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

APLICAÇÃO DE MICROONDAS NO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DA
CASTANHA DO BRASIL (*Bertholletia excelsa*)

PARECER

Por

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por **Flávio Alves da Silva**, aprovada pela Comissão Julgadora em 12 de junho de 2002.

Flávio Alves da Silva

Campinas, 12 de junho de 2002

(Engenheiro de Alimentos)


Prof. Dr. Antonio Marsaioli Jr
Presidente da Banca

Orientador: Prof. Dr. Antonio Marsaioli Júnior

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

Campinas-SP, 2002

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

IDADE 30
CHAMADA T/UNICAMP
Si38a
EX
MBO BCI 50216
OC 16-837102
DX
EÇO R\$ 11,00
TA 01/08/02
CPD

M00171162-6

ID 249056

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

Si38a Silva, Flávio Alves da
Aplicação de microondas no processo de beneficiamento da
castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*) / Flávio Alves da Silva.
– Campinas, SP: [s.n.], 2002.

Orientador: Antonio Marsaioli Júnior
Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de
Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1.Castanha do Brasil. 2.Microondas. 3.Secagem.
4.Umidade. I.Marsaioli Júnior, Antonio. II.Universidade
Estadual de Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos.
III.Título.

BIBLIOTECA
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

**APLICAÇÃO DE MICROONDAS NO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DA
CASTANHA DO BRASIL (*Bertholletia excelsa*)**

Por

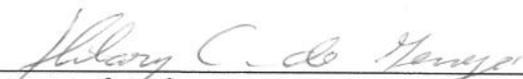
Flávio Alves da Silva

Tese aprovada em _____ de _____ de 2002

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Antonio Marsaioli Jr.
(ORIENTADOR – DEA/FEA/UNICAMP)



Prof.ª Dr.ª Hillary Castle de Menezes
(MEMBRO – DTA/FEA/UNICAMP)



Prof.ª Dr.ª Lireny Aparecido Guaraldo Gonçalves
(MEMBRO – DTA/FEA/UNICAMP)

Prof.ª Dr.ª Fernanda Elizabeth Xidieh Murr
(SUPLENTE – DEA/FEA/UNICAMP)

200235274

Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais, Joaquim e Celina, a Patrícia e irmãos Hermes, Hernandes, Frank e Fernando, em fim, a toda minha grandiosa família, pela força e amor que sempre me deram em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Antônio Marsaiolli Jr., pela orientação, dedicação, apoio, amizade e paciência dispensados durante todo o mestrado.

À Patrícia pelo amor, apoio e suporte emocional que foi fundamental para superar a distância.

A Luis, Roberta e André pela amizade e colaboração indispensáveis, assim como pelos bons momentos de alegria vividos no decorrer do curso.

À Exportadora Mutran pela doação das amêndoas utilizadas no desenvolvimento desta pesquisa, em especial ao Sr. Mauro Mutran.

As Professoras Lireny Ap. Guaraldo Gonçalves, Hillary Castle de Menezes e Fernanda E. X. Murr, as quais contribuíram de forma grandiosa, apresentando valiosas sugestões para a realização deste trabalho.

A todos do Laboratório de Óleos e gorduras, Camila, Rosana, Renato e em especial a Professora Lireny pelas sugestões e apoio dado durante a realização deste trabalho.

Aos colegas do Laboratório de Microondas Aplicada: Michele, Carlos, Fábio, Nádia, Wander e Sr. Aparecido.

Aos Professores da Fundação Universidade Estadual do Tocantins: Rosilene, Rogério, Itamar, Cilene, Robert, Elói, Cristina e Tango.

À minha família, Joaquim, Celina e irmãos, vocês foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui. MUITO OBRIGADO!!!

À Faculdade de Engenharia de Alimentos pela oportunidade e à FAPESP (Projeto N° 00/02610-0) pelo suporte financeiro de extrema importância.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	x
ÍNDICE DE TABELAS	xii
RESUMO	xv
ABSTRACT	xvi
Capítulo 1 – INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	01
Capítulo 2 – OBJETIVOS	03
Capítulo 3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	04
3.1 - Castanha do Brasil	04
3.1.1 – Generalidades	04
3.1.2 – Descrição botânica	05
3.1.3 – Colheita	05
3.1.4 – Importância e utilidades da castanha	07
3.1.5 – Classificação comercial da castanha	08
3.1.6 – Produção e exportação de castanha do Brasil	09
3.1.7 – Composição química da amêndoa da Castanha do Brasil	10
3.1.8 – Fluxograma do processo de beneficiamento da castanha do Brasil	12
3.1.9 – Descrição do fluxograma	13
3.2 - Processo de Secagem	15
3.2.1 – Cinética de secagem	17
3.2.2 – Influência das características do material na secagem	17
3.3 – Atividade de Água	18
3.4 – Estabilidade de Óleos e Gorduras	19

3.4.1 – Análises de estabilidade oxidativa de óleos e gorduras	21
3.5 – O Aquecimento por Microondas	23
3.5.1 – Propriedades dielétricas dos materiais	24
3.5.2 – Principais aplicações do processamento por microondas	26
3.5.3 – Potência disponível de microondas em forno doméstico	27
Capítulo 4 – MATERIAIS E MÉTODOS	30
4.1 – Matéria-Prima	30
4.2 – Equipamento	30
4.2.1 – Nível de laboratório (Bancada)	30
4.2.2 – Forno aplicador de microondas tipo túnel (piloto)	37
4.3 – Métodos Analíticos	40
4.3.1 – Determinação de umidade	40
4.3.1.1 – Método oficial	40
4.3.1.2 – Método alternativo	40
4.3.2 – Extração do óleo	40
4.3.3 – Método de avaliação da rancidez	40
4.3.4 – Índice de estabilidade oxidativa	41
4.3.5 – Atividade de água	41
4.3.6 – Planejamento experimental	42
4.4 – Procedimento Experimental	44
4.4.1 – Secagem	44
4.4.1.1 – Cinética de secagem	45
4.4.2 – Embalagem e armazenamento	45

Capítulo 5 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
5.1 – Resultados Obtidos nos Ensaios de Secagem Convencional Realizados no Forno de Secagem Convectivo Adaptado	46
5.1.1 – Índice de peróxidos apresentados na fração lipídica de amêndoas secas pelo processo convencional em função do tempo de armazenamento	48
5.1.2 – Índice de estabilidade oxidativa (OSI) apresentado na fração lipídica de amêndoas secas pelo processo convencional em função do tempo de armazenamento	50
5.1.3 – Atividades de água apresentadas em amêndoas secas pelo processo convencional em função do tempo de armazenamento	52
5.1.4 – Análise do planejamento experimental feito durante a secagem convencional	53
5.1.4.1 – Tempo de secagem pelo processo de secagem convencional	55
5.1.4.2 – Índice de peróxido pelo processo de secagem convencional	56
5.1.4.3 – Índice de estabilidade oxidativa e atividade de água pelo processo de secagem convencional	57
5.2 – Resultados Obtidos nos Ensaios de Secagem Via Aplicação de Energia de Microondas Realizados no Forno de Microondas Adaptado	59
5.2.1 – Índice de peróxidos apresentados na fração lipídica de amêndoas secas pelo processo com aplicação de energia de microondas em função do tempo de estocagem	61

5.2.2 – Índice de estabilidade oxidativa (OSI) apresentado na fração lipídica de amêndoas secas pelo processo com aplicação de energia de microondas em função do tempo de estocagem	63
5.2.3 – Atividades de água apresentada em amêndoas secas via aplicação de energia de microondas em função do tempo de armazenamento	65
5.2.4 – Análise do planejamento experimental feito durante a secagem realizada no forno de microondas adaptado	67
5.2.4.1 – Tempo de secagem pelo processo de secagem via aplicação de energia de microondas	68
5.2.4.2 – Índice de peróxido pelo processo de secagem via aplicação de energia de microondas	69
5.2.4.3 – Índice de estabilidade oxidativa e atividade de água pelo processo de secagem via aplicação de energia de microondas	70
5.3 – Resultados Obtidos nos Ensaio de Secagens Realizados no Forno Aplicador de Microondas Tipo Túnel (Piloto)	72
5.4 – Aspectos Econômicos da Ampliação de Escala	76
Capítulo 6 – CONCLUSÕES	81
Capítulo 7 – REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	82
Apêndice A	89

ÍNDICES DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema do OSI	22
Figura 2 - Forno de secagem convencional adaptado a um sistema gerador de ar quente	31
Figura 3 – Analisador de umidade com aplicador de microondas marca CEM, modelo Smart-5 e Acessórios	33
Figura 4 – Forno de microondas doméstico adaptado a um sistema gerador de ar quente	35
Figura 5 – Forno a microondas intermitente/contínuo COBER mod. LDM	37
Figura 6 – Curva de secagem do processo de secagem convencional	47
Figura 7 – Taxa de secagem do processo de secagem convencional	47
Figura 8 – Perfil dos teores de índice de peróxido durante o armazenamento de amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo convencional	49
Figura 9 – Comportamento dos índices de estabilidade oxidativa durante o armazenamento de amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo convencional	51
Figura 10 – Comportamento da atividade de água durante o armazenamento de amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo convencional	53
Figura 11 – Curva de secagem do processo de secagem via aplicação de microondas	60
Figura 12 – Taxa de secagem do processo de secagem via aplicação de microondas	61
Figura 13 – Perfil dos Teores de índice de peróxido durante o armazenamento de amêndoas de castanha do Brasil secas via aplicação de energia de microondas	63
Figura 14 – Comportamento dos índices de estabilidade oxidativa durante o armazenamento de amêndoas de castanha do Brasil secas via aplicação de energia de microondas	65

Figura 15 – Comportamento da atividade de água durante o armazenamento de Amêndoas de castanha do Brasil secas via aplicação de energia de microondas	67
Figura 16 – Amêndoa seca até a condição final de 3% (b.u.)	73
Figura 17 – Curva de secagem do processo de secagem realizada no sistema piloto	75
Figura 18 – Taxa de secagem do processo de secagem realizada no sistema piloto	75

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação comercial das amêndoas de castanha para exportação	09
Tabela 2 – Composição global da amêndoa da castanha do Brasil	10
Tabela 3 – Composição centesimal e de aminoácidos da proteína da amêndoa da castanha do Brasil	11
Tabela 4 – Potência calculada disponível no forno de microondas doméstico	29
Tabela 5 – Soluções de sais saturados e suas respectivas atividades de água	42
Tabela 6 – Modelo do planejamento experimental para a secagem convencional no forno de secagem convectiva adaptado	43
Tabela 7 – Modelo do planejamento experimental para a secagem no forno de microondas adaptado	44
Tabela 8 – Resultados dos ensaios realizados no forno de secagem convencional	46
Tabela 9 – Índice de peróxido de fração lipídica de amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo convencional e armazenadas durante seis meses	48
Tabela 10 – Resultados dos índices de estabilidade oxidativa determinados na fração lipídica de amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo convencional e armazenadas durante seis meses	50
Tabela 11 – Atividade de água de amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo convencional e armazenadas durante seis meses	52
Tabela 12 – Planejamento fatorial 2^2 com triplicata no ponto central para a amêndoa seca convencionalmente e estocadas durante 180 dias	54
Tabela 13 – Níveis das variáveis utilizadas no planejamento experimental durante a secagem no forno de secagem convectivo adaptado	54

Tabela 14 – Análises dos efeitos sobre o tempo de secagem para as amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo de secagem convencional e estocadas durante 180 dias	55
Tabela 15 – Análises dos efeitos sobre o índice de peróxido para as amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo de secagem convencional e estocadas durante 180 dias	56
Tabela 16 – Análises dos efeitos sobre o índice de estabilidade oxidativa para as amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo de secagem convencional e estocadas durante 180 dias	58
Tabela 17 – Análises dos efeitos sobre a atividade de água para as amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo de secagem convencional e estocadas durante 180 dias	58
Tabela 18 – Resultados dos ensaios realizados no forno de microondas adaptado	59
Tabela 19 – Relação da densidade de potência para cada nível de potência trabalhado	60
Tabela 20 – Índice de peróxido de fração lipídica de amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo com aplicação de microondas e armazenadas durante seis meses	62
Tabela 21 – Resultados dos índices de estabilidade oxidativa determinados nas frações lipídicas de amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo com aplicação de microondas e armazenadas durante seis meses	64
Tabela 22 – Atividade de água de amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo via aplicação de energia de microondas e armazenadas durante seis meses	66
Tabela 23 – Planejamento fatorial 2^2 com triplicata no ponto central para as amêndoas secas via aplicação de energia de microondas e estocadas durante 180 dias	68

Tabela 24 – Níveis das variáveis utilizadas no planejamento experimental durante a secagem no forno de microondas adaptado	68
Tabela 25 – Análises dos efeitos sobre o tempo de secagem para as amêndoas de castanha do Brasil secas via aplicação de energia de microondas e estocadas durante 180 dias	69
Tabela 26 – Análises dos efeitos sobre o índice de peróxido para as amêndoas de castanha do Brasil secas via aplicação de energia de microondas e estocadas durante 180 dias	70
Tabela 27 – Análises dos efeitos sobre o índice de estabilidade oxidativa para as amêndoas de castanha do Brasil secas via aplicação de energia de microondas e estocadas durante 180 dias	71
Tabela 28 – Análises dos efeitos sobre a atividade de água para as amêndoas de castanha do Brasil secas via aplicação de energia de microondas e estocadas durante 180 dias	71
Tabela 29 – Resultados apresentados nos ensaios realizados no secador piloto	72

RESUMO

A castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl.) oriunda da região Amazônica, durante toda sua trajetória comercial, sofre ação depredatória. O clima e o grau pluviométrico na época da safra são fatores que favorecem a penetração de insetos, parasitas e microrganismos, provocando a deterioração total ou parcial da amêndoa. Outra dificuldade que ocorre no beneficiamento da castanha é durante a secagem do produto, pois esta etapa não oferece garantias quando as condições de armazenamento e transporte dos produtos se não forem adequadas, havendo o risco de se reumedecerem. O objetivo primário deste projeto foi o de avaliar o desempenho de um sistema piloto de secagem assistido a microondas combinado com aplicação de ar quente na secagem de amêndoas de castanha do Brasil, comparando-o com os processos convencionais. Outro objetivo foi o de estudar a preservação da amêndoa seca, armazenada durante seis meses. Foi também elaborado, de forma complementar, um estudo econômico preliminar destes processos alternativos. A operação do sistema piloto foi otimizada a partir de diferentes combinações de potências de microondas e tempos de residência, com as demais variáveis – umidade, temperatura e velocidade do ar – fixadas. Seu desempenho operacional foi avaliado e comparado com os dos secadores a ar quente convencionais. A qualidade da amêndoa seca foi monitorada através de determinações de atividade de água, índice de estabilidade oxidativa, assim como determinações de índice de peróxido. Com os resultados obtidos foi possível confirmar a viabilidade técnica deste sistema piloto e estimar preliminarmente a viabilidade econômica da sua eventual aplicação em escala industrial.

ABSTRACT

The Brazil nut (*Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl.) native to the Amazonian region, suffers depredatory action during the whole of its commercial pathway. The climate and pluviometric rate at the time of harvest are factors that favor the penetration of insects, parasites and microrganismos, leading to the total or partial deterioration of the nut. Another difficulty that occurs in the processing of the chestnut is the drying of the product, this stage not guaranteeing quality when the conditions of storage and transport of the products are not adequate, with the risk of remoistening occurring. The primary objective of this project was to evaluate the performance of a pilot drying system assisted by microwaves combined with the application of hot air, in the drying of Brazil nuts, comparing this process with the conventional one. Another objective was to study the preservation of the dry nut during six months storage. A preliminary economic study of these alternative processes is also presented. The operation of the pilot system was optimized using different combinations of microwave power and residence times, with the following fixed variables: moisture content, temperature and air speed. The operational performance was evaluated and compared with that of conventional hot air driers. The quality of the dry nut was monitored by the determination of its water activity, oxidative stability and peroxide value. With these results it was possible to confirm the technical viability of this pilot system and to estimate, in a preliminary form, the economic viability of its eventual application on industrial scale.

1.0 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

Os biomateriais, produtos agrícolas e alimentos, de um modo geral representam uma das principais fontes alimentícias para o homem. Porém, apesar da importância desses produtos para a dieta humana e de todos os custos envolvidos, constata-se a existência de grandes perdas, devido ao uso de técnicas inadequadas de secagem e armazenamento (FARIA, 1998).

A amêndoa conhecida como Castanha do Pará, originária da Castanheira, que foi primeiramente denominada por Humboldt e Bonpland de "*Bertholletia excelsa*" (da família das letidáceas), teve seu nome trocado para Castanha do Brasil pelo decreto lei Nº 51.209 de 1961 (SILVA, 1996).

A Castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*) faz parte das riquezas da floresta Amazônica e representa um importante componente na pauta de exportação da região, e é, sem sombra de dúvidas, uma das mais importantes árvores amazônicas conhecidas, tendo sua exploração um papel fundamental na organização sócio econômica de grandes áreas extrativistas da floresta Amazônica. Ela se constitui em alimento grandemente apreciado não só pelo seu sabor, como também pelas suas qualidades nutritivas. Diversos estudos mostram que a castanha do Brasil representa uma fonte rica em gorduras e proteínas de boa qualidade. Esta amêndoa é quase completa em termos protéicos, razão pela qual é conhecida como "carne vegetal", uma vez que o consumo de duas castanhas equivale à proteína contida em um ovo.

Devido ao desconhecimento da população nacional de seu potencial tanto nutricional quanto industrial, e o elevado valor comercial das amêndoas, mais da metade da produção de castanha brasileira destina-se, essencialmente, ao consumo no mercado internacional, onde tem boa aceitação pelo conhecimento que a população possui de seu valor nutritivo e sua utilidade.

Segundo informações colhidas junto a um dos maiores exportadores, sediado em Belém do Pará, a proporção de castanhas comercializadas atualmente sem casca (amêndoas) para castanhas com casca era de 80% para 20%, respectivamente, no seu caso particular. Os principais países importadores são Inglaterra, Estados Unidos e Alemanha. Além de contribuir positivamente para a economia dos Estados do Norte, a castanha é um rico complemento alimentar que a floresta amazônica oferece gratuitamente às populações da região.

Considerando-se a importância deste produto, que é um dos principais alimentos da região Amazônica e fonte de divisa do país, torna-se necessário a realização de pesquisas, a fim de melhorar o processo de secagem da Castanha do Brasil visando obter-se um produto desidratado de melhor qualidade.

2.0 OBJETIVOS

2.1 *Objetivo Geral*

Avaliar o desempenho de um sistema piloto de secagem assistido a microondas combinado com aplicação de ar quente, na secagem de amêndoas de castanha do Brasil, buscando reduzir o tempo de secagem, e obter um maior rendimento industrial, quando comparado com os processos convencionais.

2.2 *Objetivos Específicos*

- a) Avaliar a manutenção das características de preservação da amêndoa seca obtida tanto pelo processo de secagem convencional, quanto pelo processo utilizando energia de microondas, durante um período de seis meses, através de determinações de atividade de água, índice de estabilidade oxidativa e determinações do índice de peróxido.
- b) Elaborar um estudo econômico preliminar visando a estimativa do custo final de produção industrial da nova alternativa de secagem aqui proposta com aplicação de microondas, comparativamente aos processos convencionais.

3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Castanha do Brasil

3.1.1 Generalidades

A castanheira (*Bertholletia excelsa*) é uma árvore de grande porte, em geral, de 30m. Atinge até 50m de altura e 2m de diâmetro, na base, formando verdadeiros maciços em determinadas florestas de terra firme, sendo por isso considerada como árvore padrão de terra firme. Raramente é encontrada em várzeas e, quando isso acontece, é sinal de ter sido a semente trazida pela água na época das grandes chuvas.

A castanheira é nativa da Amazônia, sua distribuição geográfica abrange os estados do Pará, Amazonas, Acre, Amapá, Roraima e norte de Mato Grosso. Fora do nosso território, ela tem sido encontrada em partes das Guianas, Bolívia, Colômbia, Venezuela e Peru. O início da exploração das castanhas, feita pelos índios, ao que parece, data de 1800. Até então, as castanhas só haviam sido utilizadas pelos holandeses no século XVI e começo do século XVII, por ocasião da conquista do Grão-Pará, pelos portugueses (SOUZA, 1945).

Segundo SOUZA (1945) e NEVES (1938), a exportação paraense de castanha começou a partir de 1818, cessando logo depois em consequência de alterações de ordem política. Em 1862 o preço alcançado pela Castanha do Pará era muito baixo, o que demonstrava sua pequena procura, permanecendo essa situação durante muito tempo.

Primitivamente, a castanha era explorada principalmente pelo óleo que servia para iluminação, para usos culinários e para fabricação de sabão. Posteriormente, nas próprias regiões produtoras, as castanhas novas forneceram, por maceração, um suco leitoso que era empregado de diversos modos, principalmente como mingaus e misturas no café (SOUZA, 1945).

3.1.2 Descrição botânica

Humboldt e Bompland classificaram-na no gênero *Bertholletia*, e em consideração à majestade de seu porte denominaram-na *excelsa* (espécie). Logo depois, afirmavam que deveria haver duas espécies a *excelsa* e a *nobilis* (NEVES, 1938). No Brasil, adota-se para classificação *Bertholletia*, para o gênero e *excelsa* para a espécie (SOUZA, 1945).

O fruto é um piscídio imperfeito, conhecido vulgarmente sob o nome de ouriço, é uma cápsula globoso-deprimida, quase esférica, de 8 a 16cm de diâmetro e pesa entre 500g e 1500 g, tendo visível na parte superior, o resto do cálice; a casca do fruto é espessa, lenhosa, dura, de cor castanha, repleta de células resinosas, contendo 12 a 25 sementes (castanhas) de testa dura, angulosas, agudas, mais ou menos triangulares, rugosas, estreitamente compridas, envoltas em polpa amarela e dispostas em três séries, cada castanha encerrando uma amêndoa em seu interior (NEVES, 1938).

3.1.3 Colheita

A planta tem crescimento moroso, frutifica aos oito anos e aos doze atinge a produção normal de 500kg de frutos (ouriços) por ano. Propagada assexuadamente inicia a produção no sexto ano. A castanheira floresce de outubro a dezembro e o amadurecimento dos frutos dá-se após 12 a 15 meses. As sementes contidas nos frutos que caem naturalmente se conservam em bom estado durante anos. Na época da safra (janeiro – março) a coleta estende-se por até seis meses. A colheita é feita, quase sempre, o mais perto possível de um rio navegável, porque não havendo estradas o produto tem que ser levado às costas dos castanheiros, até o ponto de embarque, por picadas abertas na mata (SOUZA, 1963).

Conforme SOUZA (1945), a colheita consiste no recolhimento dos frutos, que são os ouriços caídos das árvores, pelo vento, quando bem maduros, e na extração das castanhas. A

colheita é perigosa, se atentarmos para o tamanho, peso do fruto e a altura das árvores. Escolhido o local mais conveniente, que precisa ser ao abrigo da queda dos frutos, o castanheiro constrói a sua barraca, ou acampamento, quando a comitiva é grande.

Pela manhã, munido de uma espécie de balaio ou paneiro, que carrega às costas e um longo facão ou terçado, o castanheiro percorre os castanhais fisingando com a ponta do facão os ouriços e jogando dentro do paneiro. Como o trabalho é repetido por muitas pessoas, inclusive crianças e mulheres, enquanto uns catam os ouriços, outros abrem os frutos a martelo, facão e machadinha, para extrair as castanhas, que vão sendo amontoadas. Um homem pode apanhar e abrir de 400 a 800 ouriços por dia, ou seja, de 1 a 2 hL de castanha (SOUZA, 1945).

Os frutos caídos não devem permanecer muito tempo no chão porque se estragam em poucos dias, prejudicando a qualidade da castanha. Nunca se faz a coleta dos frutos diretamente da árvore, não pela dificuldade da subida, mas porque os frutos verdes desvalorizam o produto. Por isso, os frutos são apanhados no chão. Uma boa castanheira pode produzir de 2 a 4 barricas de castanhas, sendo que cada barrica equivale a 125 L, aproximadamente (SOUZA, 1945; SOUZA, 1963).

Depois da colheita a castanha é transportada em paneiros ou balaio de cipó, até o ponto de embarque, na canoa, e daí ao barracão, onde são armazenadas em paiol. Se este fica perto de um rio navegável a castanha é embarcada diretamente para o local onde ela se destina. Quando o castanhal é muito afastado dos trechos de navegação a motor, o transporte até o porto mais próximo é feito em canoas, vencendo os trechos encachoeirados, que são dificilmente transportados, com esforços e grande habilidade, tanto na subida em que as canoas vão cheias de provisões, como na descida quando voltam carregadas de castanha. Nos trechos extremamente difíceis as canoas, que comportam de 8 a 10 hL, são descarregadas e as castanhas transportadas em cestos e balaio, por picadas. A canoa, assim, mais aliviada, pode enfrentar as corredeiras,

sendo depois recarregada. Os barcos a motor são sempre empregados na estação chuvosa e na subida dos rios utilizam-se cabos, talhas, varejões (grandes varas de madeira) e outros dispositivos habilmente manejados, para vencerem a impetuosidade da corrente (SOUZA, 1945).

3.1.4 Importância e utilidades da castanha

A castanha faz parte das riquezas da floresta Amazônica, dentre as espécies vegetais nobres e opulentas, de grande valor econômico. Possui as mais variáveis utilidades, podendo-se dizer o mesmo do ouriço, que se constitui no epicarpo do fruto, o qual é aproveitado na confecção artesanal de adornos como estojos, cofres, cinzeiros, bijuterias e objetos de enfeites de fantasia ornamental. O tegumento ou casca da semente é utilizado como combustível de fornalhas de caldeiras das próprias usinas de beneficiamento da castanha, ou como adubo e aterro. Tanto o ouriço, quanto as cascas são considerados bons defumadores de borracha (SOUZA, 1963; MENEZES, 1968).

Protegida pelo tegumento, encontra-se a amêndoa, que possui a maior utilidade e valor econômico, servindo para fins alimentícios, em decorrência do seu elevado valor nutricional, sendo, inclusive, denominada de "carne vegetal", devido à qualidade e quantidade de aminoácidos que apresenta (MENEZES, 1968).

O "leite" de castanha, obtido da mistura de castanha ralada com água, pode ser empregado misturando com café ou com iguarias regionais, bem como no tratamento de manchas da pele (SOUZA, 1963). O "leite" da castanha é viável de ser aproveitado, pois tem um alto rendimento, embora os teores de proteína e lipídios sejam baixos se comparados com os valores percentuais da amêndoa (ANTUNES & MAKAKIS, 1977). Da amêndoa, também, é extraído um óleo que possui um bom coeficiente de digestibilidade e que pode ser empregado como lubrificante, na

aviação moderna, além do emprego na fabricação de sabões finos e cosméticos (MENEZES, 1968).

Após a extração do óleo, gera-se um resíduo, do qual obtém-se uma farinha rica em proteína, que poderá ser utilizada em misturas com a farinha de trigo na panificação, conseguindo-se, assim, um pão misto de um bom valor nutritivo. Pode-se também utilizar essa farinha em misturas com alimentos pré-fabricados ou mesmo como ração animal (MENEZES, 1968).

A farinha desengordurada aparece como um subproduto da castanha original, após extração do "leite" e do óleo (ANTUNES & MAKAKIS, 1977). Existem pesquisas quanto ao valor nutricional e quanto à oxidação dos lipídios da farinha da castanha, embora se indique a utilização da farinha na indústria de panificação (PIRSON, 1995), não há ainda padrões para o processo de secagem visando a obtenção deste produto (GONÇALVES, 1997).

3.1.5 Classificação comercial da castanha

A classificação comercial da castanha é uma medida indispensável. Compreende-se que assim seja, para não desacreditar o produto. As castanhas podem ser classificadas pelo tamanho e pela procedência.

Pelo tamanho, as castanhas podem ser de três tipos: pequenas, médias e grandes, sendo que a produção de castanhas pequenas corresponde a 40 %, a de grande 6% e a de média 54%. De modo geral, o produto recebe o nome da região de origem: localidade, municípios, rios e castanhais. Comumente, porém, a designação dos rios é a que prevalece, e daí os tipos Tocantins, Tapajós e Xingu. Nota-se que, para a exportação, as amêndoas dos diferentes tipos de castanha são assim representados conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação comercial das amêndoas de castanha para exportação

Tipos	Contagem por libra peso
Large	90-100 castanhas por libra
Medium	100-130 castanhas por libra
Small	130-160 castanhas por libra
Midget	160-180 castanhas por libra
Tiny	180-220 castanhas por libra

Quanto à qualidade a castanha pode ser: superior, média e inferior. A superior apresenta 10% de castanhas leitosas; a média até 15%; e a inferior acima desta percentagem (SOUZA, 1963).

3.1.6 Produção e exportação de castanha do Brasil

O Brasil é atualmente o segundo maior exportador de castanhas do mundo ficando atrás apenas da Bolívia, onde a mão-de-obra é mais barata (GONÇALVES, 1997). Porém, segundo estatísticas da FAO (Food Administration Organization) figura como o primeiro produtor, sendo que toda produção nacional e exportação estão concentradas na região norte. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, a produção brasileira da castanha atingiu mais de 40 mil toneladas, em 1995, quase 2 mil toneladas a mais do que a do ano anterior. O Estado do Amazonas lidera a produção com quase 16 mil toneladas anuais, seguidos pelo Pará, Acre, Amapá e Rondônia.

A Castanha do Brasil caracteriza-se como produto onde o comércio ainda está voltado essencialmente para o consumo internacional. Os mercados importadores são muito exigentes quanto ao controle de qualidade da mesma, o qual é realizado no porto de chegada da carga. As

castanhas com casca devem chegar ao seu destino com até 12% de umidade (em base úmida) e pelo menos 93% das castanhas sadias. O percentual de material impróprio aceito pelo mercado internacional é de 7% para castanhas estragadas. Quando este percentual for superior ao estabelecido, os importadores exigem descontos no preço e a compra pode ser rejeitada se o percentual for acima de 10% (SILVA, 1996).

3.1.7 Composição química da amêndoa da Castanha do Brasil

Através do estudo da composição química da *Bertholletia excelsa*, revela-se o importante aporte nutricional que esta poderá trazer a regiões nas quais predomina a má nutrição, seja esta causada por maus hábitos alimentares e/ou por problemas sócios-econômicos. A Tabela 2, mostra a composição em g por 100g da parte comestível (ROGEZ, 1995).

Tabela 2 – Composição global da amêndoa da castanha do Brasil

Componente	Composição g/100g
Água	5,0
Proteína	14,0
Lipídios Totais	66,0
Carboidratos	11,0
Fibra Bruta	2,0

O valor nutricional da castanha é especialmente importante devido ao seu perfil protéico, que apresenta todos os aminoácidos essenciais, embora haja uma pequena deficiência em lisina. A Tabela 3 apresenta o perfil dos aminoácidos e composição centesimal da amêndoa da castanha do Brasil, de acordo com alguns pesquisadores (PIRSON, 1995).

Tabela 3 – Composição centesimal e de aminoácidos da proteína da amêndoa

Constituintes	Campos, Siqueira, Pechnik (g/100g)	Costa (g/100g)	Hawley, Carden (g/100g)	Cooper, Barber, Mitchell (g/100g)
Energia*	751,00	-	659,00	666,00
Água	3,00	3,34	5,00	-
Proteínas	16,40	16,60	14,00	14,40
Lípidios Totais	69,30	66,90	66,00	65,90
Carboidratos	3,20	9,40	11,00	11,00
Fibra Bruta	4,60	-	2,00	2,10
Cinzas	3,50	3,70	-	-
Alanina	-	2,33	3,50	-
Arginina	-	16,00	13,30	-
Cistina	-	1,84	-	-
Fenilalanina	-	3,55	3,90	-
Histidina	-	1,47	2,30	-
Isoleucina	-	-	2,80	-
Leucina	-	8,70	6,90	-
Lisina	-	1,64	2,80	-
Metionina	-	-	5,70	-
Prolina	-	3,65	4,80	-
Tirosina	-	3,03	2,70	-
Treonina	-	-	2,60	-
Triptófano	-	2,59	-	-
Valina	-	1,50	4,30	-
Ác. Aspártico	-	3,85	7,40	-
Ác. Glutâmico	-	12,92	18,60	-
Potássio	-	-	-	33,90
Cálcio	243,00	182,00	-	120,00
Ferro	-	7,00	-	390,00
Fósforo	664,00	446,0	-	590,00
β Caroteno	+	-	0,10	0,10
Tiamina (B1)	1,15	-	1,00	0,35
Riboflavina(B2)	+	-	-	+
Niacina (B3)	1,60	-	-	-

*Unidade kcal/100g;

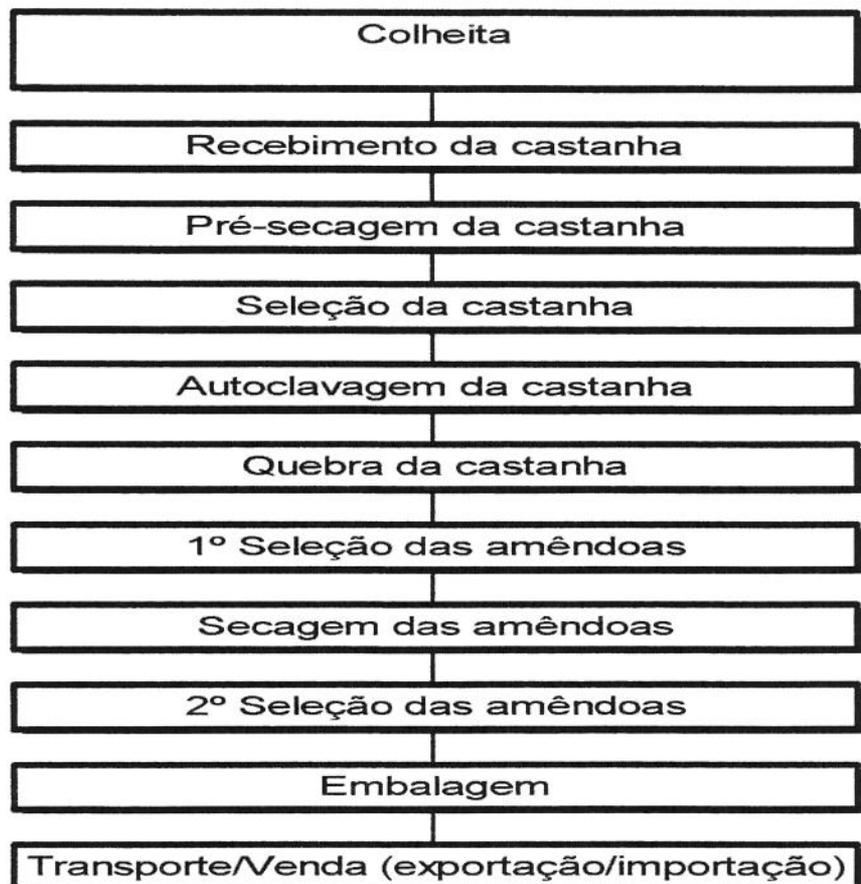
(-) não analisado;

(+) traços

Alguns estudos mostram que a castanha é muito rica em lipídios, vitaminas, minerais e proteínas de boa qualidade biológica. A amêndoa da castanha contém boa qualidade de óleo de alto valor alimentar, apresentando 13,8% de ácido palmítico, 8,7% de ácido esteárico, 31,4% de ácido oléico e 45,2% de ácido linoléico (TATEO, 1971). De acordo com GUTIERREZ *et alii* (1977) o óleo da castanha também apresenta uma pequena quantidade de ácidos mirístico e palmitoléico.

Quanto aos minerais pode ser citada a presença de Ba, Br, Ca, Co, Cs, Mg, Ni, Rb, Sr e Se, sendo este último elemento o de maior destaque entre os outros. Quanto ao teor vitamínico destacam-se as Vitaminas do grupo B, principalmente, B1 e B3, pró-vitamina A e vitamina E (ROGEZ, 1995).

3.1.8 Fluxograma do processo de beneficiamento da Castanha do Brasil



3.1.9 Descrição do fluxograma

- **Colheita da castanha:** A colheita é a etapa onde são recolhidos os frutos (ouriços) maduros, caídos da castanheira. Após a colheita estes ouriços são quebrados para retirada das castanhas, que vão sendo amontoadas em barracas construídas bem próximo ao local da colheita. Após a extração da castanha, estas são lavadas nos igarapés mais próximos aos locais de colheitas, pela imersão e agitação dos cestos que as contém, a fim de se retirar uma grande parte da sujeira que fica depositada sobre a mesma. Esta operação permite também que as castanhas ocas flutuem, sendo daí descartadas, lembrando-se que esta etapa é realizada por poucos catadores. Depois de colhidas as castanhas são transportadas através de barcos a motor, balsas, caminhões e outros, diretamente para o local onde ela se destina.

- **Recebimento da castanha:** Nesta etapa o responsável providencia a medição, seleção e limpeza, e a confirmação de compra da castanha. Na sequência esta é enviada para o pré-processamento, dentro do próprio armazém receptor, onde o produto passa por uma primeira secagem e classificação.

- **Pré-secagem da castanha:** Quando a castanha chega ao armazém receptor está ainda úmida, com aproximadamente 35-40% (b.u.) de umidade; para facilitar as demais etapas onde se deseja obter uma amêndoa com 3% de umidade final, é necessário a realização de uma pré-secagem do produto em casca, até reduzir a umidade deste para 18-12% (b.u.). Esta operação é feita em secadores rotativos com circulação de ar quente a uma temperatura de no máximo 50°C, por um período de aproximadamente 36 horas.

- **Seleção da castanha:** Após a pré-secagem da castanha é feita a primeira seleção, onde o objetivo é separar as castanhas em lotes por tamanhos (pequenos, médios e grandes), com a finalidade de facilitar as posteriores etapas de seleção das amêndoas.

- **Autoclavagem da castanha:** A autoclavagem da castanha é realizada com o intuito de se facilitar a quebra da casca e a liberação da amêndoa, assim como promover a decorticação da amêndoa. A autoclavagem é feita com vapor saturado durante 2 minutos, a uma pressão de 60-75 psia e com uma carga a cada etapa de 100hL(60kg).

- **Quebra da castanha:** Depois de terem sido autoclavadas, as castanhas são enviadas para uma área de quebra, onde são distribuídas para as operadoras que, através de um quebrador individual (prensa) de operação manual, quebram a casca, retiram e separam a amêndoa, acumulando a produção de amêndoas para, posteriormente, entregarem-nas em um posto de controle da produção individual, onde são pesadas e encaminhadas para as operações de seleção.

- **1ª Seleção das amêndoas:** Após a quebra, as amêndoas são selecionadas em pranchas vibratórias perfuradas superpostas, sendo separadas em 6 tipos que, de acordo com a nomenclatura do mercado internacional, recebem os nomes de: “large”, “medium”, “small”, “midget”, “tinies” (vide tabela 1, p.9), conforme o tamanho. Após a primeira seleção as amêndoas são colocadas em bandejas para que se possa realizar a secagem final.

- **Secagem das amêndoas:** A secagem das amêndoas é feita em estufas com circulação de ar quente, geralmente, a uma temperatura de 40-50°C e no máximo 70°C, necessitando normalmente de (2 a 3) dias para se chegar até a umidade desejada (3%). Dentro de cada estufa possui carrinhos onde se depositam as pilhas de bandejas com amêndoas.

- **2ª Seleção das amêndoas:** Depois de secas, as amêndoas são novamente selecionadas, pois na primeira seleção não se consegue uma boa separação, necessitando então de uma seleção complementar, para que se possa melhorar a primeira etapa. Observa-se que a segunda seleção é feita manualmente em cintas móveis de PVC contínuas, dotadas de mesas laterais com aberturas para saída das não-classificadas, sendo esta operação realizada somente por mulheres.

- **Embalagem:** Ao término das etapas anteriores de processamento da castanha do Brasil, as amêndoas são pesadas e embaladas. A embalagem das amêndoas ocorre da seguinte forma: primeiro coloca-se os sacos plásticos laminados dentro das caixas de papelão com capacidade para 20 kg e depositam-se as amêndoas, em seguida sela-se o saco em uma máquina seladora que faz durante a selagem a aplicação de vácuo e nitrogênio para substituir o ar. Após a selagem é procedido o fechamento das caixas com fita adesiva hermética.

- **Transporte/Venda (exportação ou importação):** Terminado o processamento da castanha do Brasil e de acordo com o destino da sua comercialização (exportação ou mercado interno), esta irá ter um determinado tipo de transporte. No caso de exportação, estas são transportadas até o porto local, onde são colocadas em containeres e embarcadas em navios, seguindo até o seu destino final, já para o mercado interno o transporte é feito através de caminhões ou outros meios.

3.2 Processo de Secagem

Em se tratando do processo de secagem existem vários conceitos utilizados por diferentes autores para descrever esta operação. De acordo com EARLE (1992), a secagem é a operação unitária segundo a qual ocorre eliminação de água por evaporação ou sublimação, presente em um material, mediante a aplicação de calor com condições controladas. Outros textos fazem referência ao processo como "operação unitária através da qual a umidade, água ou qualquer outro líquido, é removido de um material", salienta-se que esta definição possui um caráter amplo e abrange outras operações de separação de líquidos, as quais não se encaixam neste estudo de secagem (FOUST *et alii*, 1982; GEANKOPLIS, 1983).

KNEULE (1976); MUJUMDAR (1987); e KEEY (1992), apresentam definições mais abrangentes sobre o assunto, considerando secagem "operação de eliminação de pequenas quantidades de umidade de um material sólido através da evaporação, utilizando energia

térmica". Esta definição oferece menos abrangência, porém ainda não resume o que seja o processo de secagem.

OKADA (1987) resume de forma global o que seja esta operação, para que não haja confusões com outras operações de separação de líquidos, como: "secagem é o processo de remoção de água, ou de qualquer outro líquido, de um material sólido, na forma de vapor, para uma fase gasosa insaturada, através de um mecanismo de vaporização térmica, numa temperatura inferior à de ebulição".

A grande dificuldade encontrada na investigação do processo de secagem, segundo FARIA (1998), reside no fato de que o mesmo é constituído de vários fenômenos complexos, simultâneos e geralmente acoplados, de transferência de quantidade de movimento, massa e calor em sistemas sólidos, e em grande maioria particulados.

O cálculo das dimensões do equipamento de secagem deve levar em consideração várias dificuldades nas áreas da mecânica dos fluidos, da química das superfícies e da estrutura dos sólidos, além dos problemas de velocidade de transferência, tanto de massa como de calor (FOUST *et alii*, 1982).

Muitos materiais são processados no estado líquido, contudo, grande parte da indústria em geral e em especial a de materiais biológicos, trabalha com classes de produtos que necessitam estar com teor de umidade reduzido, em níveis geralmente muito abaixo dos que seriam obtidos em processos de eliminação de água, não incluídos no conceito de secagem. Outros objetivos inerentes da secagem são: permitir uma armazenagem a longo prazo do produto, concentrar suas substâncias para mudar ou melhorar o sabor e agregar valor ao produto (FARIA, 1998).

Com base no comportamento do produto durante a secagem, é possível dividir os materiais em duas classes principais. A primeira destas classes é constituída por sólidos granulados ou cristalinos que retém a umidade nos interstícios entre as partículas, ou em poros

superficiais rasos e abertos. A segunda classe de materiais é constituída de sólidos orgânicos que podem ser amorfos, fibrosos ou gelatinosos (FOUST *et alii*, 1982).

3.2.1 Cinética da secagem

A secagem de gêneros alimentícios sólidos é um caso complexo de transferências acopladas de calor e massa através dos tecidos. Existem diversas teorias de secagem que tentam explicar os mecanismos de migração de umidade no interior de sólidos, durante o período de taxa decrescente, como também a utilização de um grande número de modelos matemáticos para estimar as transferências de calor e massa envolvidas (PINTO e TOBINAGA 1996).

O cálculo da cinética de secagem está relacionado à predição do tempo de secagem, que representa um dado fundamental para o dimensionamento e a otimização de uma planta industrial envolvendo este processo. As taxas de secagem devem ser relacionadas para um determinado produto e para uma determinada operação (processo e equipamento), podendo ser estabelecidas mediante estudos de transferência de calor e massa, além dos possíveis mecanismos de migração interna de umidade. Sendo assim, podemos avaliar, projetar e/ou otimizar o processo de secagem (PARK, 1998).

3.2.2 Influência das características do material na secagem

A teoria a respeito das características do material somente apresenta validade para sistemas simples e definidos. Porém, em se tratando de biomateriais, os sistemas são muito complexos e heterogêneos, pois os componentes destes estão fortemente hidratados (BRENNAN *et alii*, 1980).

O elevado teor de água acelera a velocidade inicial da secagem. Uma concentração de constituintes poliméricos, tais como proteínas, amidos e carboidratos, aumenta a presença de água ligada e prolonga a terceira etapa da secagem, ou seja, à velocidade decrescente (CHEFTEL

et alii, 1992). As batatas, por exemplo, não apresentam nenhuma fase de secagem à velocidade constante. Por outro lado os alimentos que possuem sais, açúcares cristalizados e lipídios, absorvem pouca água, conseqüentemente, a segunda etapa da secagem (velocidade constante) é de maior importância (CHEFTEL *et alii*, 1992).

Uma característica singular e importante da secagem de alimentos (frutos em especial) é o movimento dos sólidos solúveis que se produz durante a secagem. A água líquida que migra até a superfície durante a secagem contém diversos produtos em solução. O movimento de alguns compostos solúveis são impedidos pelas paredes celulares que atuam como membrana semi-permeável. A migração de sólidos solúveis, também pode acontecer na direção oposta, ou seja, na direção do interior do sólido. Quando a superfície é seca se estabelece um gradiente de concentração entre a superfície e o centro úmido, o que pode dar origem à difusão de produtos solúveis para o interior do produto. Tem-se demonstrado que os dois mecanismos podem acontecer durante a secagem de alimentos (BURR, 1973).

3.3 Atividade de Água

A atividade de água é uma medida muito importante na determinação da estabilidade de certos alimentos processados, pois reflete o grau em que a água está ligada aos componentes do material, não se encontrando disponível para as reações bioquímicas (ex. oxidação lipídica, reações enzimáticas, reações de Maillard, etc) e para o crescimento de microrganismos. A atividade de água também é a medida da tendência da água para escapar do seu meio; esta tendência é chamada de fugacidade. A baixas pressões, como a pressão atmosférica, a fugacidade é medida experimentalmente pela pressão de vapor (MOTARJEMI, 1988). Assim, a atividade de água (a_w) é definida como a razão entre as fugacidades da água na solução e da água pura na

mesma temperatura e experimentalmente é obtida como a relação entre a pressão de vapor da água no material (p_w) e a pressão de vapor de água pura (p_0) na mesma temperatura.

$$a_w = f_w / f_0 = p_w / p_0 \quad (1)$$

Mediante a diminuição da atividade de água, conferida por certos processos que diminuem a disponibilidade de água, melhora-se a conservação e reduz-se a flora microbiana dos produtos finais obtidos. Os diversos microrganismos toleram diferentes atividades de água mínimas. Quando se alcança o limite individual do valor de a_w , os respectivos microrganismos não podem se desenvolver nesse ambiente. Dentro dos fatores de estabilidade dos produtos, a atividade de água é um dos parâmetros que podem ser medidos facilmente e com precisão (RÔDEL *et alii*, 1990)

A maioria dos alimentos frescos apresentam uma a_w superior a 0,98. Segundo LABUZA (1980) o crescimento de bactérias que influem na deterioração cessa em a_w inferiores a 0,90. A maioria das leveduras não cresce a a_w abaixo de 0,85 e os fungos em a_w abaixo de 0,70. Com poucas exceções, é possível afirmar que um alimento será estável, em relação à deterioração por microrganismos, quando a_w é inferior a 0,60 e estes são classificados como desidratados. O produto entretanto não fica imune a reações químicas e enzimáticas que prosseguem até a_w próximo de zero.

3.4 Estabilidade de Óleos e Gorduras

Existe na atualidade uma intensa procura, tanto dos consumidores como dos processadores e formuladores de alimentos, por óleos e gorduras de alta estabilidade, que permitam prolongar a vida de prateleira dos seus produtos (DOBARGANES & PEREZ, 1991).

Mesmo não existindo uma definição científica exata para óleos de alta estabilidade, normalmente estes tipos de óleos são quase sempre relacionados com óleos líquidos parcialmente hidrogenados, os quais são altamente resistentes ao desenvolvimento de sabores estranhos e possuem vida útil prolongada (ANON, 1993) citado por MORETTO e BARRERA-ARELLANO, (1995).

Inúmeros fatores determinam a estabilidade de óleos e gorduras, destacando a composição química e as condições do processo. Quando se fala de estabilidade de óleos e gorduras, está se tentando determinar o comportamento futuro do produto, com respeito a suas características de qualidade. Este comportamento depende além da história do material, da composição deste, pois a presença de compostos antioxidantes ou pró-oxidantes, o conteúdo de ácidos graxos insaturados, etc., determinam a estabilidade oxidativa (BARRERA- ARELLANO, 1998; MORETTO *et alii*, 1995).

As características de óleos e gorduras ou materiais que as contêm, sempre estão relacionadas com o fenômeno da rancidez, que é sem dúvida o fator de deterioração mais importante neste tipo de produto. Rancidez é definida como "alteração de óleos e gorduras organolepticamente detectável" e que entre outras consequências ocasiona deterioração de sabor e odor, deprecia o produto e reduz seu valor nutricional.

Existem 2 tipos de rancidez, a hidrolítica e a oxidativa. A primeira refere-se à reação de hidrólise com a produção de ácidos graxos livres. Esta reação pode ser catalizada por lipases presentes em sementes oleaginosas e alimentos, ou produzidos por microorganismos. Também pode ocorrer de forma não enzimática, como nos processos de fritura, no qual a hidrólise se dá a altas temperaturas produzindo ácidos graxos livres. A rancidez oxidativa, também chamada de autoxidação, é do ponto de vista da qualidade a mais importante em óleos e gorduras. A autoxidação é um processo natural, onde ocorre uma reação do oxigênio atmosférico com as

duplas ligações dos ácidos graxos insaturados, produzindo peróxidos e hidroperóxidos (produtos primários) os quais, por uma série de reações paralelas, produzem os compostos voláteis, como aldeídos, cetonas (produtos secundários), que são característicos de produtos rancificados. A autooxidação de ácidos graxos ocorre via radical livre que consiste basicamente em três fases: iniciação, propagação e terminação (BARRERA-ARELLANO, 1993).

Segundo BARRERA- ARELLANO, (1998) e PEREZ-CAMINO et *alii*, (1987), para assegurar uma alta estabilidade de oxidação dos óleos há necessidade de diminuir a incidência de todos os fatores que a favorecem, tais como:

- Reduzir ao máximo a incidência de temperatura e luz, que são os responsáveis pelo desencadeamento do processo de formação de radicais livres;
- Evitar a presença de metais ou traços de metais;
- Evitar o contato com o oxigênio (ar atmosférico);
- Bloquear a formação de radicais livres por meio de antioxidantes, os quais, em pequenas quantidades, atuam interferindo nos processos de oxidação das gorduras.

A reação de autooxidação é impossível de evitar, porém é possível retardá-la.

3.4.1 Análises de estabilidade oxidativa de óleos e gorduras

Historicamente, o Método do Oxigênio Ativo (AOM, método AOCS Cd 12-57), conhecido também como Swift Test, foi o teste mais utilizado para a obtenção de dados sobre a estabilidade oxidativa de óleos. Foi declarado obsoleto em 11/1993 e retirado do manual da AOCS em 1996. Existem outros métodos para avaliação da estabilidade entre eles o Schaal Oven Test onde 100g de amostra são mantidos a 65°C em uma estufa e examinados periodicamente pela determinação do índice de peróxido. Já faz alguns anos que a Brinkman Instruments lançou o Rancimat, e mais recentemente o Oil Stability Instrument (OSI). Ambos instrumentos são

baseados no método conductimétrico desenvolvido por Hadom e Zurcher (1974) para análise de óleos e gorduras. Este método é também conhecido como Teste de Swift modificado e hoje é um método oficial AOCS Cd 12b-92 revisado em 1993.(ANON, 1995).

O método OSI (Oil Stability Index) é definido como o período de tempo antes da aceleração rápida da oxidação, referido comumente como período de indução (IP). Seu princípio é baseado em uma corrente de ar purificado passando através da amostra de óleo ou gordura colocada em um tubo de reação dentro de um bloco termostaticado. O sistema de distribuição não aquece o ar antes de ser borbulhado através da amostra, a alimentação de ar seco pode ser regulada para mudar o fluxo e após a passagem pela amostra, o ar é diretamente bombeado em um recipiente com água destilada. Este ar efluente contém ácidos orgânicos voláteis formados durante a oxidação do óleo que aumentam a condutividade elétrica da água. A condutividade da água é monitorada por um eletrodo e as *medições* são feitas e armazenadas continuamente por um "software" de coleta de dados conforme mostra o esquema da figura 1.

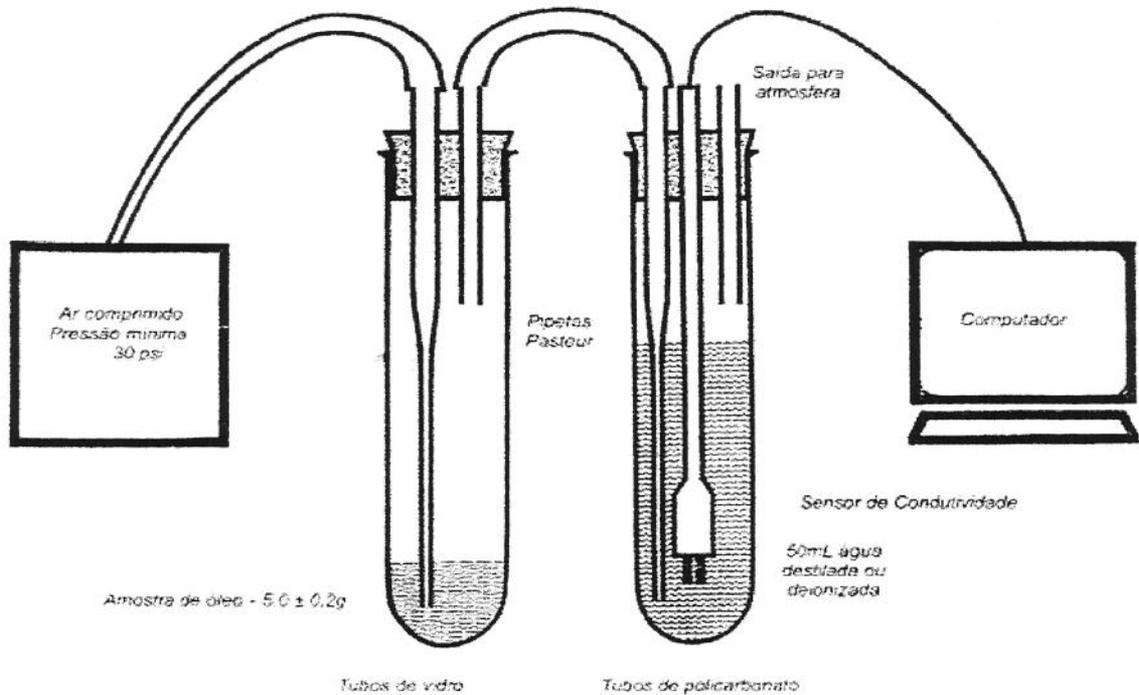


Figura 1 – Esquema do OSI

3.5 O Aquecimento por Microondas

Microonda ou energia de microondas é uma modalidade de radiação eletromagnética como a luz, ultravioleta, raios-X, ondas de televisão, rádio AM e FM e infravermelho (CUNHA, 1996).

Cabe destacar que para os processos de aquecimento as frequências utilizadas são de 915 MHz e de 2.450 MHz (32,8 cm e 12,5 cm respectivamente, em espaço livre). Estas frequências, têm sido utilizadas para aplicações industriais, científicas e médicas – ISM – (Industrial, Scientific and Medical). A maioria dos fornos de microondas domésticos opera a 2.450 MHz (MARSAIOLI, 1991).

De acordo com SMIT (1987), as ondas eletromagnéticas são oscilações de campos elétricos e magnéticos associados, que se propagam pelo espaço. Denominam-se: - comprimento de onda, a distância de um ponto de uma onda ao ponto correspondente da onda seguinte, por exemplo, de máximo positivo a máximo positivo; - frequência de emissão, o número de ondas ou ciclos por segundo.

As microondas são geradas pelo "magnetron", um tubo oscilador alimentado por um circuito eletrônico capaz de converter energia elétrica de frequência industrial (60Hz) em energia eletromagnética de microondas (por exemplo, 2450MHz). O campo eletromagnético se propaga na forma de onda eletromagnética (o meio de transporte da energia) no interior de um guia de onda metálico (linha de transmissão), até ser injetada no aplicador (uma cavidade com paredes metálicas onde está o produto a aquecer). A penetração e o aquecimento de alimentos em um campo de microondas são praticamente instantâneos, em contraste com métodos convencionais de aquecimento, onde o transporte de calor da superfície para o centro se dá 10 a 20 vezes mais lentamente.

A energia de microondas é uma fonte ímpar de energia porque cria calor dentro dos materiais processados. Esta propriedade resulta em tempos de processamento mais curtos, maior rendimento do produto final e usualmente em uma qualidade superior que a encontrada com técnicas convencionais do processamento (DECAREAU & PETERSON, 1986).

A principal meta, atualmente, nas pesquisas sobre as propriedades elétricas dos alimentos, vem sendo determinar mecanismos de interação entre os alimentos e a energia eletromagnética nas frequências de microondas, para facilitar o desenvolvimento de processos e produtos alimentícios. Essas propriedades determinam a quantidade de energia acoplada por um produto alimentício, sua distribuição dentro do produto e, conseqüentemente, o tempo e a frequência das microondas necessárias para o aquecimento dos alimentos em processos de transferência de energia por condução e radiação (MUDGETT, 1996).

3.5.1 Propriedades dielétricas dos materiais

O aquecimento de alimentos por microondas, nas frequências geralmente empregadas no processamento industrial dos alimentos 915 e 2450 MHz, resulta do acoplamento de energia de um campo eletromagnético em uma cavidade de microondas. Essas interações levam à geração de calor instantânea dentro do produto devido ao “atrito molecular”, primariamente por causa da ruptura de pontes de hidrogênio fracas associadas com a rotação dos dipolos de moléculas de água livre e com a migração eletroforética de sais livres em um campo elétrico de polaridade rapidamente variável. Esses efeitos estão predominantemente relacionados com os constituintes iônicos aquosos dos alimentos e seus constituintes sólidos associados e de sua dissipação dentro do produto. Isto resulta em elevação de temperatura instantânea dentro do produto, em contraste com os processos de aquecimento convencionais que transfere energia da superfície, com constantes térmicas de tempo longas e lenta penetração de calor (BUFFLER, 1992).

Os alimentos, de modo geral, podem ser visualizados como dielétricos de capacitores não ideais no sentido que estes possuem a habilidade de armazenar e dissipar a energia elétrica de um campo eletromagnético, através de um conjunto de propriedades dielétricas expressa em notação complexa com uma componente real, constante dielétrica, e uma componente imaginária, perda dielétrica. Tais materiais não interagem com o componente magnético do campo por causa da sua baixa permeabilidade magnética. Eles são, além disso, geralmente isolantes pobres, porque dissipam quantias consideráveis de energia elétrica, acoplada através de mecanismo de relaxação e condução relacionados primariamente a água livre e ao teor salino, como calor gerado internamente (VON HIPPEL, 1966, citado por JONES, 1986).

Segundo MUDGETT (1996), materiais biológicos agem como maus isoladores, isto é, capacitores não ideais, em termos de sua habilidade para armazenar e dissipar energia elétrica de uma aplicação de campo eletromagnético para transferência por irradiação.

SENISE (1985) relata que as radiofrequências e as microondas são empregadas para o aquecimento de materiais dielétricos, ou seja, materiais que, além de maus condutores de eletricidade são, via de regra, também maus condutores térmicos.

Desde que a energia eletromagnética penetre no material dielétrico, ocorre a transformação em calor por um conjunto de mecanismos em escala molecular e atômica, entre os quais se sobressaem a condução iônica e a rotação dipolar. A esta última, sobretudo, associa-se a imagem de “histerese dielétrica”, tema que identifica o aquecimento de materiais dielétricos sob ação de radiofrequências e microondas.

Os parâmetros que caracterizam os materiais dielétricos são:

- *permissividade (ou constante dielétrica) ϵ'* : que mede a capacidade de um material de armazenar energia elétrica, por unidade de volume;

- *fator (ou constante de perdas) ϵ''* : que é um parâmetro adimensional dado pelas propriedades elétricas do material. Seu valor indica a capacidade do material em dissipar energia elétrica na forma de calor;
- *tangente de perdas*: que é o quociente dos dois, ou seja, $\tan \delta = \epsilon'' / \epsilon'$

Seu valor indica a capacidade do material de ser penetrado por um campo elétrico e de dissipar essa energia na forma de calor.

A grande maioria das aplicações de radiofrequência e microondas na indústria relaciona-se com a água. A água, no estado líquido, está incluída entre os dielétricos com valores mais elevados de ϵ' e $\tan \delta$, o que permite dizer que materiais com água são “fáceis de esquentar” por microondas ou radiofrequência.

Essas propriedades elétricas básicas determinam a extensão da reflexão e transmissão de energia nas superfícies do produto e absorção de energia dentro do produto. As propriedades dielétricas básicas dos alimentos serão consideradas primariamente em termos dos fenômenos de relaxação e condução, como função da frequência, temperatura, composição química e estrutura física (VON HIPPEL, 1995).

3.5.2 Principais aplicações do processamento por microondas

As aplicações tecnicamente possíveis de microondas em eletrotermia industrial são numerosas, sendo que suas principais aplicações são (SENISE, 1985):

- *Na indústria de alimentos*: secagem de massas alimentícias, desidratação a vácuo, branqueamento, esterilização, pasteurização, cozimento, descongelamento de carnes.

- Na indústria do papel e gráfica: secagem de tintas e revestimentos, secagem de cola.
- Na indústria química: selagem de plásticos, secagem de produtos em pó, expansão de espumas, reações químicas incentivadas, eliminação de resíduos tóxicos.

3.5.3 Potência disponível de microondas em forno doméstico

O aquecimento de alimentos por microondas resulta do acoplamento de energia elétrica de um campo eletromagnético na cavidade de microondas e de sua dissipação dentro do produto. O movimento molecular decorrente produz uma elevação da temperatura. A taxa de elevação da temperatura é determinada pela potência absorvida bem como pelas propriedades físicas e térmicas da carga.

Para a medição da potência dos fornos de microondas, são adotados procedimentos baseados na medição da elevação de temperatura em cargas d'água padronizadas.

Para medir a potência do forno de microondas doméstico do modelo descrito no item 4.2.1(f), BERTELLI (2001), utilizou testes seguindo a metodologia da *Commission Electrotechnique Internationale* – CEI – IEC 705, onde foram feitas duas repetições para cada nível de potência oferecido pelo forno e comparados com as especificações do fabricante. A potência foi calculada segunda a equação:

$$P = [4,187 \times M_w \times (T_2 - T_1) + 0,55 \times M_c \times (T_2 - T_0)] / t \quad (2)$$

Onde,

P é a potência de saída do microondas em watts;

M_w é a massa de água em gramas;

M_c é a massa do recipiente em gramas;

T_0 é a temperatura ambiente em °C;

T_1 é a temperatura inicial da água em °C;

T_2 é a temperatura final da água em °C;

t é o tempo de aquecimento em segundos.

BERTELLI (2001) observa também que o uso de determinação de potência está limitado à calibração de equipamentos e que sua aplicação na análise dos processos dos alimentos por microondas apresenta dificuldades devido a diversas razões:

- A absorção de potência e a intensidade de campo dentro dos produtos variam com a profundidade a partir da superfície sob condições que estão continuamente variando com a temperatura durante o curso da irradiação. Assim o fator de perda dielétrica ϵ'' varia não somente de uma região do produto para outra, mas também dentro de um particular segmento do produto conforme a temperatura sobe pelo aquecimento mediante as microondas;
- O gradiente de voltagem dentro do produto varia como uma função da profundidade a partir da superfície;
- O calor gerado dentro do produto pelo acoplamento da energia elétrica do campo está sujeito aos mecanismos convencionais de transferência de calor por condução interna, convecção superficial e evaporação de umidade, mediadas pelas propriedades térmicas e de transporte do produto.

Os resultados dos níveis de potências reais oferecidos pelo forno de microondas podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 – Potência calculada disponível no forno de microondas doméstico

Especificações do Fabricante		Potência Calculada Disponível (W)		
		Voltagem (V)		Média (V)
Níveis de Potência	Potência (W)	127,4	127,5	127,5
1	150	99,4	108,50	103,9
2	200	197,5	200,34	198,9
3	300	280,9	299,57	290,2
4	400	395,0	398,84	396,9
5	500	496,2	499,07	497,6
6	550	542,5	545,66	544,1
7	650	645,8	610,81	628,3
8	750	739,8	744,08	741,9
9	800	797,8	802,44	800,1
10	900	884,5	889,66	887,1

Fonte: (BERTELLI, 2001).

4.0 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Matéria-Prima

A matéria prima utilizada foi a amêndoa da castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl.) com intervalo de umidade entre 10 e 6 % (b.u), procedente do estado do Pará, fornecida pela Exportadora MUTRAN Ltda. sediada em Belém-PA. A fim de se evitar a perda de umidade da amêndoa durante o transporte, esta foi embalada da seguinte forma: primeiro os sacos plásticos laminados foram colocados dentro das caixas de papelão com capacidade para 20 kg e depositando-se as amêndoas, em seguida os sacos foram selados em uma máquina seladora que faz durante a selagem a aplicação de vácuo e nitrogênio para substituir o ar. Após a selagem foi procedido o fechamento das caixas com fita adesiva hermética. Esta foi despachada por transporte aéreo chegando num prazo máximo de 24 horas.

4.2 Equipamentos

4.2.1 Nível de laboratório (bancada):

- a) *Estufa a vácuo* (FANEM Mod. 099EV) – Esta foi utilizada na determinação do nível de umidade presente nas amostras das matérias-primas e dos produtos em processo.
- b) *Termômetro infravermelho* RAYTEK, modelo PM30 *Plus* – Este foi utilizado para monitorar a temperatura do produto antes, durante e no final dos processos de secagem.
- c) *Aqualab, modelo CX-2-Decagon (USA)* - Este foi utilizado para determinar a a_w da amêndoa.
- d) *Prensa hidráulica manual* (Charlott *Prensas Hidráulicas LTDA*) – Este equipamento com 60 toneladas de força foi utilizado na prensagem da amêndoa de castanha do Brasil para obtenção do óleo analisado durante o armazenamento.

e) *Forno de secagem convectivo adaptado* – O forno utilizado para esta adaptação foi o de tipo elétrico (LAYR Mod. ÔNYX ECONOMIC 1.75), do qual foi eliminado toda a parte elétrica, inclusive as resistências, aproveitando-se somente sua caixa metálica e acessórios internos. Foram construídas aberturas laterais, de entrada de ar à esquerda e de saída à direita da caixa do forno, às quais foram ajustadas peças feitas sob medida em uma funilaria, adaptando-se a estas um sistema gerador de ar quente igual ao da figura 4 [item 4.2.1 (h)]. Este equipamento, dotado de duas bandejas de 35 cm x 40 cm cada uma, foi utilizado para a secagem das amêndoas por ar quente com o objetivo de serem confirmados os parâmetros do processo convencional, tal como é praticado pela indústria regional da castanha. A velocidade do ar pôde ser ajustada, nesta configuração, entre 1 e 3 m/s. A adaptação para este forno pode ser mais bem analisada através da figura 4 abaixo.



Figura 2 – Forno de secagem convencional adaptado a um sistema gerador de ar quente - (1) célula de fluxo laminar; (2) manômetro “U”; (3) válvula de esfera; (4) ventilador centrífugo do ar de entrada; (5) aquecedor por resistência elétrica; (6) controlador de temperatura; (7) termômetro digital c/ termopar; (8) registrador de temperatura; (9) abraçadeira de conexão do forno com o sistema de ar quente; (10) sistema para exaustão do ar; (11) forno doméstico.

- f) *OSI – Oxidative Stability Instrument (Omnion Instrument)* – Este equipamento foi utilizado para determinar a estabilidade oxidativa do óleo da castanha do Brasil seca pelo método convencional e pelo de aplicação de microondas.
- g) *Analizador de Umidade CEM, modelo SMART 5* – Este foi utilizado alternativamente (item 4.3.1.2) e calibrado pelo método descrito em 4.3.1.1, que utiliza a estufa a vácuo FANEM [item 4.2.1 (a)]. A figura (3) mostra o analisador, com o sistema de controle de temperatura e detalhes do sensor de temperatura. O sensor de temperatura é do tipo sensível ao calor da radiação de infravermelho, sem necessidade de contato com a superfície do produto. O analisador também possui uma balança interna que possibilita a leitura do peso das amostras durante a aplicação de microondas e uma impressora para registro dos dados.

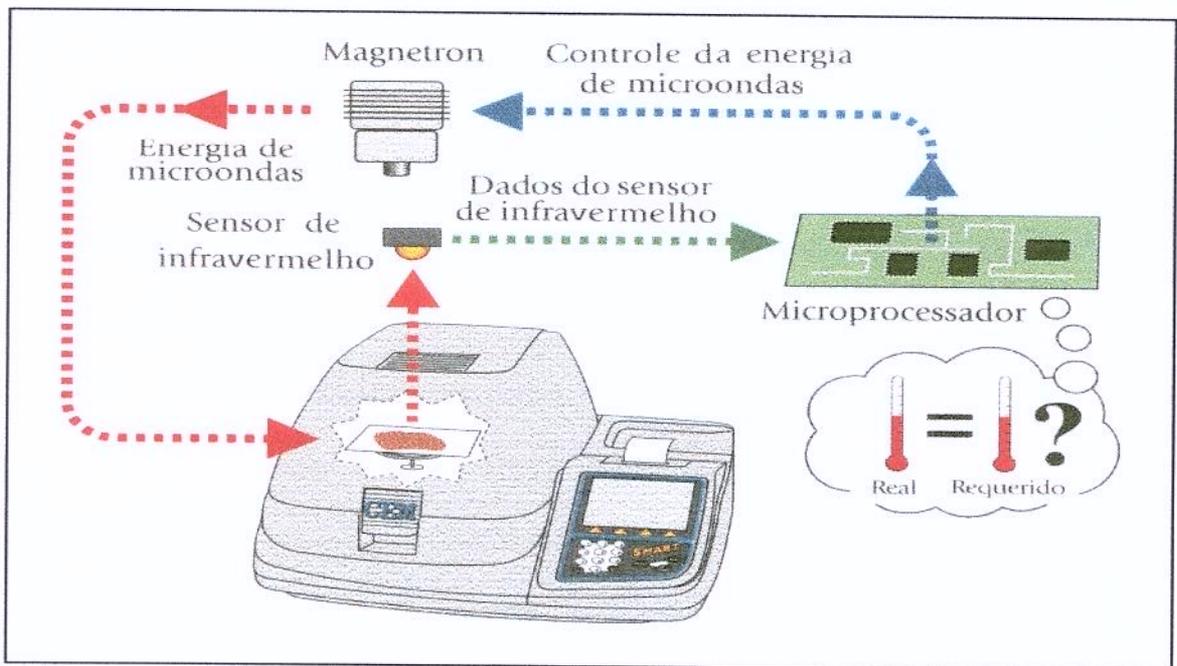


Figura 3 – Analisador de umidade com aplicador de microondas marca CEM, modelo Smart-5 e acessórios

h) *Forno de microondas adaptado* – Com o objetivo de obter uma economia de matéria-prima e tempo e também maiores informações dos parâmetros iniciais para o processo, foi feita uma adaptação em um forno doméstico Brastemp, “Double Emission System”, cavidade com volume de 38 litros, modelo BMV38-A, com 900W de potência nominal máxima e ajuste de tempo, para uma operação que permitisse o controle das condições do ar de remoção da umidade gerada pela secagem. Para isso, foram removidos da porta do forno os vidros interno e externo de proteção de uma tela metálica que retém as microondas dentro da cavidade de aplicação, não permitindo seu escape. Desta forma foi possível permitir a admissão do ar dentro da cavidade do forno através do ajuste de uma peça metálica (difusor) desenhada e construída de modo a encaixar-se na porta do mesmo. Esta peça foi interligada externamente a um sistema gerador de ar quente, composto por um ventilador centrífugo, uma válvula de esfera para controle do fluxo de ar, cuja medida é feita através de uma célula de fluxo laminar e de um manômetro “U” calibrado; ainda como parte do sistema, um aquecedor por resistência elétrica foi colocado após a seção de medição do fluxo de ar, controlada por dispositivo automático, com sensor do tipo terminal PT-100, além do que a temperatura do ar quente podia ser monitorada por termômetro digital com termopares e registrador, ambos de 2 canais. Durante todo o trajeto do ar após a sua passagem no aquecedor até a entrada no forno, o sistema foi revestido por manta de lã de vidro, para o isolamento térmico. Na parte de trás do forno foi aplicado um outro ventilador como meio auxiliar da exaustão do ar de dentro da cavidade de aplicação. Neste forno também foi adaptado um sistema interno de circulação de água, sistema este que permitiu obter menores níveis de potência, pois através de testes preliminares de secagem com amêndoa, observou-se a necessidade de trabalhar com níveis de potências menores do que as fornecidas pelo forno. Esta adaptação foi feita

instalando-se uma bomba peristáltica juntamente com um controlador de velocidade, além de outros acessórios como galões e mangueiras que possibilitaram a circulação da água. A calibração dos níveis de potência utilizados foi feita através da combinação da velocidade e do volume no qual a água passava dentro do forno e do nível de potência aplicada. O forno adaptado pode ser visto na figura 4 adiante.

A partir das análises dos resultados dos ensaios de secagem realizados neste forno de microondas doméstico adaptado, foi possível determinar os intervalos de valores dos parâmetros operacionais das amêndoas testadas no forno piloto de secagem a ar quente assistido a microondas [item 4.2.2].

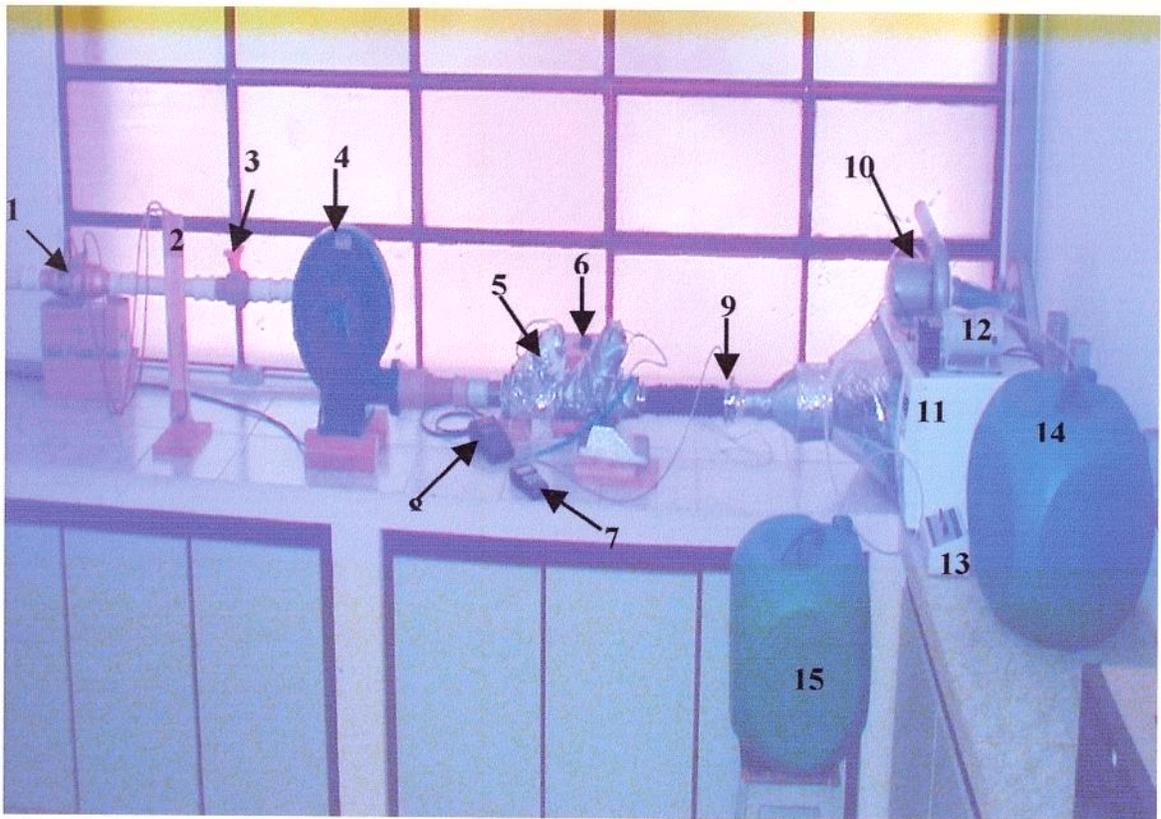


Figura 4 – Forno de microondas doméstico adaptado a um sistema gerador de ar quente - (1) célula de fluxo laminar; (2) manômetro “U”; (3) válvula de esfera; (4) ventilador centrífugo do ar de entrada; (5) aquecedor por resistência elétrica; (6) controlador de temperatura; (7) termômetro digital c/ termopar; (8) registrador de temperatura; (9) abraçadeira de conexão do forno com o sistema de ar quente; (10) ventilador centrífugo de exaustão; (11) forno de microondas doméstico; (12) bomba peristáltica; (13) controlador de velocidade da bomba; (14/15) galões para coletar água na entrada e na saída do forno.

4.2.2 Forno aplicador de microondas tipo túnel – Cober Mod. LDM (piloto)

Após se analisar os resultados dos ensaios de secagem da amêndoa no forno de microondas doméstico adaptado, realizou-se então o teste de secagem em escala piloto, fazendo uso de um aplicador de microondas tipo túnel, de regime operacional intermitente ou contínuo, adaptado a um sistema de circulação de ar quente, marca COBER, modelo LDM (Figura 5).



Figura 5 – Forno a Microondas Intermitente/Contínuo COBER mod. LDM – (1) Cavidade com porta de acesso; (2) Entrada de ar quente; (3) Controle de vazão de ar; (4) Controle de potência e microondas; (5) Controle de temperatura do ar quente; (6) Controle de velocidade da esteira (tempo de residência); (7) Monitor infravermelho de temperatura; (8) Controlador PID; (9) Célula de fluxo laminar; (10) Manômetro de coluna “U”; (11) Sistema gerador de microondas Alter mod. SM745; (12) Ajuste de potência de microondas, 0-100% de 1,9 kW; (13) Toco quádruplo; (14) Sistema medidor de microondas.

Este equipamento compõe-se de uma cavidade paralelepípedica, com porta de acesso (1), de operação intermitente ou contínua, com ar quente adaptado em fluxo ou contrafluxo com o produto (2), equipado com recursos para controlar com precisão as vazões de ar (3), a potência das microondas (4), a temperatura e umidade do ar quente (5), e o tempo de residência do produto sob processo (6). A temperatura do produto poderá também ser controlada através da monitoração por infravermelho e envio através de um medidor RAYTEK, modelo PM 30 *plus* (7) de um sinal proporcional a um controlador PID (8) que exerce a função de limitador da potência de microondas para a temperatura do produto não ultrapassar um valor pré-estabelecido (“set-point”).

O ajuste da temperatura do ar é feito através de um painel de controle do aquecedor que comanda três bancos de resistências mediante um sistema termostatzado automático com bulbo sensor aplicado a um dos bancos. O controle da vazão de ar é feito através de uma válvula borboleta, sendo medida por uma célula de fluxo laminar (MERIAN Mod. 50MC2-2) (9) interligada por mangueiras flexíveis a um manômetro de coluna “U” de vidro (10) para funcionamento com água. O conteúdo de umidade do ar ambiente pôde ser monitorado por meio das medidas das temperaturas seca e úmida.

As microondas de frequência 2450 MHz são produzidas pelo gerador (Alter mod. SM745) (11) dotado de ajuste de potência infinitamente variável (12) entre 0 e 100% de 1,9kW.

O sistema de ajuste das microondas [(13) + (14)] permite, antes de cada ciclo experimental, a sintonia de casamento de impedâncias do sistema provedor de microondas (11) em relação ao aplicador (1), objetivando otimizar a eficiência de transmissão de microondas para valores acima de 90% (ou seja, radiação refletida máxima de 10%). A potência transmitida de microondas foi fixada para cada ciclo em função da massa das amêndoas com o intuito de se

ajustar um valor a ser testado de densidade de potência (W/kg) aplicada ao material [definida como potência transmitida (W) dividida pela massa de material (kg)], de modo que a temperatura do material permanecesse dentro do valor do “set-point” (8).

4.3 Métodos Analíticos

4.3.1 Determinação de umidade

4.3.1.1 Método oficial

O método utilizado para a determinação de umidade nas amostras de amêndoa foi o método oficial da AOAC 925.40 (Umidades em Nozes e Produtos de Nozes): pesou-se 2 g da amostra, colocando-a dentro de uma estufa a vácuo durante 5 h, a uma temperatura de 95-100 °C, debaixo de uma pressão menor do que 100 mm Hg (13,3 kPa), até a obtenção de peso constante, seguindo-se resfriamento em dessecador e nova pesagem.

4.3.1.2 Método alternativo

Este método foi desenvolvido e calibrado pelo anterior e fez uso do equipamento descrito no item 4.2.1 (g).

4.3.2 Extração do óleo

O óleo extraído para análise durante o armazenamento da amêndoa foi obtido através de extração mecânica a frio, utilizando o equipamento descrito no item 4.2.1(d).

4.3.3 Método de avaliação da rancidez

As amostras das amêndoas submetidas à secagem mediante os dois processos previstos neste estudo teve a sua susceptibilidade à rancidez avaliada durante seis meses, por meio de testes do nível de peróxido, fazendo-se 2 repetições para cada amostra. Para isto as amostras, embaladas

a vácuo depois de secas, foram desembaladas a períodos de tempo regulares, de um até seis meses e, após a extração mecânica a frio do óleo bruto (VIEIRA & REGITANO-D'ARCE, 1999). Este óleo foi analisado quanto ao seu teor de peróxido, segundo o método Cd 8b-90 (AOCS, 1997). Observa-se que o índice máximo tolerado de peróxido para óleos brutos estipulado pela legislação brasileira (CNNPA 22/77, 1969), é de 20 meq O₂ kg⁻¹.

4.3.4 Índice de estabilidade oxidativa (*Oil Stability Index -OSI*)

Para determinação deste índice durante o armazenamento da amêndoa, utilizou-se o método AOCS Cd 12b-92 (1997). Fez-se 3 repetições com 5g de óleo cada a 110°C com fluxo de ar a 9 L/h. A amostra de controle também analisada por este método, permaneceu in natura e armazenada a menos 18°C, sendo que a extração do óleo para análise foi realizada no mesmo período em que ocorreu as análises da amêndoa seca armazenada.

4.3.5 Atividade de água

As determinações experimentais da atividade de água (a_w) das amostras secas foram realizadas por medida direta pelo instrumento AQUALAB, modelo CX-2, fabricado pela Decagon Devices Inc., EUA, presente no laboratório de Engenharia de Processos – LEP/DEA/FEA.

O aparelho é dotado de um ventilador, um sensor do ponto de orvalho e um termômetro infravermelho. O sensor do ponto de orvalho mede a temperatura do ponto de orvalho do ar e o termômetro infravermelho mede a temperatura da amostra. Dessas medidas a umidade relativa do espaço é computada como a razão da pressão de vapor saturado à temperatura do ponto de orvalho pela pressão de vapor saturado à temperatura da amostra. Quando a atividade de água da amostra e a umidade do ar entram em equilíbrio, a medida da umidade do espaço fornece a

atividade de água da amostra. O objetivo do ventilador é acelerar o equilíbrio e controlar a condutância da camada limite do sensor de ponto de orvalho, (NOREÑA et al., 1996).

Inicialmente o equipamento foi calibrado com soluções de sais saturados (Tabela 5), em seguida a amêndoa analisada foi cortada em filetes e a amostra foi colocada em porta-amostra de plástico que foi inserida diretamente no aparelho. Após alcançar o equilíbrio foram efetuadas três leituras da a_w e da temperatura exata da amostra. Todas as determinações foram feitas em triplicatas.

Tabela 5 – Soluções de sais saturados e suas respectivas atividades de água

Sais	a_w a 20°C	a_w a 25°C
LiCl	0,113 ± 0,003	0,113 ± 0,003
MgCl ₂	0,331 ± 0,002	0,328 ± 0,002
K ₂ CO ₃	0,432 ± 0,003	0,432 ± 0,004
Mg(NO ₃) ₂	0,544 ± 0,002	0,529 ± 0,002
NaCl	0,755 ± 0,001	0,753 ± 0,001
KCl	0,851 ± 0,003	0,843 ± 0,003
K ₂ SO ₄	0,976 ± 0,005	0,973 ± 0,005
H ₂ O	1,000 ± 0,003	1,000 ± 0,003

Fonte: Adaptado de NOREÑA *et al.*, 1996.

A temperatura para leitura da a_w foi controlada a $25,0 \pm 0,3^\circ\text{C}$ com a ajuda de banho termostático (Poly Science, Series 9500).

4.3.6 Planejamento experimental

Com o intuito de se estudar a influência de algumas variáveis e o comportamento da amêndoa da castanha do Brasil perante os tratamentos de secagem realizados, tanto pelo processo convencional realizado no forno de secagem convectivo adaptado, bem como no forno de microondas adaptado BMV38-A, foram desenvolvidos dois planejamentos experimentais do tipo fatorial 2^2 para cada processo, conforme mostrado nas Tabelas 6 e 7. As avaliações do

comportamento do produto, frente aos tratamentos, foram realizadas através de um tratamento estatístico dos dados obtidos pelo programa *Statistica* versão 5,0 (Microsoft, 1995).

As variáveis estudadas no primeiro planejamento, conforme mostra a Tabela 6, foram a velocidade do ar e a temperatura do ar de entrada no secador. Já no segundo planejamento foi estudada a potência e a temperatura do ar de entrada no forno, como é mostrado na Tabela 7, sendo que neste segundo planejamento a velocidade do ar foi fixada. Como resposta para ambos planejamentos foram avaliados os tempos de secagem, o nível de peróxido, o índice de estabilidade oxidativa e a atividade de água, apresentados pelo produto durante seis meses em cada combinação das variáveis descritas, para a obtenção de um produto final com 3,0 % de umidade em b.u.

Tabela 6 – Modelo do planejamento experimental para a secagem convencional no forno de secagem convectiva adaptado

Ensaio	VARIÁVEIS		RESPOSTAS			
	Velocidade do ar (m/s)	Temp. do Ar de Entrada (°C)	Tempo de secagem (min)	Nível de Peróxido (meq de O ₂ / kg)	Índice de Estabilidade Oxidativa (h)	Atividade de Água (a _w)
1	-1	-1				
2	+1	-1				
3	-1	+1				
4	+1	+1				
5	0	0				
6	0	0				
7	0	0				

Tabela 7 – Modelo do planejamento experimental para a secagem no forno de microondas adaptado

Ensaio	VARIÁVEIS		RESPOSTAS			
	Potência (W)	Temp. do Ar de Entrada (°C)	Tempo de secagem (min)	Nível de Peróxido (meq de O ₂ / kg)	Índice de Estabilidade Oxidativa (h)	Atividade de Água (a _w)
1	-1	-1				
2	+1	-1				
3	-1	+1				
4	+1	+1				
5	0,133	0				
6	0,133	0				
7	0,133	0				

4.4 Procedimento Experimental

4.4.1 Secagem

Após o recebimento das amêndoas, estas foram divididas em dois lotes: - um foi utilizado para o estudo da secagem convencional por ar quente, no forno de secagem convectivo adaptado [item 4.2.1 – (e)], para a redução da umidade inicial do produto numa faixa de 10 a 6% até a condição final de 3% (b.u.); o outro foi destinado aos estudos da secagem alternativa das amêndoas com aplicação da energia de microondas, no forno de microondas adaptado BMV38-A [item 4.2.1 – (h)], para a mesma redução de umidade, onde foram também determinados os intervalos de valores dos parâmetros operacionais - temperatura do produto, potência de microondas e tempo de residência no processo – que foram testados em etapa posterior no forno piloto [item 4.2.2]. No processo convencional de secagem conduzido na indústria as castanhas

são submetidas a um tratamento com ar quente entre 50 e 70°C, durante 2 a 3 dias (NERY, 1969). O intervalo de temperatura assinalado foi a condição de partida da secagem convencional pesquisada neste projeto. Após a secagem as amêndoas foram embaladas a vácuo e armazenadas durante seis meses em condições ambientes e, durante o armazenamento foram feitas avaliações da característica de preservação das amêndoas secas de cada alternativa, por análise do nível de peróxido, estabilidade oxidativa e atividade de água. Durante os processos de secagem realizados foi feita também a comparação do comportamento dos dois métodos de secagem mediante a análise das curvas de secagem levantadas.

Na seqüência foi conduzido teste de escala ampliada utilizando o forno piloto descrito no item 4.2.2. Os parâmetros operacionais levantados no ensaio de bancada do forno de microondas adaptado BMV38-A serviram como ponto de partida para esta etapa de ensaios em escala piloto.

4.4.1.1 Cinética de secagem

A cinética de secagem foi estudada mediante plotagens do termo adimensional de umidade em base seca e taxa de secagem em função do tempo de processo.

4.4.2 Embalagem e armazenamento

Ao término de cada processo de secagem, as amêndoas foram colocadas dentro de sacos transparentes de polietileno de baixa densidade (PEBD), com as seguintes dimensões: 10,5cm x 15,5cm x 0,15mm, sendo que em seguida estas foram embaladas em uma máquina soldadora a vácuo da marca Selovac (Mini Jumbo). Depois de embaladas as amêndoas foram armazenadas em condições ambientes por um período de seis meses, sendo estas avaliadas alternativamente durante este período.

5.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Resultados Obtidos nos Ensaios de Secagem Convencional Realizados no Forno de Secagem Convectivo Adaptado

Tabela 8 – Resultados dos ensaios realizados no forno de secagem convencional

Ensaio	Tempo (min)	T ar entrada (°C)	T Saída do Produto (°C)	U.R ar entrada (%)	Vazão ar entrada (m ³ /min)	Velocidade ar entrada (m/s)	Ui (%)	Uf (%)
EC1	960	55±0,5	52-55	65,31	1,1	1,5	6,58	3,01
EC2	840	55±0,5	52-55	61,06	1,8	2,5	6,50	3,03
EC3	600	65±0,5	62-65	68,42	1,1	1,5	6,58	2,99
EC4	600	65±0,5	62-65	66,29	1,8	2,5	6,50	2,98
EC5	720	60±0,5	57-60	67,72	1,45	2,0	6,60	3,01
EC6	720	60±0,5	57-60	62,06	1,45	2,0	6,58	3,00
EC7	720	60±0,5	57-60	61,10	1,45	2,0	6,56	2,98

Fixou-se em 1,2kg a massa inicial da amêndoa durante todos os ensaios de secagem realizada no forno de secagem convencional.

A figura 6 mostra o termo adimensional de umidade em função do tempo para as diversas combinações de temperatura e velocidade do ar de secagem para a amêndoa seca convencionalmente. Já a figura 7 mostra a taxa de secagem em função da umidade em base seca para as mesmas combinações.

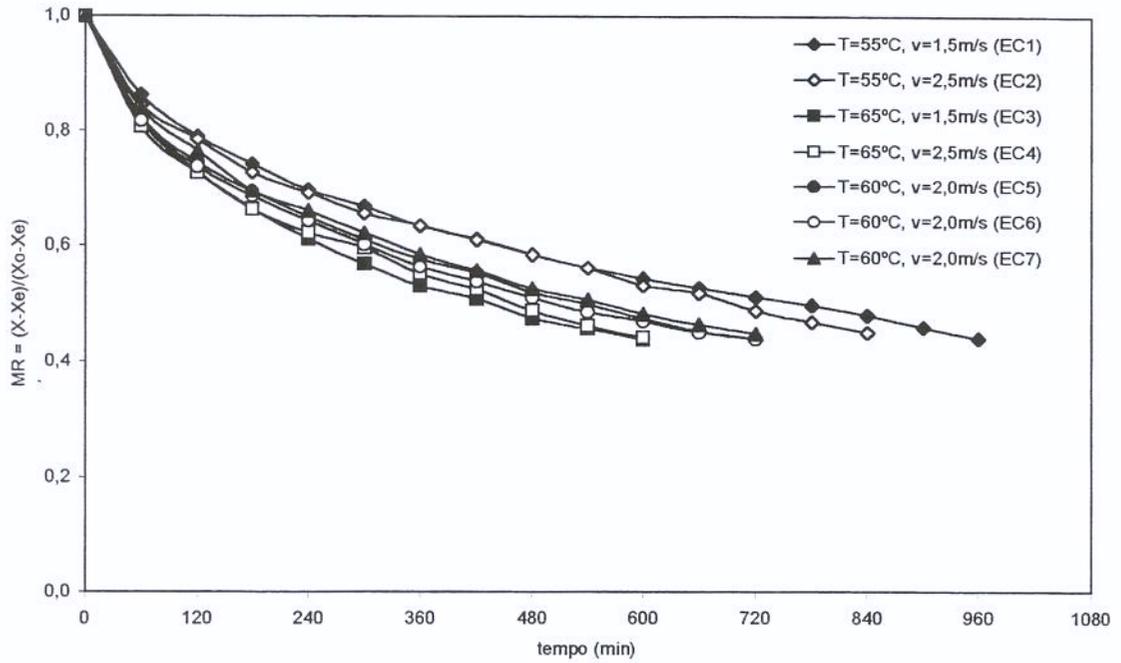


Figura 6 – Curva de secagem do processo de secagem convencional

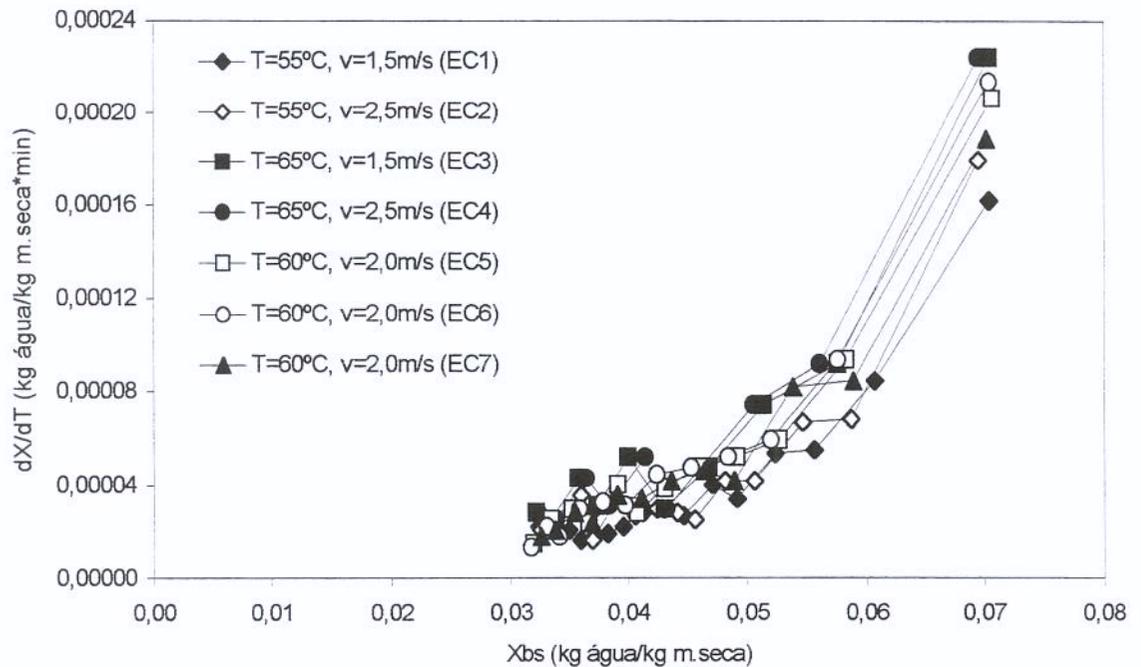


Figura 7 – Taxa de secagem do processo de secagem convencional

5.1.1 Índice de peróxidos apresentados na fração lipídica de amêndoas secas pelo processo convencional em função do tempo de armazenamento

A análise de regressão linear dos valores de índice de peróxido da fração lipídica das amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo de secagem convencional em função do tempo de armazenamento (Tabela 9) mostrou que existe correlação linear significativa ($p \leq 0,05$) para ambos os ensaios, pois em todos os ensaios os índices de peróxidos se alteraram em função do tempo de armazenamento

Tabela 9 – Índice de peróxido de fração lipídica de amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo convencional e armazenadas durante seis meses

ÍNDICE DE PERÓXIDO (meq de O ₂ / 1000g de óleo)								
Tempo (dias)	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	EC7	*CC
0	2,81 ^d	2,74 ^d	2,78 ^d	2,98 ^d	3,10 ^d	2,85 ^d	3,15 ^d	2,50 ^a
45	3,83 ^c	3,90 ^c	4,20 ^c	4,47 ^c	4,67 ^d	4,09 ^c	3,29 ^d	2,50 ^a
90	7,50 ^b	6,60 ^{bc}	6,43 ^b	5,55 ^b	5,15 ^c	4,48 ^b	5,49 ^c	2,52 ^a
135	7,18 ^b	8,95 ^b	8,75 ^{ab}	10,75 ^a	9,40 ^b	6,95 ^{ab}	9,80 ^b	2,48 ^a
180	12,74 ^a	10,14 ^a	10,24 ^a	10,81 ^a	11,71 ^a	8,76 ^a	13,15 ^a	2,45 ^a

Em cada coluna amostras com a mesma letra não são significativamente diferentes (5%/Tukey)
 *Esse é o código da amostra de controle do processo de secagem convencional, sendo que esta permaneceu in natura e foi armazenada a menos 18°C durante o tempo de armazenamento

Através dos dados de índice de peróxido (Tabela 9) podemos observar que durante o tempo de armazenamento estes valores aumentaram, sendo que somente no ensaio EC4 os valores dos três últimos meses permaneceram constante. Nota-se, que apesar do aumento destes valores, os índices de peróxido obtidos não alcançaram o limite máximo tolerado para óleos

brutos estipulado pela legislação brasileira (CNNPA 22/77, 1969), que é de 20 meq O₂ kg⁻¹. O aumento deste índice durante o armazenamento é evidência do início de reações oxidativas nas amostras armazenadas. A oscilação dos valores de índice de peróxido pode ser devido aos diferentes tratamentos aplicados durante a secagem convencional da amêndoa, haja visto que o índice inicial [tabela 9, (CC)] apresentou baixas concentrações durante todo o tempo de armazenamento.

Pelo teste de Tukey a primeira diferença significativa no nível de peróxido ocorreu a 45 dias de armazenamento para todos os ensaios, enquanto que para a amostra de controle (CC), em nenhum período o nível de peróxido se diferenciou do seu valor inicial. A figura 8 mostra melhor o comportamento dos índices de peróxidos durante o armazenamento.

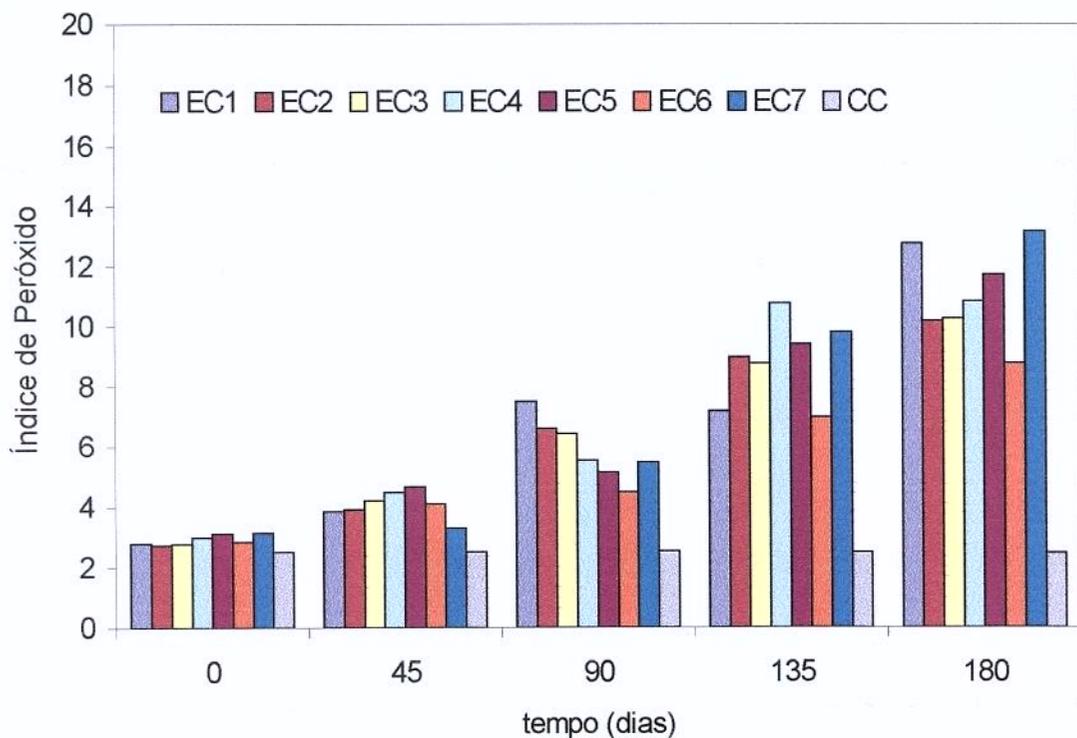


Figura 8 – Perfil dos teores de índice de peróxido durante o armazenamento de amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo convencional

5.1.2 Índice de estabilidade oxidativa (OSI) apresentado na fração lipídica de amêndoas secas pelo processo convencional em função do tempo de armazenamento

A estabilidade oxidativa da fração lipídica das amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo de secagem convencional em função do tempo de armazenamento (Tabela 10), pôde ser estimada através de testes acelerados, onde o fluxo de oxigênio e a temperatura empregada permitiram uma rápida alteração. No processo de deterioração oxidativa há um período inicial denominado período de indução onde a velocidade de reação é baixa e, quanto maior o período de indução de um óleo, mais estável ele é. Com o tempo de armazenamento, o período de indução tende a diminuir (RAUEN-MIGUEL, 1992).

Tabela 10 – Resultados dos índices de estabilidade oxidativa determinados na fração lipídica de amêndoas de castanha do Brasil seca pelo processo convencional e armazenadas durante seis meses

Tempo (dias)	OSI (h)							*CC
	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	EC7	
0	6,51 ^a	6,98 ^a	7,05 ^a	6,71 ^a	7,11 ^a	6,32 ^a	6,41 ^a	7,95 ^a
45	6,47 ^a	6,87 ^a	6,95 ^a	6,52 ^a	6,94 ^a	6,30 ^a	6,30 ^a	7,82 ^a
90	5,35 ^b	5,37 ^b	5,28 ^{bc}	5,72 ^{ab}	5,77 ^{ab}	6,30 ^a	6,30 ^a	7,60 ^a
135	4,65 ^c	5,38 ^b	5,72 ^b	5,03 ^b	5,05 ^b	5,75 ^b	5,60 ^b	7,59 ^a
180	5,05 ^b	5,57 ^b	5,17 ^c	5,00 ^b	5,18 ^b	5,95 ^{ab}	5,52 ^b	7,70 ^a

Em cada coluna amostras com a mesma letra não são significativamente diferentes (5%/Tukey)
 *Esse é o código da amostra de controle do processo de secagem convencional, sendo que esta permaneceu in natura e foi armazenada a menos 18°C durante o tempo de armazenamento

Fazendo a análise de regressão linear dos valores de índice de estabilidade oxidativa (Tabela 10), estes mostraram que existe correlação linear significativa ($p \leq 0,05$) para ambos os ensaios, pois em todos os ensaios os índices de estabilidade oxidativa se alteraram em função do tempo de armazenamento. Comparando estes dados com os índices de peróxidos (Tabela 9) observa-se que os tratamentos que tiveram os maiores valores de índice de peróxido foram os que apresentaram o menor período de indução.

Pelo teste de Tukey a primeira diferença significativa no índice de estabilidade oxidativa ocorreu a 90 dias de armazenamento para quase todos os ensaios, sendo que somente nos ensaios EC6 e EC7 os valores dos primeiros 90 dias permaneceram constantes, enquanto que para a amostra de controle (CC), em nenhum período o índice de estabilidade oxidativa se diferenciou do seu valor inicial. A figura 9 mostra melhor o comportamento dos índices de estabilidade oxidativa durante o armazenamento.

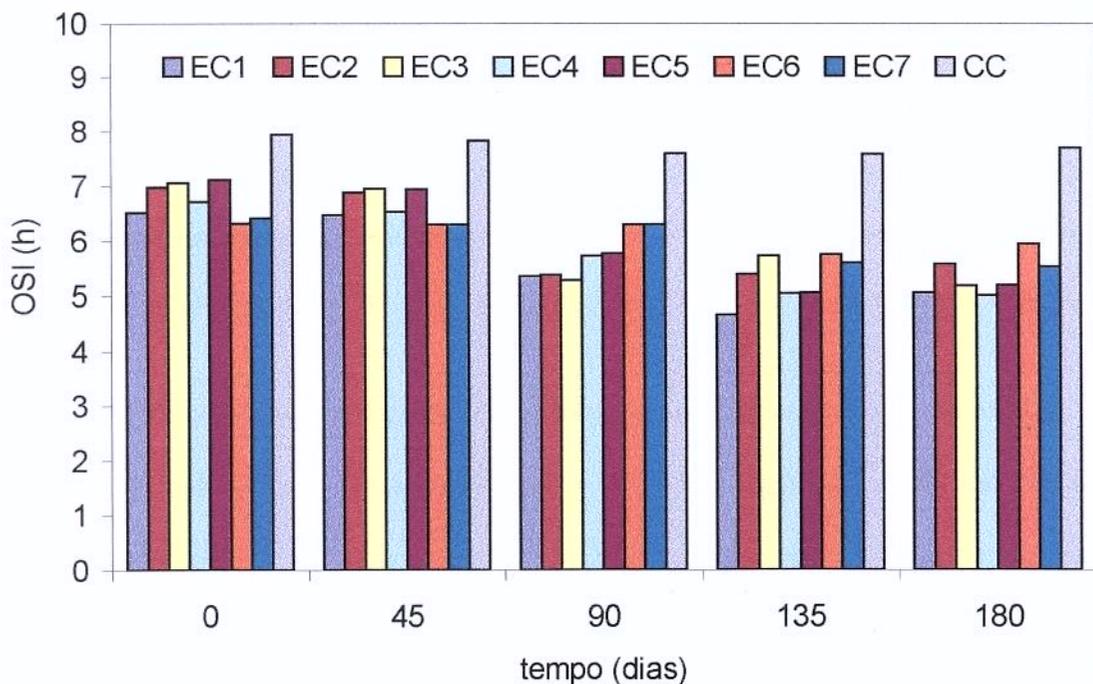


Figura 9 – Comportamento dos índices de estabilidade oxidativa (OSI) durante o armazenamento de amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo convencional

5.1.3 Atividades de água apresentadas em amêndoas secas pelo processo convencional em função do tempo de armazenamento

Analisando estatisticamente os resultados de atividade de água (Tabela 11) de amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo convencional em função do tempo de armazenamento, observou-se que todos os ensaios não apresentaram correlação linear significativa com o tempo de armazenamento ao nível de significância de $p \leq 0,05$.

Tabela 11 – Atividade de água de amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo convencional e armazenadas durante seis meses

ATIVIDADE DE ÁGUA (a_w)							
Tempo (dias)	EC1	EC2	EC3	EC4	EC5	EC6	EC7
0	0,526 ^b	0,513 ^b	0,496 ^b	0,505 ^b	0,533 ^b	0,529 ^b	0,518 ^b
60	0,533 ^{ab}	0,528 ^{ab}	0,508 ^{ab}	0,517 ^{ab}	0,538 ^{ab}	0,536 ^{ab}	0,522 ^{ab}
120	0,550 ^{ab}	0,544 ^{ab}	0,530 ^a	0,535 ^{ab}	0,549 ^{ab}	0,546 ^{ab}	0,533 ^a
180	0,580 ^a	0,585 ^a	0,539 ^a	0,568 ^a	0,588 ^a	0,577 ^a	0,555 ^a

Em cada coluna amostras com a mesma letra não são significativamente diferentes (5% / Tukey)

O teste de Tukey mostrou que em todos os ensaios ocorreu uma pequena oscilação dos valores de atividade de água durante o armazenamento, mas podem ser considerados praticamente constantes. Nota-se, que todos os valores de atividade de água obtidos (Tabela 11) estão dentro dos limites considerados seguros em relação ao crescimento de microrganismos. Segundo LABUZA (1980) a atividade de água é um parâmetro importante na degradação de alimentos e em atividades de água inferiores a 0,60 os alimentos podem ser considerados

altamente estáveis do ponto de vista microbiológico. A amêndoa “in natura” utilizada neste processo de secagem convencional estava inicialmente com atividade de água igual a 0,79. A figura 10 mostra melhor o comportamento da atividade de água durante o armazenamento.

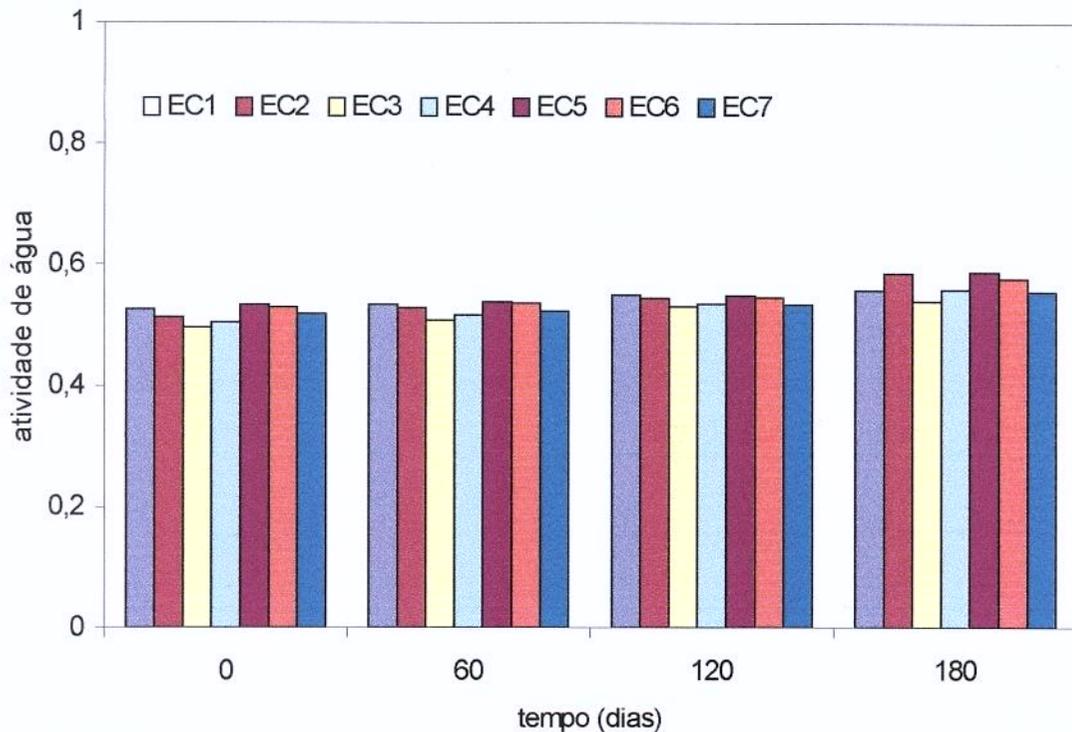


Figura 10 – Comportamento da atividade de água durante o armazenamento de amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo convencional

5.1.4 Análise do planejamento experimental feito durante a secagem convencional

A análise do comportamento das amêndoas de castanha do Brasil, diante dos tratamentos aplicados durante a secagem convencional, foi realizada através do tratamento estatístico dos dados obtidos, pelo programa *Statistica* versão 5,0 (Microsoft, 1995). As condições do tratamento e as respectivas respostas quanto ao tempo de secagem (min), índice de peróxido (meq de O₂ / kg), índice de estabilidade oxidativa (h) e atividade de água (a_w), estão apresentadas na Tabela 12.

Os valores de índice de peróxido, estabilidade oxidativa e atividade de água analisados neste planejamento, foram os obtidos quando se completaram 180 dias de armazenamento.

Tabela 12 – Planejamento fatorial 2^2 com triplicata no ponto central para a amêndoa seca convencionalmente e estocada durante 180 dias

Ensaio	VARIÁVEIS		RESPOSTAS			
	Velocidade do ar (m/s)	Temp. do Ar de Entrada (°C)	Tempo de secagem (min)	Índice de Peróxido (meq de O ₂ /kg)	Índice de Estabilidade Oxidativa (h)	Atividade de Água (a _w)
EC1	-1	-1	960	12,74	5,05	0,580
EC2	+1	-1	840	10,14	5,57	0,585
EC3	-1	+1	600	10,24	5,17	0,539
EC4	+1	+1	600	10,81	5,00	0,568
EC5	0	0	720	11,71	5,18	0,588
EC6	0	0	720	8,76	5,95	0,577
EC7	0	0	720	13,15	5,52	0,555

Tabela 13 – Níveis das variáveis utilizadas no planejamento experimental durante a secagem no forno de secagem convectivo adaptado

Nível	-1	0	+1
Velocidade (m/s)	1,5	2,0	2,5
Temperatura do ar de entrada (°C)	55	60	65

5.1.4.1 Tempo de secagem pelo processo de secagem convencional

A Tabela 14 apresenta o efeito das variáveis, velocidade do ar e temperatura do ar de entrada, bem como o efeito da interação entre elas, sobre o tempo de secagem de amêndoa de castanha do Brasil seca convencionalmente.

Tabela 14 – Análises dos efeitos sobre o tempo de secagem para as amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo de secagem convencional e estocadas durante 180 dias

	Coef. Regres.	Desvio Padrão	t (2)	p	Lim. Conf. -95%	Lim. Conf. +95%
Média	737,14	0,00	-	-	-	-
(1) V. ar (L)	-60	0,00	-	-	-	-
(2) T. ar (L)	-300	0,00	-	-	-	-
1L x 2L	60	0,00	-	-	-	-

Coefficiente de Correlação R= 0,9921

A interpretação dos resultados da Tabela 14 deve ser feita com base na magnitude e sinais dos coeficientes de regressão. Quanto maior o valor do coeficiente, maior será a influência deste sobre a resposta em estudo. O sinal indica a proporcionalidade com que varia o coeficiente com relação à resposta, ou seja, um sinal positivo indica que a relação existente entre a variável independente e a resposta é de direta proporcionalidade, ou seja, a passagem de um nível inferior para um superior da variável independente acarreta um aumento no valor da resposta. Para um sinal negativo, a relação é de inversa proporcionalidade. O valor de “p” está relacionado ao nível de significância da variável independente sobre a resposta em estudo. O intervalo de confiança escolhido normalmente é de 95%. Podendo se afirmar então que, para valores de “p” inferiores a 5%, a variável é considerada estatisticamente significativa, caso contrário, não significativa.

Pela Tabela 14 observa-se que as duas variáveis, velocidade do ar e temperatura do ar de entrada, não foram estatisticamente significantes, porém, as duas variáveis estudadas neste processo apresentaram um efeito positivo, sendo que a temperatura do ar de entrada mostrou-se um pouco mais importante, pois de acordo com a Tabela 12, o tempo de secagem foi bem menor quando se utilizou uma temperatura igual a 65°C, independente do valor da velocidade do ar de entrada, ou seja, o tempo de secagem foi o mesmo para as velocidades 1,5 e 2,5 m/s.

O valor do desvio padrão foi zero, já que não houve respostas diferentes nas replicatas do ponto central, portanto não há como calcular os valores de t, p e dos limites de confiança.

5.1.4.2 Índice de peróxido pelo processo de secagem convencional

A Tabela 15 apresenta o efeito das variáveis, velocidade do ar e temperatura do ar de entrada, bem como o efeito da interação entre elas, sobre o índice de peróxido na fração lipídica de amêndoas de castanha do Brasil secas convencionalmente e armazenadas durante seis meses.

Tabela 15 – Análises dos efeitos sobre o índice de peróxido para as amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo de secagem convencional e estocadas durante 180 dias

	Coef. Regres.	Desvio Padrão	t (2)	p	Lim. Conf. -95%	Lim. Conf. +95%
Média*	11,08	0,85	13,10	0,005779	7,44	14,72
(1) V. ar (L)	-1,01	2,24	-0,45	0,694608	-10,64	8,61
(2) T. ar (L)	-0,91	2,24	-0,41	0,722259	-10,54	8,71
1L x 2L	1,58	2,24	0,71	0,552201	-8,04	11,21

* $p < 0,05$ (estatisticamente significativo a 95% de confiança)

Coefficiente de Correlação $R = 0,5499$

Pela Tabela 15 observa-se que as duas variáveis, velocidade do ar e temperatura do ar de entrada, não foram estatisticamente significantes, porém, ambas variáveis trabalhadas apresentaram um efeito positivo, pois de acordo com a Tabela 12, os índices de peróxidos obtidos se manterão abaixo do limite máximo tolerado durante todo o tempo de armazenamento da amêndoa.

O valor do desvio padrão foi baixo, o que indica que as replicatas no ponto central foram satisfatórias. O baixo valor do coeficiente de correlação revelou um comportamento particular do produto, diferente do modelo linear utilizado no tratamento estatístico. Segundo BARROS NETO *et alii*, (1996) se o modelo linear não se adequar para o tratamento, o próximo passo na análise do planejamento experimental é tentar o modelo quadrático, modelo este que requer pontos axiais, ou seja, pontos abaixo do nível -1 e acima do nível +1, que em um planejamento fatorial 2^2 esse valor seria -1,41 e +1,41, o que não foi possível devido às condições do equipamento utilizado. Observa-se que o planejamento aqui desenvolvido teve apenas como objetivo conhecer e estudar a influência de algumas variáveis no processo e o comportamento da amêndoa perante o tratamento aplicado e não de se obter um modelo matemático que descrevesse esse comportamento. Isto foi possível através do tratamento linear.

Baixos valores de correlação devido ao comportamento particular do produto ocorreram nas outras análises do planejamento descritas posteriormente devido às mesmas razões citadas acima.

5.1.4.3 Índice de estabilidade oxidativa e atividade de água pelo processo de secagem convencional

As Tabelas 16 e 17 apresentam o efeito das variáveis, velocidade do ar e temperatura do ar de entrada, bem como o efeito da interação entre elas, sobre o índice de estabilidade oxidativa

na fração lipídica de amêndoas de castanha do Brasil e também sobre a atividade de água das amêndoas secas convencionalmente e armazenadas durante seis meses.

Tabela 16 – Análises dos efeitos sobre o índice de estabilidade oxidativa para as amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo de secagem convencional e estocadas durante 180 dias

	Coef. Regres.	Desvio Padrão	t (2)	p	Lim. Conf. -95%	Lim. Conf. +95%
Média*	5,35	0,15	36,67	0,000743	4,72	5,98
(1) V. ar (L)	0,18	0,39	0,45	0,694635	-1,49	1,84
(2) T. ar (L)	-0,23	0,39	-0,58	0,618822	-1,89	1,44
1L x 2L	-0,35	0,39	-0,89	0,465630	-2,01	1,32

* $p < 0,05$ (estatisticamente significativo a 95% de confiança)

Coefficiente de Correlação $R = 0,5307$

Tabela 17 – Análises dos efeitos sobre a atividade de água para as amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo de secagem convencional e estocadas durante 180 dias

	Coef. Regres.	Desvio Padrão	t (2)	p	Lim. Conf. -95%	Lim. Conf. +95%
Média*	0,570	0,0064	89,80	0,000124	0,54	0,60
(1) V. ar (L)	0,017	0,0168	1,01	0,418158	-0,06	0,09
(2) T. ar (L)	-0,029	0,0168	-1,73	0,226506	-0,10	0,04
1L x 2L	0,012	0,0168	0,71	0,549225	-0,06	0,08

* $p < 0,05$ (estatisticamente significativo a 95% de confiança)

Coefficiente de Correlação $R = 0,8215$

Pelas Tabelas 16 e 17 observa-se que as duas variáveis, velocidade do ar e temperatura do ar de entrada, não foram estatisticamente significantes, porém, ambas variáveis trabalhadas apresentaram um efeito positivo, pois de acordo com a Tabela 12, os índices de estabilidade oxidativa obtidos se manterão bem estável, e os valores de atividade de água se manterão abaixo de 0,6 valor este que pode ser considerado altamente estável do ponto de vista microbiológico.

O valor do desvio padrão para ambas as análises foram baixos, o que indica que as replicatas no ponto central foram satisfatórias. Os baixos valores do coeficiente de correlação obtidos nessas análises revelou um comportamento particular do produto, diferente do modelo linear utilizado no tratamento estatístico.

5.2 Resultados Obtidos nos Ensaio de Secagem via Aplicação de Energia de Microondas Realizados no Forno de Microondas Adaptado

Tabela 18 – Resultados dos ensaios realizados no forno de microondas adaptado

Ensaio	P (W)	t (min)	U.R. ar entrada (%)	U. R. ar saída (%)	T ar entrada (°C)	T ar saída (°C)	Ui (%)	T final amêndoa (°C)	Uf (%)
EM1	44	720	59,31	20,95-18,81	50±0,5	39-42	9,90	56 - 76	3,01
EM2	104	480	56,19	20,60-18,79	50±0,5	40-43	9,95	58 - 83	3,04
EM3	44	540	56,37	19,91-18,18	60±0,5	44-47	9,86	57 - 80	3,01
EM4	104	420	54,15	21,31-19,06	60±0,5	46-50	9,98	63 - 87	3,03
EM5	70	540	61,14	19,89-17,87	55±0,5	43-45	9,80	58 - 84	3,00
EM6	70	540	72,42	24,78-22,44	55±0,5	40-43	9,83	57 - 87	2,99
EM7	70	540	60,00	24,28-21,60	55±0,5	41-43	9,90	58 - 87	3,04

A massa inicial da amêndoa foi fixada em 1,7 kg durante os ensaios, já a vazão do ar de entrada e a velocidade do ar foram fixas em 2,3 m³/min e 0,8 m/s respectivamente.

A Tabela 19, mostra a relação entre cada nível de potência aplicada e a quantidade de material a ser seco na forma de densidade de potência.

Tabela 19 – Relação da densidade de potência para cada nível de potência trabalhado

Potência (W)	Densidade de Potência (W/g)
44	0,0268
70	0,0427
104	0,0634

A figura 11 mostra o termo adimensional de umidade em função do tempo para as diversas combinações de temperatura do ar de secagem e potência para a amêndoa seca no forno de microondas adaptado.

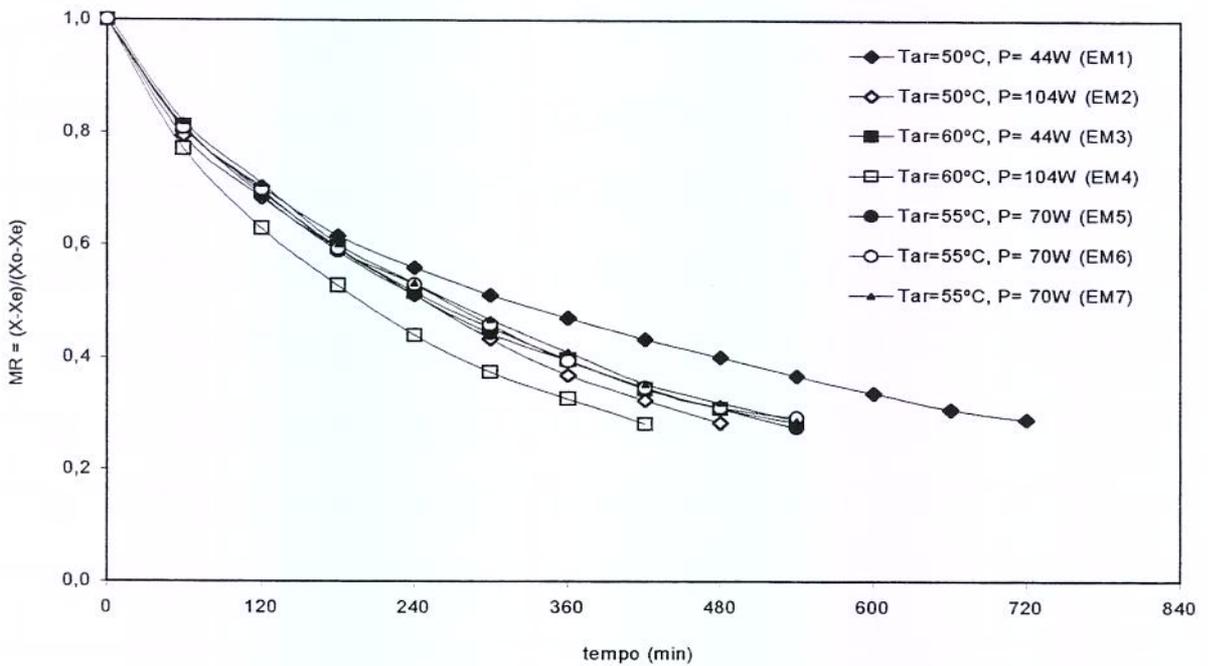


Figura 11 – Curva de secagem do processo de secagem via aplicação de microondas

Já a figura 12 mostra a taxa de secagem em função da umidade em base seca para as diversas combinações de temperatura do ar de secagem e potência para a amêndoa seca no forno de microondas adaptado.

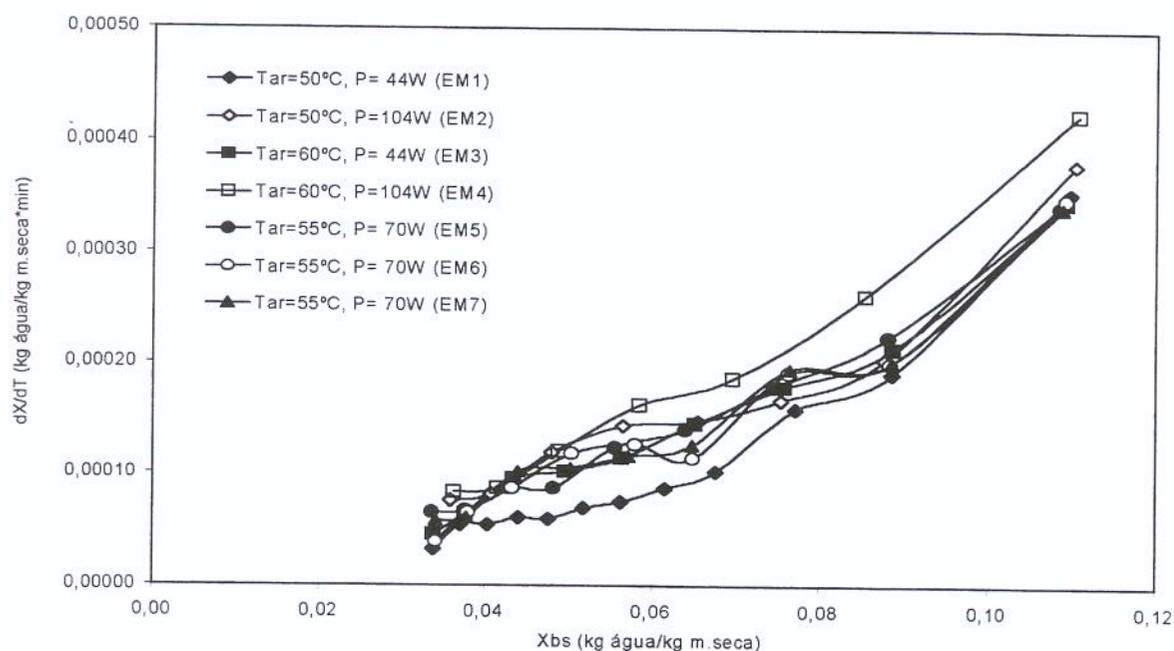


Figura 12 – Taxa de secagem do processo de secagem via aplicação de microondas

5.2.1 Índice de peróxidos apresentados na fração lipídica de amêndoas secas pelo processo com aplicação de energia de microondas em função do tempo de estocagem

A análise de regressão linear dos valores de índice de peróxido da fração lipídica das amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo com aplicação de energia de microondas em função do tempo de armazenamento (Tabela 20) mostrou que existe correlação linear significativa ($p \leq 0,05$) para ambos os ensaios, pois em todos os ensaios os índices de peróxidos se alteraram em função do tempo de estocagem.

Tabela 20 – Índice de peróxido de fração lipídica de amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo com aplicação de microondas e armazenadas durante seis meses

ÍNDICE DE PERÓXIDO (meqO ₂ /1000g de óleo)								
Tempo (dias)	EM1	EM2	EM3	EM4	EM5	EM6	EM7	*CM
0	2,88 ^e	2,71 ^d	2,66 ^e	3,25 ^d	3,44 ^d	3,03 ^e	2,97 ^e	0,90 ^a
45	3,79 ^d	3,27 ^c	3,31 ^d	4,14 ^c	4,68 ^c	3,53 ^d	3,68 ^d	0,89 ^a
90	6,16 ^c	7,32 ^b	6,24 ^c	7,40 ^b	6,74 ^b	6,53 ^c	7,12 ^c	0,92 ^a
135	11,90 ^b	12,58 ^a	8,12 ^b	8,87 ^{ab}	10,09 ^{ab}	8,65 ^b	12,60 ^b	0,88 ^a
180	14,58 ^a	13,06 ^a	11,20 ^a	11,09 ^a	13,47 ^a	13,16 ^a	14,90 ^a	0,90 ^a

Em cada coluna amostras com a mesma letra não são significativamente diferentes (5%/Tukey)
 *Esse é o código da amostra de controle do processo de secagem com aplicação de microondas, sendo que esta permaneceu in natura e foi armazenada a menos 18°C durante os 180 dias.

Analisando os valores de índice de peróxido (Tabela 20) podemos observar que durante o tempo de armazenamento estes valores aumentaram, sendo que somente no ensaio EM2 os valores dos dois últimos meses permaneceram estável. Observa-se que mesmo com o aumento destes valores, os índices de peróxido obtidos não alcançaram níveis elevados ficando sempre abaixo do limite tolerado. A oscilação dos índices de peróxidos pode ser devida aos diferentes tratamentos aplicados durante a secagem com aplicação de energia de microondas, haja visto que o índice inicial [tabela 20, (CM)] apresentou baixos valores durante todo o armazenamento.

Pelo teste de Tukey a primeira diferença significativa no nível de peróxido ocorreu a 45 dias de armazenamento para todos os ensaios, enquanto que para a amostra de controle (CM), em nenhum período o nível de peróxido se diferenciou do seu valor inicial. A figura 13 mostra melhor o comportamento dos níveis de peróxidos durante o armazenamento.

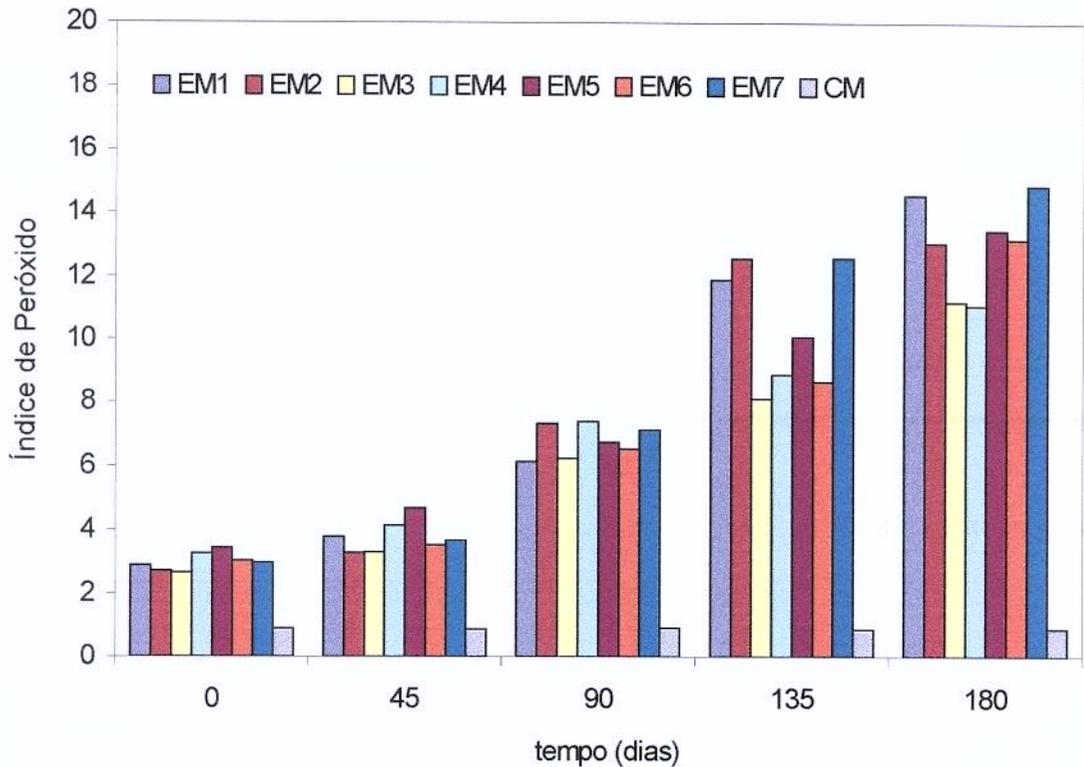


Figura 13 – Perfil dos teores de índice de peróxido durante o armazenamento de amêndoas de castanha do Brasil secas via aplicação de energia de microondas

5.2.2 Índice de estabilidade oxidativa (OSI) apresentado na fração lipídica de amêndoas secas pelo processo com aplicação de energia de microondas em função do tempo de estocagem

A estabilidade oxidativa da fração lipídica das amêndoas de castanha do Brasil secas via aplicação de energia de microondas em função do tempo de armazenamento (Tabela 21), pôde ser estimada através do método descrito no item 4.3.4.

Fazendo a análise de regressão linear dos valores de índice de estabilidade oxidativa (Tabela 21), estes mostraram que existe correlação linear significativa ($p \leq 0,05$) para ambos os ensaios, pois em todos os ensaios os índices de estabilidade oxidativa se alteraram em função do tempo de armazenamento. Comparando estes dados com o índice de peróxido (Tabela 20)

observa-se que os tratamentos que tiveram os maiores índices de peróxidos foram os que apresentaram o menor período de indução.

Tabela 21 – Resultados dos índices de estabilidade oxidativa determinados nas frações lipídicas de amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo com aplicação de microondas e armazenadas durante seis meses

OSI (h)								
Tempo (dias)	EM1	EM2	EM3	EM4	EM5	EM6	EM7	CM
0	6,98 ^a	7,44 ^a	7,09 ^a	7,18 ^a	6,90 ^a	7,11 ^a	7,29 ^a	7,35 ^a
45	6,77 ^a	7,25 ^a	6,97 ^a	7,15 ^a	6,67 ^a	7,03 ^a	7,22 ^a	7,40 ^a
90	6,15 ^{ab}	6,02 ^{ab}	6,70 ^a	6,17 ^b	6,32 ^b	6,62 ^b	6,21 ^b	7,30 ^a
135	4,45 ^c	4,77 ^b	5,50 ^b	5,95 ^{bc}	4,80 ^c	5,80 ^c	5,70 ^{bc}	7,28 ^a
180	5,15 ^b	5,01 ^b	5,40 ^b	5,25 ^c	6,00 ^b	5,55 ^c	5,27 ^c	7,35 ^a

Em cada coluna amostras com a mesma letra não são significativamente diferentes (5%/Tukey)
 *Esse é o código da amostra de controle do processo de secagem convencional, sendo que esta permaneceu in natura e foi armazenada a menos 18°C durante o tempo de armazenamento

Pelo teste de Tukey a primeira diferença significativa no índice de estabilidade oxidativa ocorreu a 90 dias de armazenamento para quase todos os ensaios, sendo que somente no ensaio EM3 os valores dos primeiros 90 dias permaneceram constantes, enquanto que para a amostra de controle (CM), em nenhum período o índice de estabilidade oxidativa se diferenciou do seu valor inicial. A figura 14 mostra melhor o comportamento dos índices de estabilidade oxidativa durante o armazenamento.

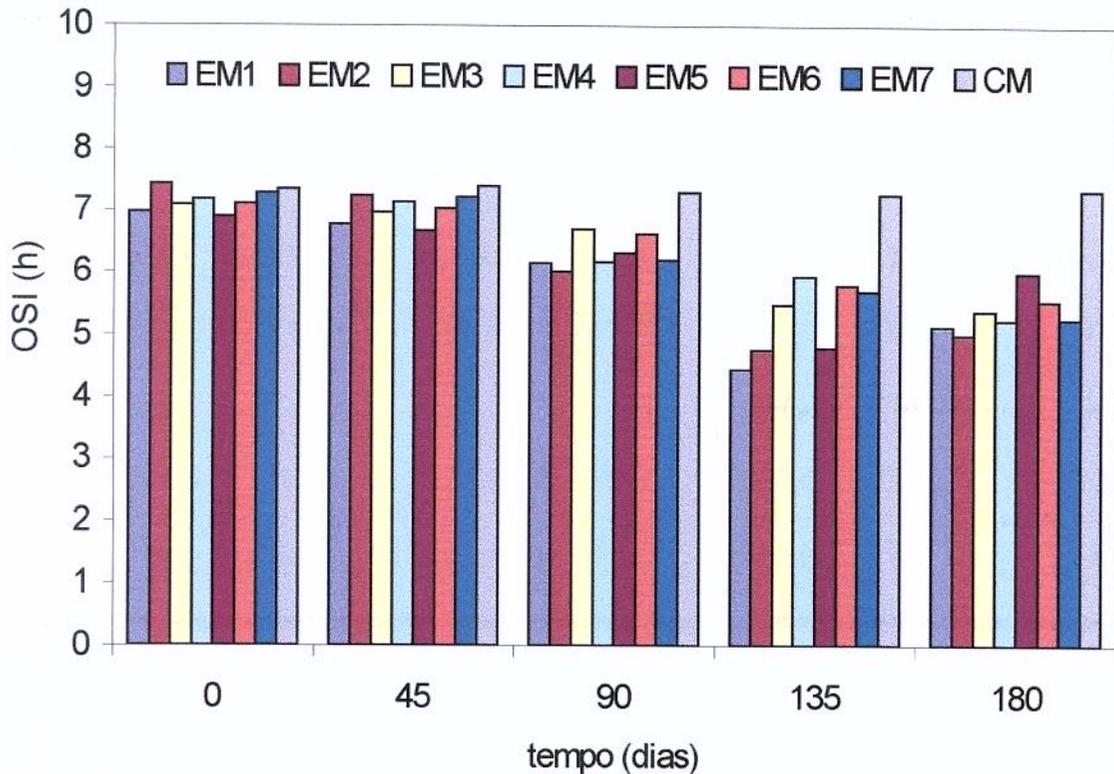


Figura 14 – Comportamento dos índices de estabilidade oxidativa (OSI) durante o armazenamento de amêndoas de castanha do Brasil secas via aplicação de energia de microondas

5.2.3 Atividades de água apresentadas em amêndoas secas via aplicação de energia de microondas em função do tempo de armazenamento

Fazendo-se estatisticamente a análise dos resultados de atividade de água (Tabela 22) de amêndoas de castanha do Brasil secas via aplicação de energia de microondas em função do tempo de armazenamento, observou-se que para todos os ensaios as análises de atividade água não apresentaram correlação linear significativa com o tempo de armazenamento ao nível de significância de $p \leq 0,05$.

Tabela 22 – Atividade de água de amêndoas de castanha do Brasil secas pelo processo via aplicação de energia de microondas e armazenadas durante seis meses

ATIVIDADE DE ÁGUA (a_w)							
Tempo (dias)	EM1	EM2	EM3	EM4	EM5	EM6	EM7
0	0,529 ^b	0,533 ^b	0,508 ^b	0,515 ^b	0,532 ^b	0,521 ^{ab}	0,518 ^b
60	0,536 ^{ab}	0,540 ^{ab}	0,518 ^{ab}	0,523 ^{ab}	0,537 ^{ab}	0,539 ^a	0,527 ^{ab}
120	0,545 ^{ab}	0,574 ^a	0,559 ^a	0,527 ^{ab}	0,547 ^{ab}	0,545 ^a	0,534 ^{ab}
180	0,581 ^a	0,590 ^a	0,577 ^a	0,569 ^a	0,588 ^a	0,563 ^a	0,572 ^a

Em cada coluna amostras com a mesma letra não são significativamente diferentes (5% / Tukey)

O teste de Tukey mostrou que em todos os ensaios ocorreu uma pequena oscilação dos valores de atividade de água durante o armazenamento, mas sendo que estes podem ser considerados praticamente constantes. Observa-se que todos os valores de atividade de água obtidos (Tabela 22) estão dentro dos limites considerados seguros em relação ao crescimento de microrganismos, ou seja, estão abaixo de 0,6 e, portanto, podem ser considerados altamente estáveis do ponto de vista microbiológico (LABUZA, 1980).

A amêndoa utilizada neste processo de secagem via aplicação de energia de microondas estava inicialmente com atividade de água igual a 0,91. A figura 15 mostra melhor o comportamento da atividade de água durante o armazenamento.

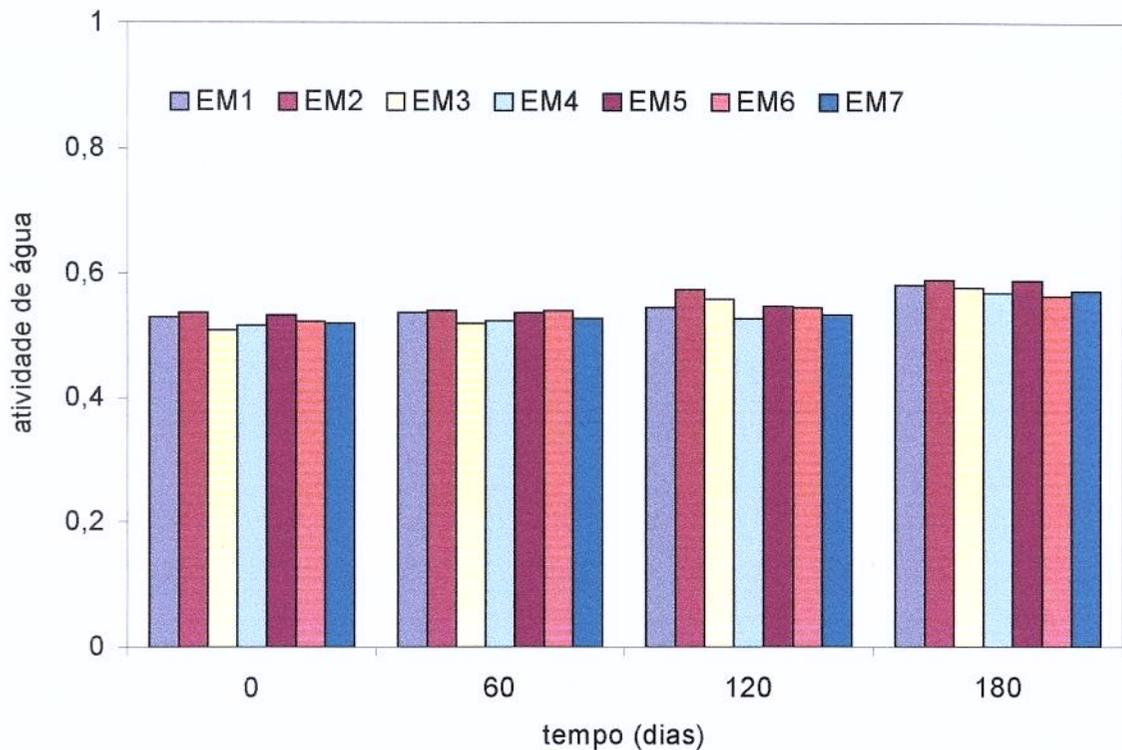


Figura 15 – Comportamento da atividade de água durante o armazenamento de amêndoas de castanha do Brasil secas via aplicação de energia de microondas

5.2.4 Análise do planejamento experimental feito durante a secagem realizada no forno de microondas adaptado

A análise do comportamento das amêndoas de castanha do Brasil, diante dos tratamentos aplicados durante a secagem no forno de microondas adaptado, foi realizada através do tratamento estatístico dos dados obtidos pelo programa *Statistica* versão 5,0 (Microsoft, 1995). As condições do tratamento e as respectivas respostas quanto ao tempo de secagem (min), índice de Peróxido (meq de O₂/ kg), índice de estabilidade oxidativa (h) e atividade de água (a_w), estão apresentadas na Tabela 23.

Os valores dos índices de peróxidos, estabilidade oxidativa e atividade de água analisados neste planejamento, foram os obtidos quando se completaram 180 dias de armazenamento.

Tabela 23 - Planejamento fatorial 2^2 com triplicata no ponto central para as amêndoas secas via aplicação de energia de microondas e estocadas durante 180 dias

Ensaio	VARIÁVEIS		RESPOSTAS			
	Potência (W)	Temp. do Ar de Entrada (°C)	Tempo de secagem (min)	Nível de Peróxido (meq de O ₂ / kg)	Índice de Estabilidade Oxidativa (h)	Atividade de Água (a _w)
EM1	-1	-1	720	14,58	5,15	0,581
EM2	+1	-1	480	13,06	5,01	0,590
EM3	-1	+1	540	11,20	5,40	0,577
EM4	+1	+1	420	11,09	5,25	0,569
EM5	0,133	0	540	13,47	6,00	0,588
EM6	0,133	0	540	13,16	5,55	0,563
EM7	0,133	0	540	14,90	5,27	0,572

Tabela 24 – Níveis das variáveis utilizadas no planejamento experimental durante a secagem no forno de microondas adaptado

Nível	-1	0,133	+1
Potência (W)	44	70	104
Temp. do Ar de entrada (°C)	50	55	60

5.2.4.1 Tempo de secagem pelo processo de secagem via aplicação de energia de microondas

A Tabela 25 apresenta o efeito das variáveis, potência e temperatura do ar de entrada, bem como o efeito da interação entre elas, sobre o tempo de secagem de amêndoas de castanha do Brasil secas via aplicação de energia de microondas e armazenadas durante seis meses.

Tabela 25 – Análises dos efeitos sobre o tempo de secagem para as amêndoas de castanha do Brasil secas via aplicação de energia de microondas e estocadas durante 180 dias

	Coef. Regres.	Desvio Padrão	t (2)	p	Lim. Conf. -95%	Lim. Conf. +95%
Média	545,09	0,00	-	-	-	-
(1) Pot. (L)	-178,65	0,00	-	-	-	-
(2) T. ar (L)	-120	0,00	-	-	-	-
1L x 2L	60	0,00	-	-	-	-

Coeficiente de Correlação $R=0,9975$

Pela Tabela 25 observa-se que as duas variáveis, potência e temperatura do ar de entrada, não foram estatisticamente significantes, porém, ambas variáveis apresentaram um efeito positivo, pois de acordo com a Tabela 23, quando se utilizou a potência igual a 104W e a temperatura igual a 60°C, obteve-se um tempo de secagem bem menor.

O valor do desvio padrão foi zero, já que não houve respostas diferentes nas replicatas do ponto central, portanto não há como calcular os valores de t, p e dos limites de confiança.

5.2.4.2 Índice de peróxido pelo processo de secagem via aplicação de energia de microondas

A Tabela 26 apresenta o efeito das variáveis, potência e temperatura do ar de entrada, bem como o efeito da interação entre elas, sobre o índice de peróxido na fração lipídica de amêndoas de castanha do Brasil secas via aplicação de energia de microondas e armazenadas durante seis meses.

Tabela 26 – Análises dos efeitos sobre o índice de peróxido para as amêndoas de castanha do Brasil secas via aplicação de energia de microondas e estocadas durante 180 dias

	Coef. Regres.	Desvio Padrão	t (2)	p	Lim. Conf. -95%	Lim. Conf. +95%
Média*	13,08	0,35	37,19	0,0007221	11,57	14,60
(1) Pot. (L)	-0,65	0,92	-0,71	0,5521937	-4,63	3,32
(2) T. ar (L)	-2,68	0,93	-2,88	0,1022525	-6,67	1,32
1L x 2L	0,71	0,93	0,76	0,5268234	-3,29	4,70

* $p < 0,05$ (estatisticamente significativo a 95% de confiança)

Coefficiente de Correlação $R=0,7821$

De acordo com a Tabela 26 nota-se que as duas variáveis, potência e temperatura do ar de entrada, não foram estatisticamente significantes, todavia, ambas variáveis trabalhadas apresentaram um efeito positivo, pois de acordo com a Tabela 23, os índices de peróxidos obtidos se manterão abaixo do valor estipulado pela legislação brasileira.

O valor do desvio padrão foi baixo, o que indica que as replicatas no ponto central foram satisfatórias. O baixo valor do coeficiente de correlação revelou um comportamento particular do produto, diferente do modelo linear utilizado no tratamento estatístico.

5.2.4.3 Índice de estabilidade oxidativa e atividade de água pelo processo de secagem via aplicação de energia de microondas

As Tabelas 27 e 28 apresentam o efeito das variáveis, potência e temperatura do ar de entrada, bem como o efeito da interação entre elas, sobre o índice de estabilidade oxidativa na

fração lipídica de amêndoas de castanha do Brasil e também sobre a atividade de água das amêndoas seca via aplicação de energia de microondas e armazenadas durante seis meses.

Tabela 27 – Análises dos efeitos sobre o índice de estabilidade oxidativa para as amêndoas de castanha do Brasil secas via aplicação de energia de microondas e estocadas durante 180 dias

	Coef. Regres.	Desvio Padrão	t (2)	p	Lim. Conf. -95%	Lim. Conf. +95%
Média*	5,38	0,14	38,53	0,000673	4,78	5,98
(1) Pot. (L)	-0,10	0,37	-0,27	0,814079	-1,68	1,48
(2) T. ar (L)	0,25	0,37	0,67	0,574342	-1,34	1,83
1L x 2L	-0,01	0,37	-0,01	0,990400	-1,59	1,58

* $p < 0,05$ (estatisticamente significativo a 95% de confiança)

Coeficiente de Correlação $R=0,3321$

Tabela 28 – Análises dos efeitos sobre a atividade de água para as amêndoas de castanha do Brasil secas via aplicação de energia de microondas

	Coef. Regres.	Desvio Padrão	t (2)	p	Lim. Conf. -95%	Lim. Conf. +95%
Média*	0,58	0,00	120,25	0,000069	0,56	0,60
(1) Pot. (L)	0,00	0,01	0,00	0,996634	-0,05	0,05
(2) T. ar (L)	-0,012	0,01	-0,99	0,427614	-0,07	0,04
1L x 2L	-0,008	0,01	-0,67	0,571186	-0,06	0,05

* $p < 0,05$ (estatisticamente significativo a 95% de confiança)

Coeficiente de Correlação $R=0,6218$

Pelas Tabelas 27 e 28 observa-se que as duas variáveis, potência e temperatura do ar de entrada, não foram estatisticamente significantes, porém, ambas variáveis trabalhadas apresentaram um efeito positivo, pois de acordo com a Tabela 23, os índices de estabilidade oxidativa obtidos se manterão bem estáveis e os valores de atividade de água se manterão abaixo de 0,6 valor este que pode ser considerado altamente estável do ponto de vista microbiológico.

O valor do desvio padrão para ambas as análises foram baixos, o que indica que as replicatas no ponto central foram satisfatórias. Os baixos valores do coeficiente de correlação obtidos nessas análises revelou um comportamento particular do produto, diferente do modelo linear utilizado no tratamento estatístico.

5.3 Resultados Obtidos nos Ensaio de Secagens Realizados no Forno Aplicador de Microondas Tipo Túnel (Piloto)

Com os resultados obtidos em bancada, no forno de microondas doméstico adaptado, onde preliminarmente a melhor condição apresentada foi a do teste EM4, onde se utilizou uma potência de 104 W e temperatura do ar igual a 60 °C, para uma quantidade de massa de 1700g, num tempo de 420 minutos e 0,0634 W/g de densidade de potência, foram então iniciados os ensaios no sistema piloto.

Os resultados dos ensaios estão descritos na Tabela 29:

Tabela 29 – Resultados apresentados nos ensaios realizados no secador piloto

Ensaio	Tempo (min)	P (W)	Vazão ar entrada (m ³ /min)	UR ar entrada (%)	T ar entrada (°C)	T final amêndoa (°C)	Ui (%)	Uf (%)
EP1	210	100	2,7	54,5	66-90	57 – 74	6,2	3,07
EP2	180	100	2,7	65,6	73-85	72 – 86	6,1	2,81
EP3	180	100	2,7	69,6	70-86	70 – 87	6,1	2,96

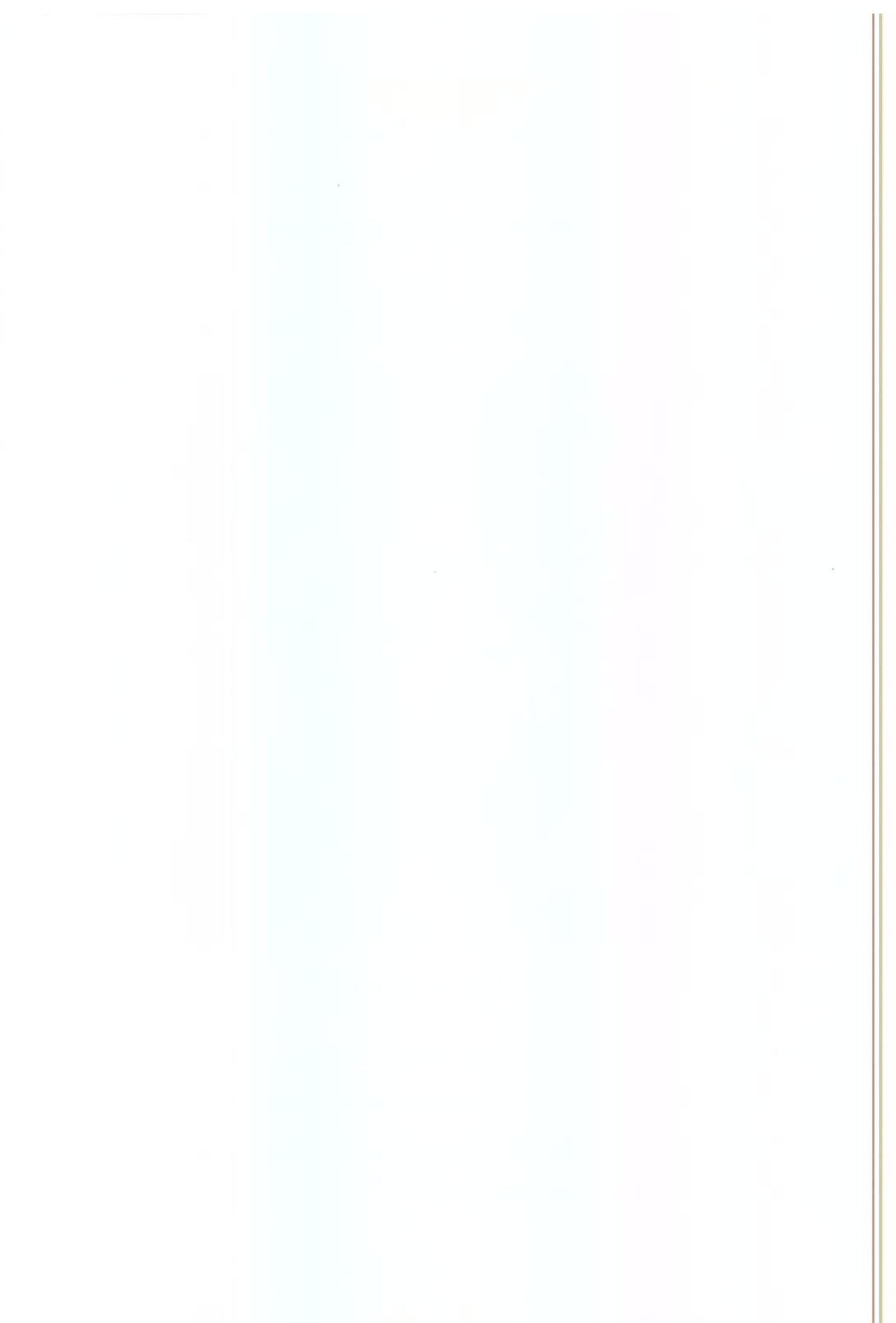
Com os resultados obtidos, notou-se que o equipamento testado apresentou condições favoráveis para realização da secagem da amêndoa de castanha do Brasil, pois como pôde se notar, os tempos de secagem obtidos foram muito curtos quando comparado com os processos de secagem convencional.

A figura 16 mostra a amêndoa seca no forno aplicador de microondas tipo túnel (piloto).



Figura 16 – Amêndoa seca até a condição final de 3% (b.u.)

A figura 17 mostra o termo adimensional de umidade em função do tempo para as diversas combinações de temperatura do ar de secagem e potência para a amêndoa seca no forno aplicador de microondas tipo túnel (piloto). Já figura 18 mostra a taxa de secagem em função da umidade em base seca para as mesmas combinações



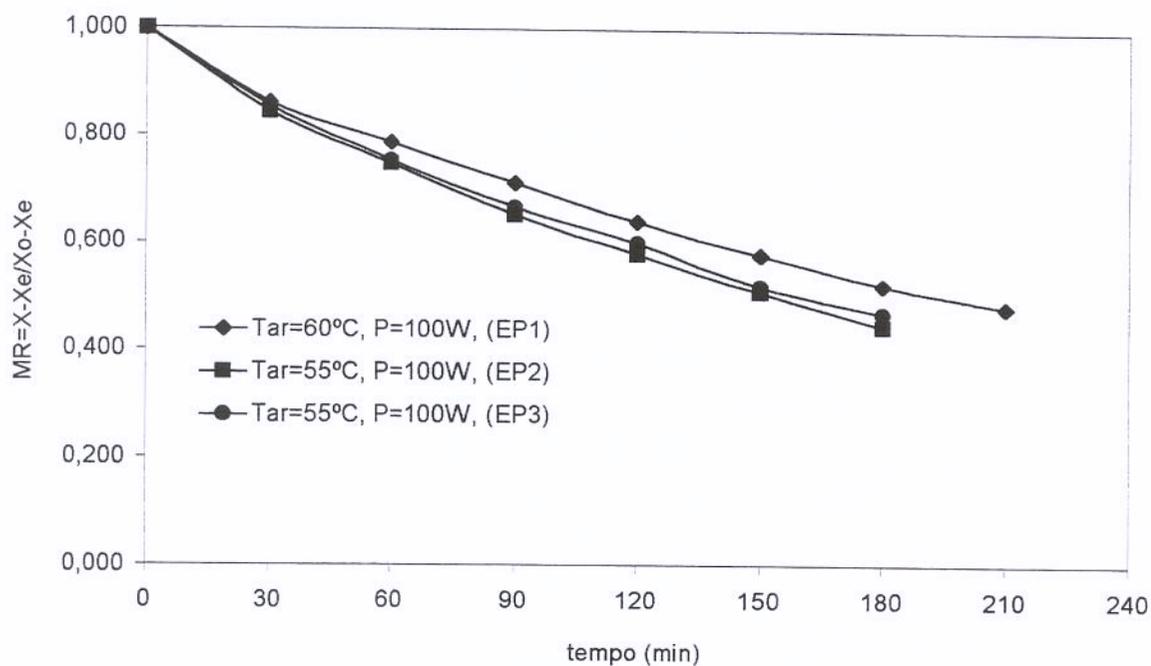


Figura 17 – Curva de secagem do processo de secagem realizada no sistema piloto

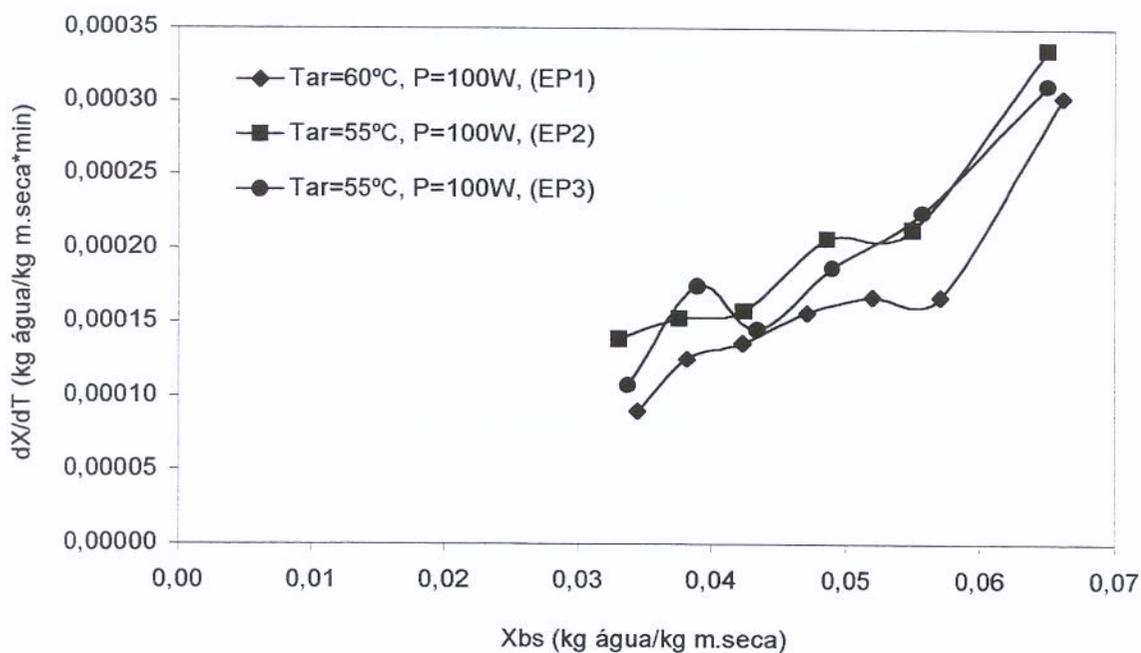


Figura 18 – Taxa de secagem do processo de secagem realizada no sistema piloto

5.4 Aspectos Econômicos da Ampliação de Escala

A justificativa para a compra de um sistema processador a microondas para alcançar uma economia significativa de energia está baseada no fato de que muitos processos de aquecimentos convencionais são tão ineficientes que uma parte ou todo o equipamento poderia ser substituído por uma unidade a microondas mais eficiente, cujos custos de capital podem ser repostos após um número de anos através de economia no uso da energia (METAXAS, 1988).

Para o caso específico da amêndoa de castanha do Brasil foi considerada uma linha de produção de 480 kg/h de amêndoa a 3% (b.u) final, partindo de uma matéria-prima com 10% (b.u.) de umidade inicial. Com base nestes dados, pode-se estimar o custo devido ao processamento por microondas da seguinte forma:

P_{ta} = Potência teórica para aquecer o produto a 80°C:

$$P_{ta} = M * C_p * \Delta T \quad (3)$$

onde, M = kg/s

$$C_p = \text{kJ/kg}^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = ^\circ\text{C}$$

Assim:

$$P_{ta} = (480 / 3600) * 1,9 * 55 = 13,93 \text{ kW}$$

P_{te} = Potência teórica para evaporar a umidade do produto

$$P_{te} = M * (m_1 - m_2 / 100 - m_1) * L_h \quad (4)$$

onde, m_1 e m_2 = umidades inicial e final do produto em base úmida

L_h = calor latente de evaporação da água a 80°C

Assim:

$$P_{ta} = (480 / 3600) * (10 - 3 / 100 - 10) * 2309 = 23,95 \text{ kW}$$

A potência teórica total necessária será igual à soma das anteriores, ou seja:

$$P_t = P_{ta} + P_{te} = 13,93 + 23,95 \approx 37,88 \text{ kW} \quad (5)$$

Considerando uma eficiência de acoplamento de 80% chega-se ao valor da potência do gerador de:

$$P_g = P_t / \eta_a = 37,88 / 0,8 \approx 47,34 \text{ kW} \quad (6)$$

Adota-se o valor mais próximo disponível comercialmente, que é a unidade de 50kW = P_g .

Assumindo-se o valor instalado da unidade geradora de microondas de 915 MHz como de US\$ 1650/kW, o seu custo fica:

$$C_{mo} = \text{US\$ } 1650/\text{kW} * 50\text{kW} = \text{US\$ } 82500 \quad (7)$$

Um aplicador rotativo industrial de microondas de corpo cilíndrico, com capacidade produtiva de 480kg/h, custaria estimativamente US\$ 85000 o que soma um investimento total para o sistema a microondas de valor US\$ 167500.

O custo de operação desta unidade é calculado com base no rendimento de transmissão da potência desde a rede elétrica até a saída do gerador (η_g) de aproximadamente 55%, isto é:

$$P_r = P_g / \eta_g = 47,34 / 0,55 = 86,1 \text{ kW} \quad (8)$$

Ao preço do kWh de $g_o = \text{US\$ } 0,10$ o custo total da energia drenada da rede ficaria:

$$C_{er} = g_o * P_r * 1 \text{ hora} = 0,10 * 86,1 * 1 = \text{US\$ } 8,61/\text{h} \quad (9)$$

Como em uma hora se produz 480kg de amêndoa, tem-se:

$$g_{mol} = C_{er} / 480 = 0,018 \text{ US\$ / kg} \quad (10)$$

Vale destacar que a este custo deverá ser acrescido aquele correspondente à depreciação dos equipamentos, à qual será atribuída uma taxa de 12% ao ano (5000h trabalhadas), isto é:

$$g_{mo2} = (0,12 * 167500) / (5000 * 480) = 0,008 \text{ US\$ / kg} \quad (11)$$

Portanto o custo total da nova alternativa de secagem ficaria então em:

$$g_{mot} = g_{mol} + g_{mo2} = 0,018 + 0,008 = 0,026 \text{ US\$ / kg de produto} \quad (12)$$

Por outro lado, pode-se estimar o valor do investimento relativo ao equipamento de secagem convencional da amêndoa de castanha do Brasil tendo em conta que, para se fazer esta estimativa, foi realizado um ensaio adicional de secagem convencional, utilizando as mesmas condições do ponto central do planejamento da secagem convencional, partindo agora de uma amêndoa com 10% (b.u.) inicial até a condição final de 3% (b.u.).

Nota-se que para esta estimativa foi considerada a mesma produção de 480 kg/h de amêndoa a 3% (b.u.) final, observando uma carga máxima de 7,5 kg de produto por m² de

bandeja e considerando como válido o tempo de residência conseguido neste ensaio adicional que foi de 21 horas, notando-se então, que o material que entrará no processo vai estar com 10% (b.u.) inicial, tem-se:

$$480 \text{ kg / h} * 21 \text{ h} = 10472 \text{ kg retidos (aprox.)} \quad (13)$$

$$10472 \text{ kg} / 7,5 \text{ kg / m}^2 \approx 1396,27 \text{ m}^2 \quad (14)$$

Subdividindo esta metragem entre três unidades dotadas de carrinhos, teríamos uma área por unidade de aproximadamente $465 \text{ m}^2 \approx 5000 \text{ pés}^2$.

Fazendo uso da Figura 16-29, p.713 (PETERS & TIMMERHAUS, 1991) que fornece o custo instalado de secadores, obtém-se o valor estimado da época (Jan. 1990) de US\$ 47.000,00 [tipo atmosférico, de aço carbono], ou seja:

$$\text{Investimento total nos 3 secadores} = \text{US\$ } 141.000,00$$

Atualizando o valor pelo índice M & S (Chemical Engineering 2001, v.108, n.12, p.134), obtém-se:

$$141.000 * 1092 / 904 = \text{US\$ } 170.323,00 \quad (15)$$

A depreciação dos equipamentos pode ser calculada da mesma forma vista pela equação (11), isto é:

$$g_{col} = (0,12 * 170.323) / 5000 * 480 = 0,009 \text{ US\$ / kg} \quad (16)$$

Pode-se estimar ainda o custo da eletricidade consumida pelos ventiladores e mecanização dos carrinhos (BARTHOLOMAI, 1987).

$$g_{co2} = (206,4 \text{ kW} * 1 \text{ h} * \text{US\$ } 0,10 / \text{kWh}) / 480 \text{ kg} = \text{US\$ } 0,043 / \text{kg} \quad (17)$$

Portanto, o custo total da secagem convencional seria:

$$g_{cot} = g_{col} + g_{co2} = 0,009 + 0,043 = 0,052 \text{ US\$} / \text{kg de produto} \quad (18)$$

Vale observar que no processo convencional não foi computado o custo da energia do combustível, em virtude de estar sendo aproveitada industrialmente a casca da castanha do Brasil para esta finalidade. Entretanto, a alternativa de secagem por microondas, apesar de seu custo estimado de metade do custo do processo convencional, poderia também recorrer à co-geração energética, através do aproveitamento da mesma casca para a produção de eletricidade para o processo.

6.0 CONCLUSÕES

Os tempos de secagem obtidos nos processos de secagem convencional e com aplicação de microondas foram diferentes, com substancial redução em favor do processo com aplicação de microondas, ou seja, um produto com umidade entre 10 e 3% (b.u.) teve o seu tempo de secagem de 21 horas pelo processo convencional reduzido para 7 horas com aplicação de microondas.

Analisando-se os processos de secagem do produto com umidade no intervalo entre 6,5 e 3% (b.u.), com aplicação de microondas, conduzidos tanto em bancada como em escala piloto, verificou-se no primeiro caso um tempo médio de 4 horas, enquanto que no processo piloto o tempo ficou reduzido para entre 3 e 3,5 horas. Vale dizer que neste segundo caso foi possível exercer um melhor controle da potência de microondas como uma função da temperatura do produto.

As secagens da amêndoa de castanha do Brasil tanto pelo processo convencional, como pelo de aplicação de energia de microondas, mostraram-se bastante satisfatórias, do ponto de vista de um dos objetivos específicos visados neste trabalho, pois a preservação do produto final obtido manteve-se estável durante todo o período de armazenamento estudado.

O estudo econômico preliminar elaborado, que visava estimar o custo final de produção industrial da nova alternativa de secagem com aplicação de microondas comparativamente ao processo de secagem convencional da amêndoa da castanha do Brasil, permitiu concluir que o novo processo pode ser mais barato do que o meio de secagem convencional, a um valor aproximadamente igual à metade do custo original.

7.0 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ANON. Focus on ... high stability oils. **International Food Ingredients**, v.3, p.47-53, 1993.
- ANON. Uma comparação entre instrumentos modernos para análise de estabilidade oxidativa de óleos, gorduras e alimentos. **Óleos & Grãos**, São Benardo do Campo, p.47-51, set/out, 1995.
- ANTUNES, A.; MAKAKIS, P. Protein supplementation of navy beans with Brazil nuts. **Agriculture Food Chemistry**, v.25, n.05, 1977.
- AOCS (American Oil Chemists' Society). **Official and Tentative Methods**. 3rd. Ed., Champaign, 1997.
- BARROS NETO, B; SCARMINO, I.S.; BRUNS, R.E. **Planejamento e otimização de experimentos**. Campinas: Ed. Unicamp, 1996.
- BARRERA-ARELLANO, D. Estabilidade em Óleos e Gorduras. **Óleos & Grãos**, São Bernado do Campo, p.10-13, jul/ago 1993.
- BARRERA-ARELLANO, D. Estabilidad y utilización de nitrógeno em aceites y grasas. **Grasas y Aceites**, Sevilla, v.49, n.1, p.55-63, 1998.
- BARTHOLOMAI, A. **Food Factories** – Processes, Equipamente, Cost. Alemanha: Weinheim, 1987, 84p.

BERTELLI, M. N. **Estudo de um Protótipo para a secagem contínua de macarrão curto mediante ar quente e microondas.** Campinas, 2001. Tese de Mestrado apresentada ao Departamento de Engenharia de Alimentos da FEA/UNICAMP.

BRENNAN, I.G.; BUTTERS, J.R.; COWELL, N.D.; LILI, A.E.D. **Las operaciones de la ingeniería de los alimentos,** Ed. Acribia, Zaragoza, 1980.

BUFFLER, C. R. **Microwave cooking and processing: engineering fundamentals for the food scientist.** New York, V.N. REINHOLD AVI, 1992. 169 p.

BURR, M.K.; RESSH, R.M. Potatos in: Van Arsel, W.B.; Copley, M.L.; Morgan, A.L. **Food Desidration.** Westport, v.2: AVI, 1973.

CHEFTEL, J.C; CHEFTEL, H.; BESANCON, P. **Introducion a la bioquímica y tecnologia de los alimentos.** Acribia 2. ed.; Zaragoza, 1992.

CNNPA (Comissão Nacional de Normas e Padrões para Alimentos) . Brasil, Ministério da Saúde. Resolução nº22/77 do Decreto-lei nº986 de 21/4/1969.

CUNHA, M. L. **Estudo da secagem do café cereja descascado pelo processo a ar quente assistido a microondas.** Campinas, 1996. 74p. Tese (Mestr.) Fac. Eng. Alim. UNICAMP.

DECAREAU, R. V.; PETERSON, R.A. **Microwave processing and engineering.** Chichester: Ellis Horwood, 1986. 224p.

DOBARGANES, M.C.; & PEREZ-CAMINO, M.C. Frying process: selection of fats and quality control. **International Meeting on Fats & oils Tecnonology Symposium and Exhibition**. Ed Barrera-Arellano, D.; Gonçalves, L.A.G. Campinas, p.58-66, 1991.

EARLE, R. L. **Ingeniaria de los alimentos**. Acribia, Zaragoza, 1992.

FARIA, L.J.G. **Análise experimental do processo de secagem de urucum (Bixa orellana L.) em leito fixo**. Campinas, 1998. Tese de Doutorado apresentada ao Departamento de Termofluidodinâmica da FEQ/UNICAMP.

FOUST, A.S., WENZEL, L.A., CLUMP, C.W., MAUS, L., ANDERSEN, L.B. **Princípios das Operações Unitárias**. Ed. Guanabara Dois S.A., Rio de Janeiro-RJ, 1982.

GEANKOPLIS, C.J. **Transport Process and Unit Operations**. 2 ed., Allyn and Bacon In, New York-NY, 1983.

GONÇALVES, P.A.H. **Otimização da secagem da farinha de Castanha do Pará**. Belém, 1997. Trabalho de conclusão de curso em especialização em tecnologia de alimentos, apresentado ao Departamento de Engenharia Química/UFPA.

GUTIERREZ, E. M. R.; REGITANO D'ARCE, M. A.; RAUEN-MIGUEL, A. M. Estabilidade oxidativa de óleo bruto de castanha do Pará, **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, Brasil, v. 17, n. 01, p. 22-27, 1977.

JONES, P. L. High frequency dielectric heating in paper making. **Drying Technology**, v. 4, n. 2, p. 217-244, May, 1986.

KEEY, R.B. – **Drying of loose and particulates materials**. Hemisphere Publishing Corporation, New York-NY, 1992.

KNEULE, F. **El secado**. In: Enciclopedia de la tecnología química: Técnica de procesos de las industrias químicas e derivadas. Bilbao: Urmo, v. 01, 1976.

LABUZA, T.P. The effect of Water activity on kinetics of Food Deterioration. **Food Technology**, v.39, n.4, p. 36-41, 1980.

MARSAIOLI JR. A. **Desenvolvimento da tecnologia de aplicação de microondas em secador cilíndrico-rotativo combinado com ar quente para produtos granulados**. Campinas, 1991. 197p. Tese (Doutor em Engenharia de Alimentos) - Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.

MENEZES, T.J.B. **Castanha do Pará na Indústria de Alimentos e Bebidas**. v. 04, n. 05, p. 42-43, 1968.

METAXAS, A. C.; MEREDITH, R. J. **Industrial Microwave Heating**. 2. ed. London: Peter Peregrinus, 1988. 357 p.

MORETTO, E.; BARRERA-ARELLANO, D. Estabilidade oxidativa e comportamento térmico de misturas de oleína de palma e óleos vegetais. **Óleos & Grãos**, São Bernado do Campo, p.19-21, mar/abr 1995.

MOTARJEMI, Y. **A study of some physical properties of water in foodstuffs**, 1988, PhD. Thesis, Department of Food Engineering, Lund University, Lund, Sweden.

MUDGETT, R. E. Eletrical properties of foods. In: RAO, M. A. (Ed.) **Engineering properties of food**, 2. Ed. New York, 1996. P. 389-456.

MUJUMDAR, A.S. Preface. In: (Ed.) **Handbook of industrial drying**. New York, Marcel Dekker, 1987.

NERY, J.P. Castanha do Brasil. **Bol. Inst. Tecnol. Alim.** v.20, p.13-25, 1969.

NEVES. C.A. **A castanha do Pará**. Revista de Agricultura, outubro, novembro e dezembro, 1938.

NOREÑA, C.Z.; HUBINGER, M.D.; MENEGALLI, F.C. Técnicas básicas de Determinação de Atividade de Água: uma Revisão, **Bol. SBCTA**, v.30, n.1, p.91-96, 1996.

OKADA, M. Fundamentos sobre a secagem de sólidos. In: TRAVAGLINI. D.A. (Coord.) **Desidratação de frutas e hortaliças: manual técnico**. ITAL, p.1-38, 1987.

PARK, K. J. **Fundamentos de secagem**. Notas de aula. Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP, 1998.

PERÉZ-CAMINO.; MÁRQUEZ-RUIZ, G.; DOBARGANES, M.C. Alteración en grasas usadas en fritura. I comportamiento de aceites de oliva y girasol en freidoras domésticas. **Grasas & Aceites**, Sevilla, v.38, n.5, p.307-312, 1987.

PETERS, M.S.; TIMMERHAUS, K.D. **Plant design and economics for chemical engineers**, 4. Ed. p.713. New York, 1991.

PINTO, L. A. A. & TOBINAGA, S. Modelos de secagem em camada fina de alimentos: uma revisão da literature. **VETOR, Rio Grande**, n. 6, p.33-49, 1968.

PIRSON, S. Annexe liau rapport. Scientifique UCL-BNUT. Extraits du mémoire de fin d'études universitaires promoteur LARONDELLE, Y. 1995.

RÔDEL, W.; SCHEJER, R.; WAGNER, H. Nuevo Metodo para la Determinacion de la Actividad Agua en Productos Cárnios, **Fleischwirtschaft**, v.2, p.36-41, 1990.

ROGEZ, H. Primeiro Seminário do Projeto “Estudo pluridisciplinar sobre a valorização de frutas Amazônicas e de seus derivados”, **VII Castanha do Pará**, Belém, Brasil, janeiro, 1995.

SENISE, J. T. A utilização de rádio frequência e microondas na eletrônica industrial. **Revista Brasileira de Engenharia Química**, v. 8, n. 1, p. 51-61, jul/set, 1985.

SILVA, H.N.C. **A produção e o comércio da castanha do Pará (*Bertoletia excelsa*) no período de 1984 a 1991**. Belém, 1996. Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento Sócio-Econômico da UFPA.

SMIT, **Microondas**. Ed. Érica Ltda, 1987.

SOUZA, H.A. **Castanha do Brasil; Estudo botânico, químico e tecnológico**. Ministério da Agricultura, Rio de Janeiro, 1963.

SOUZA, P.F. **Tecnologia de produtos florestais**. Imprensa Nacional – Rio de Janeiro. p. 274-288, 1945.

TATEO, F. **La composizione acidica della materia guesta estratte daí semi di *Bertholletia excelsa***, **Industrie Alimentari**, Pinerolo, v. 10, n. 02, p. 68-70, 1971.

TIMOTH, H.S. Nuts and Nut Products. **In: Official methods of analysis of AOAC international**. 16 ed. Gaithersburg: AOAC, 1997, 2v., cap. 40, p.40.

VIEIRA, T.M.F.S. & REGITANO-D'ARCE, M.A.B. Antioxidant concentration effect on stability of Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) crude oil. **Archivos Latinoamericanos de Nutrición**, v.49, n.3, p.271-274, 1999.

VON HIPPEL, A.R. **Dielectric and waves** 2. ed. Massachusetts: MIT Press, 1995. 284p.

APÊNDICE – A

• *Secagem Convencional*

Tabela A1 – Valores de umidade em base seca, taxa de secagem e adimensional de umidade para amêndoa seca no forno convencional adaptado com temperatura do ar igual a 55°C.

Tempo (min)	EC1 (v=1,5 m/s)			EC2 (v=2,5 m/s)		
	X-Xe/Xo-Xe	X _{bs}	dX/dT	X-Xe/Xo-Xe	X _{bs}	dX/dT
0	1,0000	0,0704	0,0001620	1,0000	0,0695	0,0001797
60	0,8620	0,0607	0,0000847	0,8449	0,0587	0,0000683
120	0,7898	0,0556	0,0000550	0,7859	0,0546	0,0000668
180	0,7430	0,0523	0,0000535	0,7282	0,0506	0,0000416
240	0,6974	0,0491	0,0000342	0,6923	0,0481	0,0000416
300	0,6682	0,0471	0,0000401	0,6564	0,0456	0,0000253
360	0,6341	0,0447	0,0000268	0,6346	0,0441	0,0000282
420	0,6113	0,0431	0,0000297	0,6103	0,0424	0,0000297
480	0,5859	0,0413	0,0000282	0,5846	0,0406	0,0000267
540	0,5619	0,0396	0,0000223	0,5616	0,0390	0,0000342
600	0,5429	0,0382	0,0000193	0,5321	0,0370	0,0000163
660	0,5264	0,0371	0,0000178	0,5180	0,0360	0,0000356
720	0,5112	0,0360	0,0000164	0,4872	0,0339	0,0000223
780	0,4973	0,0350	0,0000208	0,4680	0,0325	0,0000208
840	0,4796	0,0338	0,0000238	0,4500	0,0313	
900	0,4593	0,0324	0,0000223	-	-	-
960	0,4403	0,0310		-	-	-

Tabela A2 – Valores de umidade em base seca, taxa de secagem e adimensional de umidade para amêndoa seca no forno convencional adaptado com temperatura do ar igual a 65°C.

Tempo (min)	EC3 (v=1,5 m/s)			EC4 (v=2,5 m/s)		
	X-Xe/Xo-Xe	X _{bs}	dX/dT	X-Xe/Xo-Xe	X _{bs}	dX/dT
0	1,0000	0,0704	0,0002141	1,0000	0,0695	0,0002243
60	0,8176	0,0576	0,0001041	0,8064	0,0561	0,0000921
120	0,7290	0,0513	0,0000758	0,7270	0,0505	0,0000743
180	0,6644	0,0468	0,0000624	0,6629	0,0461	0,0000475
240	0,6112	0,0431	0,0000505	0,6219	0,0432	0,0000297
300	0,5682	0,0400	0,0000446	0,5962	0,0414	0,0000520
360	0,5302	0,0373	0,0000253	0,5514	0,0383	0,0000312
420	0,5087	0,0358	0,0000401	0,5244	0,0365	0,0000431
480	0,4745	0,0334	0,0000208	0,4873	0,0339	0,0000252
540	0,4567	0,0322	0,0000223	0,4655	0,0324	0,0000282
600	0,4377	0,0308		0,4411	0,0307	

Tabela A3 – Valores de umidade em base seca, taxa de secagem e adimensional de umidade para amêndoa seca no forno convencional adaptado com temperatura do ar igual a 60°C.

Tempo (min)	EC5 (v=2,0 m/s)			EC6 (v=2,0 m/s)		
	X-Xe/Xo-Xe	X _{bs}	dX/dT	X-Xe/Xo-Xe	X _{bs}	dX/dT
0	1,0000	0,0707	0,0002067	1,0000	0,0704	0,0002140
60	0,8245	0,0583	0,0000937	0,8177	0,0576	0,0000936
120	0,7449	0,0526	0,0000595	0,7380	0,0520	0,0000594
180	0,6944	0,0491	0,0000520	0,6874	0,0484	0,0000520
240	0,6503	0,0459	0,0000476	0,6431	0,0453	0,0000476
300	0,6098	0,0431	0,0000387	0,6025	0,0424	0,0000446
360	0,5770	0,0408	0,0000283	0,5646	0,0398	0,0000312
420	0,5530	0,0391	0,0000401	0,5380	0,0379	0,0000327
480	0,5189	0,0367	0,0000238	0,5101	0,0359	0,0000297
540	0,4987	0,0352	0,0000297	0,4848	0,0341	0,0000178
600	0,4735	0,0335	0,0000253	0,4696	0,0331	0,0000223
660	0,4520	0,0319	0,0000149	0,4506	0,0317	0,0000134
720	0,4394	0,0310		0,4392	0,0309	

Tabela A4 – Valores de umidade em base seca, taxa de secagem e adimensional de umidade para amêndoa seca no forno convencional adaptado com temperatura do ar igual a 60°C.

Tempo (min)	EC7 (v=2,0 m/s)		
	$X-X_e/X_0-X_e$	X_{bs}	dX/dT
0	1,0000	0,0702	0,0001888
60	0,8386	0,0589	0,0000847
120	0,7662	0,0538	0,0000817
180	0,6963	0,0489	0,0000416
240	0,6607	0,0464	0,0000461
300	0,6213	0,0436	0,0000416
360	0,5857	0,0411	0,0000342
420	0,5565	0,0391	0,0000357
480	0,5260	0,0369	0,0000238
540	0,5057	0,0355	0,0000282
600	0,4816	0,0338	0,0000208
660	0,4638	0,0326	0,0000178
720	0,4485	0,0315	0,0000134
750	0,4371	0,0307	

• *Secagem com Aplicação de Microondas*

Tabela A5 – Valores de umidade em base seca, taxa de secagem e adimensional de umidade para amêndoa seca no forno de microondas adaptado com temperatura do ar igual a 60°C.

Tempo (min)	EM1 (P=44 W)			EM2 (P=104 W)		
	X-Xe/Xo-Xe	X _{bs}	dX/dT	X-Xe/Xo-Xe	X _{bs}	dX/dT
0	1,0000	0,1099	0,0003547	1,0000	0,1105	0,0003800
60	0,8063	0,0886	0,0001904	0,7937	0,0877	0,0002036
120	0,7023	0,0772	0,0001589	0,6831	0,0755	0,0001666
180	0,6156	0,0676	0,0001023	0,5927	0,0655	0,0001481
240	0,5597	0,0615	0,0000870	0,5123	0,0566	0,0001437
300	0,5122	0,0563	0,0000751	0,4342	0,0480	0,0001198
360	0,4712	0,0518	0,0000696	0,3692	0,0408	0,0000817
420	0,4332	0,0476	0,0000598	0,3249	0,0359	0,0000762
480	0,4005	0,0440	0,0000609	0,2835	0,0313	
540	0,3672	0,0403	0,0000544	-	-	-
600	0,3375	0,0371	0,0000544	-	-	-
660	0,3078	0,0338	0,0000468	-	-	-
720	0,2822	0,0310		-	-	-

Tabela A6 – Valores de umidade em base seca, taxa de secagem e adimensional de umidade para amêndoa seca no forno de microondas adaptado com temperatura do ar igual a 60°C.

Tempo (min)	EM3 (P=44 W)			EM4 (P=104 W)		
	X-Xe/Xo-Xe	X _{bs}	dX/dT	X-Xe/Xo-Xe	X _{bs}	dX/dT
0	1,0000	0,1094	0,0003459	1,0000	0,1109	0,0004247
60	0,8103	0,0886	0,0002132	0,7701	0,0854	0,0002614
120	0,6934	0,0758	0,0001784	0,6287	0,0697	0,0001862
180	0,5955	0,0651	0,0001457	0,5279	0,0585	0,0001623
240	0,5156	0,0564	0,0001142	0,4401	0,0488	0,0001209
300	0,4529	0,0495	0,0001022	0,3746	0,0415	0,0000871
360	0,3969	0,0434	0,0000957	0,3275	0,0363	0,0000839
420	0,3444	0,0377	0,0000642	0,2821	0,0313	
480	0,3092	0,0338	0,0000457	-	-	-
540	0,2841	0,0311		-	-	-

Tabela A7 – Valores de umidade em base seca, taxa de secagem e adimensional de umidade para amêndoa seca no forno de microondas adaptado com temperatura do ar igual a 55°C.

Tempo (min)	EM5 (P=70 W)			EM6 (P=70 W)		
	X-Xe/Xo-Xe	X _{bs}	dX/dT	X-Xe/Xo-Xe	X _{bs}	dX/dT
0	1,0000	0,1086	0,0003424	1,0000	0,1093	0,0003490
60	0,8109	0,0881	0,0002239	0,8080	0,0883	0,0002001
120	0,6873	0,0747	0,0001783	0,6979	0,0763	0,0001914
180	0,5888	0,0640	0,0001402	0,5926	0,0649	0,0001142
240	0,5114	0,0556	0,0001239	0,5298	0,0580	0,0001272
300	0,4430	0,0481	0,0000870	0,4598	0,0504	0,0001185
360	0,3950	0,0429	0,0000870	0,3946	0,0433	0,0000870
420	0,3469	0,0377	0,0000674	0,3467	0,0380	0,0000652
480	0,3097	0,0337	0,0000652	0,3108	0,0341	0,0000315
540	0,2737	0,0297		0,2934	0,0322	0,0000196
560	-	-		0,2827	0,0311	

Tabela A8 – Valores de umidade em base seca, taxa de secagem e adimensional de umidade para amêndoa seca no forno de microondas adaptado com temperatura do ar igual a 55°C.

Tempo (min)	EM7 (70 W)		
	X-Xe/Xo-Xe	X _{bs}	dX/dT
0	1,0000	0,1090	0,0003414
60	0,8190	0,0885	0,0002011
120	0,7083	0,0765	0,0001946
180	0,6013	0,0648	0,0001261
240	0,5319	0,0572	0,0001163
300	0,4678	0,0502	0,0001055
360	0,4098	0,0439	0,0001022
420	0,3536	0,0378	0,0000609
480	0,3201	0,0341	0,0000587
540	0,2878	0,0306	