



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA QUÍMICA**



**ESTUDO DE TÉCNICAS HÍBRIDAS DE DESIDRATAÇÃO DE**  
**RESÍDUOS DE ACEROLA**

**GERALDO DANIEL RIBEIRO NOGUEIRA**

Uberlândia – MG

2016



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA QUÍMICA**



**ESTUDOS DE TÉCNICAS HÍBRIDAS DE DESIDRATAÇÃO DE**  
**RESÍDUOS DE ACEROLA**

Geraldo Daniel Ribeiro Nogueira

Orientadores:

Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte

Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química

Uberlândia – MG

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

N778e  
2016      Nogueira, Geraldo Daniel Ribeiro, 1990-  
             Estudo de técnicas híbridas de desidratação de resíduos  
             de acerola / Geraldo Daniel Ribeiro Nogueira. - 2016.  
             106 f. : il.

Orientador: Claudio Roberto Duarte.

Marcos Antonio de Souza Barrozo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Química - Teses. 2. Secagem - Teses.  
3. Agroindústria - Teses. 4. Resíduos agrícolas - Teses. I. Duarte,  
Claudio Roberto. II. Barrozo, Marcos Antonio de Souza.  
III. Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Química. IV. Título.

CDU: 66.0

---

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA, EM 15 DE FEVEREIRO DE 2016.

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte  
Orientador (PPGEQ/UFU)



Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo  
Orientador (PPGEQ/UFU)



Prof. Dr. Ricardo Corrêa de Santana  
(FEQUI/UFU)



Profª. Drª. Beatriz Cristina Silvério  
(ICTE/UFTM)

Dedico aos meus pais, à minha irmã e àqueles  
que sempre torceram e acreditaram em mim!

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Sinval Luiz Ribeiro e Maria Nogueira Ribeiro, pelo apoio emocional e por acreditarem em mim. À minha irmã, Laura Ribeiro Nogueira, pela amizade, carinho e companheirismo.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte e Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo, por terem me dado a oportunidade de trabalhar neste projeto, pelo apoio constante e pela transmissão de conhecimento.

Aos colegas e amigos de laboratório Glaucia Souza, Thiago Taham, Diogo Segalen, Priscila Bernades, Suélen Gonçalves, Marcela Caixeta, Laiane Andrade, Angélica Reis, Lidja Dahiane, Neiton Silva, Yanne Kyriakidis, pelo apoio durante esta etapa.

Às técnicas do laboratório de Engenharia Química Cléo Vieira, Francielle Batista e Roberta, pela disposição em ajudar em tudo que era possível.

Aos alunos de iniciação Claudia Andrade, Gabriela Sella, Kindly Miranda e Nathaniel Terra pela participação na execução deste trabalho.

Aos meus amigos passados e presentes externos à universidade por tornarem este período mais leve.

“How wild it was, to let it be.”

— Cheryl Strayed, *Wild: From Lost to Found*  
on the Pacific Crest Trail

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>I</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>III</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>IV</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>V</b>
<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>3</b>
<b>2.1 - Fruticultura brasileira .....</b>	<b>3</b>
2.1.1 - Acerola .....	4
<b>2.2- Compostos bioativos .....</b>	<b>7</b>
2.2.1 – Compostos fenólicos e flavonoides .....	8
2.2.2 – Ácido cítrico e Ácido ascórbico .....	8
<b>2.3 – Secagem .....</b>	<b>9</b>
2.3.1 – Umidade de equilíbrio .....	10
2.3.2 – Taxa de secagem.....	12
2.3.3 – Cinética de secagem .....	14
2.3.4 – Transferência simultânea de calor e massa em camada espessa .....	16
<b>2.4 – Secagem híbrida.....</b>	<b>17</b>
2.4.1 – Micro-ondas.....	18
2.4.1.1 – Propriedades Dielétricas .....	19
2.4.1.2 – Aquecimento por micro-ondas .....	21
2.4.1.3 – Secagem assistida por micro-ondas .....	22
2.4.1.4 – Secagem com micro-ondas a vácuo.....	23
2.4.2 – Leito fixo .....	25
2.4.2.1 – Infravermelho .....	25
2.4.2.2 – Leito fixo auxiliado por infravermelho .....	26
<b>2.5 – Pré-tratamentos .....</b>	<b>26</b>
<b>2.6 – Estudos relevantes envolvendo o resíduo de acerola .....</b>	<b>27</b>
<b>CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>32</b>
<b>3.1 – Material .....</b>	<b>32</b>
<b>3.2 – Análises .....</b>	<b>32</b>
3.2.1 – Umidade .....	33



3.2.2 – Teor de cinzas .....	33
3.2.3 – Massa específica aparente .....	33
3.2.4 – Massa específica real .....	33
3.2.5 – Porosidade de um leito preenchido com resíduo de acerola.....	34
3.2.6 – Ângulo de repouso estático.....	34
3.2.7 – Ângulo de repouso dinâmico .....	35
3.2.8 – Determinação do diâmetro da partícula.....	36
3.2.9 – Potencial hidrogeniônico (pH) .....	36
3.2.10 – Açúcar Redutor Total (ART).....	36
3.2.11 – Compostos bioativos.....	37
3.2.11.1 – Acidez Titulável Total (ATT).....	37
3.2.11.2 – Teor de Fenólicos Totais (TPT) .....	37
3.2.11.3 – Teor de Flavonoides Totais (TFT).....	38
3.2.11.4 – Teor de ácido ascórbico (AA) .....	38
<b>3.3 – Análises microbiológicas .....</b>	<b>39</b>
3.3.1 – Contagem total de microrganismos mesófilos aeróbios .....	39
3.3.2 – Contagem bolores e leveduras .....	40
<b>3.4 – Secagem .....</b>	<b>40</b>
3.4.1 – Secagem em micro-ondas .....	41
3.4.2 – Secagem em micro-ondas a vácuo.....	43
3.4.3 – Pré-tratamentos .....	45
3.4.3.1 – Branqueamento .....	45
3.4.3.2 – Ultrassom.....	45
3.4.3.3 – Etanol.....	46
3.4.4 – Secagem em leito fixo auxiliado por infravermelho .....	46
<b>CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>49</b>
<b>4.1 – Caracterização do resíduo de acerola .....</b>	<b>49</b>
<b>4.2 – Análises microbiológicas .....</b>	<b>51</b>
<b>4.3 - Secagem .....</b>	<b>53</b>
4.3.1 - Secagem em micro-ondas .....	53
4.3.1.1 - Considerações gerais e cinética desidratação.....	53
4.3.1.2 - Compostos bioativos .....	56
4.3.2 - Secagem em micro-ondas a vácuo .....	57
4.3.2.1 - Considerações gerais e cinética desidratação.....	57
4.3.2.2 - Compostos bioativos .....	60
4.3.3 - Pré-tratamentos.....	63
4.3.4 - Secagem em micro-ondas a vácuo com pré-tratamento.....	66
4.3.4.1 - Considerações gerais e cinética desidratação.....	66
4.3.4.2 – Compostos bioativos.....	69
4.4.5 – Secagem em leito fixo auxiliado por infravermelho .....	72
4.4.5.1 – Considerações gerais e cinética desidratação .....	72
4.4.5.2 – Compostos bioativos.....	78
<b>CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES .....</b>	<b>81</b>

<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>83</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>84</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>101</b>
<b>Apêndice A – Teste IMPI (InternationalMicrowave Power Institute) .....</b>	<b>102</b>
<b>Apêndice B – Ajuste dos modelos de cinética de secagem rivais aos dados da secagem do resíduo de acerola em micro-ondas.....</b>	<b>103</b>
<b>Apêndice C – Ajuste dos modelos de cinética de secagem rivais aos dados da secagem do resíduo de acerola em micro-ondas a vácuo.....</b>	<b>104</b>
<b>Apêndice D – Ajuste dos modelos de cinética de secagem rivais aos dados da secagemem micro-ondas a vácuo do resíduo de acerola tratado com imersão em etanol.....</b>	<b>105</b>
<b>Apêndice E – Resultados obtidos para os compostos bioativos na secagem convectiva do resíduo de acerola em leito fixo auxiliado por infravermelho .....</b>	<b>106</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Frutos de acerola maduros de diversos tamanhos. ....	4
Figura 2.2 – Esquema do reservatório para testes estáticos de umidade de equilíbrio.....	11
Figura 2.3 - Curva da taxa de secagem.....	12
Figura 2.4 – Períodos da taxa de secagem em sólidos porosos. ....	13
Figura 2.5 – Representação de uma onda eletromagnética. ....	18
Figura 2.6 – Espectro da radiação eletromagnética.....	19
Figura 2.7 – Rotação dipolar induzida por um campo elétrico. ....	22
Figura 2.8 – Comparação entre secagem convectiva, micro-ondas a vácuo e liofilização. ...	24
Figura 3.1 – Resíduo de acerola. ....	32
Figura 3.2 - Estrutura para medição do ângulo de repouso estático.....	35
Figura 3.3 - Estrutura para medição do ângulo de repouso dinâmico. ....	35
Figura 3.4 – Fluxograma experimental para a desidratação do resíduo de acerola.....	41
Figura 3.5 – Esquema para secagem em micro-ondas.....	43
Figura 3.6 – Esquema do aparato experimental para secagem em micro-ondas a vácuo.....	43
Figura 3.7 – Esquema da unidade experimental para secagem em leito fixo auxiliado por infravermelho.....	46
Figura 3.8 – Mostrador tipo calador. ....	48
Figura 4.1 – Curvas de cinética de secagem para diferentes potências. ....	54
Figura 4.2 – Perfil de temperatura do resíduo de acerola desidratado em diferentes potências. ....	55
Figura 4.3 – Variação de compostos bioativos após a desidratação do resíduo de acerola em micro-ondas: (a) TPT, (b) TFT, (c) ATT.....	56
Figura 4.4 – Temperatura do material (a) e cinética de secagem (b) do resíduo de acerola desidratado em micro-ondas a vácuo com potência de 229 W e diferentes níveis de vácuo aplicado. ....	59
Figura 4.5 – Variação dos compostos bioativos para secagem do resíduo de acerola em micro-ondas a vácuo: (a) TPT, (b) TFT e (c) AA. ....	62
Figura 4.6 – Teores de compostos bioativos do resíduo de acerola <i>in natura</i> e após a secagem em micro-ondas a vácuo sem (controle) e com pré-tratamentos: (a) TPT, (b) TFT e (c) AA. ....	65
Figura 4.7 – Temperatura do material (a) e cinética de secagem (b) do resíduo de acerola pré-tratado com imersão em etanol e desidratado em micro-ondas a vácuo com potência de 229 W e diferentes níveis de vácuo aplicado. ....	67
Figura 4.8 – Variação dos compostos bioativos para secagem do resíduo de acerola IE em micro-ondas a vácuo: (a) TPT, (b) TFT e (c) AA.....	71
Figura 4.9 - Distribuições de umidade adimensional do resíduo de acerola no decorrer do tempo para diferentes posições axiais (Experimentos (a) 1 e (b) 2).....	74
Figura 4.10 - Distribuições de umidade adimensional do resíduo de acerola no decorrer do tempo para diferentes posições axiais (Experimentos (a) 5 e (b) 6).....	76
Figura 4.11 - Distribuições de umidade adimensional do resíduo de acerola no decorrer do tempo para diferentes posições axiais (Experimentos (a) 3 e (b) 4).....	77
Figura 4.12 - Distribuições de umidade adimensional do resíduo de acerola no decorrer do tempo para diferentes posições axiais (Experimentos (a) 7, (b) 8 e (c) 9). ....	78

Figura 4.13 – TPT do resíduo de acerola para as diferentes posições axiais na secagem em leito fixo auxiliado por infravermelho e do resíduo <i>in natura</i> .....	79
Figura 4.14 – AA do resíduo de acerola para as diferentes posições axiais na secagem em leito fixo auxiliado por infravermelho e do resíduo <i>in natura</i> .....	80

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características físico-químicas e nutricionais da acerola em diferentes graus de maturação. ....	6
Tabela 2.2 – Composição centesimal do fruto de acerola. ....	7
Tabela 2.3 – Modelos de cinética de secagem. ....	15
Tabela 3.1 - Constituintes do meio de cultura Ágar Padrão. ....	39
Tabela 3.2 - Constituintes do meio de cultura Ágar Padrão. ....	40
Tabela 3.3 – Planejamento experimental para desidratação do resíduo de acerola em micro-ondas a vácuo. ....	44
Tabela 3.4 – Planejamento experimental na desidratação em leito fixo auxiliado por infravermelho. ....	47
Tabela 4.1 - Caracterização do resíduo de acerola e comparação com a literatura. ....	50
Tabela 4.2 – Crescimento* de bactérias mesófilas aeróbias ou facultativas no resíduo de acerola ao longo do tempo. ....	52
Tabela 4.3 – Crescimento* de bolores e leveduras no resíduo de acerola ao longo do tempo. ....	53
Tabela 4.4 - Coeficientes para modelo de Overhults et al. (1973) para a desidratação por micro-ondas. ....	54
Tabela 4.5 - Coeficientes para modelo de Overhults et al. (1973) para a desidratação por micro-ondas a vácuo. ....	58
Tabela 4.6 – Adimensionalização das variáveis independentes na secagem de resíduo de acerola em micro-ondas a vácuo. ....	58
Tabela 4.7 – Teores de compostos bioativos dos resíduo de acerola ao final de cada experimento de secagem em micro-ondas a vácuo. ....	60
Tabela 4.8 - Umidade do resíduo de acerola após cada pré-tratamento e tempo de secagem necessário. ....	64
Tabela 4.9 - Coeficientes para modelo de Overhults et al. (1973) para a desidratação do resíduo de acerola IE em micro-ondas a vácuo. ....	68
Tabela 4.10 – Teores de compostos bioativos dos resíduo de acerola pré-tratado com IE ao final de cada experimento de secagem em micro-ondas a vácuo. ....	69
Tabela 4.11 – Teores de umidade inicial, final e de equilíbrio (b.u.) do resíduo de acerola nas posições axiais do leito fixo. ....	73
Tabela 4.12 – Radiação infravermelha (IR), velocidade (v) e temperatura do ar de secagem (T) para cada experimento. ....	78
Tabela A.1: Determinação da potência de cada nível do forno micro-ondas. ....	102

## RESUMO

A fruticultura é uma atividade comercial consolidada no Brasil. No país são produzidas mais de 41 milhões de toneladas de frutas, colocando-o atrás apenas da China e da Índia. As frutas frescas podem ser comercializadas *in natura* ou seguir para a industrialização primária ou secundária que origina frutas processadas das mais variadas formas, como polpas, sucos e geleias. Durante as etapas de processamento há a geração de materiais não aproveitados, os chamados de resíduos. Estima-se que 40 % em volume das frutas enviadas para a indústria se tornam resíduos. Os quais são constituídos por uma mistura heterogênea de sementes, bagaços e cascas, que são ricos em ácido ascórbico, tocoferóis, carotenoides e em compostos fenólicos. Produtores agrícolas e indústrias enfrentam o problema do seu descarte, pois apesar de este ser um material biodegradável ele necessita de um tempo de decomposição, transformando-se, assim, em uma fonte de poluente ambiental. A secagem híbrida, ou seja, a associação de técnicas distintas em um único processo destaca-se como uma alternativa para o reaproveitamento destes resíduos, transformando-o para a alimentação humana e animal. Neste estudo foi abordada a caracterização do resíduo de acerola proveniente da indústria de polpas, a faixa de umidade segura para o armazenamento e a aplicação de técnicas híbridas de desidratação para possível reaproveitamento. Verificou-se que o resíduo de acerola é uma fonte rica em nutrientes e compostos bioativos e com umidades abaixo de 26% não apresentam crescimento microbiano. Em seguida, foi realizada a desidratação do resíduo de acerola através de duas técnicas híbridas: micro-ondas a vácuo e convectiva em leito fixo auxiliado por infravermelho. Testes preliminares indicaram a viabilidade do uso de micro-ondas como forma de desidratação, ocasionando inclusive o enriquecimento de alguns compostos, como o teor de flavonoides totais. Quando o vácuo foi acoplado ao processo, minimizou-se a degradação do ácido ascórbico devido à diminuição das reações de oxidações. Diversos pré-tratamentos ainda foram testados com o intuito de aprimorar a secagem em micro-ondas a vácuo. Dentre os quais, o que obteve maior destaque foi a imersão do resíduo em etanol. A secagem do resíduo após a imersão em etanol apresentou redução média de 54% no tempo de secagem, além de aumentar o teor de ácido ascórbico. O modelo de Overhults foi o que melhor representou os dados de cinética de secagem do resíduo de acerola tanto na desidratação em micro-ondas quanto em micro-ondas a vácuo (com e sem pré-tratamento). Verificou-se também que a utilização de radiação infravermelha foi positiva para minimizar a heterogeneidade característica da desidratação em leito fixo.

Palavras-chave: secagem, resíduos agroindustriais, tecnologias híbridas.

## ABSTRACT

Fruit growing is a solid commercial activity in Brazil. Over 41 million tons of fruits are produced per year, placing it behind only China and India. Fruits can be sold fresh or processed, as pulps, juices and jams. During the processing, agro-industrial residues are generated. It is estimated that more than 40% in volume of the fruits sent to be processed will become agro-industrial residues. These residues are constituted by a heterogeneous mix of seeds, peels and residual pulp. Which are rich in ascorbic acid, tocopherols, carotenoids and phenolic compounds. Industries and producers face the problem of its disposal. Although it is a biodegradable material, the residues require some time to decompose. Within this context, hybrid drying techniques rise as an alternative to reuse these residues turning it into flour aiming food products. Therefore, in this study acerola residue was characterized by its physical-chemical properties, maximum moisture content for safe storage and the use of hybrid dehydration techniques for its possible reuse. It was found that acerola residue is a rich source of nutrients and bioactive compounds and when it has moisture content below 26% does not present favorable conditions for microbiological growth. Then, drying experiments were performed in two different hybrid dryers: vacuum microwave and fixed-bed convective dryer aided by infrared radiation. Preliminary tests showed that the use of microwave was viable as a dehydration method, which caused an increase in some compounds, such as total flavonoids content. It was noticed that ascorbic acid degradation due to oxidation was reduced when vacuum was added to the process. Several pre-treatments were tested in order to enhance vacuum microwave drying. Among which, the pre-treatment where the residue was immersed in ethanol got the most prominent results including average reduction of 54% of the process and ascorbic acid content increases. The Overhults model fitted better the experimental drying kinetic data for acerola residue dehydration in both the microwave and in vacuum microwave (with and without pre-treatment). It was also found that the use of infrared radiation had a positive effect in order to minimize heterogeneity characteristic of dehydration in a fixed bed.

**Keywords:** drying, agro industrial residues, hybrid technologies.

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

O Brasil é um dos três maiores produtores de frutas do mundo. Em 2013, a produção foi superior a 41,6 milhões de toneladas de frutos, o que representa, aproximadamente, 5% de toda produção mundial. De acordo com a Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (CNA), cerca de 50% da produção brasileira é destinada ao mercado de frutas frescas e o restante para transformação primária e secundária (CNA, 2016).

A industrialização de sucos e polpas de frutas permite que derivados de frutas regionais, principalmente do norte e nordeste do Brasil, como o açaí, possam ser degustados em outras regiões do país e do mundo, além de reduzir os desperdícios gerados por transporte e manuseio impróprio (SEBRAE-SC, 2013). Alimentos industrializados a base de frutas ainda são capazes de fornecer nutrientes, vitaminas e compostos antioxidantes, além de serem de fácil preparo e livres de conservantes (no caso das polpas).

Devido à intensa atividade agrícola, o Brasil também é um dos países que mais produzem resíduos agroindustriais, (CATANEO et al., 2008). Estima-se que para a produção de sucos e polpas de frutas sejam gerados de 30 a 40% do volume de resíduos constituídos, principalmente, por frutas refugadas, cascas, sementes, caroços e bagaço. (MARTINS e FARIAS, 2002).

Estudos têm demonstrado que os resíduos agroindustriais são ricos em ácido ascórbico, tocoferóis, carotenoides e compostos fenólicos, e por isso, muitas vezes, exibem atividade antioxidante ainda mais elevada do que as frações da polpa (WOLFE et al., 2003; MANACH et al., 2004; AJILA et al., 2007). Antioxidantes estes que ajudam na prevenção de certas doenças degenerativas associadas ao envelhecimento, como câncer, doenças cardiovasculares, catarata, declínio do sistema imune e disfunções cerebrais (ATOUI et al., 2005).

Como a quantidade de resíduos pode chegar a muitas toneladas, agregar valor a esses subprodutos é de interesse econômico e ambiental, necessitando de investigação científica e tecnológica, que possibilite sua utilização eficiente, econômica e segura. Para poder aproveitar os resíduos de frutas, uma alternativa promissora é o processo de secagem. A



secagem beneficia o transporte (diminuindo o volume e peso do material), assim como aumenta os nutrientes por unidade de massa seca e a vida útil, pois reduz a sua atividade de água que afeta o crescimento microbiano, reações enzimáticas e outras reações de origem química e física.

Há diversos equipamentos com dinâmicas diferentes para a operação de desidratação, como a secagem em leito fixo, leito fluidizado, leito de jorro, leito rotativo, liofilização, infravermelho, micro-ondas, entre outros. A fim de aperfeiçoar o processo de desidratação pode-se fazer uso de técnicas híbridas, ou seja, associação tecnologias em um único processo como, por exemplo, micro-ondas a vácuo e a associação do leito fixo com radiação infravermelha. Por isso, há a necessidade de estudos fundamentais para o entendimento do fenômeno, assim como das condições de operação para o avanço de tecnologias híbridas.

Diante do exposto, o objetivo geral deste trabalho é estudar a utilização de tecnologias híbridas na desidratação de resíduos do processamento de acerola. Visa-se, com isso, encontrar as condições com elevada eficiência energética e que preservem as qualidades nutricionais, bem como os teores dos compostos bioativos.

A proposta intitulada “Estudo de técnicas híbridas na desidratação de resíduos de acerola” tem como objetivos específicos:

- Investigar as propriedades físico-químicas e nutricionais do resíduo agroindustrial proveniente da produção de polpa de acerola a fim de caracterizá-lo como uma possível fonte de nutrientes;
- Determinar a faixa de umidade do resíduo de acerola apropriada para o armazenamento e que impeça o desenvolvimento de microrganismos;
- Avaliar o conteúdo de compostos fenólicos e flavonoides totais e o teor de ácido ascórbico dos resíduos do processamento de acerola *in natura* e após secas com técnicas híbridas (micro-ondas a vácuo e secagem em leito fixo auxiliada por radiação infravermelha);
- Avaliar o efeito de pré-tratamentos do resíduo de acerola sobre a secagem em micro-ondas a vácuo;
- Estudar o desempenho da secagem em micro-ondas a vácuo e em leito fixo auxiliada por radiação infravermelha, tendo em vista a qualidade final do resíduo desidratado.

## CAPÍTULO 2

### REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1 - Fruticultura brasileira

Com polos produtivos espalhados por todo país, mas concentrados principalmente no nordeste e interior do estado de São Paulo, o Brasil apresenta grande potencial para exportação de frutas frescas e produtos agrícolas industrializados, como polpas, sucos, compotas e geleias. Os mercados da Holanda, da Bélgica, dos Estados Unidos e do Japão recebem mais de 90% de toda exportação de frutas frescas brasileiras. Entretanto, a falta de acordos comerciais prejudicam as exportações brasileiras, que são cerca de 3% de toda a produção nacional. No mercado interno, a melhoria do poder aquisitivo e a crescente preocupação com alimentação saudável faz a fruticultura ter uma boa perspectiva de crescimento (CNA, 2016).

O comércio de frutas tropicais *in natura* encontra grandes dificuldades, pois as frutas frescas se deterioram em poucos dias. Estimam-se em até 50% as perdas de frutas e hortaliças, principalmente por manuseio e preservação inadequados (CHITARRA e CHITARRA, 2005). Assim, a comercialização de derivados de frutas processadas se apresenta como uma solução para reduzir este desperdício. Em 2015, no acumulado até novembro, o Brasil já havia exportado mais de 3,15 mil toneladas de polpas de frutas, favorecendo a balança comercial com uma quantia de US\$ 7,6 milhões, segundo dados consultados no sistema AliceWeb do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior.

Uma fruta com crescente destaque na indústria de polpas e sucos é a acerola, pois além de sabor agradável ela é rica em compostos bioativos, como ácido ascórbico e fenólicos. No Brasil, o cultivo encontra condições climáticas favoráveis para a sua produção, que vem se acentuando de forma persistente e já despertou interesse dos produtores e consumidores brasileiros e estrangeiros. Entretanto, dados relativos à produção nacional, consumo e industrialização da fruta ainda são escassos.

### 2.1.1 - Acerola

Também conhecida como “Cereja das Antilhas” ou “Cereja de Barbados”, a acerola é originária do Caribe, América Central e norte da América do Sul. Os frutos da acerola são drupas carnosas pequenas de formas variáveis (arredondados, cônicos ou ovalados) com epicarpo fino, liso ou com sulcos, e de coloração que varia do alaranjado ao vermelho intenso de acordo com grau de maturação e/ou cultivo. O mesocarpo é carnoso, suculento, de acidez elevada e representa de 70% a 80% do peso. A acerola possui três sementes envolvidas por endocarpos trilobados e reticulados distintos (ALMEIDA et al., 2002; NASSIF e CÍCERO, 2006; COSTA et al., 2003; GOMES, 2015).



Figura 2.1 – Frutos de acerola maduros de diversos tamanhos.

Fonte: Gomes (2015).

Por ser rica em vitamina C, ela foi difundida em diversos países e vem apresentando boa adaptação, principalmente, no Brasil, o qual é o principal produtor. Entretanto, a introdução da acerola no país tem sua história discutível. Cita-se a Universidade Federal Rural de Pernambuco como responsável pela vinda de sementes de acerolas de Porto Rico em 1955. Porém, o Catálogo de Plantas dos viveiristas Dieberger, de 1940, já citava mudas de acerolas em Limeira – SP (MARINO NETTO, 1986).

Hoje, o Brasil destaca-se como maior produtor, consumidor e exportador de acerola. A produção em escala industrial pode ser encontrada em todo território nacional, tendo como destaque a região nordeste. Bahia, Ceará, Paraíba e Pernambuco detêm cerca de 60% da

produção nacional, seguida pela região sudeste, que é responsável por, aproximadamente, 15% (FURLANETO e NASSER, 2015).

As acerolas podem ser classificadas como doces ou ácidas, a depender da acidez total titulável (ATT), dos sólidos solúveis totais e dos teores de açúcares. No Brasil são cultivados mais de 40 variedades de acerola, sendo as principais Apodi (BRS 235), Cabocla, Cereja (BRS 236), Frutacor (BRS 238), Olivier, Roxinha (BRS 237), Rubra, Sertaneja (BRS 152) (ALMEIDA et al., 2002).

Em 2012, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) apresentou a cultivar de aceroleira BRS 366-Jaburu. Esta nova variedade proporciona até sete safras anuais, mais ricas em vitamina C e que começa a produzir a partir do 8º mês após o plantio. A planta de porte baixo a médio tem uma produção média de 100 kg/planta/ano, enquanto variedades tradicionais produzem cerca de 40 kg/planta/ano, a partir do 3º ou 4º ano após o plantio. A Embrapa ainda desenvolve uma outra variedade mais saborosa. Espera-se que até o final dos testes, em 2016, tenham-se frutas maiores (acima de 10g), mais doces e com maior vida útil, estimulando assim o consumo de acerola *in natura* (FURLANETO e NASSER, 2015; EMBRAPA, 2012).

A aceroleira é uma planta rústica se desenvolve bem tanto em climas tropicais quanto subtropicais, arbustiva e pode alcançar até 3 metros de comprimento, dando frutos quase que de forma contínua se houver água disponível, insolação suficiente e temperaturas médias acima de 20°C (RITZINGER e RITZINGER, 2011). O teor de vitamina C que os frutos apresentarão tem relação íntima com a insolação durante o cultivo da acerola e o grau de maturação (ARAÚJO e MINANI, 1994; FURLANETO e NASSER, 2015).

Apesar de sabor e textura agradáveis, o consumo *in natura* da acerola é limitado, pois a fruta possui um tecido protetor frágil e de rápida maturação (GONZAGA NETO e SOARES, 1994; RITZINGER e RITZINGER, 2011; CAETANO et al., 2012). As frutas podem ser conservados por até 10 dias em temperatura ideal de 7°C, sendo que aquelas destinados à exportação devem ser congelados a -20°C. Por isso, a maior parte da produção brasileira é destinada para a indústria de processamento (FURLANETO e NASSER, 2015). Depois de industrializada, a acerola pode ser comercializada na forma de sucos, polpas, geleias, cápsulas vitamínicas, refrigerantes, entre outros (BARBOZA et al., 2006).

A colheita deve ser realizada de forma manual e diariamente, pois no mesmo pé pode haver frutas prontas para a colheita, flores e frutas imaturas. Quando o destino é o consumo *in natura* ou para a indústria de polpas e sucos, o indicador do ponto de colheita é uma fruta

avermelhada e firme. Se o destino for a indústria farmacêutica, a acerola deve ser colhida ainda esverdeada ou verde-amarelada (GONGATTI NETTO et al. 1996; SOBRINHO et al., 1998).

O teor de ácido ascórbico (constituente da vitamina C), assim como outras características físico-químicas, também é dependente do estágio de maturação. Quando a fruta está madura, o teor de ácido ascórbico pode ser de 20% a 50% inferior ao teor da acerola ainda verde (VENDRAMINI e TRUGO, 2000; FERREIRA et al., 2009). A Tabela 2.1 apresenta a variação de algumas características para diferentes graus de maturação.

Tabela 2.1 – Características físico-químicas e nutricionais da acerola em diferentes graus de maturação.

Característica	Estágio de maturação		
	Verde (imaturo)	Amarelo (intermediário)	Vermelha (madura)
Vitamina C (mg/ 100g)	2164	1065	1074
Proteína (g/100g)	1,2	0,9	0,9
Cinzas (g/100g)	0,4	0,4	0,4
Umidade (g/100g)	91,0	92,4	92,4
Acidez titulável	18,2	15,6	34,4
pH	3,7	3,6	3,7
Sólidos solúveis (°Brix)	7,8	7,7	9,2
Açúcar redutor (g/100g)	3,3	4,2	4,4
Açúcar não-redutor (g/100g)	1,1	0,1	n.d.*
Açúcar total (g/100g)	4,4	4,3	4,4

\*não detectado.

Fonte: Vendramini e Trugo (2000).

A acerola ainda possui alta atividade antioxidante, pois contém nutrientes e compostos bioativos como compostos fenólicos, flavonoides, tiamina, riboflavinas, niacina, antocianinas e carotenoides, além de minerais como ferro e cálcio (ARAUJO e MINAMI,

2005). Tais compostos auxiliam na prevenção e combate de doenças degenerativas, câncer e envelhecimento precoce (DEMBITSKY et al., 2011). Na Tabela 2.2 é apresentada a composição da acerola.

Tabela 2.2 – Composição centesimal do fruto de acerola.

<b>Composição</b>	<b>Fruto inteiro (4,8 g)</b>
Água	4,39 g
Carboidratos	0,37g
Preteína	0,02 g
Cálcio	1 mg
Ferro	0,01 mg
Fósforo	1 mg
Potássio	7 mg
Vitamina C	80,5 mg
Tiamina	0,001 mg
Niacina	0,019 mg

Fonte: Adaptado de Unifesp (2015)

## 2.2– Compostos bioativos

Os radicais livres são os elétrons independentes não-pareados presentes em moléculas orgânicas e inorgânicas. Essa configuração faz com que os elétrons sejam altamente instáveis, quimicamente reativos e com períodos de meia-vida curtos (HALLIWELL, 1995; POMPELLA, 1997). A formação de radicais livres em seres vivos está relacionada com a ação catalítica enzimática que ocorre durante os processos do metabolismo celular, como respiração aeróbica e, também, pela exposição a fatores exógenos, como a radiação ultravioleta e uma dieta irregular (CERUTTI, 1991). Os radicais livres são combatidos por compostos antioxidantes, entretanto quando em altas concentrações são capazes de provocar a morte celular, induzindo envelhecimento precoce, doenças cardiovasculares, degenerativas e neurológicas, e alterações no DNA, o que desencadeia processos de mutagênese e carcinogênese (ANDERSON, 1996; POULSEN et al., 1998)

No combate ao excesso de radicais livres realizado pelos compostos antioxidantes tem-se destaque para os compostos fenólicos, flavonoides e ácido ascórbico oriundos de

produtos naturais, que atuam como sequestradores dos elétrons desemparelhados e quelantes na etapa de iniciação e propagação do processo oxidativo (SHAHIDI et al., 1992).

### **2.2.1 – Compostos fenólicos e flavonoides**

Os compostos fenólicos não são sintetizados pelos humanos e por isso devem ser consumidos através de uma dieta rica em vegetais. Dentre os compostos fenólicos, os flavonoides merecem destaque. Esses compostos são de considerável importância, pois são capazes de inibir o processo de peroxidação lipídica (HARTMAN e SHANKEL, 1990; HALLIWELL et al., 1995; DECKER, 1997).

Na natureza, são descritos mais de 8000 compostos fenólicos. Eles podem ser pigmentos que dão a aparência colorida aos alimentos ou produtos do metabolismo secundários, normalmente derivados de reações de defesa das plantas contra agressões do ambiente. Os flavonoides compreendem um grupo de compostos fenólicos amplamente distribuídos nas frutas e nos vegetais, apresentando-se sob muitas variações como flavonóis, flavonas, flavanonas, catequinas, antocianinas, isoflavonas e chalconas (BRAND-WILLIAMS et al., 1995). Noorozi et al. (1998) descrevem a rutina como flavonoides com capacidade de inibição da oxidação provocada por  $H_2O_2$  em linfócitos humanos superior a vitamina C.

### **2.2.2 – Ácido cítrico e Ácido ascórbico**

A acidez é um importante parâmetro na avaliação da conservação de produtos alimentícios. Os ácidos orgânicos influenciam na cor, textura e odores dos alimentos, além de controlar o crescimento do número de micro-organismos (SOUZA et al., 2010). O ácido orgânico 2-hidroxi-1,2,3-propanotricarboxílico, comumente conhecido como ácido cítrico, é o ácido mais representado na acidez total titulável. Este é um ácido orgânico fraco e que pode ser utilizado como conservante natural. Na indústria alimentícia é amplamente aplicado como acidulante e antioxidante por apresentar sabor agradável, baixa toxicidade e alta solubilidade.

Outro ácido importante é o ácido ascórbico, componente da Vitamina C. Ele também é influente no odor, sabor e conservação do fruto. (SHAHIDI et al., 1992). O ácido ascórbico se degrada facilmente, sendo estável apenas em meio ácido, com ausência de luz, calor e oxigênio. Ele tem a habilidade de perder e captar hidrogênio, o que lhe garante um papel essencial no metabolismo. Essa vitamina está envolvida na síntese do colágeno, no

desenvolvimento do tecido conjuntivo, no processo de cicatrização e recuperação após queimaduras e ferimentos, na resistência a infecções, na absorção do ferro, entre outras funções. É importante na resposta imune e em reações alérgicas (BASU, 2006).

Existem várias estratégias possíveis para o melhor aproveitamento dos compostos bioativos dos resíduos das frutas. Dentre elas, tem-se a desidratação a partir da secagem, que é o processo comercial mais utilizado para preservar alimentos, pois tem menor custo e operação simples (ALMEIDA et al., 2006).

### **2.3 – Secagem**

A secagem é uma operação unitária muito utilizada nas indústrias e visa a remoção de água ou outros compostos voláteis de misturas, pastas ou sólidos úmidos, fornecendo um produto sólido com umidade reduzida. Mesmo sendo utilizada desde os tempos pré-históricos, o desenvolvimento da secagem na indústria de alimentos se deu com a demanda de produtos de mais fácil transporte e armazenamento, com menor volume e peso e maior tempo de conservação para a alimentação de soldados em períodos de guerras (IBARZ e BARBOSA-CÁNOVAS, 2002).

Apesar de ser uma das operações mais exploradas no setor alimentício, a aplicação da secagem não está limitada a indústria de alimentos e é amplamente aplicada em produtos biológicos, fármacos, papéis, produtos agrícolas, cerâmicas, entre outros (IBARZ e BARBOSA-CÁNOVAS, 2002).

Na maioria dos processos, a remoção da umidade se dá através do contato do ar quente de secagem com o material a ser seco. Entretanto, a convecção não é o único mecanismo de desidratação e a secagem pode ser realizada através da aplicação de vácuo, liofilização, desidratação osmótica e com ondas do espectro eletromagnético, como o infravermelho e as micro-ondas (SEADER e HENLEY, 2006).

Quando um sólido úmido é submetido à secagem convectiva dois processos ocorrem simultaneamente, a transferência de calor e a de massa. A transferência de calor ocorre a partir do ambiente para evaporar a umidade do sólido e é dependente da temperatura, umidade, fluxo e direção do ar, além da forma física do sólido e pressão. Para se evaporar a água de um material úmido, deve haver o aquecimento até a temperatura na qual a pressão de vapor da água exceda a pressão parcial da umidade no ar em contato com o material. Já a transferência de massa ocorre do interior para a superfície do material (MUJUMDAR, 2006).



O movimento da umidade no interior do sólido ocorre em função da sua natureza física, sua temperatura e seu conteúdo de umidade. Os mecanismos podem ser sintetizados em: movimento da água devido à capilaridade, difusão devido ao gradiente de concentração e do vapor d'água através dos poros (MUJUMDAR, 2006; IBARZ e BARBOSA-CÁNOVAS, 2002).

A capacidade do ar em remover água do material depende, principalmente, da sua temperatura e da umidade relativa (CELESTINO, 2010). Estas e as demais propriedades no ar de secagem são relacionadas pela Lei dos Gases Ideais, pois o processo de secagem ocorre, geralmente, à pressão atmosférica.

Em materiais biológicos a água existe sob duas formas: água livre e água combinada, sendo a água total a soma dessas duas parcelas. A parcela da água que está “ligada” nas estruturas sólidas do material, como carboidratos e lipídios, necessita de maiores quantidades de energia quando comparado aos níveis de energia requeridos para evaporação da água “não-ligada” (PARK e NOGUEIRA, 1992).

Uma propriedade fundamental relacionada à qualidade do alimento é a atividade de água ( $A_w$ ). A atividade de água expressa o conteúdo de água livre e é definida pela razão entre a pressão parcial de vapor de água ( $P_v$ ) e a pressão de vapor da saturação ( $P_s$ ), à mesma temperatura, Equação 2.1 (ALZAMORA, 1984; FERREIRA NETO et al., 2005; MUJUNDAR, 2006). Em alimentos com baixa atividade de água, os microrganismos presentes tem seu metabolismo interrompido, o que impede o seu desenvolvimento ou reprodução (GAVA, 2008). Normalmente, substratos com atividade de água inferior a 0,6 não apresentam crescimento microbiano (GARCIA, 2004).

$$A_w = \frac{P_v}{P_s} \quad (2.1)$$

### 2.3.1 – Umidade de equilíbrio

A umidade de equilíbrio representa o teor mínimo de umidade que um material apresentará e é dependente de características externas ao sólido, como temperatura e umidade relativa do ar circundante. A umidade de equilíbrio se dá quando há o equilíbrio entre as pressões de vapor da água no sólido e a pressão parcial do vapor de água do meio ambiente (BARROZO, 1995). Ou seja, a umidade de equilíbrio de um material é a umidade final apresentada pelo sólido após um balanço de água entre o material e o ar da vizinhança em

estado estacionário, quando estão em contato por tempo suficientemente longo para atingir o equilíbrio (ARABHOSSEINIA et al., 2009). Esta é uma definição particularmente importante nos processos de secagem, pois representa o limite mínimo de umidade para determinada condição operacional, ou seja, esta é a variável que é determina qual a umidade final mínima que o material poderá atingir (BARROZO, 1995; MOYERS e BALDWIN, 1997).

Para se determinar a umidade de equilíbrio há duas formas mais utilizadas: o método dinâmico e o estático. A diferença entre os métodos se dá pelo fato de haver movimentação do ar ou do material até que o equilíbrio seja atingido no método dinâmico. Já no método estático o equilíbrio se dá sem movimentação do ar ou da amostra do material (CORRÊA et al., 1998).

No método dinâmico uma quantidade do material que se deseja levantar a isoterma da umidade de equilíbrio, com umidade inicial já determinada, entra em equilíbrio com o ar através da recirculação de ar em uma unidade em temperatura constante. A umidade relativa do ar recirculante é monitorada até que ela se torna constante, momento em que se considera que houve o equilíbrio e a umidade apresentada pelo sólido é a chamada umidade de equilíbrio. Então, pode-se medir novamente a umidade da amostra (MUJUNDAR, 2006).

No método estático, a amostra atinge o equilíbrio com ar estático que circunda a mesma. A atmosfera de umidade relativa constante é obtida através soluções ácidas ou soluções salinas saturadas, as quais conferem uma umidade relativa característica. Geralmente, há uma preferência pelas soluções salinas devido à segurança para o manuseio. Este método tem como vantagem a maior facilidade de se obter condições termodinâmicas constantes e utiliza aparatos semelhantes ao ilustrado na Figura 2.2 (BARROZO, 1995; MAJUNDAR, 2006).

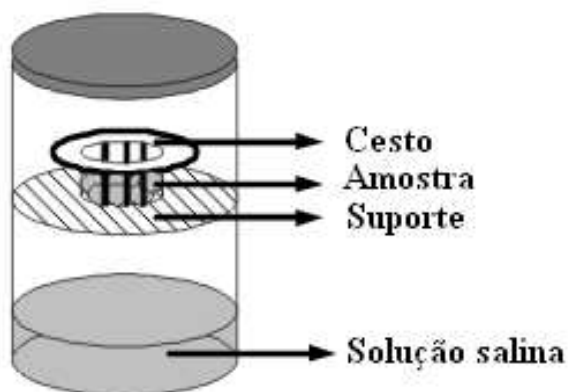


Figura 2.2 – Esquema do reservatório para testes estáticos de umidade de equilíbrio.

Fonte: Adaptado de Pacheco et al. (2009)

Silva (2015 a) obteve isotermas de equilíbrio para a dessorção de resíduo de acerola utilizando o método estático. Para isso, foram colocadas amostras em estruturas similares à da Figura 2.2 com soluções salinas saturadas. A fim de controlar a umidade relativa do ar, o autor dispôs tais estruturas em estufas incubadoras para controlar a temperatura. As amostras foram pesadas periodicamente e o equilíbrio foi considerado quando o peso se manteve praticamente constante em cada amostra. O modelo que apresentou maior representação dos dados experimentais obtidos pelo autor foi o modelo de Sigma-Copace.

### 2.3.2 – Taxa de secagem

Durante a desidratação, a taxa de secagem é proporcional à mudança da umidade do material com o tempo e pode ser analisada em períodos distintos, como sintetizado na Figura 2.3.

O período A'B ou AB corresponde ao início da secagem, em que o material quente ou frio, respectivamente, entra em contato com o ar de secagem. No ponto B o material atinge as condições de equilíbrio na superfície do material. Em muitos casos esta etapa inicial é desconsiderada por ser rápida em relação às demais etapas (IBARZ e BARBOSA-CÁNOVAS, 2002).

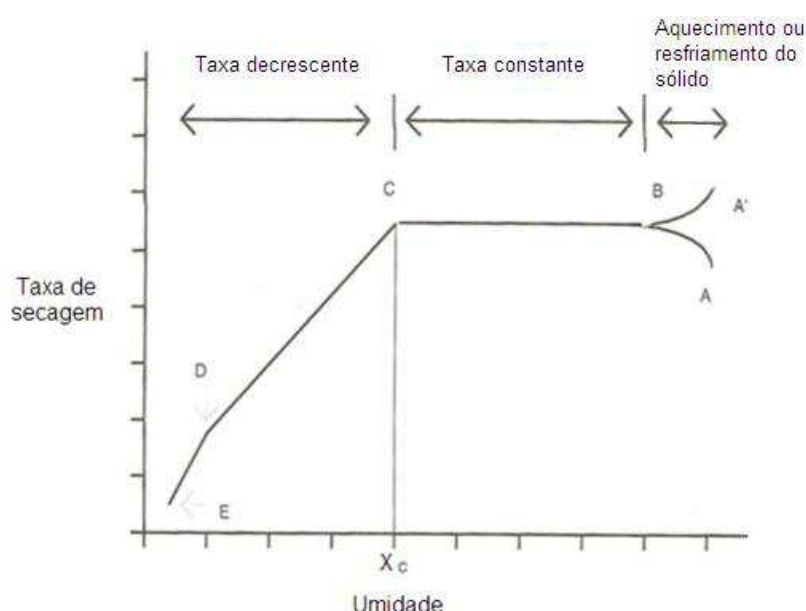


Figura 2.3 - Curva da taxa de secagem.

Fonte: Adaptado de Ibarz e Barbosa-Cánovas, 2002.

A etapa de taxa constante, correspondente ao período BC, é associada com a remoção da água livre (WELTI e VERGARA, 1997). Nesta etapa a água comporta-se como se o sólido não estivesse presente. Nos sólidos porosos a água retirada da superfície é repostada pelo fluxo de água do interior do material. Este período ocorre enquanto a água evaporada for compensada pela água do interior, até atingir a umidade crítica ( $X_c$ ). Nele, o sólido tem temperatura próxima da temperatura de bulbo úmido do ar de secagem (GEANKOPLIS, 1983). Entretanto, se a umidade inicial do material a ser seco estiver abaixo da umidade crítica, não haverá o período de taxa constante. A umidade crítica não é dependente apenas do material a ser seco, como também varia de acordo com a espessura da camada deste material (McCABE et al., 2005).

Já o período de taxa decrescente pode ser dividido em outros dois períodos. O primeiro deles é o que corresponde à etapa CD. Nesta etapa a taxa de secagem é controlada pela transferência de massa interna de água e vapor e ocorre quando os pontos úmidos da superfície decaem continuamente até a superfície estar totalmente seca. Neste ponto, D, inicia-se a segunda etapa do período de taxa decrescente. Nele, o calor requerido para a remoção da água é transferido pelo sólido até seu interior e o vapor produzido é transferido por uma corrente gasosa até a superfície e por isso há um aquecimento do material acima da temperatura de bulbo úmido. É possível que não haja diferenças visíveis entre o primeiro e segundo período de taxa decrescente (IBARZ e BARBOSA-CÁNOVAS, 2002). Um esquema do comportamento da transferência de massa em materiais porosos durante o período de secagem é apresentado na Figura 2.4.

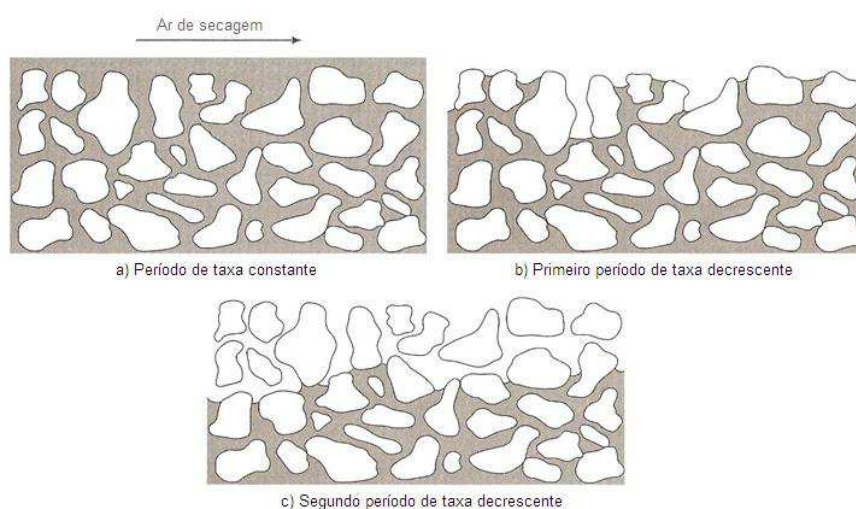


Figura 2.4 – Períodos da taxa de secagem em sólidos porosos.

Fonte: Adaptado de Seader e Henley, 2006.

### 2.3.3 – Cinética de secagem

A fim de desenvolver projetos de novos secadores e otimização das operações de secagem é necessário conhecer a cinética de secagem de cada material (SHIBY, 2007). Os experimentos conduzidos em camadas finas tem a finalidade de representar elementos de volume para leitos com camadas espessas (BARROZO, 1995; AFONSO JÚNIOR e CORRÊA, 1999). Por isso vários pesquisadores têm feito estudos da cinética de secagem em camada fina para vários materiais. Como exemplos podem ser citados os trabalhos de Barrozo (1995) com sementes de soja, Almeida et al. (2006) com frutos de acerola, Corrêa et al. (2006) que avaliaram a secagem do café, Martinazzo et al. (2007) que estudou folha de capim-limão, e Carlesso et al. (2007), Radünz et al. (2010) e Veras et al. (2012) que estudaram a secagem de sementes de maracujá-amarelo, folhas de sálvia e pimenta dedo-de-moça, respectivamente. Silva (2015 a) realizou um o estudo da cinética de secagem para o resíduo de acerola.

Existem modelos teóricos, semi-empíricos e empíricos a fim de descrever a cinética de secagem. Os modelos teóricos são baseados em princípios fundamentais, porém há certa dificuldade na determinação dos parâmetros na equação. Dentre os modelos teóricos, o mais utilizado é o modelo difusivo unidirecional, ele descreve a migração da umidade livre do interior do sólido para a superfície devido a um gradiente de concentração. Como o modelo considera esta migração a etapa mais lenta, ele é capaz de descrever a cinética de secagem apenas para sólidos que não apresentam período de taxa constante (GELY e GINER, 2007). Este modelo segue a Lei de Fick, Equação 2.2.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla(D_{ef}\nabla M) \quad (2.2)$$

Em que:

$M$  = teor de umidade;

$D_{ef}$  = difusividade efetiva e

$t$  = tempo.

Este modelo tem apresentado bons resultados para grãos e cereais, provavelmente devido ao fato de estes materiais dificilmente apresentarem o período de taxa constante e, portanto, o processo de secagem ser controlado pelo período de taxa decrescente, em que as

condições internas de transferência de umidade determinam o processo. (QUEIROZ, 1995; BARROZO, 1995; PRADO et al., 2009).

O parâmetro de difusividade efetiva engloba vários mecanismos de migração de umidade e ainda pode ser considerado constante para algumas determinadas condições operacionais. Entretanto ele é, geralmente, dependente da temperatura e umidade do ar. Como a difusividade varia conforme mudam as condições de secagem (temperatura e velocidade do ar), ela não é intrínseca ao material (OLIVEIRA et al., 2006).

Devido a diversidade de mecanismos envolvidos na transferência de massa, alguns pesquisadores procuram propor equações semi-empíricas para prever a cinética de secagem. Esses modelos são fundamentados em fenômenos teóricos derivados do modelo difusivo. Entretanto não refletem toda a complexidade do processo e por isso, geralmente, apresentam uma maior adequação aos dados experimentais (BARROZO, 1995; AFONSO JÚNIOR e CORRÊA, 1999). São apresentados na Tabela 2.3 os principais modelos semi-empíricos utilizados na literatura (Equações 2.3 a 2.7).

Tabela 2.3 – Modelos de cinética de secagem.

Modelo	Equação	Referência
$MR = \exp(-kt)$	2.3	Lewis (1921)
$MR = \exp(-kt^n)$	2.4	Page (1949)
$MR = A \exp(-kt) + \frac{1}{9} \exp(-kt)$	2.5	Henderson e Henderson (1968)
$MR = \exp[-(kt)^n]$	2.6	Overhults et al (1973)
$MR = A \exp(-kt)$	2.7	Brooker et al. (1974)

1, 2, 3, 4, 5 apud Silva (2015 a).

Lewis (1921) sugeriu que no período de taxa de secagem decrescente a mudança da umidade fosse proporcional ao gradiente de umidade entre o teor de umidade do material e a umidade de equilíbrio do material, uma analogia à Lei de Resfriamento de Newton (BROOKER, 1992; BARROZO, 1995; AFONSO JÚNIOR e CORRÊA, 1999). Avaliando a secagem de milho em camada fina e comparando os dados experimentais com os preditos pelo modelo de Lewis, Page (1949) propôs um modelo modificado para a Equação de Lewis (CARLESSO et al., 2007). Também oriundo da Equação de Lewis, Overhults et al. (1973) propuseram modificações empíricas no modelo. Já os modelos de Brooker et al. (1974) e

Henderson e Henderson (1968) são simplificações da solução analítica do modelo difusivo, em que são observados apenas os primeiros termos da série (BARROZO, 1995).

Nos modelos citados, a constante de secagem ( $k$ ) representa as condições externas de secagem e é relacionada com a difusão líquida que controla o processo (BABALIS e BELESSIOTIS, 2004). Já o parâmetro  $n$  tem um caráter empírico e corrige os possíveis erros resultantes da resistência interna para a transferência de umidade que foram negligenciados (AZZOUZ et al., 2002) e o parâmetro  $A$  é uma constante a ser estimada.

Alguns modelos totalmente empíricos também podem ser citados, como o de Thompson et al. (1968) e Wang et al. (1978). Apesar de apresentarem bons ajustes são restritos apenas para as faixas experimentais e materiais nos quais foram testados (BARROZO, 1995; QUEIROZ et al., 1995).

#### **2.3.4 – Transferência simultânea de calor e massa em camada espessa**

A cinética de secagem, apresentada no item 2.3.2, não é capaz de descrever de forma adequada o comportamento da secagem em camadas espessas, pois consideram apenas a variável temporal. Por isso, foram desenvolvidos modelos que englobam as transferências simultâneas de calor e massa, que além do tempo também consideram a variável espacial. Ou seja, para o primeiro há a consideração de que as propriedades são constantes para toda a camada, enquanto os modelos de camada espessa não (BARROZO, 1995; BORTOLAIA, 2011).

A configuração do secador, o material e as condições de operação interferem na forma como ocorre a transferência de calor e massa entre o material e o ar de secagem (McMINN e MAGEE, 1999). O desenvolvimento de modelos matemáticos que descrevem como ocorre essa interação surge com o intuito de examinar e interpretar a influência das variáveis operacionais sem a necessidade de se recorrer a um grande número de testes experimentais (PRADO, 2004), além de auxiliar no desenvolvimento de novos secadores e na otimização daqueles já existentes.

O modelo de secagem em camada espessa que recebe as maiores atenções na literatura é o chamado modelo a duas fases, o qual tem um caráter generalista. Este modelo associa a cada ponto do sistema uma fase sólida e uma gasosa, com características próprias (SILVA, 2015 a). Ele apresenta equações diferenciais parciais de transferência de massa e calor baseadas na termodinâmica das misturas e possui menos simplificações. Este é o tipo de

modelagem mais fundamental e com a atual capacidade computacional de processamento tem-se tornado mais viável (BORTOLAIA, 2011).

## **2.4 – Secagem híbrida**

Como visto anteriormente, a secagem é uma operação indispensável para vários segmentos industriais, principalmente o de alimentos. Neste setor há uma preocupação no processamento de produtos de melhor qualidade e com menor gasto energético. Nesse sentido, destacam-se os estudos de métodos de secagem híbridos, ou seja, aqueles que incorporam dois ou mais métodos de secagem tradicional à um único processo (CHOU e CHUA, 2001).

As principais motivações no desenvolvimento de novas tecnologias de secagem híbrida são a minimização da degradação do produto final com a umidade final desejada, além de possível redução de gasto energético durante o processo. Os parâmetros de qualidade devem ser considerados durante o estudo de diferentes mecanismos híbridos de secagem para avaliar sua aplicabilidade (CHOU e CHUA, 2001).

Frequentemente, a escolha do método de secagem varia de acordo com características intrínsecas do material. Para alimentos sensíveis ao calor, os métodos de transferência de massa e calor são considerações críticas na escolha do secador e são necessárias avaliações pertinentes quanto à degradação do mesmo após a desidratação.

No presente trabalho foram avaliados dois processos híbridos para a secagem do resíduo de acerola. O primeiro é a secagem em micro-ondas a vácuo. Vários autores estudam a aplicação deste método para diversos produtos termossensíveis, como: cenouras (LIN et al., 1998; CUI, 2004; ANDREOLA, 2013; BÉTTEGA et. al., 2014), maçãs (CHONG et al., 2014), cerejas (MOTAVALI et al., 2011), cogumelos (GIRI e PRASAD, 2014; PEI et al., 2014), morangos (BÓRQUEZ e SAAVEDRA, 2015), hortelã-pimenta (URIBE et al., 2016), entre outros. O segundo processo estudado consiste na aplicação de infravermelho para auxiliar a secagem em leito fixo.

Nas seções a seguir será apresentada uma revisão da literatura para auxiliar a compreensão do que são micro-ondas e como elas podem ser utilizadas para a secagem tradicional e a vácuo, assim como a motivação para acoplar a radiação infravermelha na secagem em leito fixo.



### 2.4.1 – Micro-ondas

As micro-ondas são radiações não-ionizantes, ou seja, não tem capacidade de remover elétrons ou átomos do meio onde se deslocam, mas podem quebrar moléculas e ligações químicas. Elas fazem parte do espectro eletromagnético e são compostas por um campo elétrico (E) conjugado com um magnético (H), os quais são perpendiculares um ao outro, como representado na Figura 2.5 (ARRUDA e SANTELLI, 1997; ROSINI et al., 2004).

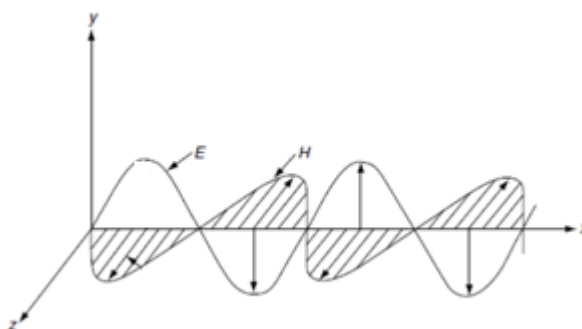


Figura 2.5 – Representação de uma onda eletromagnética.

Fonte: MUJUNDAR, 2006.

As micro-ondas estão situadas entre a radiação infravermelha e as ondas de rádio, com frequência na banda de 300 MHz a 300 GHz e comprimento de ondas de 1mm a 1m (Figura 2.6). Como é uma forma de energia eletromagnética, as micro-ondas não necessitam de um meio material para se propagar e se deslocam com a mesma velocidade que luz no meio em questão. A velocidade de propagação ( $c$ ) ainda é diretamente proporcional à sua frequência ( $f$ ) e ao comprimento de onda ( $\lambda$ ) (Equação 2.8) (DECAREAU e PETERSON, 1986).

A frequência representa o número de oscilações em um determinado intervalo de tempo e por ser uma característica invariante é a que melhor descreve uma radiação eletromagnética (LEONARDO, 2009). As frequências usuais para utilização de micro-ondas são de 915 MHz e 2450 MHz (PEREIRA, 2007).

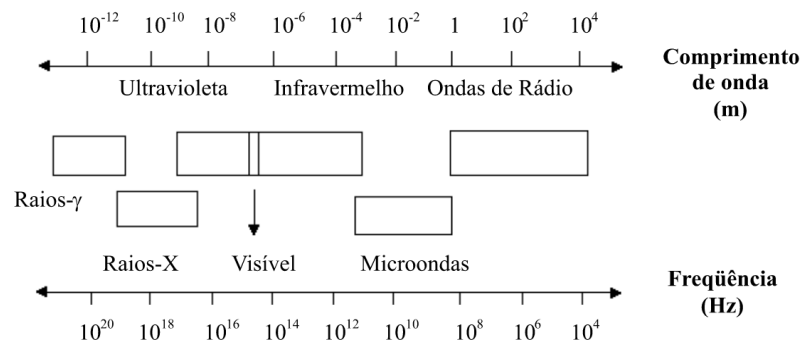


Figura 2.6 – Espectro da radiação eletromagnética

Fonte: Sanseverino, 2002.

$$\lambda = c.f \quad (2.8)$$

Para a aplicação de micro-ondas é necessário um sistema composto por uma válvula de geração de micro-ondas (magnétron), que transforma a potência fornecida por uma fonte elétrica em frequências de micro-ondas. As micro-ondas geradas são transmitidas de forma guiada por tubos metálicos até a cavidade do forno, onde elas são aplicadas no material que se deseja aquecer (PEREIRA, 2007).

As micro-ondas podem ser refletidas por materiais condutores (superfícies metálicas), refratadas quando expostas a materiais dielétricos (substâncias polares em geral) ou invisíveis em materiais transparentes (teflon, polietileno) (ENGELDER e BUFFLER, 1991; LEONARDO, 2009). As reflexões nas paredes metálicas da cavidade dos fornos formam ondas estacionárias que causam o aumento ou a diminuição do campo eletromagnético. Este fenômeno é o responsável pelo aquecimento heterogêneo observado em fornos micro-ondas (PEREIRA, 2007).

#### 2.4.1.1 – Propriedades Dielétricas

A interação das micro-ondas com os materiais dielétricos está relacionada com a permissividade complexa ( $\epsilon$ ). Esta propriedade é composta por uma parte real e uma parte imaginária, Equação 2.9. A parte real, constante dielétrica relativa ( $\epsilon'$ ), é relacionada com a capacidade do material em armazenar energia elétrica por unidade de volume. Já a parte imaginária, fator de perdas relativo ( $\epsilon''$ ), indica a capacidade do material em dissipar energia na forma de calor por unidade de tempo.

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2.9)$$

A constante dielétrica relativa e o fator de perdas relativos ainda podem ser relacionados com a tangente de perdas ( $\tan \delta$ ), Equação 2.10, a qual representa a eficiência da conversão da energia micro-ondas em calor.

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2.10)$$

A profundidade de penetração das micro-ondas no material ( $dp$ ), Equação 2.11, é definida como a distância da superfície do material em direção ao seu interior em que a potência de aplicação das micro-ondas é reduzida em  $1/e$  do seu valor inicial, ou seja, a profundidade de penetração é definida como a distância na qual 63% da potência de micro-ondas aplicada é absorvida. Este parâmetro também é conhecido como distância de atenuação e está relacionado com as propriedades dielétricas do material e o comprimento de onda no vácuo ( $\lambda_0$ ) (VON HIPPEL, 1954; MENEZES et al., 2007).

$$dp = \frac{\lambda_0}{2\pi f \sqrt{2\varepsilon' \left[ 1 + \sqrt{\left(\frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}\right)^2 - 1} \right]}} \quad (2.11)$$

De acordo com GOLDBLITH (1967), a absorção volumétrica de potência ( $P_v$ ) e a elevação de temperatura no aquecimento por micro-ondas são descritas pelas Equações 2.12 e 2.13:

$$P_v = 2\pi f \varepsilon_0 \varepsilon'' E^2 \quad (2.12)$$

Em que:

$\varepsilon_0$  = permissividade no vácuo e

$E$  = campo elétrico aplicado.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{P_v}{\rho c_p} \quad (2.13)$$

Em que:

$T$  = temperatura do material;

$C_p$  = calor específico do material e

$\rho$  = massa específica do material.

A interação entre o material e a radiação eletromagnética é diretamente influenciada pelas propriedades dielétricas, sendo estas propriedades afetadas por diversos fatores, como a frequência da radiação eletromagnética, temperatura, umidade e porosidade do sólido. As relações das propriedades dielétricas com a temperatura são complexas, podendo aumentar ou diminuir de acordo com o material. A água, por ser polar, é o constituinte dos alimentos que mais absorve a energia das micro-ondas. Já a porosidade tende a reduzir as propriedades dielétricas, pois o ar que ocupa os poros é um material transparente às micro-ondas (VENKATESH e RAGHAVAN, 2004; NELSON e TRABELSI, 2012).

Em produtos agroindustriais submetidos a um campo eletromagnético, a umidade é o fator que mais interfere nas propriedades dielétricas, devido à grande quantidade de água presente (VENKATESH e RAGHAVAN, 2004). Sendo assim, a potência absorvida pelo material durante o processo é variável, pois ela depende da umidade e temperatura do mesmo, propriedades que não se mantêm constantes.

#### **2.4.1.2 – Aquecimento por micro-ondas**

Na secagem convectiva a transferência de calor ocorre por meio da condução de energia da superfície do material para o seu interior. Este processo é, geralmente, lento e requer altas temperaturas do meio exterior. Por outro lado, o aquecimento pela ação das micro-ondas ocorre devido à interação das moléculas polares e íons com o campo eletromagnético (PEREIRA, 2007). Dois dos mecanismos responsáveis pelo aquecimento por micro-ondas tem mais destaque: a rotação dipolar e a polarização iônica.

A rotação dipolar é o mecanismo com maior importância na remoção da umidade durante a secagem. Nela, as moléculas polares tendem a girar a fim de orientar seus polos de acordo com o campo elétrico externo (Figura 2.7). Como há a alternância da polaridade milhares de vezes por segundo, a fricção gerada pelo movimento das moléculas é responsável pela dissipação de energia em forma de calor (METAXAS e MEREDITH, 1983). Já na

polarização iônica ocorre a agitação de íons dissolvidos que se deslocam e aumentam o número de choques, gerando calor através da fricção com outros íons e moléculas (SCHUBERT e REGIER, 2005; LEONARDO, 2009). Estes mecanismos proporcionam um rápido aquecimento do material.

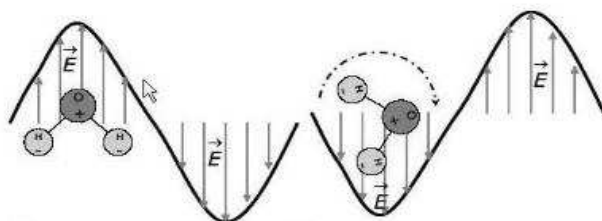


Figura 2.7 – Rotação dipolar induzida por um campo elétrico.

Fonte: Adaptado de CORRÊA, 2014.

#### 2.4.1.3 – Secagem assistida por micro-ondas

Nas últimas décadas, os fornos micro-ondas tornaram-se constantes não só em cozinhas residenciais, mas também se expandiram no setor industrial. Tais fornos, hoje, são utilizados na sinterização de cerâmicas, como reatores e na digestão de amostras para procedimentos analíticos em laboratórios. As principais aplicações de micro-ondas na indústria alimentícia são o degelo, o aquecimento, a pasteurização ou esterilização e desidratação de alimentos.

Devido aos mecanismos não convencionais na secagem com aplicação de micro-ondas há uma redução do tempo de processamento e, conseqüentemente, uma economia de energia. Além da rapidez, a secagem assistida por micro-ondas promove maior taxa de secagem em regiões mais úmidas, não interferindo nas partes secas. O alimento após a secagem com micro-ondas pode apresentar melhor qualidade e equipamentos de secagem com micro-ondas ainda requerem menor espaço físico de instalação (SENISE, 1985; MENEZES, 2007).

Silva (2015 b) estudou a desidratação do resíduo do processamento industrial de maracujá-amarelo em micro-ondas doméstico (800 W de potência nominal e 2450 Hz). Neste estudo, foram avaliadas as potências de aplicação das micro-ondas assim como o tempo de operação. As amostras foram submetidas a quatro potências distintas (280, 480, 600 e 800 W) durante os tempos de 1, 10, 15 e 20 min. Dos modelos de cinética de secagem já descritos na literatura ajustados aos dados obtidos, o de Overhults apresentou o melhor ajuste. O autor

verificou que para maiores níveis de potência o tempo necessário para a redução da umidade aos níveis desejados foi menor e os teores de compostos bioativos aumentaram, entretanto o produto obtido apresentava sinais de queimado.

A fim de aprimorar a desidratação por micro-ondas, alguns autores estudaram modificações nos secadores micro-ondas. Pereira (2007), por exemplo, estudou a secagem de bananas tratadas osmoticamente em micro-ondas combinado com um sistema de circulação de ar. Foi verificado que as micro-ondas apresentaram efeitos mais significativos na remoção de umidade que o fenômeno convectivo proporcionado pelo ar quente. A temperatura do ar apresentou uma influência secundária na secagem quando micro-ondas foram incorporadas ao processo, enquanto que a velocidade não apresentou influência na cinética de secagem. Também foi observado que níveis de potências elevados resultaram num maior número de amostras queimadas. Uma vantagem apresentada pela autora para este sistema foi que a aplicação combinada com secagem convectiva é capaz de resfriar a superfície do produto evitando a carbonização do mesmo.

Como ressaltado por Wang e Xi (2005), se a secagem de alimentos em micro-ondas não for realizada de maneira adequada, os produtos obtidos podem ser de má qualidade. Neste sentido, um processo que surge como promissor e avaliado no presente estudo é a secagem em micro-ondas a vácuo.

#### **2.4.1.4 – Secagem com micro-ondas a vácuo**

A secagem em micro-ondas a vácuo é utilizada com mais frequência para a desidratação de vegetais, hortaliças e frutas a fim de conservar a qualidade final dos produtos. Esta metodologia ainda é aplicada na produção de *chips* e *snacks* livres de óleo e de melhor qualidade quando comparados aos produzidos com desidratação convectiva (FIGIEL, 2009; BAI-NGEW, 2011).

Na secagem em micro-ondas a vácuo, em substituição ao fluxo de ar, a pressão é reduzida na câmara de secagem. Além de evitar o contato com o oxigênio, as baixas pressões facilitam a evaporação e difusão da umidade do interior do material. Em baixas pressões a temperatura de ebulição da água também é reduzida, fazendo com que o produto fique exposto a menores temperaturas quando comparados com processos à pressão atmosférica (ZHANG et al., 2006; CHEN et al., 2008).

Kundra e Mujundar (2009) relatam a secagem em micro-ondas a vácuo como uma alternativa atraente para a liofilização e secagem convectiva em relação ao custo/benefício. Pois, a liofilização apesar de apresentar produtos finais de boa qualidade é um processo lento (podendo levar dias) e dispendioso, uma vez que requer pressões próximas do vácuo absoluto. A secagem convectiva, ao contrário da liofilização, possui menor custo. Porém não produz alimentos de qualidade tão elevada devido às temperaturas mais altas. Já a secagem em micro-ondas a vácuo é um processo rápido, que pode ser realizado em minutos, em vez de horas ou dias e ainda apresenta produtos finais com propriedades nutricionais satisfatórias e aparência atrativa. A Figura 2.8 resume as características custo/qualidade apresentadas por estes três processos.

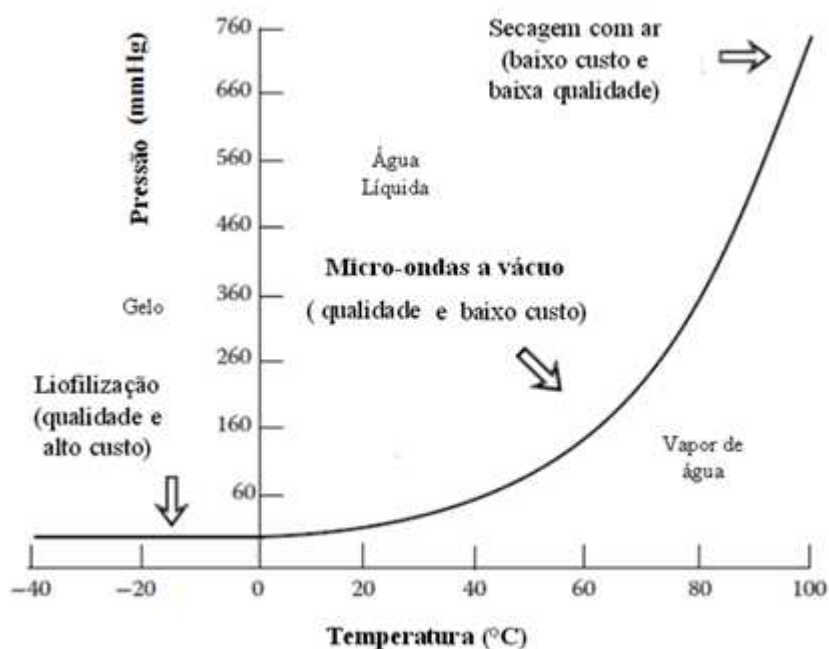


Figura 2.8: Comparação entre secagem convectiva, micro-ondas a vácuo e liofilização.

Fonte: Adaptado de Kundra e Mujundar (2009).

Diversos estudos relatam a secagem de produtos agroindustriais utilizando micro-ondas a vácuo. Nawirska et al. (2009) desidrataram fatias de abóboras através de secagem convectiva, micro-ondas a vácuo e liofilização. A aplicação do micro-ondas a vácuo apresentou produtos com coloração mais atrativa e ainda reduziu em cerca de dez vezes o tempo de desidratação, quando comparado com a secagem convectiva, o qual foi o segundo método mais rápido.

Rosa (2010) estudou a secagem de cenoura em micro-ondas e em micro-ondas a vácuo. Neste estudo foi utilizado um forno micro-ondas laboratorial de 600 W de potência e 2450 Hz. A autora observou que a associação do vácuo não alterou significativamente a cinética de secagem. Por outro lado, verificou-se que a inclusão do vácuo no método de secagem diminuiu a densidade aparente do produto final, pois o vácuo causa o chamado efeito *puffing*, o qual consiste na exaustão de gases do interior do material e produz alimentos mais porosos.

#### **2.4.2 – Leito fixo**

Os secadores leito fixo compreendem os sistemas de secagem mais simples e de fácil operação. A secagem em leito fixo é uma operação na qual o ar de secagem percorre um leito em que as partículas estão estáticas, promovendo a transferência simultânea de calor e massa (SOUZA, 2013). Neste processo, a secagem ocorre em camadas, devido à formação de uma frente de secagem. Assim, o material que está na zona de intercâmbio de umidade entre o sólido e o ar permanece com temperatura próxima à de bulbo úmido do ar. As camadas nas regiões anteriores a frente de secagem apresentam umidades próximas do equilíbrio e temperaturas próximas a do ar de secagem enquanto e as regiões posteriores se mantêm úmidas e em baixas temperaturas.

Esta heterogeneidade é uma desvantagem apresentada pelo secador em leito fixo, pois resulta em produtos com características distintas a depender da posição axial em que o material se encontra. Para melhorar a eficiência do processo, o presente trabalho visou adicionar uma nova frente de secagem com radiação infravermelha contrária à convectiva.

##### **2.4.2.1 – Infravermelho**

A radiação infravermelha faz parte do espectro eletromagnético e localizada entre a luz visível e a radiação de micro-ondas. Assim como esta última, o infravermelho é uma radiação não-ionizante e não necessita de meio material para se propagar.

Alimentos submetidos à desidratação por infravermelho geralmente apresentam grandes quantidades de água. Em materiais sólidos, a absorção da radiação se dá em uma camada superficial, entretanto em materiais mais porosos a penetração da radiação é mais



pronunciada. Por isso, a absorção da radiação infravermelha é dependente do conteúdo de umidade apresentado pelo material (LAMPINEN et al, 1991).

O aquecimento do material através do infravermelho se dá sem aquecimento do ar da vizinhança, pois este é invisível a este tipo de radiação (GINZBURG, 1969). A secagem de alimentos por radiação infravermelha também é mais acentuada quando comparada a secagem convectiva e ainda se intensifica com o aumento de energia fornecida pelo emissor de infravermelho (MASAMURA et al., 1988).

Ainda podem ser citadas como vantagens a aplicação deste mecanismo de desidratação facilidade em manipular e redirecionar a fonte de calor para a superfície de secagem, além de obter respostas rápidas, facilitando o controle do processo. Incorporar o infravermelho a um secador já existente também é simples e de baixo custo.

#### **2.4.2.2 – Leito fixo auxiliado por infravermelho**

Na literatura não há descrição de trabalhos realizando secagem em leito fixo em camada espessa auxiliado por infravermelho. Entretanto, Chayjan et al. (2014) estudaram o efeito do tipo de leito (fixo em camada delgada, semi-fluidizado e fluidizado), da temperatura do ar de secagem (40°C, 55°C e 70°C) e da potência do infravermelho aplicado ao material (500W, 1000W e 1500W) no tempo de secagem do pistache e no consumo específico de energia. Os autores consideraram que a adição do infravermelho pode ser uma forma de aumentar a taxa de secagem em leito fixo de camada delgada.

### **2.5 – Pré-tratamentos**

A inserção de pré-tratamentos nos processos de secagem de frutas é considerada por vários estudiosos como crucial para se obter uma melhor qualidade dos produtos desidratados (KARATHANOS et al., 1995; TORREGIANNI e BERTOLO, 2001).

O branqueamento é um dos métodos de pré-tratamento que são utilizados para impedir alguns processos fisiológicos antes da secagem de vegetais e frutas. A aplicação de calor inativa enzimas responsáveis pelo escurecimento e sabores desagradáveis. Geralmente, frutas e legumes são escaldados por aquecimento com vapor ou água quente (MATÈ et al., 1999; TEMBO et al., 2008).

A utilização do etanol no pré-tratamento da secagem provoca a evaporação mais intensa da umidade, se comparado ao processo convencional (SANTOS e SILVA, 2008). Braga et al. (2010) concluíram que a pulverização de etanol sobre a superfície da fruta era mais efetivo que a atomização do composto na atmosfera de secagem.

O pré-tratamento ultrassônico baseia-se na propagação de uma onda mecânica com frequência superior a 20 MHz num meio físico. A ação da onda provoca um movimento entre as partículas do material, gerando tensões que causam o rompimento das suas células, formando, também, micro canais (CALEGARI, 2006).

## **2.6 – Estudos relevantes envolvendo o resíduo de acerola**

Diversos estudos apontando a viabilidade de aproveitamento tecnológico do resíduo de acerola têm sido desenvolvidos a partir dos anos 2000 no Brasil, pois este é o maior produtor e processador de acerola. Dentre os principais estudos, foram abordadas as mais variadas aplicabilidades do resíduo, como na produção de carvão ativado e de farinha alimentícia para consumo humano e animal.

Macêdo (2012) estudou o consórcio de fibra-de-coco com resíduos da produção agroindustrial para produção de carvão ativado. Sendo que dos resíduos incorporados, incluiu-se o de acerola. A mistura de 50% de fibra-de-coco e 50% resíduo de acerola apresentou baixos teores de cinzas e teor de carbono fixo superior a 85%. Como as cinzas são matérias inorgânicas, como cálcio, enxofre e fósforo, elas não participam da produção de energia e são apenas resíduos da reação de combustão. Em níveis elevados, as cinzas podem prejudicar e limitar determinados usos industriais, pois o material mineral é hidrofílico e apresenta efeito desfavorável adsorvendo preferencialmente água. Quando foi analisado o teor de carbono fixo, o consórcio com resíduo de acerola também apresentou o melhor resultado, sendo o teor de carbono fixo do resíduo de acerola puro superior a 90%. O estudo ainda verificou a relação direta entre o teor de carbono fixo e materiais voláteis, o que determina o poder calorífico de uma matéria-prima.

Silva et al. (2012) estudaram a produção de ácido cítrico utilizando o resíduo agroindustrial de acerola como substrato. Também foram estudados os resíduos de mangaba e graviola. Para a produção do substrato, os resíduos foram secos em estufa de convecção forçada a 40°C durante 24h. Após este período foram triturados em liquidificador industrial e esterilizados por 15 min a 121°C e 1 atm. Para a conversão, foi utilizada a levedura

*Kluveromyces marxianus* URM 4404. O resíduo de acerola quando utilizado como substrato apresentou uma produção de 4,1g/L de ácido cítrico, apresentando o melhor resultado dentre os resíduos testados. Entretanto, foi adicionado glicose e extrato de levedura como fontes adicionais de nutrientes.

De Andrade et al. (2001) avaliaram o consumo de nutrientes por ovinos através de dietas de capim-elefante e resíduos de acerola, melão e abacaxi. Em relação ao conteúdo de proteína bruta e fibras, o resíduo de acerola se mostrou superior aos demais resíduos agroindustriais. Quando os resíduos da agroindústria foram incorporados à alimentação dos ovinos em até 30%, não houve redução do consumo animal. Os autores verificaram que os resíduos chegaram a representar 3,82% do peso vivo dos animais, o que justifica sua aplicação como fonte alternativa de alimento.

Anselmo (2008) estudou juvenis de tambaqui alimentados com rações extrusadas de diferentes resíduos de frutos. Um grupo de controle foi tratado com ração sem resíduo de frutas e os demais tratados com ração adicionada de 30% de cada um dos resíduos testados (acerola, jenipapo, camu-camu e araçá-boi). Com os resultados obtidos para o desempenho e a digestibilidade, o autor verificou que os resíduos de acerola e jenipapo podem ser utilizados como fontes alternativas de proteínas.

Moreira (2014) avaliou o efeito da inclusão de farinha do resíduo desidratado de acerola na alimentação de frangos. No estudo, as aves foram tratadas com ração contendo níveis variáveis do resíduo de acerola (0, 10 e 20%). A adição de 10% de farinha de acerola na dieta não alterou os parâmetros de desempenho produtivos. Já a adição de 20% influenciou negativamente a conversão alimentar. A adição de farinha de resíduo de acerola em qualquer nível aumentou o comprimento intestinal e peso das vísceras dos animais e houve também redução no peso das carcaças, porém sem prejuízo dos cortes nobres.

Castelini (2015) avaliou a utilização do farelo de acerola em programas de restrição alimentar para suínos pesados. Nos tratamentos houve adição crescente do farelo de acerola na alimentação dos suínos. Apesar de haver perdas lineares no ganho de peso dos suínos, verificaram-se aumentos de até 10,44% na porcentagem de carne magra das carcaças, sendo que as características qualitativas da carne não foram influenciadas pelos níveis de farelo de acerola estudados.

Oliveira (2008) avaliou extratos metanoicos de farinha de resíduo de acerola, maracujá e abacaxi. Neste estudo foi constatado mais que o dobro do teor de fenóis na farinha do resíduo de acerola em relação à farinha de maracujá e 10 vezes superior à farinha do

resíduo de abacaxi. Demonstrou-se assim, a possibilidade de se utilizar o extrato de acerola como suplemento ou aditivo alimentar.

Nos estudos citados anteriormente uma característica em comum foi que não houve preocupação em avaliar os efeitos das variáveis do processo de secagem do resíduo de acerola na qualidade do mesmo. Entretanto, Moreira (2007) avaliou estas variáveis com o propósito de obter extratos do resíduo de acerola encapsulados que apresentassem possibilidade de utilização como alimento funcional, corantes e/ou antioxidantes. A encapsulação teve como objetivo evitar a degradação do ácido ascórbico e das antocianinas. Estes compostos foram recuperados do resíduo de acerola através de prensagem do bagaço, que foi diluído em solução aquosa de ácido cítrico. No processo de recuperação do ácido ascórbico e antocianinas, foram utilizadas diferentes concentrações de ácido cítrico no solvente (0-2%) e proporções solvente/bagaço (2/1-6/1). O extrato obtido após a prensagem foi seco por *spray dryer*. Neste estudo, as condições ótimas de extração foram 5:1 (solvente:bagaço) e ausência de ácido cítrico, recuperando 82,47% de antocianinas e 83,22% de ácido ascórbico. A atomização ótima teve temperatura de entrada, 185°C; proporção encapsulante/sólidos de acerola, 5:1, tendo como material encapsulante pelo menos 50% de goma de cajueiro. A goma de cajueiro foi utilizada por ter composição semelhante à goma arábica e ser considerada encapsulante por excelência.

Em 2012, foram realizados dois estudos distintos que visaram avaliar a secagem do resíduo de acerola em leito de jorro. No primeiro, Souza Júnior (2012) avaliou a secagem de uma suspensão aquosa do resíduo de acerola triturado adicionado de maltodextrina, utilizando como material inerte partículas de polipropileno de alta densidade. Para o comportamento fluidodinâmico do leito foi verificado que ele é alterado de forma significativa quando a suspensão é atomizada, necessitando maior vazão de ar de secagem para manutenção das condições de jorro. A suspensão ainda promoveu uma menor taxa de circulação de sólidos e uma maior distribuição de ar na região de jorro. Tal efeito não foi verificado com a atomização de água, sugerindo que as partículas sólidas da suspensão favorecem forças de coesão nas partículas inertes entre si e com a parede. No que se refere à eficiência do processo e à qualidade do pó obtido, foram realizados experimentos avaliando a influência da temperatura e velocidade do ar de secagem e intermitência da alimentação da suspensão. Todas variáveis apresentaram efeito positivo na eficiência do processo, sendo a temperatura do ar de secagem a variável mais influente. Em relação à qualidade do pó obtido, em todas as

condições houve acentuada diminuição do teor de ácido ascórbico em relação ao resíduo *in natura*, entretanto ainda apresentando valores superiores a diversas frutas.

No segundo estudo, Bortolotti (2012) analisou a fluidodinâmica do leito de jorro operando com mistura de resíduo de acerola com soja, a diferentes frações mássicas e diferentes alturas de leito estático. Analisando o efeito da segregação da mistura através do índice de mistura (razão entre a fração final local e a fração inicial global do resíduo de acerola) foi verificado que para todas as condições havia maior concentração de acerola na parte superior do leito estático e que a segregação era intensificada com o aumento do tempo de secagem. Em relação à qualidade final do resíduo de acerola foram avaliados os teores de ácido ascórbico, fenólicos e flavonoides totais. Para todos os parâmetros de qualidade houve aumentos dos teores de compostos bioativos em relação ao resíduo *in natura* após a secagem em leito de jorro.

Nóbrega (2012) estudou a secagem do resíduo agroindustrial de acerola em um secador convectivo de bandejas com as temperaturas de 60, 70 e 80 °C, velocidade do ar de secagem de 4,0; 5,0 e 6,0 m/s e espessura do material de 0,5; 0,62 e 0,75 cm. No secador o fluxo de ar foi perpendicular à bandeja. Após a secagem, foram observadas reduções na concentração de compostos fenólicos totais, carotenoides, antocianinas, protoantocianinas e também na atividade antioxidante total medida através do método DPPH em relação ao resíduo *in natura* e liofilizado. No entanto, considerando a concentração de compostos bioativos totais, análises colorimétricas e estabilidade microbiológica apresentada pelo pó seco do resíduo de acerola, este ainda foi considerado uma possível fonte alimentar.

Marques (2013) estudou o aproveitamento do resíduo de acerola para a produção de farinhas de bagaço de acerola e de sementes de acerola, além de sua incorporação em barras de cereais. O resíduo foi seco em estufa ventilada, à temperatura de 45°C e o bagaço foi liofilizado até massa constante. Foram preparadas barras de cereais com diferentes concentrações das farinhas de acerola e barras de controle com adição apenas de aveia. As barras de cereais com adição de até 12,5% de farinha de resíduo de acerola e 12,5% de aveia integral foram consideradas com maior valor nutricional e atenderam às exigências do mercado consumidor, pois possuíam baixo valor energético e teores elevados de fibras alimentares.

Silva (2014) realizou a secagem do resíduo de acerola em secador rotoaerado e em secador por infravermelho a temperatura controlada, além de avaliar o efeito de pré-tratamentos do material a fim de obter um produto final de melhor qualidade e um processo

mais eficiente. Foram observadas taxas de secagem maiores quando o resíduo foi tratado com etanol pulverizado e a secagem realizada em temperaturas inferiores a 115°C. A autora também observou aumentos nos teores de fenólicos e flavonoides totais quando o resíduo sofreu este tratamento antes da secagem.

Silva (2015 a) realizou a secagem do resíduo de acerola em leito fixo em camada espessa. Foram avaliadas a influência da velocidade do ar, da temperatura do ar e do tempo de secagem no potencial de desidratação, bem como no teor de compostos bioativos. A condição de secagem com velocidade e temperatura do ar de 1,30 m/s e 60°C com um tempo de 140 min foi a que conduziu a um resíduo mais homogêneo em relação ao teor de umidade em todas as posições axiais e com um teor intermediário dos compostos bioativos avaliados. Neste estudo também não foi encontrado nenhum composto impróprio para o consumo no resíduo de acerola.

## CAPÍTULO 3

### MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 – Material

O resíduo de acerola (Figura 3.1) constituído, principalmente, por caroços e polpa de acerola residual foi cedido pela empresa FrutPres, localizada no município de Presidente Olegário-MG. O material foi transportado sob refrigeração e protegido da claridade. Ao chegar ao Laboratório de Sistemas Particulados (LPD) da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, o mesmo foi armazenado em sacos plásticos, envolvidos em papel alumínio, etiquetados e armazenados a -18 °C. Antes de cada experimento o resíduo foi descongelado a 5 °C pelo período de 24 h.



Figura 3.1 – Resíduo de acerola.

#### 3.2 – Análises

Os resíduos *in natura* foram caracterizados quanto à Umidade, Teor de cinzas, Açúcares Redutores Totais, Ácido Ascórbico, Acidez Total Titulável, Teores de Fenólicos, Flavonoides Totais e diâmetro médio de Sauter. Após a desidratação, também foram efetuadas as análises de compostos bioativos.

### 3.2.1 – Umidade

Os testes de umidade foram realizados de acordo com a norma analítica 4.5.1 do Instituto Adolf Lutz (1985). Uma massa conhecida da amostra foi disposta em estufa a  $105\pm 3^{\circ}\text{C}$  por 24h (Marconi, modelo MA033). Após esse período, a amostra foi transferida para um dessecador até resfriar e ser pesada em balança analítica (precisão  $\pm 0,0001$  g; Marte, AY220). O teor de umidade foi calculado pela diferença da massa antes e após o período na estufa.

### 3.2.2 – Teor de cinzas

Para determinação do teor de cinzas foi utilizada a metodologia descrita na Farmacopéia Brasileira (1988). Cerca de 2 g do material seco em estufa a  $105\pm 3^{\circ}\text{C}$  por 24h foi transferido para cadinhos de porcelana previamente calcinados, arrefecidos e pesados. Os cadinhos com as amostras foram levados para incinerar em mufla (DigiMec série FHMP), à  $500^{\circ}\text{C}$  por 3 h. Após este período, os cadinhos foram retiradas da mufla, levados para repouso em dessecador até atingir a temperatura ambiente e pesados novamente. As porcentagens de cinzas foram calculadas em relação ao material seco.

### 3.2.3 – Massa específica aparente

A massa específica aparente ou densidade foi determinada através da picnometria do resíduo de acerola *in natura* utilizando éter de petróleo ( $\rho = 635 \text{ kg/m}^3$ ) a  $27\pm 1^{\circ}\text{C}$ .

### 3.2.4 – Massa específica real

A umidade do resíduo de acerola foi previamente retirada em estufa a  $105\pm 3^{\circ}\text{C}$  durante 24 h. Em seguida, foram colocadas em dessecador para estabilizar a temperatura. A medida da densidade real foi realizada em um picnômetro a gás hélio da marca Micromeritics, modelo AccuPyc 1330. O hélio, por ser inerte e de átomos pequenos, consegue penetrar nos poros do material, permitindo dessa forma a determinar o volume do sólido com maior precisão.



### 3.2.5 – Porosidade de um leito preenchido com resíduo de acerola

A porosidade do leito foi determinada adicionando, aleatoriamente, uma massa do resíduo em um recipiente cilíndrico até uma altura desejada. A massa adicionada foi mensurada em uma balança Shimadzu, modelo BL3200H, com 0,01 g de precisão. Para calcular o volume do recipiente, este foi limpo, seco e preenchido com água destilada a  $25 \pm 1$  °C até a mesma altura desejada e a massa da água foi aferida. Com os dados obtidos, a porosidade foi calculada através da Equação 3.1. As medidas de porosidade foram realizadas em triplicata.

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_s}{V_c} = 1 - \frac{m_s}{\rho_s} \frac{\rho_a}{m_a} \quad (3.1)$$

Em que:

$\varepsilon$  = porosidade do leito;

$V_s$  = volume do sólido;

$V_c$  = volume do cilindro;

$m_s$  = massa do sólido;

$\rho_s$  = densidade aparente do sólido;

$m_a$  = massa da água e

$\rho_a$  = densidade aparente da água.

### 3.2.6 – Ângulo de repouso estático

O ângulo de repouso estático foi determinado utilizando o sistema apresentado na Figura 3.2. Neste sistema duas placas de madeira paralelas conectadas por uma dobradiça foram fixadas em uma estrutura metálica, sendo uma placa fixa e a outra móvel. A leitura do ângulo foi realizada com ajuda de um transferidor fixado na placa estática. Cerca de 200 g do resíduo de acerola foi espalhado de forma aleatória sobre a placa superior e a placa móvel elevada de forma gradual. No momento em que as primeiras partículas deslizaram foi realizada a leitura do ângulo de repouso estático. O ensaio foi feito em triplicata.



Figura 3.2 - Estrutura para medição do ângulo de repouso estático.

Fonte: Silva (2014).

### 3.2.7 – Ângulo de repouso dinâmico

O ângulo de repouso dinâmico foi realizado em um tambor cilíndrico de diâmetro e altura de 0,1m, construído em acrílico. O aparato experimental utilizado é apresentado na Figura 3.3. O tambor foi preenchido até 50% do seu volume, a velocidade rotacional foi de 2,7 rpm e o ângulo dinâmico de repouso foi obtido com resultados de fotografias (obtidas ao final de cada experimento) dos experimentos utilizando-se o *software* ImageJ. Para determinar a massa necessária para preencher a metade do tambor foi utilizada a Equação 3.2. Esta metodologia foi baseada nos trabalhos de Silvério (2012), Silva (2014) e Silva (2015 a).



Figura 3.3 - Estrutura para medição do ângulo de repouso dinâmico.

Fonte: Silva (2014).

$$m_s = \frac{1}{2} \frac{\pi d_c^2 h_c}{4} \rho_s (1 - \varepsilon) \quad (3.2)$$

Em que:

$d_c$  = diâmetro do tambor cilíndrico e

$h_c$  = altura do tambor cilíndrico.

### 3.2.8 – Determinação do diâmetro da partícula

O Diâmetro Médio de Sauter ( $\overline{D_s}$ ) foi calculado, utilizando a Equação 3.3, com os dados de peneiramento do resíduo de acerola no seguinte conjunto de peneiras da Série Tyler: 1" (25 mm), 3/4" (19,1 mm); 1/2" (12,7 mm) ; 3/8" (9,52 mm); 3,5 # (5,66 mm); 4 # (4,75 mm) e 6 # (3,56 mm).

$$\overline{D_s} = \frac{1}{\sum \Delta s_i / D_i} \quad (3.3)$$

Em que:

$\Delta s_i$  = fração mássica das partículas com diâmetro médio  $D_i$ .

### 3.2.9 – Potencial hidrogeniônico (pH)

O potencial hidrogeniônico foi determinado adicionando, aproximadamente, 15 g do resíduo em 100 mL de água destilada. A mistura foi agitada durante 30 minutos em agitador magnético da marca Fisatom, modelo 751. Após a agitação, o sobrenadante foi filtrado em papel filtro e o pH aferido com um peagâmetro pH 300, marca ION.

### 3.2.10 – Açúcar Redutor Total (ART)

Os açúcares redutores totais foram determinados pela metodologia descrita por Miller (1959). Neste Método, o ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS) é reduzido a ácido 3-amino-5-nitrosalicílico ao mesmo tempo que ocorre a oxidação dos grupos aldeídos e cetônicos à grupos carboxílicos, desenvolvendo uma coloração marrom-alaranjado intensa.

Do sobrenadante filtrado no item 3.2.10, 1 mL foi adicionado a 2 mL de DNS em Tubo Folin-Wu e levado para banho em água fervente durante 5 min. Após este período, os tubos foram resfriados em água gelada, o volume completado até 25 mL e o conteúdo homogeneizado. Então foi feita a leitura da absorbância da mistura no comprimento de ondas de 540 nm em espectrofotômetro V-1200, Pró-análise, utilizando cubetas de quartzo (caminho óptico de 10 mm).

A calibração do zero foi feita utilizando um teste em branco, em que 1 mL de água destilada substituiu a amostra, seguindo o mesmo procedimento. O método foi previamente padronizado por uma curva de calibração de glicose (0,1 a 1,0 mg/mL com intervalos de 0,1 g/L).

### **3.2.11 – Compostos bioativos**

Para determinação dos teores de compostos bioativos do resíduo de acerola *in natura* e após a secagem pelos diversos métodos estudados, o ambiente analítico foi mantido em temperatura de 25°C e luminosidade reduzida. Tais precauções foram tomadas a fim de minimizar a influência de fatores externos aos analisados na degradação dos compostos. A metodologia e material adotado para tais análises são descritos nos itens a seguir:

#### **3.2.11.1 – Acidez Titulável Total (ATT)**

A ATT das amostras foi realizada de acordo com os métodos da *Association of Official Analytical Chemists* – AOAC (1995), com titulação por NaOH 0,1N e aplicando fenolftaleína como indicador de viragem. Os resultados foram expressos em mg de ác. cítrico/100 g amostra, base seca.

#### **3.2.11.2 – Teor de Fenólicos Totais (TPT)**

Foi utilizado o método de Folin-Ciocalteu adaptado (SINGLETON e ROSSI, 1965) para determinar o teor de fenólicos totais, sendo metanol utilizado como solvente extrator. A curva padrão com ácido gálico foi preparada com concentrações variáveis de 0,01 a 0,1 mg/mL e lida em espectrofotômetro com comprimento de onda de 622 nm. Os experimentos

foram realizados em triplicata para três massas distintas e os resultados expressos em mg de ácido gálico equivalente (AGE)/100 g de amostra, em base seca.

#### **3.2.11.3 – Teor de Flavonoides Totais (TFT)**

Para o teor de flavonoides totais o método colorimétrico de Zhishen et al. (1999) foi adaptado. Como solvente extrator também foi utilizado o metanol, já o padrão empregado foi a rutina e a leitura efetuada no comprimento de onda de 450 nm. Para cada experimento foram feitas análises em triplicata para três massas distintas do resíduo, totalizando assim nove resultados por condição. Todos os resultados foram expressos em µg de rutina/100 g de amostra em base seca.

#### **3.2.11.4 – Teor de ácido ascórbico (AA)**

Foi utilizada a metodologia de Dürüst et al. (1997) com adaptações. O espectrofotômetro foi zerado com água destilada e, no comprimento de onda de 520 nm, a absorbância da mistura das soluções de ácido oxálico 0,4% (0,5 mL) com tampão de acetato (0,5 mL) e 2,6-diclorofenol-indofenol (DCFI) 0,05% (4,0mL). Foram realizadas seis leituras e a média foi denominada de L1. Todas as leituras foram realizadas após 15 s.

Para a curva padrão foram preparadas soluções de ácido ascórbico com concentrações variadas de 5 a 70 mg/L. Foram realizadas em triplicatas leituras da absorbância das misturas de cada solução padrão de ácido ascórbico (0,5 mL) com tampão de acetato (0,5 mL) e 2,6-diclorofenol-indofenol 0,05% (4 mL) e estas absorbâncias foram designadas como L2. A curva padrão foi obtida através da regressão linear da diferença L1-L2 com a concentração de ácido ascórbico.

As amostras foram trituradas e massas de 0,5 g, aproximadamente, separadas para a análise. A seguir foram adicionados 25 mL de solução de ácido oxálico (0,4%, m/v) a cada massa e a mistura agitada mecanicamente em tubos do tipo vortex. Esta mistura foi filtrada e o extrato obtido utilizado para as determinações de novos L2. O branco foi feito substituindo a solução de DCFI por água destilada. Os resultados foram expressos em mg ác. ascórbico/100 g de amostra (base seca).

### 3.3 – Análises microbiológicas

A fim de avaliar a vida útil do resíduo de acerola foi quantificado o crescimento de bactérias facultativas e mesófilas (35-37°C) e bolores e leveduras presentes no resíduo a diferentes faixas de umidade (3,7-66,9%, b.u.). O resíduo após desidratado até as umidades desejadas foi acondicionado em unidades seladas a vácuo e protegidas da luminosidade.

As diluições das amostras foram preparadas de acordo com a norma descrita pela ISO 6887-4 (2003), a qual especifica regras de preparação de amostras e diluições decimais para análise microbiológica de produtos alimentares. Nesta metodologia, o material desidratado deve ser deixado em repouso com diluente (água peptonada esterilizada 0,1%) durante 30±5 min para recuperação de injúrias ou “stress” provocados pelo processamento. Após este período o volume é transferido para as diluições subsequentes.

As diluições seriadas foram realizadas adicionando 1 mL da solução de diluição prévia para um tubo de ensaio com 9mL de água peptonada 0,1% estéril, obtendo-se a diluição 10<sup>-1</sup>. A mistura foi agitada por 1 min para garantir total homogeneidade. O procedimento foi repetido retirando 1 mL da diluição anterior até a diluição de 10<sup>-5</sup>.

#### 3.3.1 – Contagem total de microrganismos mesófilos aeróbios

Para determinação das bactérias mesófilas, o meio de cultura utilizado foi o *Plate Count Agar* (PCA) também conhecido como Ágar Padrão, cujos componentes estão relacionados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Constituintes do meio de cultura Ágar Padrão.

Constituinte	Quantidade
Peptona	5 g
Extrato de levedura	2,5 g
Dextrose	1,0 g
Ágar	15 g
Água destilada	1000 mL

No sistema de contagem foi aplicada a metodologia *Spread Plate* descrita por, Silva et al. (2010). Com placas de petri previamente preparadas com aproximadamente 20 mL de meio PCA estéril e solidificado, foi adicionado 0,1 mL de cada diluição à placa e a solução

espalhada com alça de drigalski esterilizada. O plaqueamento foi feito em triplicata em câmara de fluxo laminar e as placas colocadas em estufa a 36 °C por 48 h. Transcorrido o tempo de incubação, fez-se a contagem nas placas que apresentavam Unidades formadoras de Colônia (UFC) entre 30 e 300. Multiplicou-se a média aritmética pelo respectivo fator de diluição e a concentração foi determinada em UFC/g alimento.

### 3.3.2 – Contagem bolores e leveduras

Para a contagem de bolores e leveduras foi aplicada uma metodologia semelhante ao da contagem total de microrganismos mesófilos aeróbios. Entretanto, o meio de cultura utilizado foi o meio Batata Dextrose Agar (BDA) (PINHEIRO et al., 2006), com constituintes apresentados na Tabela 3.2, e o tempo de incubação de 3 a 5 dias na temperatura de 30 °C.

Tabela 3.2 - Constituintes do meio de cultura Ágar Padrão.

Constituinte	Quantidade
Infusão de batata	200 g
Dextrose	20 g
Ágar	15 g
Água destilada	1000 mL

### 3.4 – Secagem

A desidratação do resíduo de acerola foi conduzida através de micro-ondas, micro-ondas a vácuo (com e sem pré-tratamento) e leito fixo auxiliado por infravermelho, conforme apresentado na Figura 3.4. O procedimento experimental e os materiais utilizados são descritos nos itens a seguir:

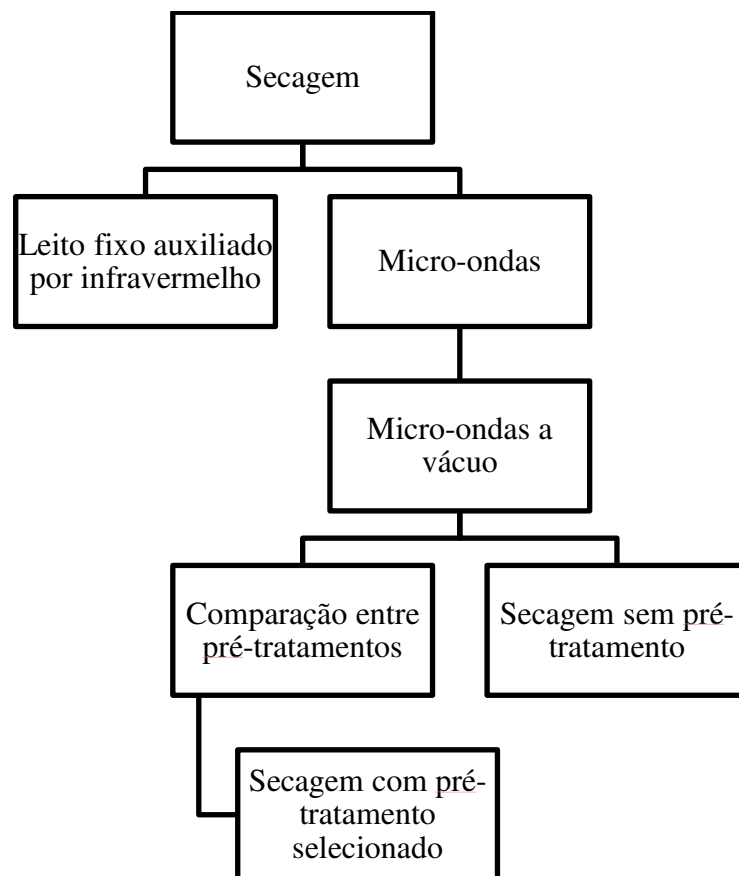


Figura 3.4 – Fluxograma experimental para a desidratação do resíduo de acerola.

### 3.4.1 – Secagem em micro-ondas

Para a secagem do resíduo de acerola em micro-ondas foi utilizado um forno micro-ondas doméstico *flatstyle*, marca Panassonic modelo nº NN-SF560WRUK com frequência de 2450 Hz adaptado para inserção de uma balança analítica, conforme apresentado por Silva (2015 b). Os níveis de potência foram determinados pela metodologia descrita no Apêndice A.

Para cada teste, o forno foi pré-aquecido com 2 L de água durante 5 min em potência máxima, as paredes enxugadas com pano frio e úmido. Para os testes de cinética de desidratação foram colocados  $60,0 \pm 0,5$  g do resíduo de acerola em um recipiente de vidro e este disposto dentro da cavidade do forno a 3 cm da base. Então foi ajustada a potência do forno e iniciou-se o experimento. Em tempos pré-determinados, a massa era lida no visor da balança Shimadzu, Aux 220, acoplada ao aparato (Figura 3.5). Os experimentos foram encerrados quando a taxa de secagem foi inferior 0,1 g/min.

Foram utilizadas as potências de 114, 229, 399 e 513 W (determinadas conforme descrito no Apêndice A). O cálculo do adimensional de umidade ( $MR$ ) foi realizado de acordo



com a Equação 3.4, sendo a umidade de equilíbrio ( $M_{eq}$ ) considerado nula nas secagens envolvendo a aplicação de micro-ondas:

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{M}{M_0} \quad (3.4)$$

Em que:

$M$  = teor de umidade do material e

$M_0$  = teor de umidade inicial do material.

Os modelos de cinética de secagem descritos na Tabela 2.3 foram ajustados aos dados experimentais obtidos para cada nível de potência. Para as análises dos compostos bioativos (TPT, TFT e ATT) os experimentos foram realizados até a umidade final de  $10,0 \pm 1,5\%$ , em base úmida, a fim de evitar a queima do resíduo. O teor de umidade foi determinado utilizando a Equação 3.5.

$$M = \frac{(m - m_c) - (m_0 - m_c) \left(1 - \frac{M_0}{100}\right)}{(m - m_c)} 100 \quad (3.5)$$

Em que:

$m$  = massa da amostra e da câmara de secagem;

$m_c$  = massa da câmara de secagem e

$m_0$  = massa inicial da amostra.

Para avaliar o perfil de temperatura do resíduo foram realizados novos experimentos em todas as potências testadas, no qual o processo foi interrompido em tempos pré-determinados e a aferição da temperatura feita com termômetro infravermelho (Minipa, modelo MT-395).

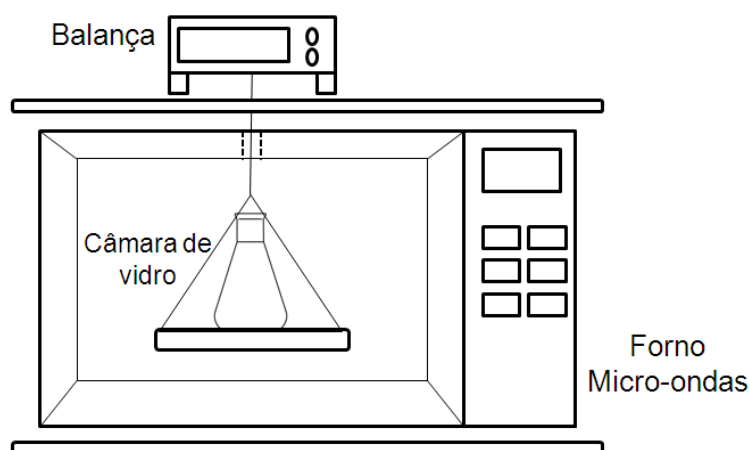


Figura 3.5 – Esquema para secagem em micro-ondas.

### 3.4.2 – Secagem em micro-ondas a vácuo

O forno micro-ondas utilizado para os testes sem vácuo foi adaptado para introduzir uma mangueira de silicone, conectando a câmara de vidro a um sistema de vácuo composto por um kitassato e uma bomba de vácuo marca Primatec2 VC. O kitassato foi preenchido com sílica-gel com a finalidade de reter a umidade liberada durante a secagem. Um esquema do equipamento é representado na Figura 3.6.

Em cada experimento, foi colocado  $60,0 \pm 0,5$  g do resíduo na câmara de vidro e o vácuo desejado aplicado. No painel do forno, a potência foi programada e o experimento iniciado.

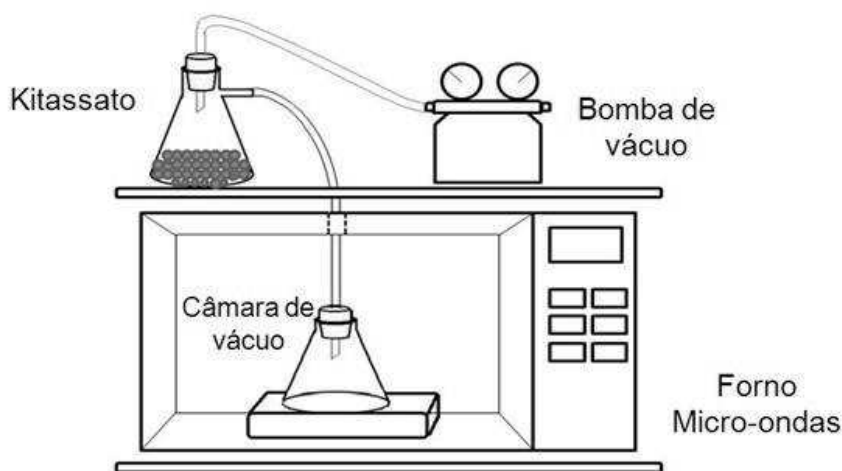


Figura 3.6 – Esquema do aparato experimental para secagem em micro-ondas a vácuo.

Assim como na secagem em micro-ondas, a fim de evitar a carbonização da amostra, o que prejudicaria a análise dos teores de compostos bioativos, os resíduos foram desidratados até a umidade de  $10,0 \pm 1,5\%$ , em base úmida. Os testes foram realizados seguindo o planejamento experimental descrito na Tabela 3.3. A fim de descrever modelos para as respostas em função da potência e do vácuo aplicado foram feitas regressões múltiplas.

Tabela 3.3 – Planejamento experimental para desidratação do resíduo de acerola em micro-ondas a vácuo.

Experimento	Potência (W) ( <i>x1</i> )	Vácuo aplicado (mmHg) ( <i>x2</i> )	<i>x1</i>	<i>x2</i>
1	229	100	-0,4	-1
2	399	100	0,6	-1
3	229	300	-0,4	1
4	399	300	0,6	1
5	229	200	-0,4	0
6	229	200	-0,4	0
7	114	200	-1,2	0
8	513	200	1,3	0
9	229	0	-0,4	-2
10	229	400	-0,4	2

Os valores de *x1* e *x2* estão correlacionados com as variáveis de entrada originais, potência de micro-ondas e vácuo aplicado, e podem ser obtidos através das Equações 3.6 e 3.6:

$$x1 = \frac{\text{Potência (W)} - 300}{170} \quad (3.6)$$

$$x2 = \frac{\text{Vácuo aplicado (mmHg)} - 200}{100} \quad (3.7)$$

Para os experimentos de potência fixa de 229 W e vácuo aplicado variável de 100 a 400 mmHg (experimentos 1, 3, 5/6 e 9) também foram acompanhados a evolução da temperatura do resíduo. Para a coleta de dados de cinética de secagem em micro-ondas a vácuo o processo foi interrompido em tempos pré-determinados, o vácuo desfeito e a massa

pesada. Após a pesagem, o vácuo foi refeito e o forno religado. Para acompanhar a evolução da temperatura do resíduo foram feitas corridas com condições operacionais idênticas, em que o processo foi interrompido, a aferição da temperatura feita com termômetro infravermelho (Minipa, modelo MT-395), porém com pressão contínua e sem pesagem do material para evitar um esfriamento demasiado do material.

### **3.4.3 – Pré-tratamentos**

A fim de aprimorar a secagem e a qualidade final do produto foram testados pré-tratamentos antes da desidratação em micro-ondas a vácuo. Os resíduos submetidos ao branqueamento, sonicação a diferentes frequências e tempos, imersão do resíduo em etanol e pulverização de etanol foram desidratados até  $10,0 \pm 1,5\%$ , base úmida, em micro-ondas a vácuo sob a potência de 229 W e vácuo aplicado de 200 mmHg. Para comparações do impacto na qualidade do produto final foram feitas análises de AA, TPT e TFT.

Depois de selecionado o pré-tratamento que apresentou os melhores resultados em relação aos teores de compostos bioativos e cinética de secagem, o planejamento descrito na Tabela 3.2 foi refeito com o resíduo tratado pelo pré-tratamento selecionado e os dados de cinética e temperatura coletados da mesma forma.

#### **3.4.3.1 – Branqueamento**

Foi realizado de acordo com a metodologia de Doymaz (2010) adaptada, sendo a amostra colocada em água a 75°C por 2,5 min. Após este período, a amostra foi, imediatamente, transferida para água gelada também por 2,5 min.

#### **3.4.3.2 – Ultrassom**

As sonicações foram conduzidas em banhos ultrassônicos sem agitação mecânica em duas potências diferentes. Para os ensaios a 40 kHz, foram avaliados os tempos de sonicação de 10 min (UA10) e 20 min (UA20) mantendo-se água em excesso. Para a segunda condição de frequência (33 kHz) adotou-se o mesmo procedimento (10 min (UB10) e 20 min (UB20)). Após o tratamento com ultrassom as amostras foram colocadas sobre papel absorvente para a retirada do excesso de água superficial.

### 3.4.3.3 – Etanol

Os pré-tratamentos com etanol foram realizados de duas formas, com os resíduos imersos em etanol e com etanol pulverizado sobre o resíduo. O primeiro foi realizado de acordo com a metodologia de Fernandes et al. (2008) adaptada, sendo os resíduos pesados em balança analítica e imersos em etanol 93,0 INPM, na proporção de 1 kg de resíduo para 4 L de etanol durante 5 min. Após esse período resíduos foram dispostos em papel absorvente para remoção do excesso de líquido superficial. No outro método o etanol 93,2 INPM foi pulverizado sobre o resíduo de acerola na proporção de 2 L para 3 kg de resíduo, sendo os mesmos deixadas em repouso por 1,5 h até o momento da secagem. Essa metodologia baseou-se nos trabalhos de Santos e Silva (1997), Braga et al. (2010) e Silva (2014).

### 3.4.4 – Secagem em leito fixo auxiliado por infravermelho

Para a secagem em leito fixo auxiliado por infravermelho foi utilizado uma unidade experimental construída no Laboratório de Sistemas Particulados da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (Figura 3.7).

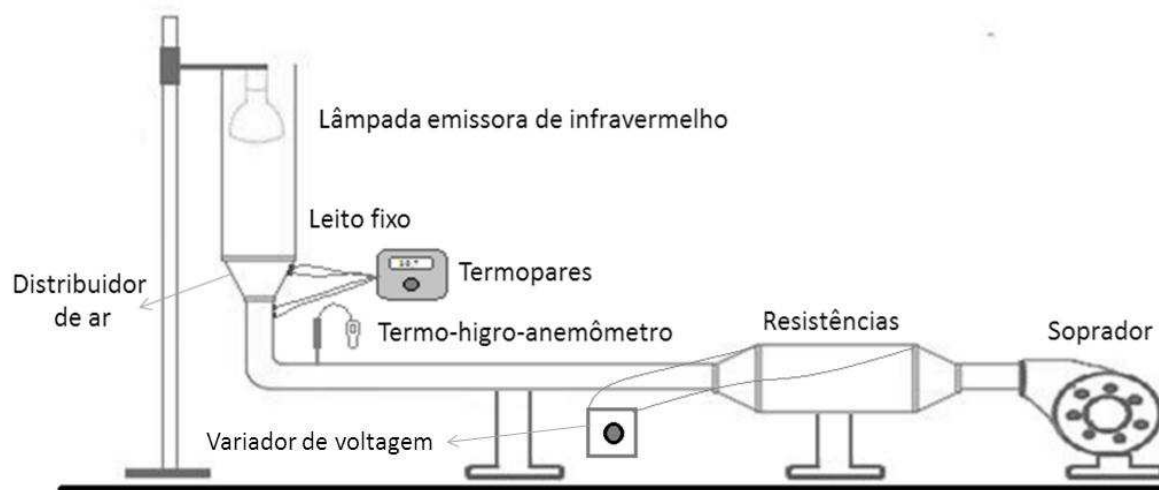


Figura 3.7 – Esquema da unidade experimental para secagem em leito fixo auxiliado por infravermelho.

O secador foi composto por um soprador do tipo ventilador radial de 7,5 cv (Keppler Weber, modelo 112M) com um inversor de frequência (CFW08) e ligado a uma tubulação com resistências elétricas com variador de voltagem (Renê Graf de entrada 220 V e saída 0-220 V), um tronco de cone preenchido por esferas de vidro para a distribuição uniforme do ar

de secagem, leito fixo e uma lâmpada incandescente de emissão infravermelha modelo E27 com 250 W de potência, marca NardExpress. Para a leitura da velocidade, temperatura de bulbo seco e bulbo úmido foram utilizados um medidor de velocidade anemômetro de fio quente modelo VelociCalc – TSI e termopares de cobre-constantan. A tubulação de escoamento do ar de secagem possuía 0,08 m de diâmetro e a célula de secagem 0,60 m de comprimento e 0,25 m de diâmetro interno.

O tempo total de secagem de 230 min (fixo para todos os experimentos), assim como as variáveis velocidade e temperatura do ar de secagem foram baseadas no estudo realizado por Silva (2015 a), que também secou resíduo de acerola em leito fixo com camada espessa (0,25 m), porém sem a radiação infravermelha acoplada. No presente estudo, a camada de resíduo adotada foi de 0,20 m.

A fim de verificar a influência das variáveis velocidade ( $v$ ), temperatura ( $T$ ) do ar de secagem e intensidade de radiação infravermelha (IR) no teor de umidade ao longo do leito, no tempo de secagem e na qualidade do resíduo seco, foram realizados 9 experimentos conforme apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4–Planejamento experimental na desidratação em leito fixo auxiliado por infravermelho.

Experimento	$v$ (m/s)	$T$ (°C)	IR (W/m <sup>2</sup> )
1	0,2	40	350
2	0,2	40	1050
3	0,4	31,8	700
4	0,4	88,2	700
5	0,4	60	206,5
6	0,4	60	1193,5
7	0,4	60	700
8	0,4	60	700
9	0,4	60	700

O procedimento experimental foi baseado nos trabalhos de Souza (2013) e Silva (2015 a), que secaram soja e resíduo de acerola em leito fixo com camada espessa, respectivamente. No início de cada experimento, as condições operacionais foram estabelecidas e o sistema ligado. Quando a temperatura do ar antes e após o distribuidor de ar coincidia com o valor definido para a corrida, foi realizada a leitura de bulbo seco e bulbo

úmido nas duas posições. Então o resíduo de acerola era inserido no leito pela abertura superior até formar uma camada de 0,20 m. A lâmpada de emissão de infravermelho ligada a 20 cm da camada superior do leito e a contagem do tempo de experimento iniciada. A intensidade da radiação infravermelha foi manipulada através de um *dimer* e aferida através de um medidor de radiação da Instrutherm, modelo MES-200.

Com um mostrador do tipo calador (Figura 3.8) foram retiradas amostras do resíduo no leito nas posições axiais de 0,05; 0,10; 0,15 e 0,20 m (a partir da base do leito) e as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido verificadas nos tempos de secagem de 30, 60, 120, 180 e 230 min. Com as amostras coletadas foram obtidos os teores de umidade de cada posição no leito ao longo do tempo através do método gravimétrico ( $105 \pm 3^\circ\text{C}$  por 24 h). A umidade relativa do ar (UR) para todos os experimentos esteve compreendida na faixa de 15a35%. A  $M_{eq}$  (Equação 3.8) foi calculada através da Equação de Sigma-Copace (CORREA et al., 1995) com parâmetros para o resíduo de acerola definidos por Silva (2015 a).



Figura 3.8 – Mostrador tipo calador.

$$M_{eq} = \exp[a - bT + c \exp(UR)] \quad (3.8)$$

Em que:

$$a = -0,0738;$$

$$b = 0,0132;$$

$$c = 1,5778.$$

O cálculo do adimensional de umidade do resíduo foi realizado conforme a Equação 3.9 (SOUZA, 2013).

$$MR = \frac{M - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} \quad (3.9)$$

## CAPÍTULO 4

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 4.1 – Caracterização do resíduo de acerola

Os resultados obtidos na caracterização físico-química do resíduo de acerola são apresentados na Tabela 4.1, assim como dados encontrados na literatura.

Observa-se que a ATT (baseada no conteúdo de ácido cítrico) encontrada neste trabalho, 2,02 g ácido cítrico/100 g (b.s.), foi ligeiramente inferior aos valores descritos na literatura para o resíduo de acerola. Entretanto esteve na mesma ordem de grandeza. Já o ART ficou compreendido na faixa analisada em demais trabalhos, que foi de 1,80 a 2,50 g de glicose/100 g em base seca. Sendo que o valor observado neste estudo foi de  $1,83 \pm 0,07$  g de glicose/100 g (b.s.). O mesmo aconteceu para TFT. Por outro lado, o TPT foi superior aos valores encontrados por demais autores.

Comparando especificamente os dados de TFT com os resultados de um trabalho prévio do nosso grupo de pesquisa (SILVA, 2015 a) e sabendo que foram feitas nove observações nos dois estudos, quando realizada uma análise estatística de comparação de médias baseada na distribuição *t-student*, verifica-se que as médias são estatisticamente iguais nos dois estudos. Entretanto, isto não ocorreu para o TPT que foi diferente nos dois estudos.

A amostra *in natura* apresenta uma alta concentração de compostos bioativos, pois este é superior a 1000 mg AGE/100 g. Amostras com concentrações compreendidas entre 100 e 1000 mg AGE/100 g são de valores intermediários e abaixo deste intervalo são consideradas baixas concentrações (VASCO, 2009).

O Teor de Ácido Ascórbico (AA) foi o composto que apresentou maior variação quando comparado com a literatura. O valor observado neste estudo chegou a ser cerca de 60% inferior ao encontrado por Nóbrega (2012). Apesar de inferior aos dados da literatura para o AA, o resíduo utilizado neste trabalho pode ser considerado fonte de vitamina C, pois segundo a Resolução de diretoria colegiada – RDC no 269 da Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA (BRASIL, 2005) a ingestão diária recomendada (IDR) de vitamina C para adultos é 45 mg/dia. Adotando-se a porção padronizada em 100 g em base seca



(BRASIL, 2003), o resíduo de acerola 861% da IDR para Vitamina C. Para um alimento ser considerado com “alto teor” de vitaminas precisa fornecer no mínimo 30% da IDR de referência por 100 g (BRASIL, 1998).

Tabela 4.1 - Caracterização do resíduo de acerola e comparação com a literatura.

Análise	Este trabalho	Literatura
Acidez Total Titulável (ATT) (g ác. cítrico/100 g, b.s.)	2,02±0,1	2,56±0,07 <sup>1</sup> 2,46±0,09 <sup>2</sup>
Açúcar redutor total (ART) (g glicose/100 g, b.s.)	1,83±0,07	2,13±0,08 <sup>1</sup> 2,50±0,1 <sup>4</sup> 1,80-2,38 <sup>5</sup>
Ácido Ascórbico (AA) (mg ác ascórbico/100 g, b.s.)	387,33±19,04	1002,38±13,80 <sup>4</sup>
Teor de fenólicos totais (TPT) (mg AGE/100 g, b.s.)	1505,21±49,1	446,4±16,8 <sup>1</sup> 1352,42±57,23 <sup>2</sup>
Teor de flavonoides totais (TFT) (µg rutina equivalente/100 g, b.s.)	1618,02±97,43	800 <sup>3</sup> 1000±14 <sup>2</sup> 1650±15 <sup>1</sup>
Teor de Cinzas (g/100 g b.u.)	3,25±0,15	2,46±0,09 <sup>1</sup> 3,04±0,05 <sup>2</sup>
pH	3,63±0,1	3,2±0,18 <sup>1</sup> 3,54±0,01 <sup>6</sup>
Massa específica real (kg/m <sup>3</sup> )	1574,6±34,9	1426,05±0,7 <sup>1</sup> 1427,50 ± 9,40 <sup>2</sup>
Massa específica aparente (kg/m <sup>3</sup> )	886,25±35,23	823,54±3,36 <sup>1</sup> 860,6±10,6 <sup>2</sup>
Umidade (%)	80,84±1,31	79,38±1,46 <sup>1</sup>
Ângulo de repouso estático	52±1°	50,67 ± 0,44 <sup>o1</sup> 40,0±2,20 <sup>o1</sup> 48,0±0,20 <sup>o3</sup>
Ângulo de repouso dinâmico	51,83±1,43°	55,87±0,28 <sup>o1</sup> 50,50±2,10 <sup>o2</sup> 49,3±4,20 <sup>o4</sup>
Diâmetro médio de Sauter (mm)	7,91	7,05 <sup>3</sup>

Fontes: <sup>1</sup>Silva(2015 a); <sup>2</sup>Silva (2014); <sup>3</sup>Bortolotti (2012); <sup>4</sup>Nóbrega (2012), <sup>5</sup>Braga et al. (2011) e <sup>6</sup>Matsuura et al. (2001).

O teor de cinzas obtido, assim como o pH e a densidade aparente, apesar de superiores, estão próximos dos valores descritos na literatura. Já as médias do teor de umidade do resíduo utilizado neste trabalho e aquele utilizado no estudo de Silva (2015 a) são estatisticamente iguais, considerando a distribuição *t-student* com 18 observações e coeficiente de confiança de 95%.

Tanto a massa específica real quanto a massa específica aparente do resíduo de acerola utilizados neste trabalho foram ligeiramente superiores aos valores descritos na literatura. Vale ressaltar que para a determinação da densidade real o material havia sido seco em estufa à 105°C, enquanto que para a obtenção da densidade aparente foi utilizado o material úmido (*in natura*).

Segundo Jong et al. (1999), a escoabilidade de um material pode ser relacionada com seus ângulos de repouso, pois quanto menor o ângulo de repouso dinâmico maior será a escoabilidade do sólido. Neste trabalho, os valores para os ângulos de repouso estático e dinâmico foram próximos e relativamente altos (acima de 50°). Segundo a classificação adotada por Kaye (1997) citado por Carvalho (2013), materiais com ângulo de repouso estático menor que 30° são classificados como sendo de fácil escoamento. Para aqueles com ângulo de repouso estático entre 30° e 50° são considerados de difícil escoamento e, acima de 50° o material é classificado como coesivo. Dentro desse contexto, o resíduo de acerola se classifica como um material coeso, indicando que é preferencial a escolha de secadores estáticos, como leito fixo. Altos valores para o ângulo de repouso podem estar relacionados com a umidade do material e a baixa esfericidade (MEDEIROS et al., 2001).

O Diâmetro médio de Sauter apresentado pelo resíduo utilizado neste trabalho foi de 7,91 mm, valor superior ao encontrado por Bortolotti (2012). Vale ressaltar que todos nutrientes, compostos bioativos e características físico-químicas analisadas têm valores intimamente ligados às características de cultivo, condições ambientais, safra e estágio de maturação (MATSUURA et al., 2001), justificando assim as diferenças encontradas entre os dados deste trabalho e de alguns estudos da literatura.

#### **4.2 – Análises microbiológicas**

Na Tabela 4.2 são apresentados os resultados do crescimento de bactérias mesófilas aeróbias e facultativas no resíduo de acerola em diferentes umidades ao longo do tempo. Observa-se que o resíduo de acerola com umidade inferior a 26,2%, em base úmida, não

apresentou ambiente favorável para o desenvolvimento de bactérias mesófilas no período de 24 semanas (seis meses). Para as umidades de 47,7 e 66,9% (base úmida) os experimentos foram encerrados após a 4ª semana, pois já havia sido detectado o crescimento exponencial destes microrganismos.

Sabe-se que a presença de microrganismos em alimentos não significa, necessariamente, um risco para o consumidor ou uma qualidade inferior destes produtos. Entretanto, segundo o *International Commission on Microbiological Specifications for Foods* (ICMSF), se o alimento apresenta condições que permitem a entrada e/ou crescimento de agentes infecciosos ou toxigênicos, pode se tornar um veículo de transmissão de doenças. Sendo assim, o número UFC de microrganismos aeróbios mesófilos encontrado em um alimentos através da contagem em placas tem sido um dos indicadores microbiológicos da qualidade dos alimentos e sua provável vida útil (ICMSF, 1984).

Tabela 4.2 – Crescimento\* de bactérias mesófilas aeróbias ou facultativas no resíduo de acerola ao longo do tempo.

Umidade (%, b.u.)	Semanas								
	1	2	3	4	8	12	16	20	24
3,7	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
19,4	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
26,2	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
47,7	1,42.10 <sup>3</sup>	1,71.10 <sup>3</sup>	3,40.10 <sup>3</sup>	9,08.10 <sup>3</sup>	-	-	-	-	-
66,9	5,13.10 <sup>4</sup>	5,75.10 <sup>4</sup>	1,55.10 <sup>4</sup>	2,81.10 <sup>4</sup>	-	-	-	-	-

\* Resultados expressos em UFC/g. NC significa que não houve crescimento de microrganismos.

A contagem de bolores (fungos filamentosos multicelulares) e leveduras é aplicável, principalmente, na análise de alimentos ácidos, com pH menor que 4,5, alimentos parcialmente desidratados e farinhas. A presença destes em elevados índices mostra falhas no processamento e/ou estocagem do alimento (SIQUEIRA, 1995). Na Tabela 4.3 são apresentados os resultados de bolores e leveduras no resíduo de acerola em diferentes umidades ao longo do tempo.

Observa-se que o resíduo de acerola com umidade inferior a 26,2%, em base úmida, assim como ocorreu para bactérias mesófilas, não apresentou ambiente favorável para o crescimento de bolores e de leveduras dentro seis meses.

Tabela 4.3 – Crescimento\* de bolores e leveduras no resíduo de acerola ao longo do tempo.

Umidade (%, b.u.)	Semanas								
	1	2	3	4	8	12	16	20	24
3,7	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
19,4	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
26,2	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC
47,7	$1,26.10^3$	$2,20.10^3$	$4,20.10^3$	$8,00.10^3$	-	-	-	-	-
66,9	$3,22.10^3$	$7,55.10^4$	$1,85.10^5$	$6,80.10^5$	-	-	-	-	-

\* Resultados expressos em UFC/g. NC significa que não houve crescimento de microrganismos.

Assim, é possível afirmar que de acordo com os padrões microbiológicos estabelecidos pela Resolução RDC nº 12 de 01 de janeiro de 2001, da ANVISA (BRASIL, 2001), o resíduo de acerola desidratado com teores de umidade inferiores a 26,2% são estéreis durante seis meses de armazenamento.

### 4.3 - Secagem

#### 4.3.1 - Secagem em micro-ondas

##### 4.3.1.1 - Considerações gerais e cinética desidratação

Antes de avaliar a secagem híbrida em micro-ondas a vácuo, foram realizados testes de desidratação do resíduo de acerola utilizando apenas micro-ondas. Os testes foram realizados para as potências de 114, 229, 399 e 513 W e foram divididos em duas etapas.

Na primeira, o resíduo foi desidratado até massa praticamente constante e os modelos de cinética de secagem descritos na Tabela 2.1 foram ajustados os dados de adimensional de umidade ( $MR$ ) ao longo do tempo. Já a segunda etapa consistiu na secagem do resíduo para todas as potências mencionadas até um teor de  $10,0 \pm 1,5\%$  em base úmida. Esta etapa teve como objetivo analisar o efeito da variação de potência nos teores de compostos bioativos.

Dentre a discriminação dos modelos rivais (Apêndice B), a equação que melhor representou os dados experimentais foi a de Overhults, com coeficiente de correlação médio de 99,86% e parâmetros apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Coeficientes para modelo de Overhults et al. (1973) para a desidratação por micro-ondas.

Potência (W)	Parâmetros e Coeficiente de Correlação		
	k	N	R <sup>2</sup>
114	0,032	1,358	0,9990
229	0,064	1,223	0,9986
399	0,102	1,335	0,9981
513	0,119	1,191	0,9987

Na Figura 4.1 estão representadas as curvas de cinética de secagem, assim como o ajuste pelo modelo de Overhults et al. (1973) para todas as potências.

O resultado esperado que em potências mais altas a secagem ocorra de forma mais rápida foi encontrado. Entretanto a relação entre o aumento da densidade de potência, razão da potência pela massa de material a ser seco, e o efeito na cinética de secagem não é linear, indicando que há algum valor crítico de densidade de potência (razão entre a massa do material e a potência de micro-ondas aplicada) a partir do qual não há ganhos no que se refere a cinética de secagem.

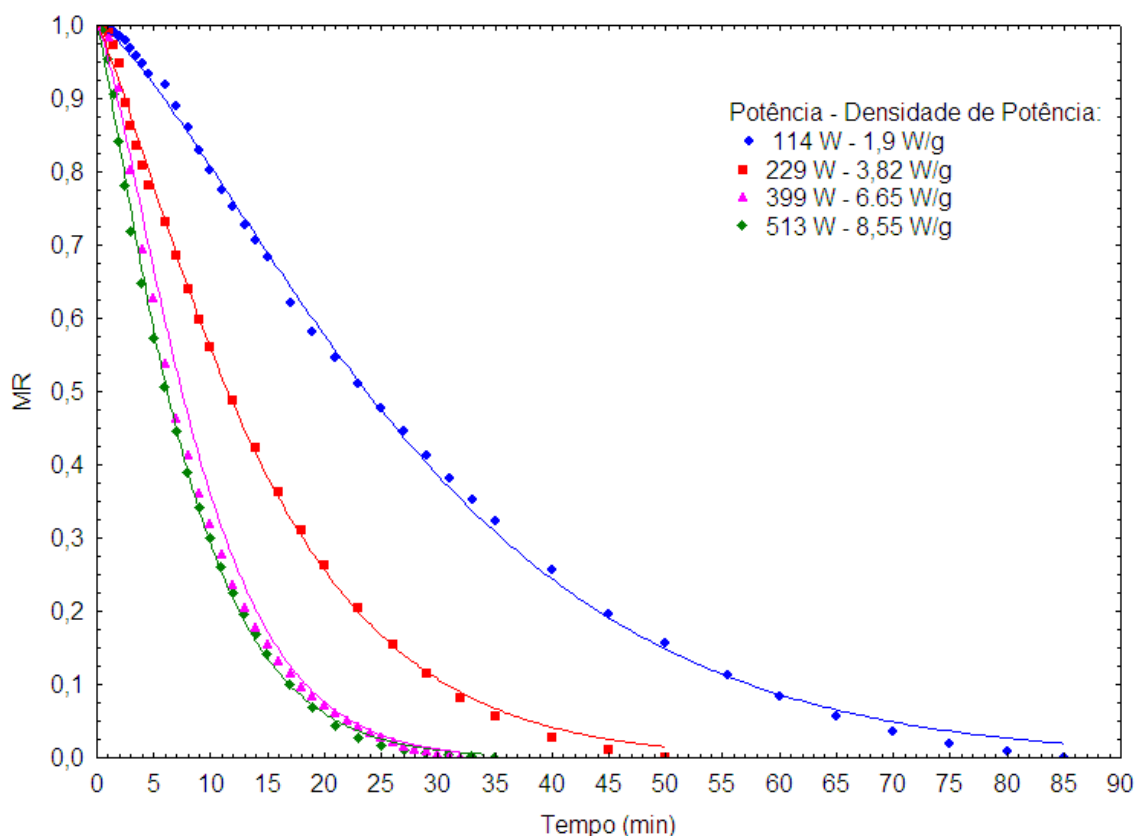


Figura 4.1 – Curvas de cinética de secagem para diferentes potências.

Na Figura 4.2 é apresentada a evolução da temperatura do resíduo de acerola na secagem em micro-onda. Observa-se que para todas as potências utilizadas (114, 229, 399 e 513 W) o resíduo atinge temperaturas constantes próximas, pois a desidratação ocorre a pressão atmosférica e a água apresenta o mesmo ponto de ebulição. Entretanto, nota-se que quando é utilizada a potência de 114 W são necessários 4 min para que o material atinja a temperatura constante, enquanto para a potência de 513 W requer metade deste período (2 min) para atingir a mesma temperatura.

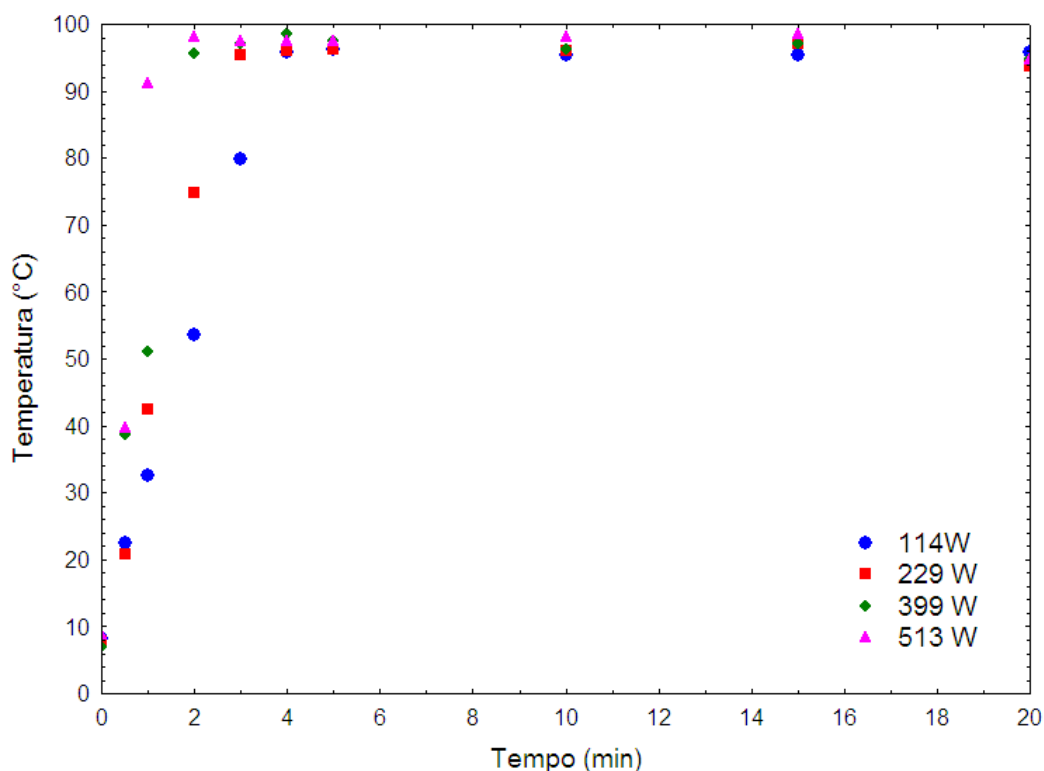


Figura 4.2 – Perfil de temperatura do resíduo de acerola desidratado em diferentes potências.

Segundo Zhang et al. (2006), a ação das micro-ondas no alimento podem ser divididas em três estágios distintos. No primeiro ocorre o aquecimento do alimento com a conversão da energia das micro-ondas em energia térmica. No segundo estágio o material estabelece um perfil de temperatura estável e a energia de micro-ondas convertidas em calor é utilizada para evaporar a umidade. Este segundo estágio perdura até uma umidade crítica, a partir da qual a temperatura do material se eleva resultando no superaquecimento ou até mesmo carbonização do material. Como pode ser observado na Figura 4.2, o processo foi interrompido antes de atingir o terceiro estágio.

#### 4.3.1.2 - Compostos bioativos

Na Figura 4.3 são apresentadas as médias de TPT, TFT e ATT após a secagem em micro-ondas. A comparação entre médias foi baseada na distribuição *t-student* com um índice de confiança de 95%. Letras diferentes em colunas diferentes indicam médias estatisticamente distintas ( $p \leq 0,05$ ).

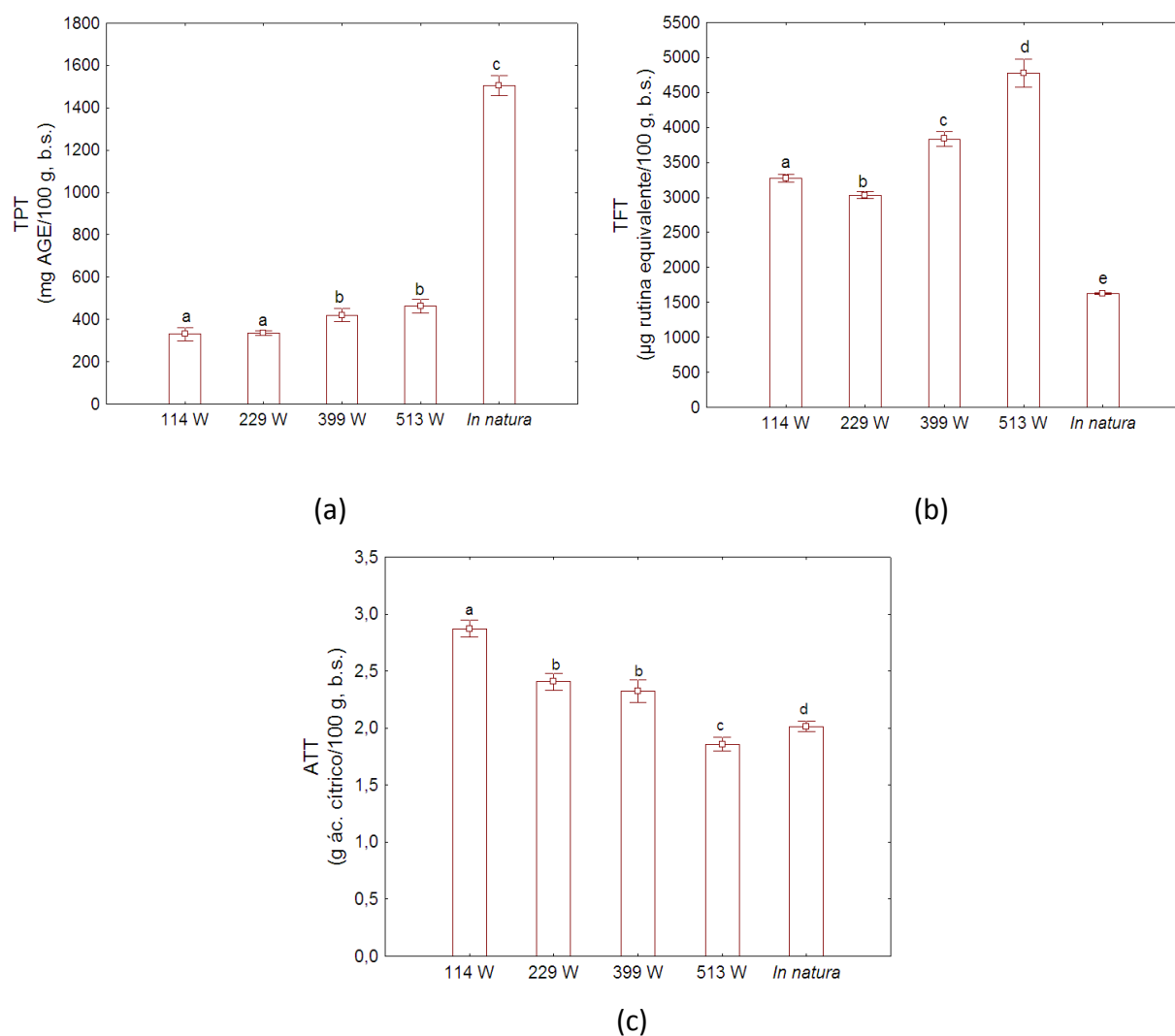


Figura 4.3 – Variação de compostos bioativos após a desidratação do resíduo de acerola em micro-ondas: (a) TPT, (b) TFT, (c) ATT.

Para qualquer potência de operação do forno micro-ondas houve redução do TPT em relação ao resíduo *in natura*, conforme pode ser observado na Figura 4.2(a). Esta diminuição pode estar relacionada com a degradação térmica sofrida pelos compostos. Também é possível observar que o TPT aumenta ligeiramente com a elevação da potência,

provavelmente devido ao rompimento das fibras e liberação de compostos. Este fenômeno já foi relatado por diversos autores, como Silva (2015 b) secando resíduo de maracujá em micro-ondas.

Tal efeito é observado de forma ainda mais clara para o TFT (Figura 4.2 b), pois os valores após a secagem são superiores ao do resíduo *in natura*. Sendo assim, a liberação de flavonoides, que são um subgrupo que compõe os compostos fenólicos, favorece o aumento do TPT verificado com o incremento da potência.

O aumento da ATT em relação ao resíduo *in natura* pode estar ligado com a facilidade de se extrair ácido cítrico depois da secagem. Após o processo de desidratação, o composto que antes estava ligado é liberado devido ao rompimento de constituintes celulares durante a secagem (CHISM e HAARD, 1996). Já a redução da ATT com o aumento da potência está relacionada à degradação térmica, pois em potências mais altas o material também atinge temperaturas superiores. Maia et al. (2007) também verificaram degradação do ácido cítrico em suco de acerola após tratamento térmico.

Pode-se observar que a secagem em micro-ondas é um processo promissor na desidratação de resíduo de acerola, pois reduziu a umidade a níveis desejados em pouco tempo. Apesar de haver reduções nos teores de fenólicos totais, o resíduo apresenta um bom potencial e pode ser considerado de concentrações intermediárias, segundo a classificação de Vasco (2009).

#### **4.3.2 - Secagem em micro-ondas a vácuo**

##### **4.3.2.1 - Considerações gerais e cinética desidratação**

A fim de aprimorar a secagem em micro-ondas, foram realizados novos testes de desidratação, acoplando um sistema de vácuo para redução da pressão na câmara de secagem. Considerando os modelos de cinética de secagem já descritos, aquele proposto por Overhults et al. (1973) continua sendo o modelo que melhor ajusta os dados experimentais de cinética de desidratação em micro-ondas a vácuo. A discriminação dos demais modelos é apresentada no Apêndice C. Na Tabela 4.2 são apresentados os parâmetros para cada condição operacional.



Tabela 4.5 - Coeficientes para modelo de Overhults et al. (1973) para a desidratação por micro-ondas a vácuo

Potência (W)	Vácuo Aplicado (mmHg)	Overhults et al. (1973)		
		k	n	R <sup>2</sup>
229	100	0,053	2,479	0,9992
399	100	0,102	2,680	0,9979
229	300	0,047	2,015	0,9989
399	300	0,105	2,529	0,9945
229	200	0,052	2,272	0,9950
229	200	0,049	2,324	0,9963
114	200	0,018	1,754	0,9989
513	200	0,119	2,303	0,9952
229	400	0,044	2,076	0,9989
229	0	0,044	2,670	0,9908

Com os resultados apresentados na Tabela 4.5, foram propostas equações empíricas através de técnicas de regressão múltipla para a constante de cinética de secagem (k) e para o parâmetro n. As variáveis independentes foram adimensionalizadas conforme mostram as Equações 4.1 e 4.2 presentes na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Adimensionalização das variáveis independentes na secagem de resíduo de acerola em micro-ondas a vácuo.

Variável	Equação	Adimensionalização
Potência (W)	4.1	$x_1 = \frac{Potência - 300}{170}$
Vácuo aplicado (mmHg)	4.2	$x_2 = \frac{Vácuo\ aplicado - 200}{100}$

Para as regressões foi adotado um nível de significância de 10% ( $\alpha \leq 0,10$ ). Os modelos obtidos estão representados pelas Equações 4.3 e 4.4, com coeficientes de correlação de 98,54% e 94,13% para os parâmetros k e n, respectivamente.

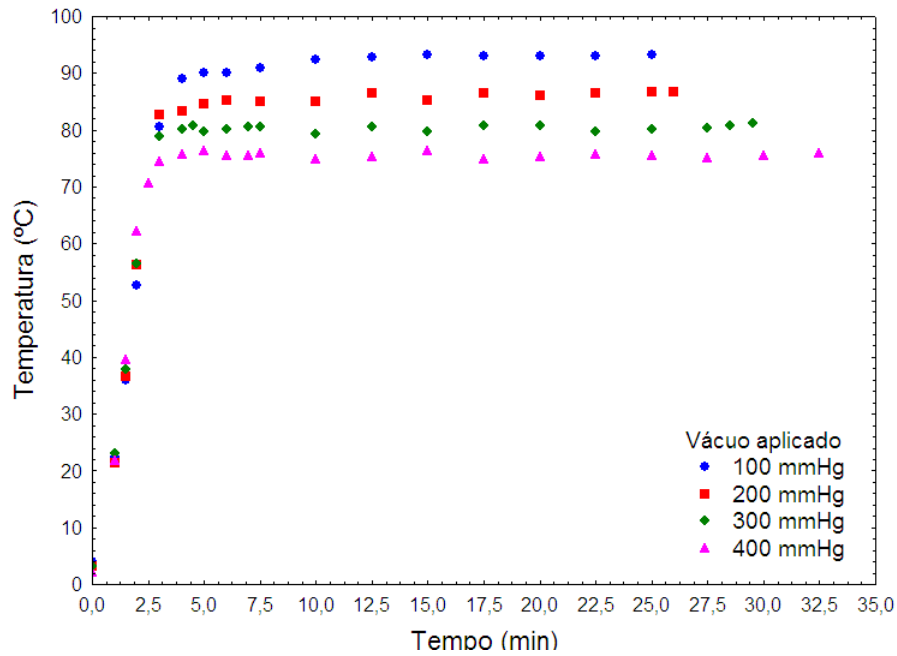
$$k = 0,0751 + \underline{x}^T b_1 + \underline{x}^T B_1 \underline{x} \quad (4.3)$$

$$\text{Na qual: } b_1 = \begin{bmatrix} 0,0479 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ e } B_1 = \begin{bmatrix} 0 & -0,0039 \\ -0,0039 & -0,0022 \end{bmatrix} \underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

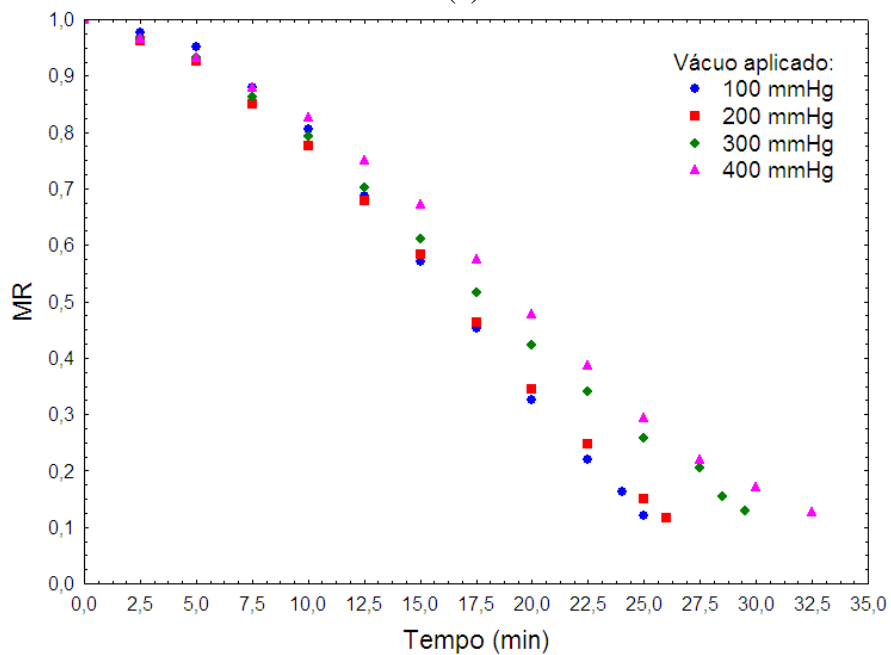
$$n = 2,5132 + \underline{x}^T b_2 + \underline{x}^T B_2 \underline{x} \quad (4.4)$$

$$\text{Na qual: } b_2 = \begin{bmatrix} 0,3159 \\ -0,1502 \end{bmatrix} \text{ e } B_2 = \begin{bmatrix} -0,3684 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Na Figura 4.4 são apresentados os dados de temperatura do material ao longo do tempo de secagem (Figura 4.4a), assim como a cinética de secagem (Figura 4.4b) para a potência fixa do forno micro-ondas de 229 W em diferentes níveis de vácuo aplicado.



(a)



(b)

Figura 4.4 – Temperatura do material (a) e cinética de secagem (b) do resíduo de acerola desidratado em micro-ondas a vácuo com potência de 229 W e diferentes níveis de vácuo aplicado.

Nota-se que com o aumento do vácuo aplicado de 100 para 400 mmHg houve uma redução de aproximadamente 20°C na temperatura do sólido e um aumento no tempo de secagem. Neste caso, as moléculas de água excitadas pela ação das micro-ondas difundem para a superfície e evaporam devido à baixa pressão. A baixa pressão ainda faz com que o ponto de ebulição da água reduza, permitindo que os produtos sejam secos a uma temperatura mais baixa do que produtos sob pressão atmosférica (CHEN et al.,2008).

#### 4.3.2.2 - Compostos bioativos

Na Tabela 4.7 são apresentados os teores dos compostos bioativos do resíduo de acerola ao final de cada experimento de secagem em micro-ondas a vácuo.

Tabela 4.7 – Teores de compostos bioativos dos resíduo de acerola ao final de cada experimento de secagem em micro-ondas a vácuo.

Potência (W)	Vácuo Aplicado (mmHg)	AA (mg ác. Ascórbico/100 g, b.s.)	TPT (mg AGE/100 g, b.s.)	TFT (µg rutina equivalente/100 g, b.s.)
229	100	820,58	378,64	3565,12
399	100	958,56	406,31	3716,51
229	300	1100,96	403,02	3788,25
399	300	1204,09	396,24	4265,48
229	200	1091,54	410,49	3483,29
229	200	1077,81	408,58	3450,85
114	200	1018,96	414,99	4142,02
513	200	1201,24	464,34	4430,71
229	400	1158,48	404,55	4183,44
229	0	662,19	335,96	3034,01

A fim de quantificar o comportamento dos compostos bioativos em função das variáveis estudadas foram realizadas regressões múltiplas com nível de significância de 10% ( $\alpha \leq 0,10$ ). A adimensionalização utilizada na matriz  $\underline{x}$  é a mesma apresentada na Tabela 4.6. Em todas as regressões, a distribuição dos resíduos foi aleatória.

A função obtida por regressão múltipla dos fenólicos totais (TPT) teve um  $R^2 = 95,76\%$  e é descrita pela Equação 4.5. Na regressão todos os fatores, assim como seus termos quadráticos e a interação entre eles foram significativos estatisticamente.

$$TPT = 401,96 + \underline{x} \cdot b_3 + \underline{x} \cdot B_3 \underline{x} \quad 4.5$$

$$\text{Na qual: } b_3 = \begin{bmatrix} 11,23 \\ 7,31 \end{bmatrix} \text{ e } B_3 = \begin{bmatrix} 26,58 & -10,59 \\ -10,59 & -8,55 \end{bmatrix} \underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Na regressão múltipla para os flavonoides totais, apenas os termos do vácuo aplicado e o termo quadrático da potência foram estatisticamente significativos. A função apresentou um coeficiente de correlação de 85,55% e é representada na Equação 4.6. Já a regressão para o teor de ácido ascórbico (Equação 4.7) foi capaz de explicar em 96,52% a variação deste composto em função da potência e vácuo aplicado. Nela o termo quadrático da potência e o termo da interação entre as variáveis não se mostraram significativos estatisticamente.

$$TFT = 3555,87 + \underline{x} \cdot b_4 + \underline{x} \cdot B_4 \underline{x} \quad 4.6$$

$$\text{Na qual: } b_4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 255,91 \end{bmatrix} \text{ e } B_4 = \begin{bmatrix} 556,78 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

$$AA = 1086,53 + \underline{x} \cdot b_5 + \underline{x} \cdot B_5 \underline{x} \quad 4.7$$

$$\text{Na qual: } b_5 = \begin{bmatrix} 76,78 \\ 126,54 \end{bmatrix} \text{ e } B_5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -40,01 \end{bmatrix} \underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Na Figura 4.5 são apresentadas as superfícies de resposta para teor de fenólicos totais, teor de flavonoides totais e teor de ácido ascórbico em função das variáveis analisadas.

Pode-se verificar na Figura 4.5(a) que em níveis de potência mais baixos, o vácuo aplicado exerce uma maior influência para o TPT, aumentando o valor do teor de fenólicos totais com o aumento do vácuo aplicado. Wojdylo et al. (2009), secando morangos em micro-ondas a vácuo, também encontraram teores de fenólicos inferiores ao do fruto *in natura*. Sugerindo assim, que as perdas de fenólicos se devem à degradação térmica com o aumento da potência durante o processo de secagem. O mesmo foi verificado por Calín-Sánchez et al. (2013) e Calín-Sánchez et al. (2014) para romã e fatias de alho quando secas em micro-ondas a vácuo. Como visto na Tabela 4.1, o resíduo de acerola utilizado *in natura* neste trabalho apresenta 1505,21 mg AGE/100 g, ou seja, valor superior aos verificados após a secagem (Figura 4.5a).

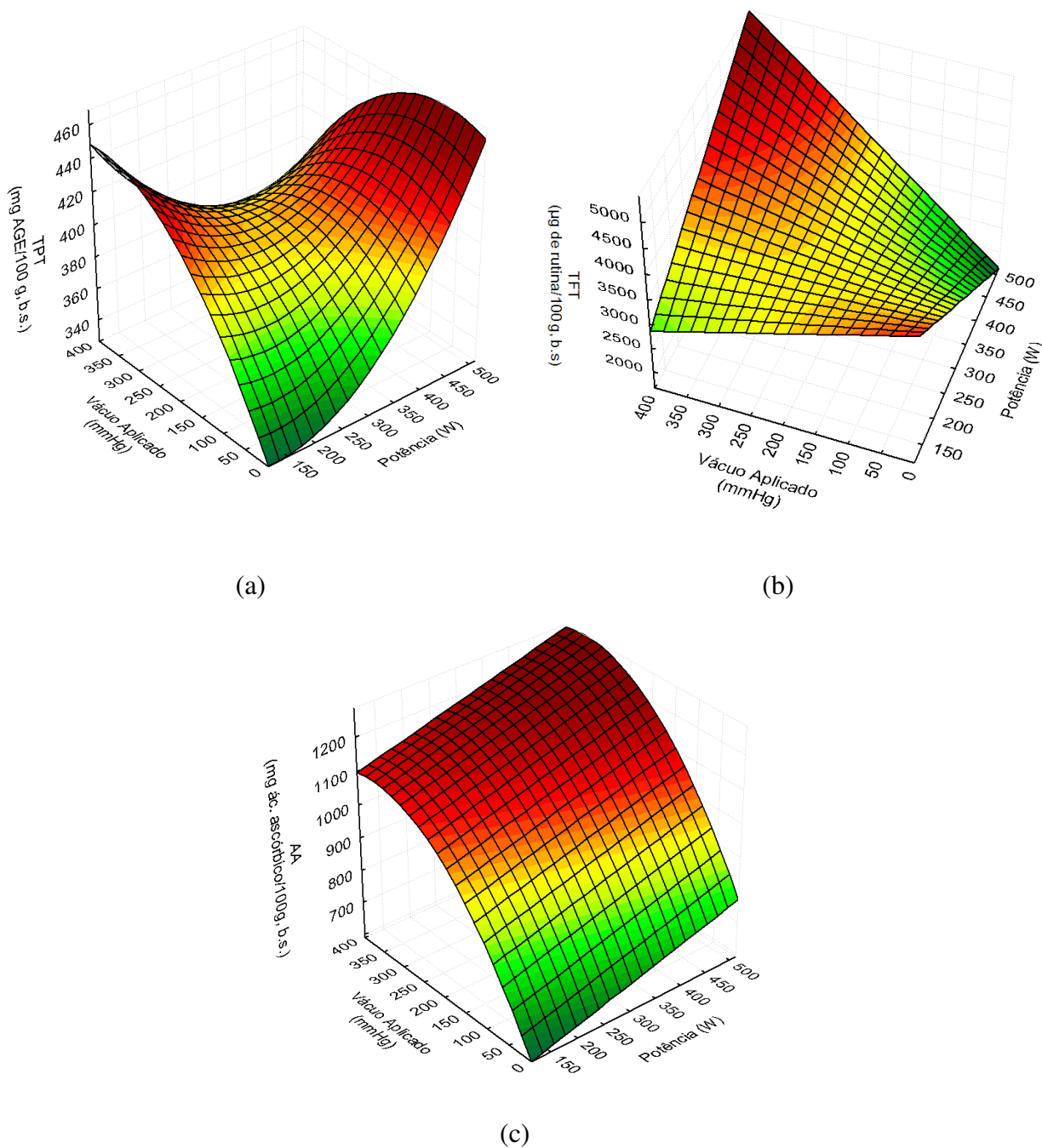


Figura 4.5 – Variação dos compostos bioativos para secagem do resíduo de acerola em micro-ondas a vácuo: (a) TPT, (b) TFT e (c) AA.

Entretanto, o teor de flavonoides totais apresentou um aumento em relação ao resíduo *in natura* em todas as condições, sendo a variação mais sensível para níveis de potências mais altos, assim como mostra a Figura 4.5(b). Sugere-se assim, que o aumento do vácuo aplicado reduz a temperatura do material, evitando a degradação térmica do composto e que níveis de potências mais altos liberam uma maior quantidade de compostos flavonoides.

Observa-se também, na Figura 4.5(c), que o teor de ácido ascórbico é mais influenciado pelo vácuo aplicado que pela potência das micro-ondas. Após a secagem o resíduo passa a apresentar valores substancialmente superiores ao do resíduo *in natura*. O aumento do teor de ácido ascórbico pode estar ligado com a facilidade após a secagem de se extrair o composto. Após o processo, o composto que antes estava ligado é liberado devido ao rompimento de constituintes celulares durante a secagem (CHISM e HAARD, 1996). Monteiro et al. (2015) observaram que a aplicação do vácuo na secagem em micro-ondas promove a expansão das estruturas internas. Os autores verificaram um aumento na porosidade de até 28%, o que pode facilitar a extração de compostos bioativos.

O aumento da temperatura, que é proporcional à potência, também pode desativar enzimas que contribuem para a degradação do ácido ascórbico (WOJDYLO et al., 2009). O aumento do vácuo reduz a quantidade de oxigênio em contato com a amostra, o que também previne a degradação do ácido ascórbico por oxidação (ZHANG et al., 2006).

#### **4.3.3 - Pré-tratamentos**

Esta etapa do trabalho objetivou avaliar o efeito dos pré-tratamentos (ultrassom, branqueamento e aplicação de etanol) na qualidade nutricional e tempo de secagem do resíduo de acerola. Para fins de comparação, adotou-se como grupo de controle a secagem sem aplicação de nenhum pré-tratamento. Todos os experimentos avaliados nesta seção foram realizados em micro-ondas a vácuo, sendo fixa a potência de 229 W e o vácuo aplicado de 200 mmHg.

Na Tabela 4.8 são apresentados dados da umidade do resíduo de acerola após cada pré-tratamento, assim como o tempo necessário para desidratar o resíduo até  $10,0 \pm 1,5\%$  (base úmida).

Dentre todos os pré-tratamentos utilizados notou-se um aumento máximo de 2,7% na umidade inicial do resíduo de acerola quando este foi tratado com sonicação com frequência de 33 kHz durante 20 min (UB20). Já no tratamento com o resíduo imerso em etanol houve uma redução máxima de 1,6% na umidade inicial.

Resíduos tratados com ultrassom e branqueamento apresentaram um aumento no tempo de secagem de até 14 e 8 min, respectivamente. A maior redução no tempo de secagem ocorreu quando a semente foi imersa no etanol, sendo de 5 min. Dessa forma, a variação no teor de umidade sozinha não é capaz de explicar a variação no tempo de secagem apresentado na Tabela 4.8, indicando alterações estruturais e /ou químicas nos resíduos provocadas pelos

pré-tratamentos. Silva (2014) na secagem por infravermelho do resíduo de acerola quando tratado com etanol também verificou que este pré-tratamento induziu uma evaporação mais intensa da umidade.

Tabela 4.8 - Umidade do resíduo de acerola após cada pré-tratamento e tempo de secagem necessário.

Pré-tratamento	Umidade (%)	Tempo de secagem (min)
Controle	80,6±0,5	25
UA10	81,4±0,5	39
UA20	81,9±1,3	39
UB10	82,7±0,3	39
UB20	83,3±0,4	35
Branqueamento (BRQ)	82,7±1,0	33
Resíduo imerso em etanol (IE)	79,0±0,8	20
Etanol pulverizado sobre o resíduo (EP)	82,3±1,4	22,5

Na Figura 4.6 são apresentados os efeitos dos pré-tratamentos nos teores de compostos bioativos após secagem em micro-ondas a vácuo e a comparação destes com o resíduo *in natura*.

Nota-se, através da Figura 4.5(a) e 4.5(b) que a secagem em micro-ondas a vácuo, apesar de provocar um aumento no teor de flavonoides, reduz o teor de fenólicos em relação ao resíduo *in natura*. . Observou-se também que nenhum pré-tratamento aplicado produziu efeitos significativos para os teores de fenólicos e flavonoides totais.

Por outro lado, pode-se observar na Figura 4.6(c), que para o teor de ácido ascórbico houve um efeito positivo para o resíduo que sofreu tratamentos com etanol (IE e EP) quando comparados com o controle e o resíduo *in natura*, sendo este efeito superior quando o material foi imerso em etanol (IE). O branqueamento reduziu o teor de ácido ascórbico, enquanto os tratamentos com ultrassom em diferentes potências e períodos mantiveram teores de ácido ascórbico semelhantes ao do controle.

Nota-se também que o teor de ácido ascórbico aumentou para o resíduo do grupo controle e para todos pré-tratamentos após a secagem em relação ao resíduo *in natura*, apesar de esta ser uma vitamina termosensível. Este aumento é provocado pelo rompimento das fibras do resíduo, liberando compostos antes não disponíveis (CHISM e HAARD, 1996). Além do processo de secagem também poder desativar enzimas que contribuem para a degradação do ácido ascórbico (WOJDYLO et al., 2009). Bortolotti (2012), Duzzioni (2013), Silva (2014) e Silva (2015 a) também observaram este efeito após a secagem de resíduo de acerola sem pré-tratamento.

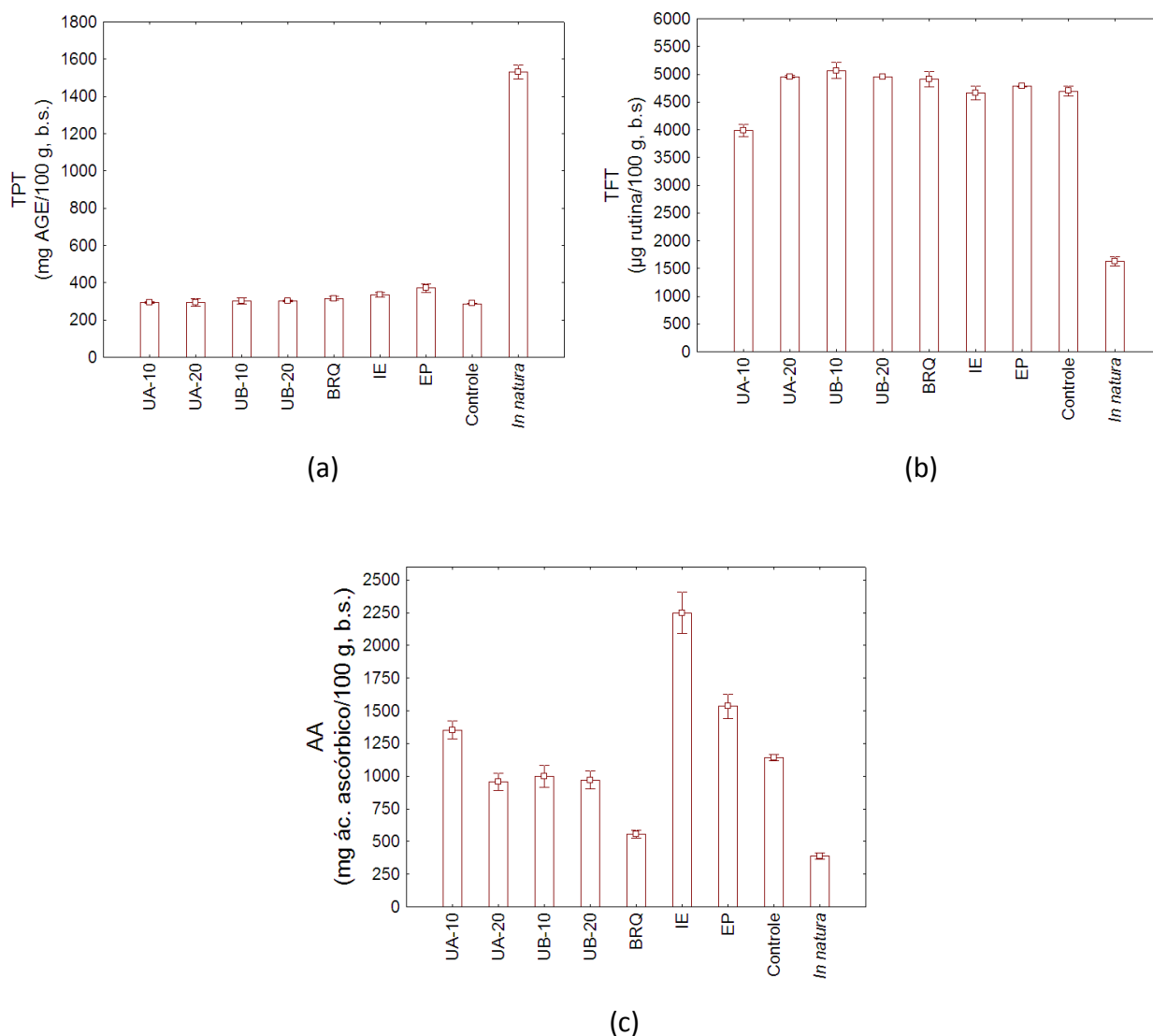


Figura 4.6 – Teores de compostos bioativos do resíduo de acerola *in natura* e após a secagem em micro-ondas a vácuo sem (controle) e com pré-tratamentos: (a) TPT, (b) TFT e (c) AA.

Apesar de não influenciar significativamente a variação dos teores de fenólicos e flavonoides totais, o resíduo tratado com imersão em etanol (IE) foi o que apresentou maior redução no tempo de secagem e aumento no teor de ácido ascórbico. Por isso foi selecionado dentre os demais pré-tratamentos para uma análise mais aprofundada da influência da potência e do vácuo aplicados no processo de desidratação e nos nutrientes e compostos bioativos.



#### **4.3.4 - Secagem em micro-ondas a vácuo com pré-tratamento**

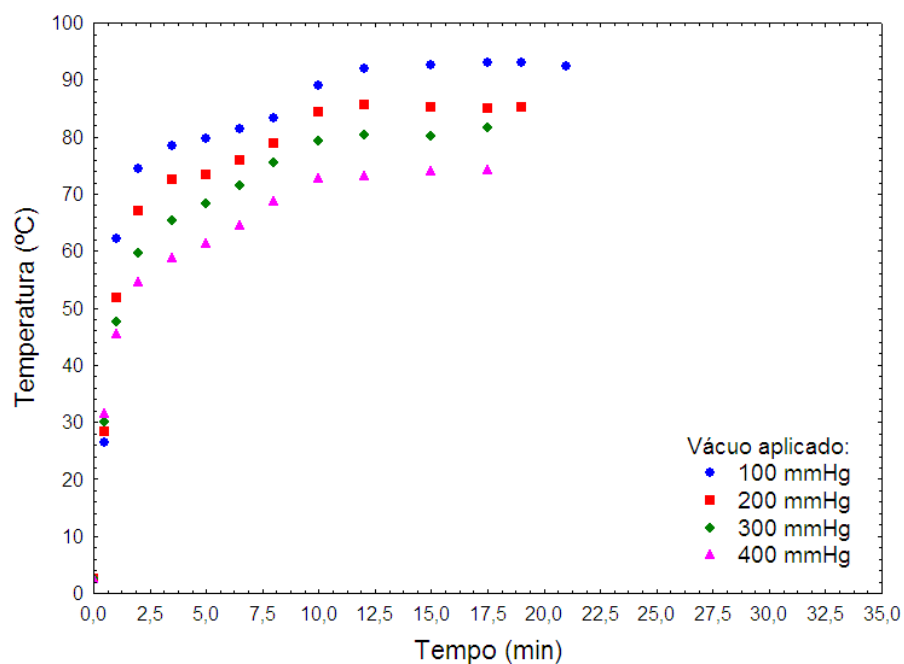
##### **4.3.4.1 - Considerações gerais e cinética desidratação**

Com o resíduo de acerola previamente tratado com imersão em etanol (IE) foi realizado um planejamento similar ao apresentado na Tabela 2.2, utilizando o mesmo sistema de secagem em micro-ondas a vácuo que o apresentado no item 2.3.1.2.

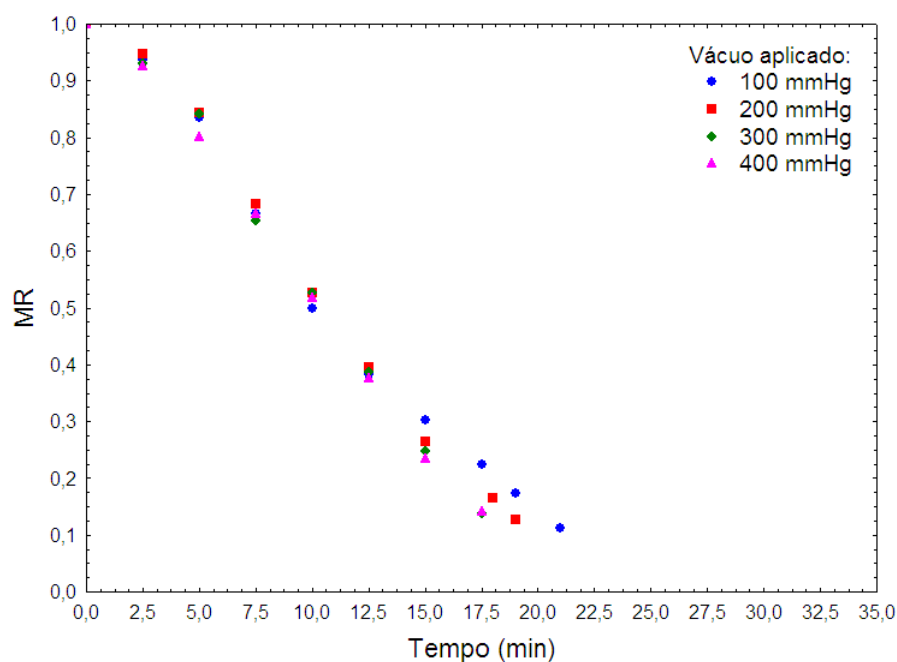
Os dados de temperatura (Figura 4.7a) e de cinética de secagem (Figura 4.7b) do resíduo com tratamento por IE desidratados em micro-ondas a vácuo com potência de 229 W e diferentes níveis de vácuo aplicado são apresentados a seguir.

Nota-se na Figura 4.7(a) que o tempo necessário para o resíduo atingir temperatura constante durante a secagem foi de 12,5 min quando o resíduo foi tratado com etanol. Este período é superior ao necessário para temperatura constante quando o resíduo não sofreu o pré-tratamento, que foi em média 2,5 min, como observado na Figura 4.4(a). Este período de aquecimento se reflete nos dados de cinética de secagem (Figura 4.4b), os quais se mantêm próximos para todos os níveis de vácuo até o momento em que a temperatura do material se torna constante.

Antes de sofrer o pré-tratamento com imersão em etanol, esta substância era nula na sua composição química do resíduo e após o pré-tratamento, parte de sua água livre é removida enquanto o etanol permeia a sua estrutura. Esta alteração na composição química do resíduo não é capaz de explicar a redução no tempo de secagem, pois tanto o etanol quanto a água apresentam momentos dipolos relativamente próximos (1,69 e 1,87 D para o etanol e para a água, respectivamente) e, portanto, a ação das micro-ondas semelhante. Entretanto, o etanol apresenta uma taxa de aquecimento maior que água, pois sua capacidade calorífica do etanol ser menor cerca de 60% (DEAN, 1968; BARBOZA et al., 2001; ). Esse aquecimento mais rápido do etanol não pode ser observado no perfil de temperatura do resíduo porque parte do calor gerado é utilizado na evaporação dos solventes (água e etanol). Por isso, as taxas de secagem são superiores no resíduo que foi tratado com etanol.



(a)



(b)

Figura 4.7 – Temperatura do material (a) e cinética de secagem (b) do resíduo de acerola pré-tratado com imersão em etanol e desidratado em micro-ondas a vácuo com potência de 229 W e diferentes níveis de vácuo aplicado.

Na discriminação estatística dos modelos rivais de cinética de secagem avaliados (Apêndice D), a equação de Overhults foi a que apresentou o melhor ajuste, assim como para o resíduo sem pré-tratamento seco em micro-ondas e em micro-ondas a vácuo. Esta equação

foi capaz de representar a variabilidade dos dados de cinética em 99,79%. Os parâmetros dos ajustes dos dados experimentais pelo modelo de Overhults et al. (1973) para cada conjunto de condições experimentais são apresentados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Coeficientes para modelo de Overhults et al. (1973) para a desidratação do resíduo de acerola IE em micro-ondas a vácuo.

Potência (W)	Vácuo Aplicado (mmHg)	Overhults et al. (1973)		
		k	n	R <sup>2</sup>
229	100	0,075	1,542	0,9946
399	100	0,144	1,869	0,9968
229	300	0,079	1,925	0,9995
399	300	0,145	1,828	0,9996
229	200	0,077	1,834	0,9998
229	200	0,080	1,947	0,9959
114	200	0,026	1,387	0,9985
513	200	0,199	1,949	0,9973
229	400	0,082	1,791	0,9986
229	0	0,063	1,514	0,9985

De forma análoga à desidratação do resíduo de acerola sem pré-tratamento, também foram propostas equações empíricas através de técnicas de regressão múltipla nível de confiança de 90% ( $\alpha \leq 0,1$ ) para a constante de cinética de secagem (k) e para o parâmetro n (Equações 4.8 e 4.9). A adimensionalização das variáveis independentes foi realizada de acordo com as Equações 4.1 e 4.2, apresentadas na Tabela 4.6. As regressões apresentaram coeficientes de correlação de 99,53% e 80,25% para os parâmetros k e n, respectivamente. Os resíduos apresentaram distribuição aleatória.

$$k = 0,1055 + \underline{x}' b_6 \quad (4.8)$$

$$\text{Na qual: } b_6 = \begin{bmatrix} 0,0719 \\ 0,004 \end{bmatrix} \text{ e } \underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

$$n = 2,0034 + \underline{x}' b_7 + \underline{x}' B_7 \underline{x} \quad (4.9)$$

$$\text{Na qual: } b_7 = \begin{bmatrix} 0,2092 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ e } B_7 = \begin{bmatrix} -0,2545 & 0 \\ 0 & -0,0925 \end{bmatrix} \quad \underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

Nota-se no modelo da constante de cinética da secagem, a qual é relacionada com a difusão líquida que controla a operação, tanto na secagem em micro-ondas a vácuo para o resíduo imerso em etanol (Equação 4.8) e para o resíduo sem pré-tratamento (Equação 4.3) que há influência da potência das micro-ondas e do vácuo aplicado, sendo a influência da potência significativamente maior que a do vácuo aplicado. Béttega et al. (2013) estudando a secagem de cenoura em micro-ondas a vácuo verificaram comportamento semelhante, no qual a cinética de secagem foi fortemente influenciada pela potência das micro-ondas e levemente afetada pelo vácuo aplicado. Tais resultados indicam que a aplicação das micro-ondas é o principal mecanismo de desidratação.

Ainda é possível observar que os valores de  $k$  para o resíduo tratado com imersão em etanol (Tabela 4.9) são, em média, 54% superiores àqueles observados sem a aplicação deste pré-tratamento (Tabela 4.5). Sabe-se que quanto maior os valores deste parâmetro menor será o tempo necessário para a desidratação. Tosato (2012) verificou redução do tempo de secagem convectiva de maçã Fuji de até 35% quando foi realizado o pré-tratamento com etanol.

#### 4.3.4.2 – Compostos bioativos

Na Tabela 4.10 são apresentados os teores dos compostos bioativos dos resíduo de acerola pré-tratado com IE ao final de cada experimento.

Tabela 4.10 – Teores de compostos bioativos dos resíduo de acerola pré-tratado com IE ao final de cada experimento de secagem em micro-ondas a vácuo.

Potência (W)	Vácuo Aplicado (mmHg)	AA (mg ác. ascórbico/100 g, b.s.)	TPT (mg AGE/100 g, b.s.)	TFT (µg rutina equivalente/100 g, b.s.)
229	100	1677,80	234,88	3911,30
399	100	1755,45	269,26	4195,26
229	300	2194,48	203,87	3800,37
399	300	2138,21	241,91	3964,54
229	200	1897,40	204,54	3739,52
229	200	1901,12	209,27	3743,73
114	200	1981,14	163,21	3728,27
513	200	2015,06	247,07	4040,52
229	400	2932,01	202,26	3286,89
229	0	1940,34	319,68	4229,58

As regressões múltiplas realizadas para quantificar o comportamento dos compostos bioativos do resíduo imerso em etanol desidratado em micro-ondas a vácuo são apresentadas pelas Equações 4.10 a 4.12. Nelas são apresentados apenas os efeitos significativos a um nível de confiança de 90% ( $\alpha \leq 0,1$ ). Os coeficientes de correlação para os teores de fenólicos totais (TPT), flavonoides totais (TFT) e ácido ascórbico (AA) foram de 93,7; 84,37 e 97,72%, respectivamente. Todas as regressões apresentaram resíduos distribuídos aleatoriamente.

$$TPT = 214,93 + \underline{x} \cdot b_8 + \underline{x} \cdot B_8 \underline{x} \quad (4.10)$$

$$\text{Na qual: } b_8 = \begin{bmatrix} 34,93 \\ -24,43 \end{bmatrix} \text{ e } B_8 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 15,64 \end{bmatrix} \underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

$$TFT = 3886,24 + \underline{x} \cdot b_9 + \underline{x} \cdot B_9 \underline{x} \quad (4.11)$$

$$\text{Na qual: } b_9 = \begin{bmatrix} 188,08 \\ -185,59 \end{bmatrix} \text{ e } \underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

$$AA = 1812,76 + \underline{x} \cdot b_{10} + \underline{x} \cdot B_{10} \underline{x} \quad (4.12)$$

$$\text{Na qual: } b_{10} = \begin{bmatrix} 0 \\ 240,23 \end{bmatrix} \text{ e } B_{10} = \begin{bmatrix} 127,92 & 0 \\ 0 & 144,23 \end{bmatrix} \underline{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}$$

São apresentadas na Figura 4.8 as superfícies de resposta para o (a) TPT, (b) TFT e (c) AA em função da potência do forno micro-ondas e o vácuo aplicado.

Apesar de os compostos fenólicos apresentarem o termo quadrático do vácuo aplicado significativo e os compostos flavonoides não, ambos apresentaram comportamento similar. O aumento da potência das micro-ondas e, consequentemente, o material com maiores temperaturas há maior liberação destes compostos devido ao rompimento de constituintes celulares, como vacúolos, detectados por Chism e Haard (1996). Este rompimento das estruturas celulares e a liberação de compostos bioativos podem estar intimamente ligados às temperaturas atingidas pelo resíduo, pois nota-se que esses teores diminuem com o aumento do vácuo aplicado. Como observado na Figura 4.8(a) a temperatura do material sólido reduz com o aumento do vácuo aplicado.

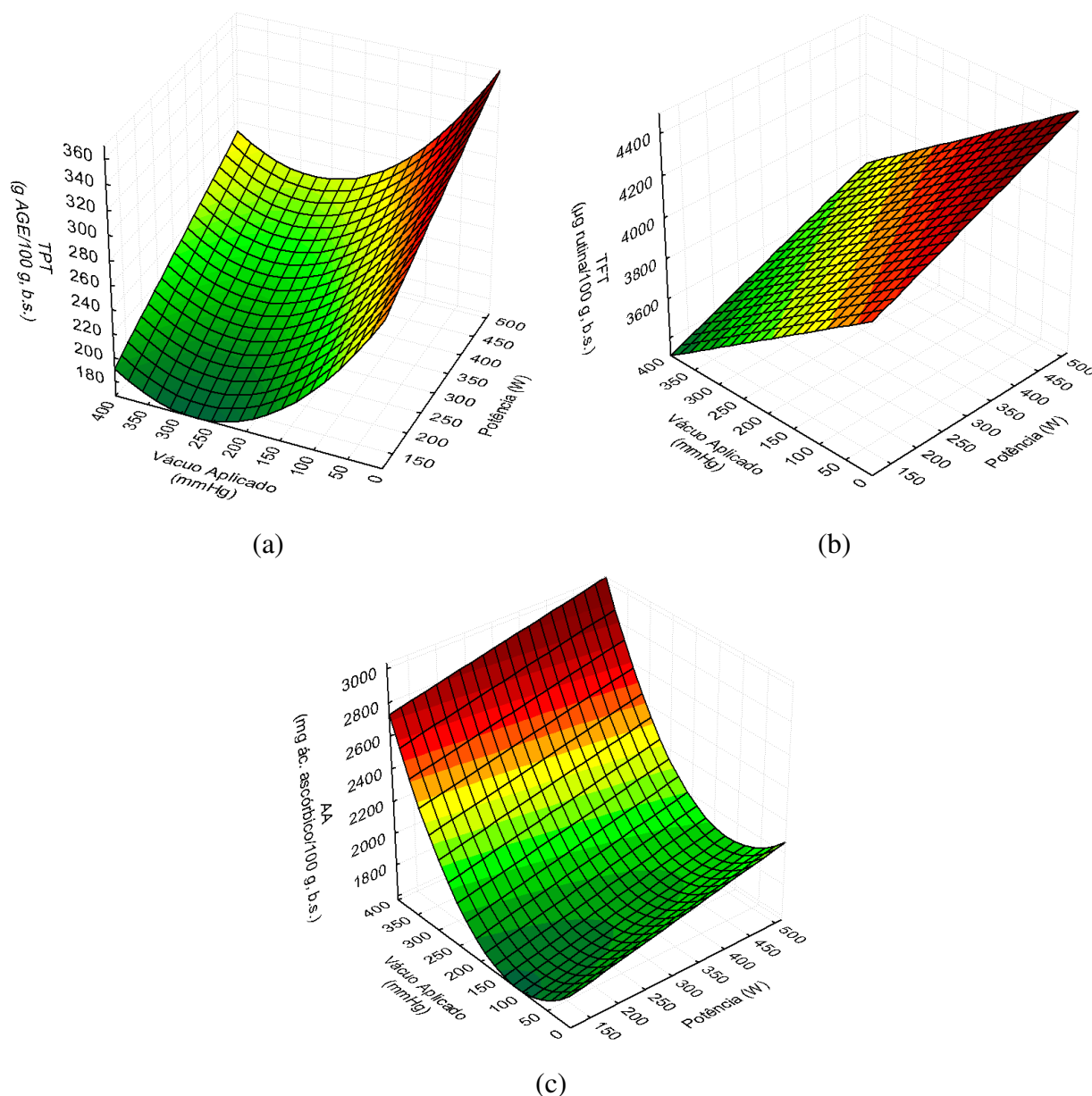


Figura 4.8 – Variação dos compostos bioativos para secagem do resíduo de acerola IE em micro-ondas a vácuo: (a) TPT, (b) TFT e (c) AA.

As temperaturas atingidas pelo resíduo de acerola em todas as potências foram superiores à temperatura ótima de atuação da polifenoloxidase (enzima capaz de catalisar a conversão de fenóis em quinonas), que é de 30°C. Isto causa a desativação desta enzima, conservando os fenóis liberados (NEVES e SILVA, 2007). Já o aumento do vácuo aplicado reduz a temperatura do sólido, promovendo uma desativação mais lenta das enzimas e, consequentemente, uma perda nos teores de fenóis.

Observa-se na Figura 4.8(c) que os teores de ácido ascórbico aumentaram tanto com o aumento do vácuo aplicado quanto da potência das micro-ondas. Assim como no resíduo

seco sem pré-tratamento, o resíduo de acerola imerso em etanol o AA é mais influenciado pelo vácuo aplicado que pela potência. De modo análogo, o vácuo aplicado diminui as reações de oxidação do ácido ascórbico devido à ausência de oxigênio (GRAN e BEAUDRY et al., 1993). A oxidação desta vitamina provocada pelo aumento da quantidade de oxigênio na presença da amostra com a redução do vácuo aplicado também foi observada por Thomkapanich et al. (2007) secando fatias de banana.

Comparando-se os compostos bioativos apresentados pelo resíduo de acerola (Tabela 4.7) e o resíduo tratado com IE (Tabela 4.10) após a secagem em micro-ondas a vácuo, nota-se que para todas as condições o AA foi superior quando o resíduo sofreu este pré-tratamento, apresentando, em média, valores duas vezes maiores. Enquanto para o TPT, houve uma redução média de, aproximadamente, 40%.

#### **4.4.5 – Secagem em leito fixo auxiliado por infravermelho**

##### **4.4.5.1 – Considerações gerais e cinética desidratação**

A porosidade encontrada para o leito fixo preenchido com resíduo de acerola foi de 0,49, ou seja, o resíduo de acerola preencheu de fato apenas 51% do volume do leito. Silva (2015 a) apresentou valor de 0,5 como sendo a porosidade do leito fixo preenchido com resíduo de acerola, portanto valor similar ao encontrado neste trabalho. Vale ressaltar que leitos compactados, ou seja, com porosidades menores tendem a apresentar maiores quedas de pressão e, conseqüentemente, maiores gastos energéticos (MATUGI et al., 2009). Prado (2004) descreve uma relação linear da porosidade do leito com a umidade do material. O autor verificou um aumento de aproximadamente 80% na porosidade do leito fixo com sementes de mamão após a secagem.

A secagem em leito fixo apresenta heterogeneidade, por isso é importante analisar as condições operacionais em que essa heterogeneidade seja mínima. Na Tabela 4.11 são apresentados os teores de umidade do sólido antes e após a secagem em leito fixo com auxílio de radiação infravermelha, assim como a umidade relativa média do ar de secagem e a umidade de equilíbrio para cada experimento. A umidade de equilíbrio foi determinada utilizando o modelo de Sigma-Copace com parâmetros para o resíduo de acerola definidos por SILVA (2015 a).

Tabela 4.11 –Teores de umidade inicial, final e de equilíbrio (b.u.) do resíduo de acerola nas posições axiais do leito fixo.

Experimento v (m/s) - T (°C) - IR (W/m <sup>2</sup> )	Umidade inicial (%, b.u.)	M <sub>eq</sub> (%, b.u.)	Umidade final (% bu) nas posições axiais do leito a partir da base			
			0,05 m	0,10 m	0,15 m	0,20 m
1) 0,2 - 40 - 350	78,61	5,56	57,75	77,91	76,35	52,30
2) 0,2 - 40 - 1050	80,85	4,93	56,14	75,01	74,96	31,57
3) 0,4 - 31,8 - 700	80,95	6,31	27,97	79,56	76,68	51,80
4) 0,4 - 88,2 - 700	82,13	1,62	6,73	3,50	4,35	5,28
5) 0,4 - 60 - 206,5	82,30	4,73	6,07	14,10	40,07	50,40
6) 0,4 - 60 - 1193,5	81,98	2,88	6,35	15,81	40,09	19,54
7) 0,4 - 60 - 700	81,54	2,83	6,17	15,54	40,20	34,80
8) 0,4 - 60 - 700	81,87	2,87	6,91	18,66	41,37	35,55
9) 0,4 - 60 - 700	80,46	2,86	6,03	14,88	36,31	36,87

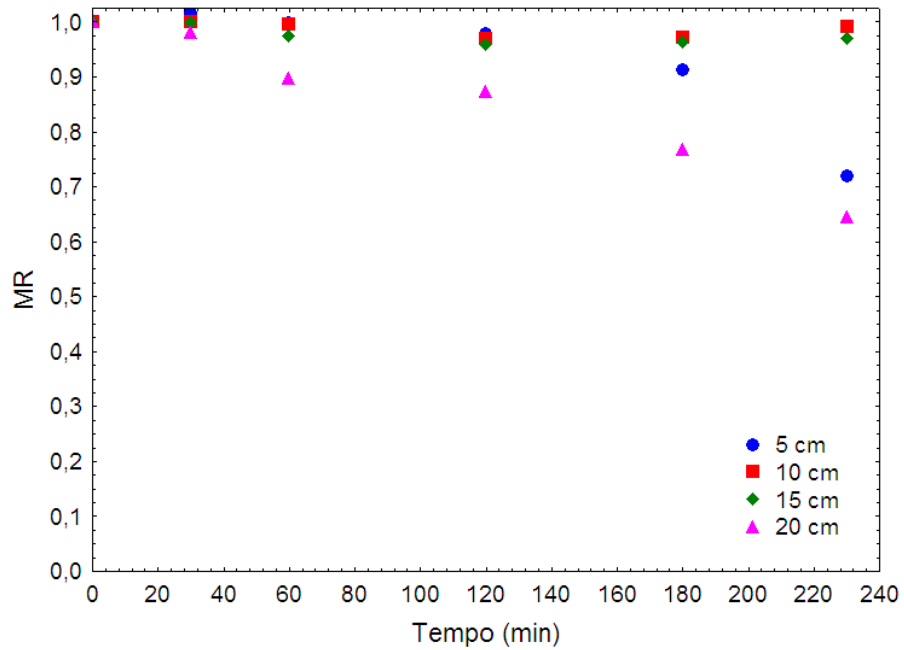
Nota-se que o Experimento 4 foi o que apresentou maior redução no teor de umidade do resíduo *in natura*. Ainda observando a Tabela 4.6, fica evidente a heterogeneidade proporcionada pela secagem em camada espessa, apesar de ainda haver o auxílio de uma nova frente de secagem: a radiação infravermelha.

Para uma melhor comparação foi realizada a adimensionalização dos dados de umidade do resíduo de acerola nas diferentes posições axiais e ao longo do tempo.

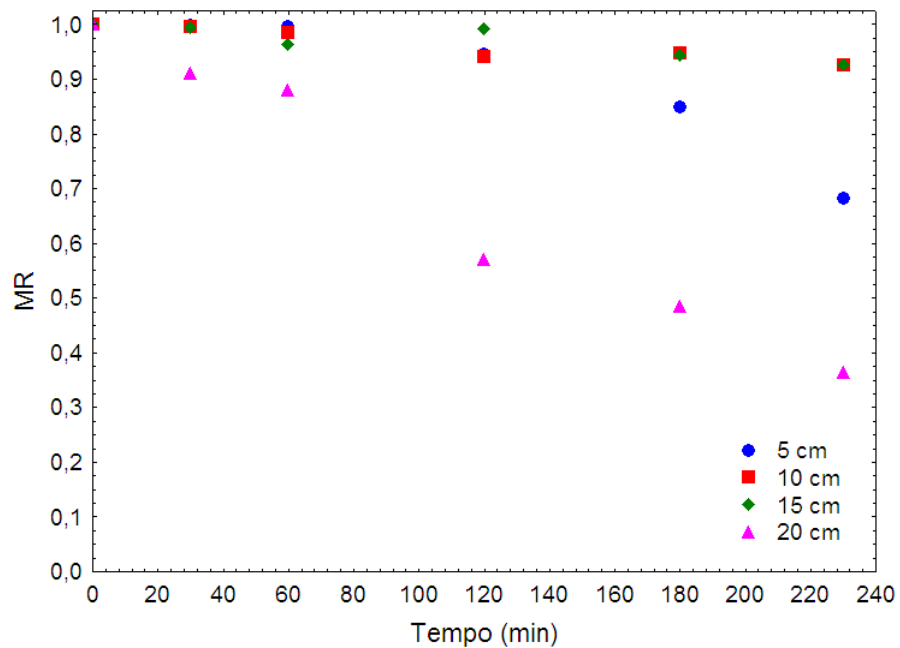
Na Figura 4.9 são apresentados estes resultados para os experimentos 1 e 2, ambos apresentaram mesmos valores para as variáveis velocidade e temperatura do ar de secagem (0,2 m/s e 40 °C), diferenciando-se apenas na intensidade da radiação infravermelha (350 e 1050 W/m<sup>2</sup>).

Nota-se através da Figura 4.9 que o tempo de secagem de 230 min não foi suficiente para reduzir a umidade do material a níveis seguros para o armazenamento de alimento quando utilizadas as condições operacionais em questão. Percebe-se que frente de secagem convectiva ainda estava atuando na primeira camada (5 cm). Em relação a segunda frente de secagem adicionada (radiação infravermelho), é possível perceber que ela atuou de forma significativa na redução da umidade na camada de posição axial mais próxima (20 cm). Os adimensionais de umidade dos experimentos 5 e 6 (Figura 4.10) evidenciam estas constatações.





(a) Experimento 1: 0,2 m/s – 40 °C – 350 W/m<sup>2</sup>



(b) Experimento 2: 0,2 m/s – 40 °C – 1050 W/m<sup>2</sup>

Figura 4.9 - Distribuições de umidade adimensional do resíduo de acerola no decorrer do tempo para diferentes posições axiais (Experimentos (a) 1 e (b) 2).

Na Figura 4.10 observa-se que a camada de 5 cm já estava com teor de umidade próximo à umidade de equilíbrio, e por isso, a frente de secagem convectiva deslocou-se para as camadas subsequentes (10 e 15 cm). Estas constatações estão de acordo com Peske e Villela (2003) que afirmaram que a secagem em leito fixo caracteriza-se por ocorrer em

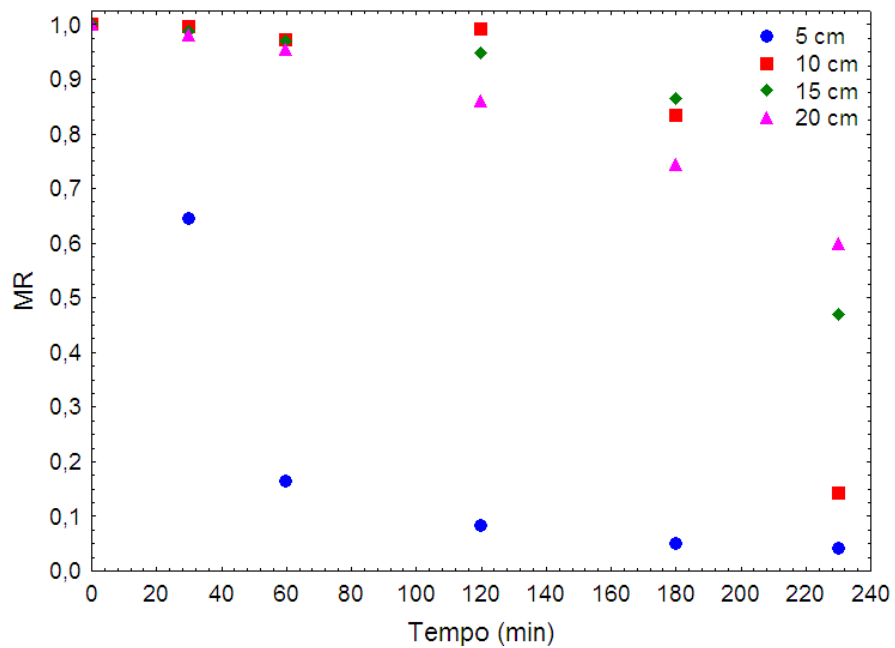
sucessivas camadas, ou seja, enquanto as camadas mais próximas da frente de secagem convectiva não atingem o equilíbrio com o ar de secagem, não haverá perda de umidade do material localizado nas camadas mais distantes e estas permanecerão úmidas. Por isso, é possível perceber o efeito positivo da adição da radiação infravermelha, pois foi a única responsável pela redução do teor de umidade da camada superior (20 cm), uma vez que a frente de secagem convectiva ainda estava atuando nas camadas intermediárias do leito. Observa-se que a maioria do leito está com umidade final em condições de armazenamento para as condições do experimento 6 (veja Tabela 4.6).

A fim de analisar o efeito da temperatura do ar de secagem na desidratação, a velocidade e a irradiação infravermelha foram fixadas em 0,4 m/s e 700 W/m<sup>2</sup>, respectivamente, realizando dois experimentos (3 e 4) com temperaturas de 31,8 e 88,2 °C. Os adimensionais de umidade para cada posição axial ao longo do tempo destes dois experimentos estão apresentados na Figura 4.11.

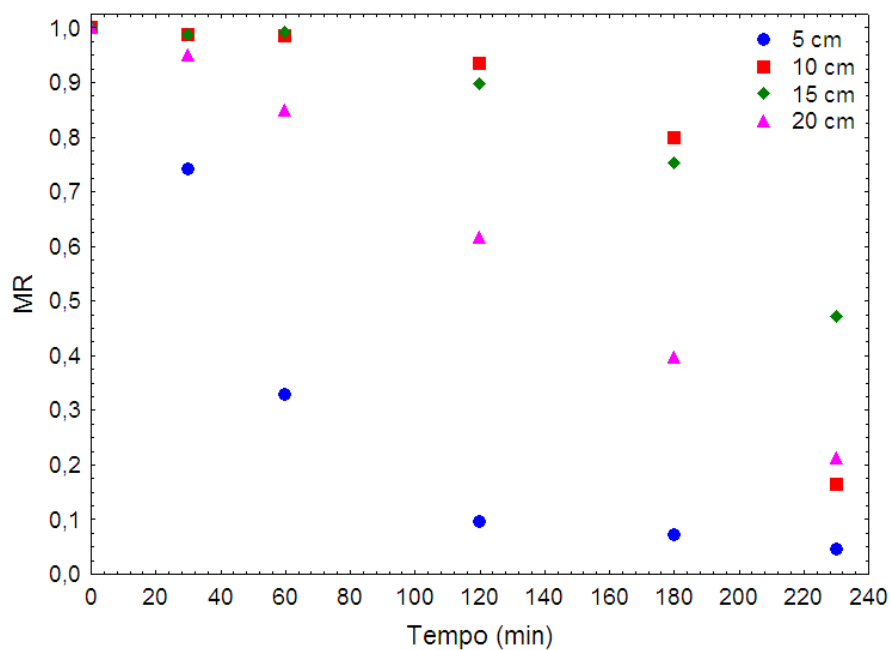
Observa-se que nas condições do Experimento 3 não houve uma variação relevante do adimensional de umidade nas posições centrais do leito, ou seja, ao atingir essas camadas o ar de secagem já se apresentava saturado. No topo do leito (20 cm) a remoção da umidade se deve exclusivamente a radiação infravermelha. Por outro lado, observa-se no Experimento 4 que todas as camadas do leito foram afetadas pela frente de secagem convectiva, apresentando ao final do experimento teores de umidade próximos à umidade de equilíbrio.

É possível observar que para alguns experimentos o adimensional de umidade apresentou valores superiores ao da amostragem anterior para a mesma camada, ou seja, o resíduo apresentou uma elevação momentânea do teor de umidade. Isso ocorreu devido ao arraste da água removida das camadas inferiores pelo ar de secagem. Silva (2015 a) também observou este efeito na secagem de resíduo de acerola em leito fixo com camada espessa.

Na Figura 4.12 são apresentadas as representações gráficas das réplicas (Experimentos 7, 8 e 9), sendo realizadas com a temperatura do ar igual a 60°C, a velocidade do ar igual a 0,4 m/s e irradiação infravermelha de 700 W/m<sup>2</sup>. Nota-se a boa reprodutibilidade dos resultados experimentais na mesma condição operacional.

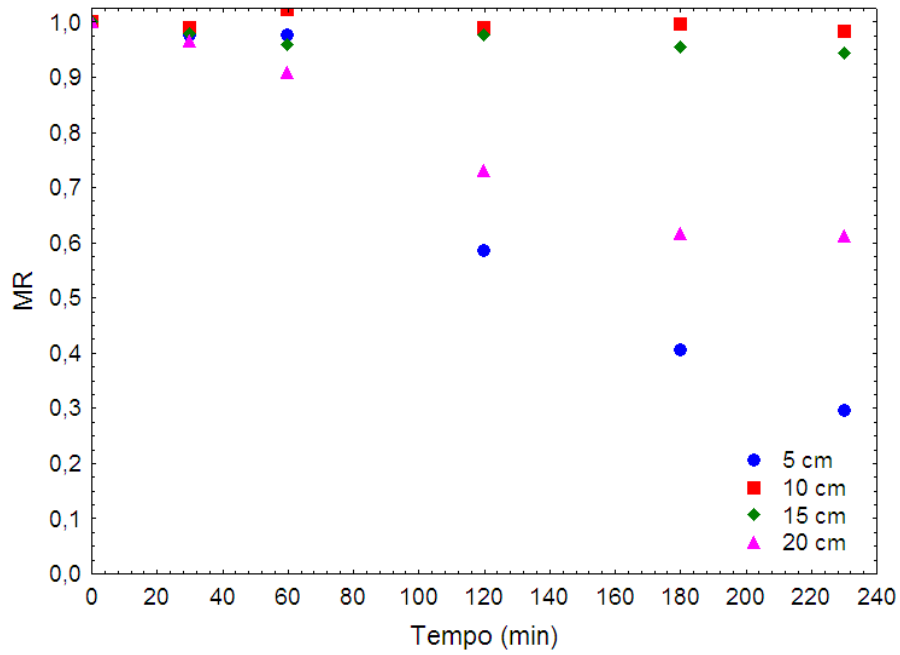


(a) Experimento 5: 0,4 m/s – 60 °C - 206,5 W/m<sup>2</sup>

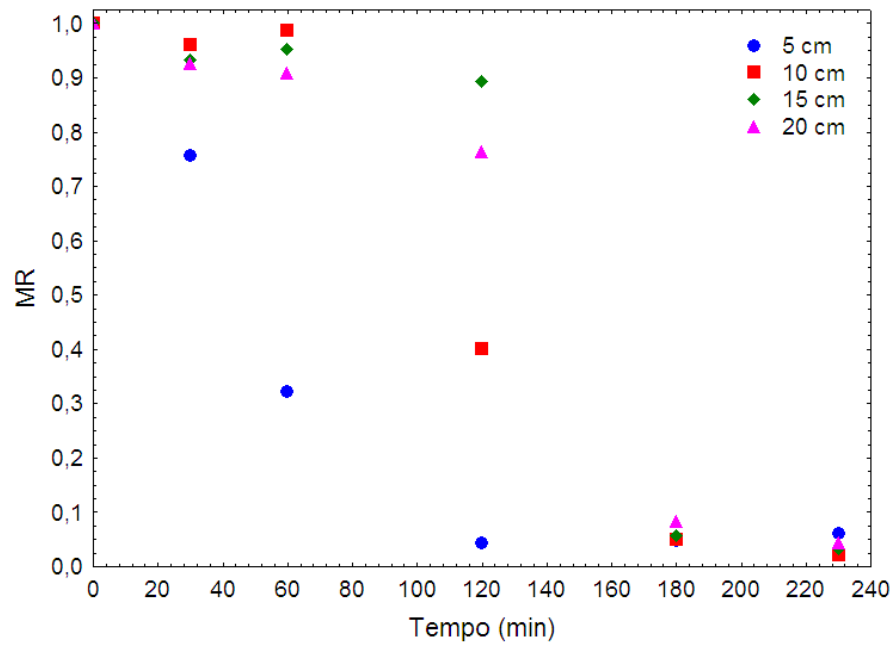


(b) Experimento 6: 0,4 m/s – 60 °C – 1193,5 W/m<sup>2</sup>

Figura 4.10 - Distribuições de umidade adimensional do resíduo de acerola no decorrer do tempo para diferentes posições axiais (Experimentos (a) 5 e (b) 6).



(a) Experimento 3: 0,4 m/s – 31,8 °C – 700 W/m<sup>2</sup>



(b) Experimento 4: 0,4 m/s – 88,2 °C – 700 W/m<sup>2</sup>

Figura 4.11 - Distribuições de umidade adimensional do resíduo de acerola no decorrer do tempo para diferentes posições axiais (Experimentos (a) 3 e (b) 4).

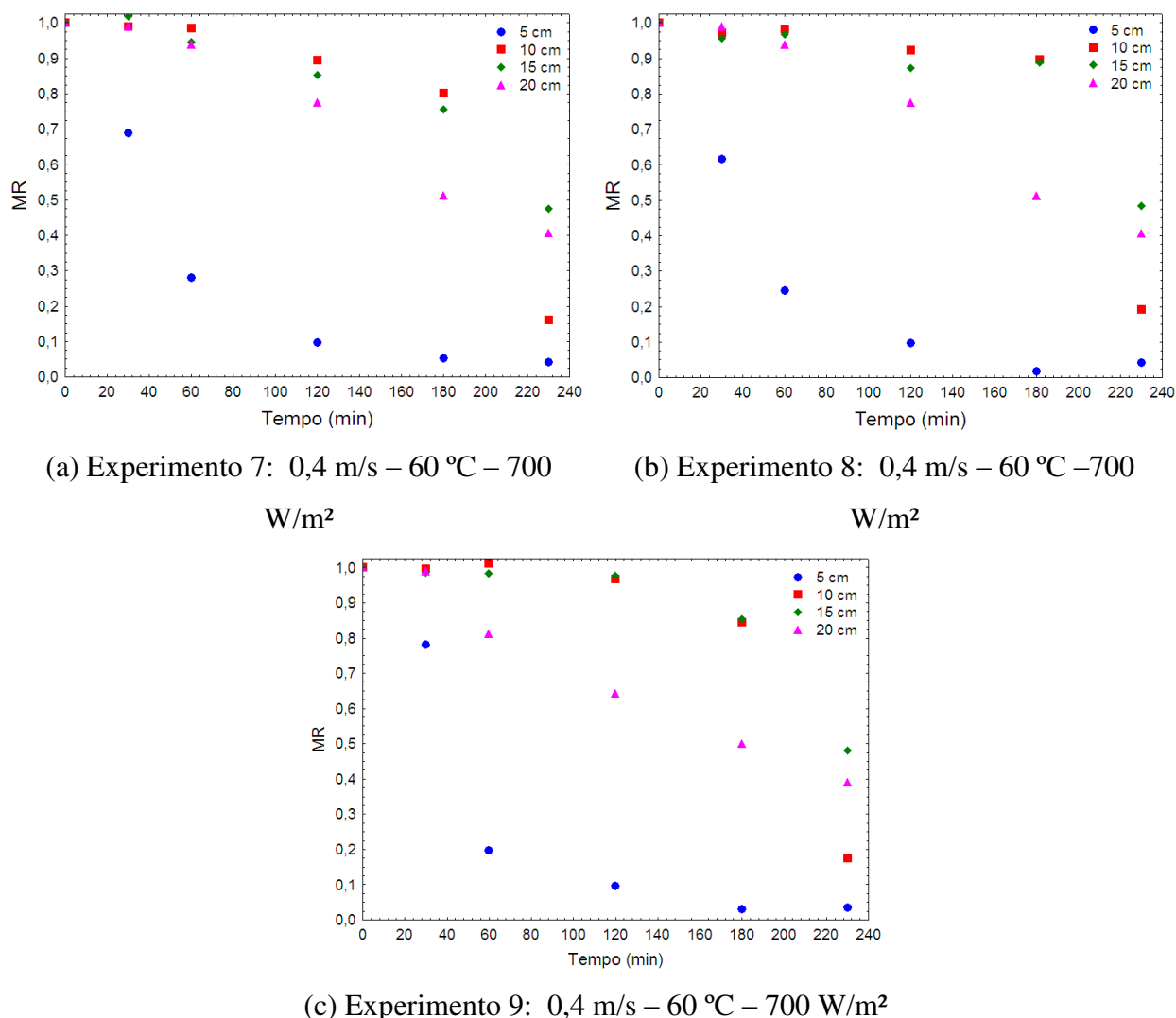


Figura 4.12 - Distribuições de umidade adimensional do resíduo de acerola no decorrer do tempo para diferentes posições axiais (Experimentos (a) 7, (b) 8 e (c) 9).

#### 4.4.5.2 – Compostos bioativos

Nas Figuras 4.12 e 4.13 são apresentados os TPT e AA, respectivamente, para as posições axiais de 5, 10, 15 e 20 cm a partir da base do leito para as diferentes condições operacionais apresentadas na Tabela 4.13. Os experimentos 8 e 9 da Tabela 4.6 são réplicas do experimento 7 e por isso não foram realizadas as análises de bioativos.

Tabela 4.12 – Radiação infravermelha (IR), velocidade (v) e temperatura do ar de secagem (T) para cada experimento.

Experimento	1	2	3	4	5	6	7
v (m/s)	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
T (°C)	40	40	31,8	88,2	60	60	60
IR (W/m²)	350	1050	700	700	206,5	1193,5	700

Observa-se na Figura 4.13 que a secagem reduziu os compostos bioativos para todas as condições experimentais. Nos experimentos 1 e 2, as camadas atingidas pela frente de secagem convectiva (5, 10 e 15 cm) apresentaram valores similares nos dois experimentos. Sendo que o resíduo de acerola na posição axial de 5 cm apresentou maiores perdas por ser o mais atingido pela frente de secagem convectiva. Nestes experimentos é possível observar que o aumento da radiação infravermelha de 350 para 1050 W/m<sup>2</sup> fez com o TPT apresentasse redução na camada de 20 cm. Entretanto, esta diminuição não foi significativa quando considerado que o aumento da radiação infravermelha fez com que a camada superficial perdesse mais 20% de umidade. Nos experimentos 5, 6 e 7 (Figura 4.13) também é possível observar que aumentos na emissão da radiação infravermelha reduzem TPT.

Ainda é possível notar na Figura 4.13 que as condições do experimento 4 provocaram a maior redução dos compostos fenólicos. Isto se deve ao fato deste ser o experimento em que se aplicou a maior temperatura (88,2 °C). As menores perdas se deram no experimento 3 (T=31,8 °C), porém neste experimento não houve redução da umidade para níveis seguros de armazenamento na maior parte do leito. Em todos os experimentos o resíduo pode ser considerado como sendo de concentração intermediária para este composto (VASCO, 2009).

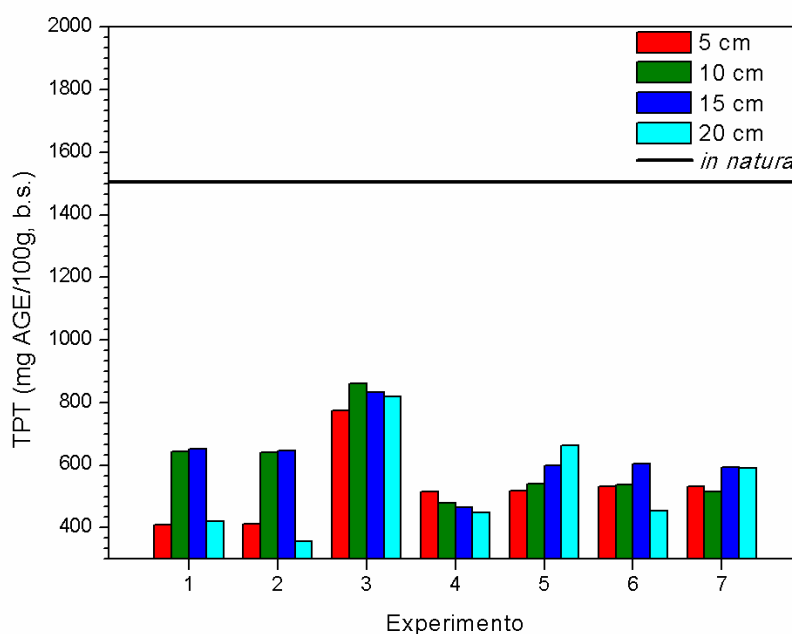


Figura 4.13 – TPT do resíduo de acerola para as diferentes posições axiais na secagem em leito fixo auxiliado por infravermelho e do resíduo *in natura*.

Na Figura 4.14, nota-se nos experimentos 5, 6 e 7 que o aumento da radiação infravermelha provoca uma leve redução do AA. Porém todos valores são próximos ao do resíduo *in natura*. Esta redução também é visível no experimento 4. Há destaque para o experimento 4, pois houve um aumento substancial deste composto após a secagem em relação ao resíduo fresco. Este experimento foi realizado na temperatura de 88,2 °C e ao final todas as camadas apresentavam teores de umidade próximos à umidade de equilíbrio. Nesta condição, o AA após a secagem apresentou valores de 10 a 13 vezes maiores que o resíduo *in natura*. Silva (2015 a) também desidratando resíduo de acerola em leito fixo em camada espessa encontrou teores de ácido ascórbico até 28 vezes superior ao do resíduo fresco quando o processo foi realizado na temperatura de 88,3 °C e velocidade de 0,68 m/s.

Nota-se que a aplicação da radiação infravermelha apesar de provocar perdas nos compostos bioativos reduz também a heterogeneidade apresentada pelo teor de umidade do material na secagem. Apesar da redução nos compostos bioativos causada pela radiação infravermelha, o resíduo de acerola ainda apresenta teores intermediários de compostos fenólicos e “alta” concentração de ácido ascórbico (BRASIL, 1998; VASCO, 2009)

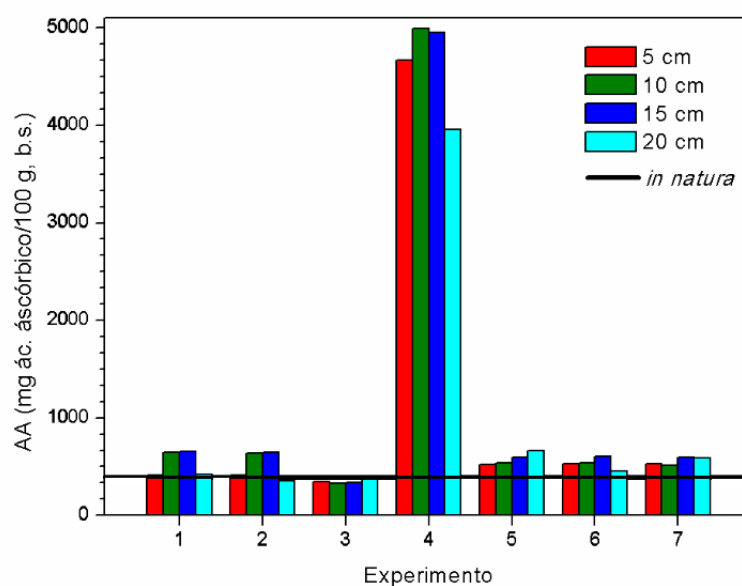


Figura 4.14 – AA do resíduo de acerola para as diferentes posições axiais na secagem em leito fixo auxiliado por infravermelho e do resíduo *in natura*.

## **CAPÍTULO 5**

### **CONCLUSÕES**

A caracterização do resíduo de acerola evidenciou este subproduto como potencial fonte de nutrientes e compostos ativos, se fazendo necessários estudos visando seu reaproveitamento, sendo a secagem uma alternativa viável. O resíduo, por ser úmido e com elevados ângulos de repouso (acima de 50°) apresenta baixa escoabilidade, indicando a secagem em leito fixo como uma alternativa atraente.

Verificou-se que, de acordo com os padrões microbiológicos estabelecidos pela ANVISA, o resíduo de acerola desidratado com teores de umidade inferiores a 26,2% são próprios para armazenamento mínimo de seis meses, pois este se torna um substrato com ambiente hostil para o crescimento de microrganismos.

Em relação aos métodos de desidratação avaliados, a secagem em micro-ondas e em micro-ondas a vácuo permitiu a redução do teor de umidade do resíduo até níveis seguros para armazenamento sem comprometer as qualidades nutricionais do alimento. Foi possível verificar também que a temperatura que o resíduo atinge é função da pressão ambiente em que se ocorre o processamento. A aplicação do vácuo beneficia o aumento do teor de ácido ascórbico, provavelmente, devido à redução da degradação oxidativa.

Dentre todos pré-tratamentos estudados, a imersão do resíduo em etanol produziu melhores resultados. Pois reduziu em 54%, em média, o tempo de secagem, além de dobrar o teor de ácido ascórbico.

Dos modelos de cinética de secagem rivais, o de Overhults foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais tanto na secagem em micro-ondas e como quando o vácuo foi acoplado.

No que diz respeito à secagem convectiva em leito fixo, a incorporação do infravermelho como uma nova frente de secagem apresentou resultados satisfatórios, pois é capaz de reduzir a heterogeneidade apresentada por este equipamento. Nas condições de secagem com velocidade e temperatura do ar de secagem de 0,4 m/s e 60 °C, respectivamente, e radiação de 1193,5 W/m<sup>2</sup> apenas a posição axial de 15 cm não apresentou teor de umidade seguro para o armazenamento. Também foi possível verificar que a aplicação do infravermelho induz à uma ligeira redução dos teores de compostos bioativos.



Em todas as condições de operação estudadas para a secagem em leito fixo conduziram à redução dos teores de fenólicos totais, principalmente para a temperatura mais elevada (88,2 °C). Entretanto, o resíduo ainda pode ser considerado como sendo de concentração intermediária para este composto. Também foi possível observar que a secagem na temperatura de 88,2 °C provocou uma elevação de até 13 vezes nos teores de ácido ascórbico e umidades finais próximas da umidade de equilíbrio.

## **SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Desidratar o resíduo de acerola por outras metodologias híbridas, como acoplar radiação de micro-ondas e infravermelha em outros tipos secadores tradicionais (leito fluidizado e leito de jorro);
- Desenvolver um sistema de micro-ondas a vácuo com câmara de secagem giratória;
- Verificar com o auxílio da microscopia de varredura eletrônica os efeitos das condições do processo na estrutura física do resíduo de acerola desidratado;
- Avaliar o efeito dos pré-tratamentos em outras análises, como variação da cor, textura e sabor do resíduo de acerola após secagem;
- Avaliar os compostos bioativos e nutrientes por outras metodologias como a cromatografia líquida e gasosa e investigação da presença de outros compostos relevantes.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFONSO JÚNIOR, P. C.; CORRÊA, P. C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 3, n. 3, p. 349-353, 1999.
- ANSELMO, A. A. S. Resíduos de frutos amazônicos como ingredientes alternativos em rações extrusadas para juvenis de tambaqui, Colossomamacropomum. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus-AM, 2008.
- AJILA, C. M.; BHAT, S. G.; PRASADA RAO, U. J. S. Valuable components of raw and ripe peels from two Indian mango varieties. Food Chemistry, v. 102, p. 1006– 1011, 2007.
- ALMEIDA, C. A.; GOUVEIA, J. P. G.; ALMEIDA, F. A. C.; SILVA, F. L. H. Avaliação da cinética de secagem em frutos de acerola. Revista de Biologia e Ciências da Terra, v. 6, n. 1, 2006.
- ALMEIDA, J. I. L.; LOPES, J. G. V.; OLIVEIRA, F. M. M. Produtor de acerola. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza: Edições Demócrito Rocha, Instituto Centro de Ensino Tecnológico, 40 p. 2002.
- ALZAMORA, S. M. Preconservacion de frutas por métodos combinados. In: Congresso Mundial de Tecnologia de Alimentos, Buenos Aires. Anais... Buenos Aires: [s.n.], 1984.
- ANDERSON, D. Antioxidant defences against reactive oxygen species causing genetic and other damage. Mutation Research, v.350, n.1, p.103-108, 1996.
- ANDRADE, F. A. O.; de AZEVEDO, A. R., SALES, R. de O., ARRUDA, F. D. A. V.; SOUZA, P. Z. Consumo de nutrientes por ovinos alimentados com diferentes dietas à base de resíduos da agroindústria. Revista Científica de Produção Animal, v. 3, n. 1, 2001.
- ANDREOLA, K. Secagem de cenoura (Daucuscarota L.) assistida por micro-ondas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP 2013.
- AOAC, Official Methods of Analysis. Association of Official Analytical Chemists, Gaithersburg, MD, 1995.
- ARABHOSSEINIA, A.; HUISMANB, W.; VAN BOXTEL, A.; MÜLLER, J. Modeling of thin layer drying of tarragon (*Artemisia dracunculus* L.). Industrial Crops and Products, v.29, n.1, p.53-59, 2009.

- ARAUJO, E. A. F. Estudo da cinética de secagem de fatias de banana naninca (Musa acuminiata var. Cavendish) osmoticamente desidratadas. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia de alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2000.
- ARAÚJO, P.S.R de; MINAMI, K. Acerola. Campinas: Fundação Cargill, 81p ., 1994.
- ARRUDA, M. A. Z.; SANTELLI, R. E. Mecanização no preparo de amostras por microondas: o estado da arte. Química Nova, v. 20, n. 6, p. 643, 1997.
- ATOUI, A. K.; MANSOURI, A.; BOSKOU, G.; KEFALAS, P. Tea and herbal infusions: Their antioxidant activity and phenolic profile. Food Chemistry, v. 89, n. 1, p. 27-36, 2005.
- AZZOUZ, S.; GUIZANI, A.; JOMAA, W.; BELGHITH, A Moisture diffusivity and drying kinetic equation of convective drying of grapes. Journal of Food Engineering, v. 55, n. 4, p. 323-330, 2002.
- BABALIS, S. J.; BELESSIOTIS, V. G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. Journal of Food Engineering, v. 65, n. 3, p. 449-458, 2004.
- BAI-NGEW, S.; THERDTHAI, N.; DHAMVITHEE, P. Characterization of microwave vacuum-dried durian chips. Journal of Food Engineering, v.104, p.114–122, 2011.
- BARBOZA, A. C.; CRUZ, C. V.; GRAZIANI, M. B.; LORENZETTI, M. C.; SABADINI, E. Heating in microwave ovens/developing of basic concepts. Química Nova, v. 24, n. 6, p. 901-904, 2001.
- BARBOZA, S. B. S. C.; TAVARES, E. D.; MELO, M. B. Instruções para o cultivos da acerola. In: Técnica circular n. 6, Embrapa, 2006.
- BARROZO, M. A. S. Transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leito deslizante e escoamentos cruzados. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 1995.
- BASU, T. K.; DICKERSON, J. W. Vitamins in Human Health and Disease, CAB International, 2006.
- BÉTTEGA, R.; ROSA, J. G.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. T. Comparison of carrot (Daucus carota) drying in microwave and in vacuum microwave. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 31, n. 2, p. 403-412, 2014.

- BÓRQUEZ, R.; MELO, D.; SAAVEDRA, C. Microwave–Vacuum Drying of Strawberries with Automatic Temperature Control. Food and Bioprocess Technology, v. 8, n. 2, p. 266-276, 2015.
- BORTOLAIA, L. A. Modelagem matemática e simulação do processo de secagem artificial de grãos de soja em secadores de fluxo contínuo. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2011.
- BORTOLOTTI, C. T., Estudo Experimental da Fluidodinâmica de Mistura de Resíduo de Acerola e Soja em Leito de Jorro. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2012.
- BRAGA, A. C. D.; LIMA, M. S.; AZEVEDO, L. C.; RAMOS, E. C. Caracterização e obtenção do resíduo gerado no processo industrial de clarificação do suco de acerola. Revista Semiárido de Visu, v.1, n.2, p.126-133, 2011.
- BRAGA, A. M. P.; SILVA, M. A.; PEDROSO, M. P.; AUGUSTO, F.; BARATA, L.E.S. Volatile composition changes of pineapple during drying in modified and controlled atmosphere. International Journal of Food Engineering, v. 6, n. 1, 2010.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. Drying cereal grains. AVI Publishing Company, 1974.
- BRAND-WILLIAMS, W.; CUVELIER, M. E.; BERSET, C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity. LWT-Food science and Technology, v. 28, n. 1, p. 25-30, 1995.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC n. 12 de 02 de Janeiro de 2001. Aprova o Regulamento Técnico sobre padrões microbiológicos para alimentos. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 10 de Janeiro de 2001.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Portaria n. 27 de 13 de Janeiro de 1998. Aprova o Regulamento Técnico referente à Informação Nutricional Complementar (declarações relacionadas ao conteúdo de nutrientes), constantes do anexo desta Portaria. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 16 de Janeiro de 1998.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC n. 269, de 22 Setembro de 2005. Aprova o regulamento técnico sobre a Ingestão Diária Recomendada (IDR)

- de proteína, vitaminas e minerais. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 23 de Setembro de 2005.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC n. 359, de 23 de Dezembro de 2003. Aprova Regulamento Técnico de Porções de Alimentos Embalados para Fins de Rotulagem Nutricional. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 26 de Dezembro de 2003.
- BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F. W. & Hall, C. W. Drying Cereal Grains, Westport, CT, USA, 1974.
- BROOKER, D.B.; BAKKER-ARKEMA, F.W.; HALL, C.W. Drying and storage of grains and oil seeds. Westport: The AVI Publishing Company, 450 p., 1992.
- CAETANO, P. K.; DAIUTO, E. R.; VIEITES, R. L. Característica físico-química e sensorial de geleia elaborada com polpa e suco de acerola. Brazilian Journal of Food Technology, [s.n.], p. 191-197, 2012.
- CALEGARI, L. Uso da onda ultrassônica como meio de controle do processo de secagem da madeira. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, 2006.
- CALÍN-SÁNCHEZ, Á.; FIGIEL, A.; HERNÁNDEZ, F.; MELGAREJO, P., LECH, K.; CARBONELL-BARRACHINA, Á. A. Chemical composition, antioxidant capacity, and sensory quality of pomegranate (*Punica granatum* L.) arils and rind as affected by drying method. Food and Bioprocess Technology, v. 6, n. 7, p. 1644-1654, 2013.
- CALÍN-SÁNCHEZ, Á.; FIGIEL, A.; WOJDYŁO, A.; SZARYCZ, M.; CARBONELL-BARRACHINA, Á. A. (2014). Drying of garlic slices using convective pre-drying and vacuum-microwave finishing drying: kinetics, energy consumption, and quality studies. Food and Bioprocess Technology, v. 7, n. 2, p. 398-408, 2014.
- CARLESSO, V. O.; BERBERT, P. A.; SILVA, R. F.; DETMANN, E. Avaliação de modelos de secagem em camada fina de sementes de maracujá-amarelo. Revista Brasileira de Sementes, v. 29, n. 2, p.28-37, 2007.
- CASTELINI, R. F. Farelo de acerola em programa de restrição alimentar para suínos pesados. 2015. Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Faculdade de ciências agrárias e veterinárias, Jaboticabal-SP, 2015.
- CATANEO, C. B.; CALIARI, V.; GONZAGA, L. V.; KUSKOSKI, E. M.; FETT, R. Atividade antioxidante e conteúdo fenólico do resíduo agroindustrial da produção de vinho. Semina: Ciências Agrárias, v. 29, n. 1, p. 93-102, 2008.

- CELESTINO, S. M. C. Princípios de secagem de alimentos. Planaltina-DF: EMBRAPA Cerrados; 2010.
- CERUTTI, P.A. Oxidant stress and carcinogenesis. European Journal of Clinical Investigation, v.21, n.1, p.1-5, 1991.
- CHAYJAN, R. A.; ALIZADE, H. H. A.; SHADIDI, B. Modeling of some pistachio drying characteristics in fix, semi fluid and fluid bed dryer. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, v. 14, n. 2, p. 143-154, 2012.
- CHEN, H. H.; HUANG, T. C.; TSAI, C. H.; MUJUMDAR, A. S. Development and performance analysis of a new solar energy-assisted photocatalytic dryer. Drying Technology, v. 26, n. 4, p. 503-507, 2008.
- CHISM, G. W.; HAARD, N. F. Characteristics of edible plant tissues. In: FENNEMA, O. R. Food Chemistry. p. 943– 1011. New York: Marcel Dekker, Inc, 1996
- CHITARRA, M. I. F; CHITARRA, AB. Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio. Lavras: Editora da Universidade Federal de Lavras. 2005.
- CHOU S.K.; CHUA, K.J. New hybriddryingtechnologies for heatsensitivefoodstuffs. Trends in Food Science & Technology 12 (2001) 359–369
- CHONG, C. H; F., A.; LAW, C. L.; WOJDYŁO, A. Combined drying of apple cubes by using of heat pump, vacuum-microwave, and intermittent techniques. Food and Bioprocess Technology, v. 7, n. 4, p. 975-989, 2014.
- CNA – Confederação da Agricultura e Pecuária do Brasil (2016). Agronegócio: balanço 2013, perspectivas 2014. Brasília, DF. Disponível em: [http://www.canaldoprodutor.com.br/sites/default/files/balanco\\_CNA\\_2013\\_web.pdf](http://www.canaldoprodutor.com.br/sites/default/files/balanco_CNA_2013_web.pdf).
- CORRÊA, P. C.; MARTINS, D. S. R.; MELO, E. C. Umigrãos: Programa para o cálculo do teor de umidade de equilíbrio para os principais produtos agrícolas; Viçosa, MG, Centreinar - UFV, p. 10, 1995.
- CORRÊA, P. C.; MARTINS, J. H.; CHRIST, D.; MANTOVANI, B. H. M. Curvas de dessorção e calor latente de vaporização para as sementes de milho pipoca (Zeamays). Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 2, n. 1, 1998.
- CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; RIBEIRO, D. M. *Drying characteristics and kinetics of coffee Berry*. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, v. 8, n. 1, p. 1-10, 2006.
- COSTA, L. C.; PAVANI, M. D. C. M. D.; MORO, F. V.; ERECIN, D. Viabilidade de sementes de acerola (Malpighia emarginata DC): avaliação da vitalidade dos tecidos. Revista Brasileira de Fruticultura, v. 25, n. 3, p. 532-534, 2003.

- CUI, Z. W.; XU, S. Y.; SUN, D. W. Microwave–vacuum drying kinetics of carrot slices. Journal of Food Engineering, v. 65, n. 2, p. 157-164, 2004.
- DEAN, J. A. Lange's Handbook of Chemistry, 13<sup>th</sup> edition, Mc Graw Hill Book Company, New York, 1968.
- DOYMAZ, İ. Effect of citric acid and blanching pre-treatments on drying and rehydration of Amasya red apples. Food and Bioproducts Processing, v. 88, n. 2, p. 124-132, 2010.
- FERREIRA, R. M. de A.; AROUCHA, E. M. M., de SOUZA; P. A., e QUEIROZ, R. F. Ponto de colheita da acerola visando à produção industrial de polpa. Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável, v. 4, n. 2, 2009.
- FERREIRA NETO, C. J.; de FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A.; de MELO, J.. Avaliação sensorial e da atividade de água em farinhas de mandioca temperadas. Ciência e agrotecnologia, v. 29, n. 4, p. 795-802, 2005.
- DECAREAU, R. V.; PETERSON, R. A. Microwave processing and engineering. Chichester : Ellis Horwood, 224p.,1986.
- DECKER, E.A. Phenolics: prooxidants or antioxidants? Nutrition Reviews, New York, v.55, n.11, p.396-407,1997.
- DEMBITSKY, V.; POOVARODOM, S.; LEONTOWICZ, H.; LEONTOWICZ, M.; VEARASILP, S.; TRAKHTENBERG, S.; GORINSTEIN, S. The multiple nutrition properties of some exotic fruits: biological activity and active metabolites. Food Research International, v. 44, p. 1671-1701, 2011.
- DOYMAZ, I. Drying of potato slices: effect of pretreatments and mathematical modeling. Journal of Food Processing and Preservation, v. 36, n. 4, p. 310-319, 2012.
- DÜRÜST, N.; SÜMENGİN, D.; DÜRÜST, Y. Ascorbic acid and element contents of foods of Trabzon (Turkey). Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 45, n. 6, p. 2085-2087, 1997.
- DUZZIONI, A. G., LENTON, V. M., SILVA, D. I. S., BARROZO, M. A. S. Effect of drying kinetics on bioactive compounds and antioxidant activity of acerola (*Malpighia emarginata* D. C.) residue. International Journal of Food Science & Technology, v.48, p. 1041-1047, 2013.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária. Iniciando um pequeno grande negócio agroindustrial: polpa e suco de frutas/ Embrapa Agroindústria de Alimentos, Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 123p., 2003.



- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária. Folheto - Cultivar Acerola BRS 366 Jaburu, 2012.
- ENGELDER D. S.; BUFFLER C. R. Measuring dielectric properties of food products at microwave frequencies. Microwave world, v. 12, n. 2, p. 6-15, 1991.
- FARMACOPÉIA BRASILEIRA. 4 ed., Ed.; Atheneu, São Paulo, 1988.
- FERNANDES, F. A. N.; GALLÃO, M. I.; RODRIGUES, S. Effect of osmotic dehydration and ultrasound pre-treatment on cell structure: melon dehydration. LWT-Food Science and Technology, v. 41, n. 4, p. 604-610, 2008.
- FIGIEL, A. Drying kinetics and quality of vacuum-microwave dehydrated garlic cloves and slices. Journal of Food Engineering, v.94, n. 1, p.98-104, 2009.
- FURLANETO, F. P. B.; NASSER, M. D. Panorama da cultura da acerola no estado de São Paulo. Pesquisa & Tecnologia, vol. 12, n. 1, 2015.
- GAVA, A. J.; SILVA, C. A. B.; FRIAS, J. R. G. Tecnologia de alimentos: princípios e aplicações. São Paulo: Nobel, 512 p., 2008.
- GARCIA, D. M. Análise de atividade de água em alimentos armazenados no interior de granjas de integração avícola. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2004.
- GEANKOPOLIS, C. J. Drying of process materials, in Transport Process and Unit Operations. 2ª ed. Boston-MA: Allyn and Bacon; 1983.
- GELY, M. C.; GINER, S. A. Diffusion coefficient relationships during drying of soya bean cultivars. Biosystems Engineering, v. 96, n. 2, p. 213-222, 2007.
- GIRI, S. K.; PRASAD, Suresh. Drying kinetics and rehydration characteristics of microwave-vacuum and convective hot-air dried mushrooms. Journal of food engineering, v. 78, n. 2, p. 512-521, 2007.
- GINZBURG, A. S. Application of Infrared Radiation in Food Processing. Leonard Hill, 1969.
- GOLDBLITH, S. A. Basic principles of microwaves and recent developments. Advances in Food Research, v.15, [s.n.] , p. 277 -301, 1967.
- GOMES, S. L. dos S. Desenvolvimento e caracterização de geleia mista de maracujá e acerola. 2015.
- GONGATTI NETO, A.; ARDITO, E.F.G.; GARCIA, E.E.C.; BLEINROTH, E.W.; FREIRE, F.C.O.; MENEZES, R.E. Acerola exportação: procedimento de colheita e pós-colheita: EMBRAPA – SPJ, 30p., 1996 (Série Publicação Técnica FRUPEX, 21).

- GONZAGA NETO, L.; SOARES, J. M. Acerola para exportação: Aspectos técnicos da produção. Brasília: EMBRAPA - SPI, 43p., 1994. (Série Publicações Técnicas FRUPEX, 10)
- GRAN, C. D.; BEAUDRY, R. M. Modified atmosphere packaging determination of lower oxygen limits for apple fruit using respiratory quotient and ethanol accumulation. In: International Controlled Atmosphere Research Conference, 6., 1993, New York. Proceedings... New York: [s.n.], 1993. v. 1, p. 54-62
- HALLIWELL, B., AESCHBACH, R., LÖLINGER, J., ARUOMA, O.I. The characterization on antioxidants. Food and Chemical Toxicology, v. 33, n. 7, p. 601-617, 1995.
- HARTMAN, P.E., SHANKEL, D.M. Antimutagens and anticarcinogens: a survey of putative interceptor molecules. Environmental and Molecular Mutagenesis, v. 15, n. 3, p. 145-182, 1990.
- HENDERSON, J. M. & HENDERSON, S. M. A computational procedure for deep-bed drying analysis. Journal of Agricultural Engineering Research, v. 13, n. 2, p. 87-95, 1968.
- IBARZ, A.; BARBOSA-CANOVÁS, G. V. Unit Operations in Food Engineering. Boca Raton: CRC Press; 2002.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz. v. 1: Métodos químicos e físicos para análise de alimentos, 3. ed. São Paulo: IMESP, 1985. p. 21.
- ISO – International Organization for Standardization: ISO 6887-4. Microbiology of food and animal feeding stuffs: Preparation of test samples, initial suspension and decimal dilutions for microbiological examination - Part 4: Specific rules for the preparation of products other than milk and milk products, and fish and fishery products. Geneva: ISO; 2003.
- ICMSF – International commission on microbiological specifications for foods. Microorganismos de los alimentos: técnicas de análisis microbiológico. Zaragoza: Acribia, 431p., 1984.
- JONG, J.A.H.; HOFFMANN, A.C.; FINKERS, H.J. Properly determine powder flowability to maximize plant output. Chemical Engineering Progress, v.95, n.4, p.25-34, 1999.
- KARATHANOS, V. T. et al. Air-drying kinetics of osmotically dehydrated fruits. Drying Technology, v. 13, n. 5, p. 1503-1521, 1995.
- KUDRA, T., MUJUMDAR, A.S. Advanced Drying Technologies, CRC Press, Taylor and Francis, 2009.

- LAMPINEN, M. J.; OJALA, K. T.; KOSHI, E. Modeling and measurements of dryers for coated paper. Drying Technology, v. 9, n. 4, p. 973–1017, 1991.
- LEONARDO, V. J. A. Contribuição ao estudo da secagem com microondas de tinta à base de resina acrílica emulsionada em água utilizada na sinalização horizontal viária. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia Mauá do Instituto Mauá de Tecnologia, Mauá-SP, 2009.
- LEWIS, L.W. The rate of drying of solid materials. Industrial Engineering Chemistry, v.13, n. 1, p. 427, 1921.
- LIN, T. M.; DURANCE, T. D.; SCAMAN, C. H. Characterization of vacuum microwave, air and freeze dried carrot slices. Food Research International, v. 31, n. 2, p. 111-117, 1998.
- MACÊDO, L. P. M. P. Viabilidade da produção de carvão ativado a partir de resíduos alternativos. Dissertação de mestrado. Universidade Católica De Pernambuco, 2012.
- MANACH, C.; SCALBERT, A.; MORAND, C.; RÉMÉSY, C.; JIMÉNEZ, L. Polyphenols: food sources and bioavailability. The American Journal of Clinical Nutrition, v. 79, n. 5, p. 727-747, 2004.
- MATÉ, J. I.; ZWIETERING, M.; VAN'T RIET, K. The effect of blanching on the mechanical and rehydration properties of dried potato slices. European Food Research and Technology, v. 209, n. 5, p. 343-347, 1999.
- MATUGI, K.; M. I.; FARGNOLI, A. G.; AGUIAR, M. L. Estudo da porosidade de tortas de filtração de gases em filtros de tecido. Anais... VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, Uberlândia-MG, 2009.
- MARINO NETTO, L. Acerola: a cereja tropical. Ed. Nobel, São Paulo 95p., 1986.
- MAIA, G. A.; SOUSA, P. D.; SANTOS, G. D.; SILVA, D. D.; FERNANDES, A. G.; PRADO, G. D. Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 27, n. 1, p. 130-134, 2007.
- MARTINAZZO, A. P.; CORRÊA, P. C.; RESENDE, O.; MELO, E. C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.11, n.3, p.301–306, 2007.
- MARTINS, C. R.; FARIAS, R. M. Produção de alimentos x desperdício: tipos, causas e como reduzir perdas na produção agrícola. Revista da Faculdade de Zootecnia, Veterinária e Agronomia, v.9, n.1, p.83-93, 2002.
- McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. Unit Operations of Chemical Engineering. 7<sup>a</sup> ed., Nova York: McGraw-Hill; 2005.

- McMINN, W. A. M, MAGEE, T .R. A. Principles, methods and applications of the convective drying of food stuffs. Food and Bioproducts Processing, v. 77, n. 3, p. 175-193, 1999.
- MEDEIROS, M.F.D.; ALSINA, O.L.S.; ROCHA, S.C.; JERÔNIMO, C.E.M.; MATA, A.L.M.L.; MEDEIROS, U.K.L.; FURTUNATO, A.A. Escoabilidade de leitos de partículas inertes com polpa de frutas tropicais. Efeitos na secagem em leito de jorro. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.5, n.3, p.475-480, 2001.
- MENEZES, R. R.; SOUTO, P. M.; KIMINAMI, R. H. G. A. Sinterização de cerâmicas em microondas. Parte I: Aspectos fundamentais (Microwave sintering of ceramics. Part I: Fundamental aspects). Cerâmica, v. 53, p. 1-10, 2007.
- METAXAS, R.; MEREDITH, J. Industrial Microwave Heating, v. 1, Front Cover. A. C.. IET – Technology & Engineering – 357p., 1983.
- MATSUURA, F. C. A. U.; CARDOSO, R. L., FOLEGATTI, M. D. S.; OLIVEIRA, J. R. P.; OLIVEIRA, J. D.; SANTOS, D. D.. Avaliações físico-químicas em frutos de diferentes genótipos de acerola (*Malpighia puniceifolia* L.). Revista Brasileira de Fruticultura, v. 23, n. 3, p. 602-606, 2001.
- MASAMURA, A.; SADO, H.; HONDA, T.; SHIMIZU, M.; NABETHANI, H.; HAKAJIMA, M. Drying of potato by far infrared radiation, Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi, v.35, p. 309-314, 1988.
- MONTEIRO, R. L.; CARCIOFI, BAM; LAURINDO, J. B. Ciclos de aquecimento-pulso de vácuo para modificação da textura de bananas desidratadas em campo de microondas. Blucher Chemical Engineering Proceedings, v. 1, n. 2, p. 4517-4524, 2015.
- MOTAVALI, A.; NAJAFI, G. H.; ABBASI, S.; MINAEI, S.; GHADERI, A. Microwave–vacuum drying of sour cherry: comparison of mathematical models and artificial neural networks. Journal of food Science and technology, v. 50, n. 4, p. 714-722, 2013.
- MOREIRA, E. G. Obtenção e caracterização de extrato microencapsulado de resíduo agroindustrial de acerola. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2007.

- MOREIRA, A. J. C. Alimentação alternativa de frangos tipo colonial com resíduo agroindustrial de fruta. Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista "Júlio De Mesquita Filho", Araçatuba-SP, 2014.
- MOYERS, C. G.; BALDWIN, G. W. Psychrometry, evaporative cooling, and solids drying. In: Perry's chemical engineers' handbook, p. 1-90, 1997.
- MUJUMDAR, A.S. Handbook of Industrial Drying, 3ª ed., Florida: CRC/Taylor & Francis, 2006.
- MUJUMDAR A. S.; KROKIDA M.; MARINOS-KOURIS D.. Rotary Drying. In: Handbook of Industrial Drying, 3ª ed., 2006.
- NAWIRSKA, N, FIGIEL, A, KUCHARSKA, A. Z, SOKÓŁ-ŁĘTOWSKA, A., BIESIADA, A. Drying kinetics and quality parameters of pumpkin slices dehydrated using different methods. Journal of Food Engineering, v. 94, n. 1, p. 14-20, 2009.
- NASSIF, Daniel Silveira Pinto; CICERO, Silvio Moure. Avaliação de sementes de acerola por meio de raios-x. Revista Brasileira de Fruticultura, v. 28, n. 3, p. 542-545, 2006.
- NELSON, S. O.; TRABELSI, S. Factors influencing the dielectric properties of agricultural and food products. Journal of Microwave Power and Electromagnetic Energy, v. 46, n. 2, p. 93-107, 2012.
- NEVES, V. A., SILVA, M. A. Polyphenol oxidase from yacon roots (*Smallanthus sonchifolius*). Journal of Agricultural and Food Chemistry, v. 55, p. 2424-2430, 2007.
- NÓBREGA, E. M. M. A. Secagem do resíduo de acerola (*Malpighia emarginata* DC.): Estudo do processo e avaliação do impacto sobre o produto final. Dissertação de mestrado. UFRN. Natal, RN, 2012.
- NOOROZI, M., ANGERSON, W.J., LEAN, M.E. Effects of flavonoids and vitamin C on oxidative DNA damage in human lymphocytes. American Journal of Clinical Nutrition, v.67, n.6, p.1210-1218, 1998.
- MARQUES, T. R. Aproveitamento tecnológico de resíduos de acerola: farinhas e barras de cereais. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2013.
- MILLER, G.L. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. Analytical Chemistry, v. 31, n. 3, p. 426-428, 1959.
- OLIVEIRA, A. C. de. Antioxidant capacity of tropical flour fruits residues. 108 f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Alagoas, Maceió-AL, 2008.

- OLIVEIRA, R. A.; OLIVEIRA, W. P.; PARK, KIL J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. Engenharia Agrícola, v. 26, n. 1, p.181-189, 2006.
- OVERHULTS, D. G.; WHITE, G. M.; HAMILTON, H. E.; ROSS, I. J. Drying soybeans with heated air. Transactions of the ASAE, v. 16, n. 1, p. 112-113, 1973.
- PACHECO, A. C. W.; LUZ, G. R.; JORGE, L. M. DE M. P.; ROBERTO, P. Determinação das isotermas de equilíbrio na adsorção da ração de peixe. Anais... VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação, Uberlândia-MG, 2009.
- PAGE, G. E. Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin-layer. Purdue University, West Lafayette, 1949.
- PARK, K.J., NOGUEIRA, R.I. Modelos de ajuste de isotermas de sorção de alimentos. In: Engenharia Rural, Piracicaba: ESALQ/USP, 1992. v. 3, n. 1, p.81-86.
- PEI, F.; YANG, W. J.; SHI, Y.; SUN, Y.; MARIGA, A. M.; ZHAO, L. Y.; HU, Q. H. Comparison of freeze-drying with three different combinations of drying methods and their influence on colour, texture, microstructure and nutrient retention of button mushroom (*Agaricus bisporus*) slices. Food and bioprocess technology, v. 7, n. 3, p. 702-710, 2014.
- PEREIRA, N. R. Estudo da aplicação de Microondas na secagem de bananas tratadas osmoticamente. Tese de doutorado. Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas-SP, 2007.
- PINHEIRO, A. M.; FERNANDES, A. G.; FAI, A. E. C.; PRADO, G. D.; SOUSA, P. D.; MAIA, G. A. Avaliação química, físico-química e microbiológica de sucos de frutas integrais: abacaxi, caju e maracujá. Ciência e Tecnologia de Alimentos, v. 26, n. 1, 2006.
- POMPELLA, A. Biochemistry and histochemistry of oxidant stress and lipid peroxidation. International Journal of Vitamin and Nutrition Research, v.67, n.5, p.289-297, 1997.
- POULSEN, H. E.; LOFT, S.; PRIEME, H.; VISTISEN, K.; LYKKESFELDT, J.; NYSSONEN, K.; SALONEN, J. T. Oxidative DNA damage in vivo: relationship to age, plasma antioxidants, drug metabolism, glutathione-S-transferase activity and urinary creatinine excretion. Free radical research, v. 29, n. 6, p. 565-571, 1998.
- PRADO, M. M. Secagem em leito fixo de sementes com mucilagem. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 2004.

- PRADO, M. M.; MARQUES, L. G.; PEREIRA, A. G. M.; SARTORI, D. J. M. Conceito da curva característica de secagem: aplicação para sementes com cobertura natural e artificial a base de gel. Anais do ENEMP - Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, Campinas – SP, 2009.
- QUEIROZ, D.M.; PEREIRA, J.A.M., MELO, E.C. Modelos matemáticos de simulação de secagem de grãos. Viçosa: Centro Nacional de Treinamento em Armazenagem, Viçosa - MG, 1995.
- RADÜNZ, L. L.; MOSSI<sup>2</sup>, A. J.; ZAKRZEWSKI, C. A.; AMARAL, A. S.; GRASSMANN, L. Análise da cinética de secagem de folhas de sálvia. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.14, n.9, p.979–986, 2010.
- RITZINGER, R.; RITZINGER, C. H. S. P. Acerola - Aspectos Gerais da Cultura. Cruz das Almas: Embrapa, 2005.
- ROSA, J. G. Secagem de cenoura (Daucus carota L.) em microondas. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos-SP, 2010.
- ROSINI, F.; NASCENTES, C. C.; NÓBREGA, J. A. Experimentos didáticos envolvendo radiação microondas, Química Nova, v. 27, n. 6, p. 1012-1015, 2004.
- SANSEVERINO, A. M. Microondas em síntese orgânica. Química Nova, v. 25, n. 4, p. 660-667, 2002.
- SANTOS, P.H.S.; SILVA, M.A. Preliminary study of ascorbic acid retention during drying of pineapple in ethanolic atmosphere. In: 16th International Drying Symposium (IDS 2008), 2008.
- SCHUBERT, H; REGIER, M. Drying using microwave processing. The microwave processing of foods, p. 142-152, 2005.
- SEADER, J. D.; HENLEY, E. J. Separation Process Principles. 2<sup>a</sup> ed. Danvers: John Wiley & Sons, Inc.; 2006.
- SEBRAE-SC - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas – Santa Catarina, Fábrica de polpa de frutas. Disponível em: <<http://www.sebraesc.com.br/ideais/default.asp?vcdtexto=4097&%5E%5E>>.
- Acesso em: 27 de ago. 2013.
- SENISE, J. T. A utilização de rádio-frequência e micro-ondas na eletrônica industrial. Revista Brasileira de Engenharia Química, v. 8, n. 1, p. 51-56, 1985.

- SHAHIDI, F.; JANITHA, P. K.; WHANASUNDARA, P. D. Phenolic Antioxidants CRC. Critical Reviews and Food Science and Nutrition, Boca Raton, v.32, n.1, p.67 -103, 1992.
- SHIBY, V. K.; MISHRA, H., N. Thin layer modelling of recirculatory convective air drying of curd (Indian Yoghurt). Food and Bioproducts Processing, v. 85, n. 3, p. 193-201, 2007.
- SILVA, D. I. S. Estudo da transferência de calor e massa na secagem em leito fixo visando o aproveitamento de resíduo de acerola (Malpighia Emarginata dc). Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2015 a.
- SILVA, G. K. C.; Silva, G. K. D. C.; Ramalho, S. A.; Gualberto, N. C.; Gomes, E. B.; Mendonça, R. C.; Narain, N. Utilização de resíduo agro-industrial como matéria prima para a Produção de ácido cítrico por *Kluveromyces marxianus* URM 4404. Scientia Plena, v. 8, n. 5, 2012.
- SILVA, N., JUNQUEIRA, V.C.A., SILVEIRA, N.F.A., TANIWAKI, M.H., SANTOS, R.F.S., GOMES, R.A.R. Manual de Métodos de Análise Microbiológica de Alimentos e Água. 4ª Ed. São Paulo. p. 41-42, 52-55, 364-368, 374-377, 519, 2010.
- SILVA, N. C. Desidratação de resíduos do processamento de maracujá-amarelo por diferentes metodologias. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2015 b.
- SILVA, P. B. Secagem de Resíduos de Frutas em Secador Roto-Aerado. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2014.
- SILVÉRIO, B. C. Estudos Fluidodinâmicos e de Secagem de Fertilizantes em Diferentes Tipos de Secadores Roto-aerados. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2012.
- SIQUEIRA, R. S. Manual de microbiologia de alimentos. Brasília: EMBRAPA, SPI; Rio de Janeiro: EMBRAPA, CTAA, 159p., 1995.
- SINGLETON, V. L.; Rossi, J. A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolibdic\_phosphotungstic acid reagents. American Journal of Enology and Viticulture, [s.n.], v.16, p.144-158, 1965.



- SOBRINHO, R.B.; BATISTA, J.L.; GUEVARA, L.A.C.; WARUMBY, J. Pragas da aceroleira. In: SOBRINHO, R.B.; CARDOSO, J.E.; FREIRE, F.C.O. Pragas de Fruteiras Tropicais de Importância Agroindustrial. Brasília: Embrapa-SPI; Fortaleza: Embrapa-CNPAT, p. 33-40, 1998.
- SOUZA DE SÁ, P. G.; GUIMARÃES, A. L.; OLIVEIRA, A. P.; FONTANA, A. P.; DAMASCENO, P. K. F.; BRANCO, C. R. C.; BRANCO, A.; ALMEIDA, J. R. G. S. Fenóis totais, flavonoides totais e atividade antioxidante de *Selaginella convoluta* (Arn.) Spring (Selaginellaceae). Revista Ciência Farmacêutica Básica Aplicada, v. 4, n. 33, p. 561-566, 2012.
- SOUZA, G. F. M. V. Secagem de sementes de soja em leito fixo: equilíbrio e cinética da sílica gel para controle de umidade, modelagem do processo e análise da qualidade das sementes. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2013.
- SOUZA JÚNIOR, F. E. Secagem do resíduo industrial da acerola em leito de jorro: estudos fluidodinâmicos e análise do desempenho do secador. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2012.
- SOUZA, L. M.; CORREIA, K. C.; SANTOS, A. M. G. dos; BARRETO, L. P.; NETO, E. B. Comparação de metodologias de análise de pH e acidez titulável. Anais... JEPEX UFRPE, Recife-PE, 2010.
- TEMBO, L., CHITEKA, Z. A., KADZERE, I., AKINNIFESI, F. K., TAGWIRA, F. Blanching and drying period affect moisture loss and vitamin C content in *Ziziphus mauritiana* (Lamk.). African Journal of Biotechnology, v. 7, n. 17, 2008.
- THOMKAPANICH, O., SUVARNAKUTA, P., DEVAHASTIN, S. Study of intermittent low pressure superheated steam and vacuum drying of a heat-sensitive material. Drying Technology, v. 25, p. 205-223, 2007.
- THOMPSON, T. L.; PEART, R. M.; FOSTER, G. H. Mathematical simulation of corn drying – a new model. Transactions of the ASAE, v. 14, n. 6, p. 582-586, 1968.
- TORREGIANNI, D.; BERTOLO, G. High-quality fruit and vegetable products using combined processes. In: FITO, P. et al. (Ed.). Osmotic Dehydration & Vacuum Impregnation – Application in Food Industries. Lancaster: Technomic Publishing Co., Inc., 2001. p. 3-9.
- TOSATO, P. G. Influência do etanol na secagem de maçã fuji. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2012.

- <http://www.dis.epm.br/servicos/nutri/public/alimento/nutriente/relatorio/2/id/09001/seqQuant/3>. Acesso em 13 de dezembro de 2015.
- URIBE, E.; MARÍN, D.; VEGA-GÁLVEZ, A.; QUISPE-FUENTES, I.; RODRÍGUEZ, A. . Assessment of vacuum-dried peppermint (*Menthapiperita* L.) as a source of natural antioxidants. Food chemistry, v. 190, p. 559-565, 2016.
- VASCO, C. Phenolic compounds in Ecuadorian fruits. Tese de doutorado. Swedish University of Agricultural Sciences. Uppsala, 2009.
- VENDRAMINI, A.L.; TRUGO, L.C. Chemical composition of acerola fruit (*Malpighiaglabra* L.) at three stages of maturity. Food Chemistry, v.71, n.2, p.195-198, 2000.
- VENKATESH, M. S.; RAGHAVAN, G. S. V. An Overview of Microwave Processing and Dielectric Properties of Agri-food Materials. Biosystems Engineering, v. 88, n. 1, p. 1-18, 2004.
- VERAS, A. O. M.; BÉTTEGA, R.; FREIRE, F. B.; BARROZO, M. A. S.; FREIRE, J. T. Drying kinetics, structural characteristics and vitamin c retention of dedo-de-moça pepper (*capsicum baccatum*) during convective and freeze drying. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 29, n. 04, p. 741 - 750, 2012.
- VON HIPPEL, A.R. Dielectric Materials and Applications. New York: The Technology Press of M.I.T. and John Wiley & Sons, 1954.
- WANG, C.Y.; SINGH, R. P. A Single layer drying equation for rough rice. American Society of Agricultural and Biological Engineers, n. 78-3001, 1978.
- WANG, J.; XI, Y. S. Drying characteristics and drying quality of carrot using two-stage microwave process. Journal of Food Engineer, v. 68, p. 505-511, 2005.
- WELTI, J., VERGARA, F. Atividade de água / Conceyto y aplicación em alimentos com alto contenido de humedad. In: AGUILERA, J. M. Temas em Tecnologia de Alimentos. Santiago; 1997.
- WOLFE, K.; WU, X.; LIU, R. H. Antioxidant activity of apple peels. Journal of agricultural and food chemistry, v. 51, n. 3, p. 609-614, 2003.
- WOJDYŁO, A.; FIGIEL, A.; OSZMIANŚKI, J. Effect of drying methods with the application of vacuum microwaves on the bioactive compounds, color, and antioxidant activity of strawberry fruits. Journal of agricultural and food chemistry, v. 57, n. 4, p. 1337-1343, 2009.

- ZHANG, M.; TANG, J.; MUJUMDAR, A. S.; WANG, S. Trends in microwave-related drying of fruits and vegetables. Trends in Food Science & Technology, v. 17, p. 524–534, 2006.
- ZHISHEN, J.; MENGCHENG, T; JIANMING, W.. The determination of flavonoid contents in mulberry and their scavenging effects on superoxide radicals. Food Chemistry, v. 64, n. 4, p. 555-559, 1999.

## **Apêndices**

## Apêndice A – Teste para medir a potência nominal dos níveis do forno micro-ondas utilizado na secagem em micro-ondas e micro-ondas a vácuo: Teste IMPI (International Microwave Power Institute)

Por calorimetria a potência de cada nível do forno micro-ondas foi aferida, sendo, realizado o método IMPI-2 Litros adaptado de Buffler (1991). O forno micro-ondas foi pré-aquecido através do aquecimento de 2 litros de água durante 5 minutos no nível máximo. Após este período, enxugou-se as paredes com pano frio e úmido. Para cada teste, uma carga de  $2000 \pm 1$  g foi distribuída em dois béqueres de 1 L, agitadas com colher de plástico e as temperaturas iniciais aferidas com um termômetro Instrutherm THR-080 com resolução de  $0,1^\circ\text{C}$ . Os béqueres foram dispostos de modo que se tocavam no centro do forno e o mesmo foi ligado por 2 min e 2 s. Após este período, os béqueres foram retirados do forno individualmente, as cargas agitadas novamente com colher de plástico e as temperaturas finais medidas. A potência foi calculada através da Equação 1:

$$P(W) = 70 \frac{\Delta T_1(^{\circ}\text{C}) + \Delta T_2(^{\circ}\text{C})}{2} \quad (1)$$

Tabela A.1: Determinação da potência de cada nível do forno micro-ondas.

Nível	m <sub>1</sub> (g)	m <sub>2</sub> (g)	$\Delta T_1$	$\Delta T_2$	Potência (W)	Media(W)
5	1000,54	1000,11	10	9,7	689,5	687,16
	1000,6	999,97	10,3	9,6	696,5	
	1000,5	1000,87	9,7	9,6	675,5	
4	1000,52	1000,4	7,2	7,4	511	513,33
	1000,66	1000,29	7,4	7,3	514,5	
	1000,17	1000,47	7,4	7,3	514,5	
3	1000,15	1000,74	5,6	5,5	388,5	399
	1000,25	1000,06	5,8	5,8	406	
	1000,93	1000,77	5,8	5,7	402,5	
2	1000,9	1000,54	3,2	3,4	231	228,67
	1000,42	1000,09	3,3	3,3	231	
	1000,82	1000,27	3,2	3,2	224	
1	1000,53	1000,07	1,8	1,5	115,5	114,33
	1000,23	1000,4	1,7	1,6	115,5	
	1000,28	1000,03	1,7	1,5	112	

Os testes foram realizados em triplicata para cada nível de potência. Se a variação de cada medida fosse superior a 5% da média todo o teste deveria ser repetido.

Buffler, C. A guideline for power output measurement of consumer microwave ovens. Microwave World 10 (5):15. 1991.

**Apêndice B – Ajuste dos modelos de cinética de secagem rivais aos dados da secagem do resíduo de acerola em micro-ondas.**

Potência(W)	Lewis (1921)	
	k	R <sup>2</sup>
114	0,0305	0,9748
229	0,0627	0,9875
399	0,1197	0,9916
513	0,1073	0,9778
	R <sup>2</sup> médio	0,9829

Potência(W)	Page (1949)		
	k	n	R <sup>2</sup>
114	0,0094	1,3584	0,9990
229	0,0346	1,2257	0,9986
399	0,0793	1,1908	0,9987
513	0,0472	1,3353	0,9981
		R <sup>2</sup> médio	0,9986

Potência(W)	Overhuts et al. (1973)		
	k	n	R <sup>2</sup>
114	0,0322	1,3584	0,9990
229	0,0643	1,2257	0,9986
399	0,1190	1,1908	0,9987
513	0,1016	1,3353	0,9981
		R <sup>2</sup> médio	0,9986

Potência(W)	Brooker et al. (1974)		
	A	k	R <sup>2</sup>
114	1,0799	0,0341	0,9879
229	1,0625	0,0685	0,9944
399	1,0661	0,1290	0,9966
513	1,1044	0,1173	0,9878
		R <sup>2</sup> médio	0,9917

Potência(W)	Henderson e Henderson (1968)		
	A	k	R <sup>2</sup>
114	0,9688	0,0341	0,9879
229	0,9514	0,0685	0,9944
399	0,9550	0,1290	0,9966
513	0,9933	0,1173	0,9878
		R <sup>2</sup> médio	0,9917

**Apêndice C – Ajuste dos modelos de cinética de secagem rivais aos dados da secagem do resíduo de acerola em micro-ondas a vácuo.**

Potência (W)	Vácuo aplicado (mmHg)	Lewis (1921)		Page (1949)			Overhuts et al. (1968)			Brooker et al. (1973)			Henderson e Henderson (1968)		
		k	R <sup>2</sup>	k	n	R <sup>2</sup>	k	n	R <sup>2</sup>	A	k	R <sup>2</sup>	A	k	R <sup>2</sup>
229	100	0,0511	0,8481	0,0007	2,4791	0,9992	0,0528	2,4791	0,9992	1,1355	0,0583	0,8775	1,0243	0,0583	0,8775
399	100	0,0945	0,8253	0,0022	2,6803	0,9979	0,1020	2,6803	0,9979	1,1197	0,1073	0,8529	1,0086	0,1073	0,8529
229	300	0,0473	0,8972	0,0021	2,0145	0,9990	0,0470	2,0145	0,9990	1,1217	0,0531	0,9208	1,0106	0,0531	0,9208
399	300	0,0968	0,8376	0,0033*	2,5299	0,9945	0,1049	2,5299	0,9945	1,1214	0,1106	0,8662	1,0103	0,1106	0,8662
229	200	0,0456	0,8566	0,0012*	2,2723	0,9950	0,0524	2,2723	0,9950	1,1002	0,0517	0,8818	0,9891	0,0517	0,8818
229	200	0,0456	0,8540	0,0009	2,3243	0,9963	0,0496	2,3243	0,9963	1,1193	0,0521	0,8823	1,0081	0,0521	0,8823
114	200	0,0166	0,9138	0,0009	1,7542	0,9990	0,0179	1,7542	0,9990	1,1349	0,0194	0,9474	1,0238	0,0194	0,9474
513	200	0,1142	0,8599	0,0074	2,3028	0,9952	0,1185	2,3028	0,9952	1,1252	0,1299	0,8870	1,0140	0,1299	0,8870
229	400	0,0462	0,8911	0,0015	2,0764	0,9990	0,0438	2,0764	0,9990	1,1391	0,0520	0,9166	1,0280	0,0520	0,9166
229	0	0,0374	0,8129	0,0002*	2,6704	0,9908	0,0443	2,6703	0,9908	1,1198	0,0436	0,8465	1,0087	0,0436	0,8465
		R <sup>2</sup> médio	0,8597		R <sup>2</sup> médio	0,9966		R <sup>2</sup> médio	0,9966		R <sup>2</sup> médio	0,8879		R <sup>2</sup> médio	0,8879

\* Indica que o nível de confiança do ajuste foi inferior a 95% ( $\alpha \leq 0,05$ ), entretanto foi superior a 90% ( $\alpha \leq 0,1$ ).

**Apêndice D – Ajuste dos modelos de cinética de secagem rivais aos dados da secagem micro-ondas a vácuo do resíduo de acerola tratado com imersão em etanol.**

Potência (W)	Vácuo aplicado (mmHg)	Lewis (1921)		Page (1949)			Overhuts et al. (1968)			Brooker et al. (1973)			Henderson e Henderson (1968)		
		k	R <sup>2</sup>	k	n	R <sup>2</sup>	k	N	R <sup>2</sup>	A	k	R <sup>2</sup>	A	k	R <sup>2</sup>
229	100	0,0766	0,9517	0,0185	1,5415	0,9946	0,0751	1,5415	0,9946	1,0674	0,0816	0,9598	0,9563	0,0816	0,9598
399	100	0,1469	0,9251	0,0267	1,8690	0,9968	0,1438	1,8690	0,9968	1,0666	0,1562	0,9334	0,9555	0,1562	0,9334
229	300	0,0814	0,9156	0,0077	1,9246	0,9995	0,0795	1,9246	0,9995	1,0786	0,0875	0,9270	0,9675	0,0875	0,9270
399	300	0,1490	0,9321	0,0294	1,8282	0,9996	0,1453	1,8282	0,9996	1,0647	0,1581	0,9400	0,9535	0,1581	0,9400
229	200	0,0792	0,9243	0,0092	1,8335	0,9998	0,0777	1,8335	0,9998	1,0779	0,0852	0,9354	0,9668	0,0852	0,9354
229	200	0,0780	0,9081	0,0073*	1,9466	0,9960	0,0800	1,9466	0,9960	1,0696	0,0838	0,9189	0,9585	0,0838	0,9189
114	200	0,0250	0,9659	0,0062	1,3872	0,9985	0,0256	1,3872	0,9985	1,0871	0,0276	0,9803	0,9760	0,0276	0,9803
513	200	0,1938	0,9138	0,0428	1,9497	0,9973	0,1986	1,9497	0,9973	1,0686	0,2079	0,9239	0,9575	0,2079	0,9239
229	400	0,0801	0,9298	0,0112	1,7913	0,9986	0,0816	1,7913	0,9986	1,0604	0,0852	0,9381	0,9493	0,0852	0,9381
229	0	0,0641	0,9594	0,0152	1,5143	0,9985	0,0631	1,5143	0,9985	1,0615	0,0681	0,9667	0,9504	0,0681	0,9667
		R <sup>2</sup> médio	0,9326		R <sup>2</sup> médio	0,9979		R <sup>2</sup> médio	0,9979		R <sup>2</sup> médio	0,9423		R <sup>2</sup> médio	0,9423

\* Indica que o nível de confiança do ajuste foi inferior a 95% ( $\alpha \leq 0,05$ ), entretanto foi superior a 90% ( $\alpha \leq 0,1$ ).



**Apêndice E – Resultados obtidos para os compostos bioativos na secagem convectiva do resíduo de acerola em leito fixo auxiliado por infravermelho**

<b>Experimento</b>		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
v (m/s)		0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
T (°C)		40	40	31,8	88,2	60	60	60
IR (W/m <sup>2</sup> )		350	1050	700	700	206,5	1193,5	700
TPT (mg AGE/100 g, b.s.)	5 cm	410,57±5,54	411,57±4,83	774,22±14,60	515,82±32,53	517,41±18,00	532,91±10,63	532,99±16,94
	10 cm	644,92±13,77	639,79±9,95	862,30±16,26	479,11±8,54	539,97±23,70	536,76±13,65	514,80±20,51
	15 cm	652,28±8,83	647,51±17,63	834,34±30,19	465,68±12,12	597,81±8,92	604,47±25,35	593,39±10,77
	20 cm	420,12±9,60	356,31±12,09	819,70±31,12	447,11±22,06	664,47±15,94	453,65±9,26	590,45±36,81
AA (mg ác. ascórbico/100 g, b.s.)	5 cm	946,90±26,19	991,24±55,58	342,12±9,99	4666,24±225,07	2798,84±145,95	2846,80±131,80	2817,17±120,30
	10 cm	1431,24±62,76	1420,69±73,25	327,63±14,37	4995,06±238,39	2877,13±88,62	2862,13±82,13	2866,06±97,55
	15 cm	1366,90±62,57	1377,25±166,54	337,97±15,47	4952,31±145,34	1942,72±141,60	1923,77±140,22	1883,36±55,27
	20 cm	732,44±38,38	988,60±50,97	368,85±19,33	3958,72±140,03	1146,59±45,50	1724,51±68,43	1455,29±88,55