados na Tabela 6.7 é a diferença na remoção de umidade quando a carga permanece estática ou em movimento. Embora a evaporação da água da carga estática possa variar sensivelmente com a posição em que ela é alocada no interior da cavidade ressonante, devido ao padrão de aquecimento próprio do forno de micro-ondas, como foi discutido no Capítulo 3, a desidratação de 100 gramas de batata-doce no interior do tambor e sem agitação foi nitidamente mais rápida no período de tempo realizado. Porém, esse fato não justifica que o processo de secagem dessa forma seja melhor do que aquele com a movimentação da carga. Pelo contrário, apesar de ter uma taxa de desidratação mais elevada, a batata-doce, quando estática, está sujeita a um sobreaquecimento que danifica a qualidade do produto. Como não ocorre a passagem da carga pelas diferentes zonas de aquecimento no interior do forno, a temperatura é atingida muito rapidamente em alguns pontos e em virtude disso a água evapora de forma mais acelerada, até que inicie a carbonização na superfície do material, o que propicia a perda de qualidade do produto e a formação de sabor característico não desejado.

Apesar dessas constatações, não se pode desconsiderar outras variáveis que possam influenciar na resposta da cinética de secagem da batata-doce, como por exemplo, a geometria da carga (cubos, palitos, discos, etc.), a disposição da carga pelo forno, a adição e geometria das chicanas e o diâmetro do tambor. Essas variáveis não foram estudadas isoladamente nesse trabalho, porém, possibilita que futuras pesquisas sejam realizadas avaliando seus efeitos.

### 6.2.2 Consumo energético

Para saber o consumo energético dos ensaios de desidratação, o desempenho energético foi quantificada em termos da energia requerida para aquecer e evaporar uma unidade de massa de água (MJ/kg), definida pela equação 6.2:

$$CEU = \frac{P \cdot t}{M_{H_2O}} \quad (6.2)$$

Onde *CEU* é o consumo de energia por unidade de água evaporada; *P* a potência de operação do magnetron, *t* o tempo de aquecimento e *M<sub>H<sub>2</sub>O</sub>* a massa de água evaporada no determinado tempo. Os valores do CEU calculado para os dezessete ensaios realizados são apresetados, juntamente com a taxa de remoção de umidade, na Tabela 6.8. A potência de operação se manteve constante durante todos os experimentos, estabelecida em 820 W.

A partir dos valores da Tabela 6.8, verifica-se que o ensaio número 11, realizado nas condições de velocidade igual a 15 rotações por minuto, tempo de aquecimento de 30 segundos e massa inicial de batata-doce de 125 gramas, foi nitidamente o ensaio que deteve o menor consumo de energia por unidade de massa de água evaporada, equivalente a 3,075 MJ/kg. Esse, por sua vez, também apresentou a maior taxa de remoção de umidade. Por outro lado, o CEU dos outros ensaios não se distanciou expressivamente da média calculada em 7,364 MJ/kg.

Tabela 6.8: Consumo de energia por unidade de água evaporada sob potência de operação de 820 W.

Ensaio	Taxa de remoção de umidade (s <sup>-1</sup> )	CEU (MJ/kg)
1	0,00120	6,846
2	0,00141	5,811
3	0,00100	8,200
4	0,00131	6,271
5	0,00063	8,723
6	0,00089	6,150
7	0,00065	8,367
8	0,00065	8,408
9	0,00097	6,788
10	0,00080	8,167
11	0,00213	3,075
12	0,00098	6,708
13	0,00112	9,138
14	0,00074	6,501
15	0,00079	8,266
16	0,00071	9,179
17	0,00076	8,589

### 6.3 Conclusões

A inserção de um tambor rotativo no interior de uma cavidade que recebe radiação de micro-ondas mostrou-se como uma alternativa para desidratar amostras de batata-doce. A partir das análises estatísticas realizadas, conseguiu-se obter um modelo de

segunda ordem para a remoção de umidade. Este, por sua vez, não sofre influências da velocidade, quadrática e linear, individualmente.

Foi avaliada também, a taxa de remoção de umidade, cujo modelo gerado foi influenciado pelas variáveis massa e tempo. Destaca-se que o estudo comparativo da desidratação de batata-doce sem e com rotação, forneceu resultados de maior remoção de água para o caso sem rotação, contudo devido ao superaquecimento que ocorreu nessa situação, há a possibilidade de que tenha ocorrido a destruição dos componentes funcionais da batata-doce, o que diminui a qualidade do produto final.

## Capítulo 7 – Considerações Finais

### 7.1 Conclusões

A proposta de um tambor rotativo com aquecimento por micro-ondas foi alcançada. Esse, por sua vez, não se limita a um protótipo de bancada para prever o comportamento em escala industrial, mas sim, um equipamento com valor comercial no seu próprio formato.

A partir da metodologia desenvolvida com grãos de pipoca foi possível estudar o comportamento do aquecimento no interior de uma cavidade ressonante, confirmando a não homogeneidade da distribuição de temperatura. Verificou-se que a poucos centímetros de distância os picos de aquecimento poderiam ser máximos ou mínimos. Esse estudo da dinâmica das ondas eletromagnéticas, apesar de intuitivo, foi bastante interessante, visto que se precisou entender as características do meio no qual seria dado continuidade do trabalho.

Tomou-se conhecimento das informações nutricionais contidas na batata-doce, especialmente a de polpa alaranjada. Como esse é considerado um dos super alimentos do mundo, instigou-se a necessidade de comparar métodos que promovessem a preservação de suas propriedades, por isso, a fabricação de sua farinha. Assim, estudou-se o método de secagem, cujo objetivo é remover a umidade dos alimentos sem afetar as suas composições físico-químicas.

A secagem de batata-doce com micro-ondas foi avaliada, resultando na obtenção de taxas de secagem muito superiores as obtidas pela secagem em estufa com circulação de ar a 60 °C. Com a caracterização das farinhas, verificou-se que a composição das farinhas fabricadas pelos dois métodos foi semelhante, contudo, a gerada a partir de micro-ondas, apresentou valor de energia bruta 7 % maior.

Apesar do aquecimento com micro-ondas ser volumétrico e mais uniforme comparado a muitos métodos tradicionais de aquecimento, a distribuição não uniforme de temperatura ainda é um dos principais problemas associados ao aquecimento com micro-ondas. Assim, unindo todos os estudos até então realizados, foi possível avaliar o efeito do tambor rotativo com aquecimento por micro-ondas, como um secador de

alimentos. A partir da avaliação de três variáveis: tempo de aquecimento, quantidade mássica de batata-doce inserida no secador e a velocidade de rotação. Verificou-se, como já era esperado, que o tempo é a variável mais significativa. Já a rotação, quando avaliada isoladamente, não apresentou diferenças significativas para o processo, com velocidade variada entre 8 e 30 rpm.

Por fim, a principal conclusão que se pode ter da combinação entre tambor rotativo com aquecimento por micro-ondas, é a homogeneização das partículas. Visto que, esses materiais ao passarem por diferentes zonas de intensidade de radiação no interior da cavidade do forno, não ficam tão sujeitos ao sobreaquecimento. Uma vez que, uma das desvantagens da secagem com micro-ondas é a excessiva temperatura ao longo das bordas dos produtos alimentares, que leva ao aquecimento irregular com o surgimento de pontos com alta temperatura, os quais afetam o sabor e a qualidade do produto final. Porém, com um tambor rotativo como secador, consegue-se realizar a desidratação de um alimento, utilizando a técnica de micro-ondas, comprovadamente desejável, mantendo a qualidade do produto.

## 7.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar a implementação de um modelo que estude o fenômeno de encolhimento na difusão de umidade em sólidos secos em micro-ondas e em estufa com circulação de ar;
- Utilizar tamanhos e formas geométricas diferentes de amostras de batata-doce como variáveis para o processo de secagem em tambor rotativo;
- Estudar os efeitos da secagem em tambor rotativo com micro-ondas a pressões reduzidas;
- Efetuar o estudo da cinética de secagem de diferentes hortaliças e grãos, avaliando os efeitos do processamento com o protótipo desenvolvido;
- Avaliar o efeito da rotação de outras partículas sólidas miscíveis que necessitem de homogeneização e aquecimento concomitantemente;
- Instalar um sistema de medição e controle de temperatura com sensores ópticos não interruptivos;
- Avaliar o teor de betacaroteno e Vitamina A presente nas farinhas de batata-doce de polpa alaranjada.
- Realizar uma análise: energia *versus* fluidodinâmica.

## 7.3 Aspectos sócio-econômicos relacionados à dissertação

Para a produção de um alimento desidratado na forma de farinha, a seleção de cultivares de batata-doce com altos níveis de matéria seca e fitonutrientes e a adoção de melhorias tecnológicas para reduzir o custo e tempo de processamento são ações que precisam ser avaliadas em conjunto. O método de secagem com micro-ondas se mostrou como uma tecnologia que reduz significativamente o tempo de secagem da batata-doce, favorecendo a formação de um produto com aroma agradável e sabor adocicado e ainda, preservando os elementos e nutrientes que compõe a matriz do tubérculo, tanto quanto

a secagem convectiva, convencionalmente realizada em secadores de alimento com passagem de ar. Ficou nítido, que a farinha de batata-doce de polpa alaranjada realizada com micro-ondas é um produto nutricional, de fácil preparo, que pode ser incluído na alimentação da maioria das pessoas. A produção dessa farinha, além de estimular o cultivo de batata-doce na agricultura familiar, contribuindo no âmbito social, quando comercializada e distribuída, solucionaria parcialmente as mazelas causadas pela insuficiência de diversos nutrientes na população. Portanto, esse produto é um suplemento alimentar completo de fácil e rápida preparação.

## Referências

ALVES, R. M. V. et al. Estabilidade de farinha de batata-doce biofortificada. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 15, p. 59-71, 2012. ISSN 1981-6723.

ARAÚJO, E. N. C. D. **Desenvolvimento de um Método para Medição de Cargas em Moinhos Tubulares**. 2011. (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo.

BURRI, B. J. Evaluating Sweet Potato as an Intervention Food to Prevent Vitamin A Deficiency. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 10, n. 2, p. 118-130, 2011.

CORNEJO, F. E. P. et al. **Desenvolvimento de um equipamento para a secagem de batata doce com elevada concentração de beta-caroteno**. IV Reunião de Biofortificação - Teresina - Piauí 2011.

FOUST, A. S. et al. **Princípio das Operações Unitárias**. Segunda Edição. 1982.

GENG, F. et al. Numerical simulation on mixing dynamics of flexible filamentous particles in the transverse section of a rotary drum. **Particuology**, v. 11, n. 5, p. 594-600, 10// 2013. ISSN 1674-2001.

GIGER-REVERDIN, S. Review of the main methods of cell wall estimation: interest and limits for ruminants. **Animal Feed Science and Technology**, v. 55, n. 3-4, p. 295-334, 10// 1995. ISSN 0377-8401.

GIORI, F. P. **Adaptação de metodologia de digestão in vitro e determinação da bioacessibilidade in vitro de betacaroteno em três variedades de batata doce de polpa alaranjada.** 2010. (Dissertação). PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

GRAJALES, L. M. et al. Mixing and motion of rice particles in a rotating drum. **Powder Technology**, v. 222, n. 0, p. 167-175, 5// 2012. ISSN 0032-5910.

GREEN, D.; PERRY, R. **Perry's Chemical Engineers Handbook.** Eighth Edition. 2007.

HARTKE, R. F. **Modelagem e simulação térmica de um forno rotativo para a produção de agregado de argila calcinada.** 2007. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina

HOSENEY, R. C.; ZELEZNAK, K.; ABDELRAHMAN, A. Mechanism of popcorn popping. **Journal of Cereal Science**, v. 1, n. 1, p. 43-52, 1// 1983. ISSN 0733-5210.

IBGE. **Produção Agrícola Municipal 2012** 2013.

JENI, K.; YAPA, M.; RATTANADECHO, P. Design and analysis of the commercialized drier processing using a combined unsymmetrical double-feed microwave and vacuum system (case study: tea leaves). **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**, v. 49, n. 4, p. 389-395, 4// 2010. ISSN 0255-2701.

KITCHEN, H. J. et al. Modern microwave methods in solid-state inorganic materials chemistry: From fundamentals to manufacturing. **Chemical Reviews**, v. 114, n. 2, p. 1170-1206, 2014.

LAM, S. S.; CHASE, H. A. A review on waste to energy processes using microwave pyrolysis. **Energies**, v. 5, n. 10, p. 4209-4232, 2012.

LEONELLI, C.; VERONESI, P.; CRAVOTTO, G. Microwave-Assisted Extraction: An Introduction to Dielectric Heating. In: (Ed.). **Microwave-assisted Extraction for Bioactive Compounds:** Springer, 2013. p.1-14.

LUO, S. D. et al. **Calibration of Temperature Measurement by Infrared Pyrometry in Microwave Heating of Powder Materials: an Exothermic Reaction Based Approach** *Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy*. 47 (1): 5-11 p. 2013.

MAI, I.; BALZARETTI, N. M.; SCHMIDT, J. E. **Utilizando um forno de micro-ondas e um disco rígido de um computador como laboratório de física**. Porto Alegre, RS. 18 2008.

MEHDIZADEH, M. **Microwave/RF Applicators and Probes for material heating, sensing and plasma generation**. First Edition. USA: Elsevier Inc., 2010.

MELLMANN, J. The transverse motion of solids in rotating cylinders—forms of motion and transition behavior. **Powder Technology**, v. 118, n. 3, p. 251-270, 8/28/ 2001. ISSN 0032-5910.

MENÉNDEZ, J. A. et al. Microwave heating processes involving carbon materials. **Fuel Processing Technology**, v. 91, n. 1, p. 1-8, 1// 2010. ISSN 0378-3820.

MIRASSE, J. J. **O consumo de batata-doce de polpa alaranjada entre famílias rurais do nordeste de moçambique: um estudo sobre percepções de comida e Segurança Alimentar na província de Nampula**. 2010. (Dissertação). Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Rural, UFRGS, Porto Alegre.

MITCHELL, D. A. et al. **Solid-State Fermentation Bioreactors - Fundamentals of Design and Operation**. Berlin: Springer - Verlag: 2006.

MOTASEMI, F.; AFZAL, M. T. A review on the microwave-assisted pyrolysis technique. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, n. 0, p. 317-330, 12// 2013. ISSN 1364-0321.

RAY, R. C.; TOMLINS, K. I. **SWEET POTATO: POST HARVEST ASPECTS IN FOOD, FEED AND INDUSTRY** Nova Science Publishers, Inc.: 2010.

RISSO, R. D. S. **Etanol de batata-doce: Otimização do pré-processamento da matéria-prima e da hidrólise enzimática**. 2014. (Dissertação). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, UFRGS

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de Experimentos & Otimização de Processos**. 2ª. SP Brasil: 2009.

RODRIGUEZ-AMAYA, D. B.; NUTTI, M. R.; VIANA DE CARVALHO, J. L. Chapter 28 - Carotenoids of Sweet Potato, Cassava, and Maize and Their Use in Bread and Flour Fortification. In: PATEL, V. R. P. R. W. B. (Ed.). **Flour and Breads and their Fortification in Health and Disease Prevention**. San Diego: Academic Press, 2011. p.301-311. ISBN 978-0-12-380886-8.

ROSA, J. G. **Secagem de cenoura (*Daucus Carota L.*) em micro-ondas**. 2010. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, UFSCAR, São Carlos, SP.

SACILIK, K.; COLAK, A. Determination of dielectric properties of corn seeds from 1 to 100 MHz. **Powder Technology**, v. 203, n. 2, p. 365-370, 11/10/ 2010. ISSN 0032-5910.

SAHIN, S.; SUMNU, S. G. **Physical Properties of Foods**. Turkey: Springer Science+Business Media, LLC., 2006.

SALLES, P. **Avaliação de um reator tipo tambor rotativo para hidrólise enzimática do bagaço de cana-de-açúcar**. 2013. (Mestrado). Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, SP, Brasil.

SCHIMINK, J. R.; LEADBEATER, N. E. Microwave Heating as a Tool for Sustainable Chemistry: An Introduction. In: (Ed.). **Microwave Heating as a Tool for Sustainable Chemistry**: CRC Press, 2011.

SILVA, J. B. C. D. **Batata-doce biofortificada**. Embrapa Hortaliças, Brasília 2011.

SOSA-MORALES, M. E. et al. Dielectric properties of foods: Reported data in the 21st Century and their potential applications. **LWT - Food Science and Technology**, v. 43, n. 8, p. 1169-1179, 10// 2010. ISSN 0023-6438.

SUNKARA, K. R. et al. Influence of flight design on the particle distribution of a flighted rotating drum. **Chemical Engineering Science**, v. 90, n. 0, p. 101-109, 3/7/2013. ISSN 0009-2509.

TEOW, C. C. et al. Antioxidant activities, phenolic and  $\beta$ -carotene contents of sweet potato genotypes with varying flesh colours. **Food Chemistry**, v. 103, n. 3, p. 829-838, // 2007. ISSN 0308-8146.

TUDOR, A. **Sweet Potato Power: Discover Your Personal Equation for Optimal Health**. 2014.

VAN JAARSVELD, P. J. et al. Retention of  $\beta$ -carotene in boiled, mashed orange-fleshed sweet potato. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 19, n. 4, p. 321-329, 6// 2006. ISSN 0889-1575.

WANG, R. et al. Soybean drying characteristics in microwave rotary dryer with forced convection. **Frontiers of Chemical Engineering in China**, v. 3, n. 3, p. 289-292, 2009/09/01 2009. ISSN 1673-7369.

WHO. **Global prevalence of vitamin A deficiency in populations at risk 1995–2005. WHO Global Database on Vitamin A Deficiency**. Geneva, World Health Organization 2009.

YAN, W. Q. et al. Influence of microwave drying method on the characteristics of the sweet potato dices. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 37, n. 5, p. 662-669, 2013.

