



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Câmpus de São José do Rio Preto

Maria Júlia Neves Martins

**Influência da Aplicação do Ultrassom de Alta Intensidade na
Desidratação Osmótica do Gengibre**

São José do Rio Preto - SP
2019

Maria Júlia Neves Martins

**Influência da Aplicação do Ultrassom de Alta Intensidade na
Desidratação Osmótica do Gengibre**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de São José do Rio Preto.

Financiadora: CAPES

Orientador: Prof. Dr. Javier Telis Romero

São José do Rio Preto - SP
2019

M386i Martins, Maria Júlia Neves

 Influência da aplicação do ultrassom de alta intensidade na desidratação
osmótica do gengibre / Maria Júlia Neves Martins. -- São José do Rio Preto,
2019

 80 f. : il., tabs., fotos

 Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto
de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto

 Orientador: Javier Telis Romero

 1. Tecnologia de alimentos. 2. Alimentos desidratação. 3. Gengibre. 4.
Ultrassom. 5. Sacarose. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Biociências Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Maria Júlia Neves Martins

**Influência da Aplicação do Ultrassom de Alta Intensidade na
Desidratação Osmótica do Gengibre**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de São José do Rio Preto.

Financiadora: CAPES

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Javier Telis Romero
UNESP – São José do Rio Preto
Orientador

Prof^a. Dr^a. Maria Aparecida Mauro
UNESP – São José do Rio Preto

Prof^a. Dr^a. Maria Angélica Marques Pedro
UNILAGO – São José do Rio Preto

São José do Rio Preto – SP
25 de fevereiro de 2019

Dedico este trabalho...

...A minha família, que nunca mediu esforços para me apoiar nesta escolha.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida.

Agradeço a minha família em especial meus pais e meu irmão por sempre me apoiarem nas minhas escolhas.

Agradeço ao meu orientador e professor Javier por sempre ter me auxiliado durante o mestrado, compartilhando seus conhecimentos.

Agradeço aos meus avôs David e Arthur por sempre estarem perto de mim me proporcionando momentos alegres.

Agradeço a minhas avós Ilza e Pierina (in memoriam), embora não presentes, por seus ensinamentos e recordações que foram essenciais para superar os dias turbulentos.

Agradeço a todos os professores do departamento, pela boa acolhida no curso e por compartilharem seus ensinamentos. Todos são muito especiais.

Agradeço ao professor Róger por me ajudar durante o desenvolvimento de trabalhos, compartilhando seus conhecimentos.

Agradeço aos alunos do Laboratório da Prof^a Maria Aparecida, Prof^a Vânia e Prof João Cláudio por compartilharem suas experiências.

Agradeço aos meus amigos de laboratório, Bianca, Tiago, Gisandro, Marcio, Rodrigo, Lilian, Bruna pela amizade e parceria nos trabalhos.

Agradeço à Elisa, Milena, Carol, Maria Mariana, Mariane, Lili, Lais e Letícia pela amizade.

Agradeço à minha amiga Bianca pelo companheirismo durante vários anos de amizade.

Agradeço a minhas amigas Patrícia, Michele, Bruna, Larissa e Jaqueline por sempre estarem ao meu lado.

Agradeço a Deus por conseguir realizar um dos meus sonhos e que ele continue me dando saúde para dar continuidade à minha jornada.

Agradeço à Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” e ao Departamento de Engenharia e Tecnologia de Alimentos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, a qual agradeço pelo apoio financeiro.

Agradeço a todas as pessoas do meu convívio pois cada uma me ensinou algo de especial, contribuindo para meu desenvolvimento profissional e pessoal.

*“A persistência é o caminho do êxito.”
Charlie Chaplin*

RESUMO

Alguns alimentos como frutas, legumes e hortaliças apresentam nível de perecibilidade elevado, o que gera insatisfação do consumidor ao adquirir o alimento após alguns dias da colheita. Por isso as indústrias alimentícias estão à procura de processos que aumentem a vida útil dos alimentos. O gengibre é um desses alimentos e está cada vez mais presente na alimentação da população. Pesquisadores têm estudado a aplicação do ultrassom na desidratação osmótica desses alimentos, combinando essas técnicas, com o propósito de aumentar a eficiência da desidratação osmótica, reduzir gastos e aumentar a vida útil dos alimentos. O objetivo deste trabalho foi verificar a influência da aplicação do ultrassom de alta intensidade na desidratação osmótica do gengibre em uma solução osmótica de sacarose. Para o desenvolvimento do trabalho foi determinada a densidade e o calor específico das soluções de sacarose nas concentrações de 10% a 60% ($m \cdot m^{-1}$) na faixa de temperatura entre 0°C e 90°C, que variaram entre 970,77 a 1191,08 $kg \cdot m^{-3}$ e 2,89 a 4,11 $kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$. Cinco modelos matemáticos foram elaborados, entre eles modelo linear, quadrático e exponenciais, posteriormente foram ajustados aos dados de densidade e calor específico, porém, o modelo que variou linearmente em função da concentração e quadraticamente em função da temperatura apresentou melhor ajuste em ambas as propriedades. As potências reais aplicadas ao meio foram determinadas por meio do método calorimétrico, obtendo-se um fator de conversão de 30%. Por meio dos experimentos de desidratação osmótica do gengibre, com e sem a aplicação do ultrassom de alta intensidade, foi possível verificar que aplicação do ultrassom auxilia na perda de umidade, perda de água e no ganho de sólidos.

Palavras-chave: Desidratação osmótica, gengibre, sacarose, técnicas combinadas, ultrassom de alta intensidade.

ABSTRACT

Fresh food, such as fruit and vegetables, are highly perishable and often leave customers unhappy for they have to buy the product days after it was harvested. Therefore, the food industry is always searching for processes that enhance products' shelf life. Ginger is one of these products and its presence in our regular diet is increasing. Researchers have been studying the application of ultrasound to osmotic dehydration - called combined techniques - with the objective of increasing the efficiency of osmotic dehydration, cutting costs and enhancing the product's shelf life. This study aimed at checking the influence of applying high intensity ultrasound to the osmotic dehydration of ginger in a sucrose osmotic solution. Thus, the density and the specific heat of the sucrose osmotic solutions were determined, at concentrations of 10% to 60% ($m \cdot m^{-1}$), in a temperature range of 0°C and 90°C; the values varied from 970.77 to 1191.08 $kg \cdot m^{-3}$ and from 2.89 to 4.11 $kJ \cdot kg^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$. Five mathematical models were elaborated, among them linear, quadratic and exponential models, later they were adjusted to the data of density and specific heat; the best adjusted one for both properties was the model that varies linearly in function of concentration and quadratically in function of the temperature. The real potencies applied to the medium were determined through a calorimetric method resulting in a conversion rate of 30%. Through the osmotic dehydration experiments with ginger both applying the high intensity ultrasound and without applying the ultrasound, it was possible to verify that ultrasound application helps in the loss of moisture, loss of water and in the gain of solids.

Keywords: *Osmotic dehydration, ginger, sucrose, combined techniques, high intensity ultrasound.*

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1- Gengibre in natura (rizoma). | 19 |
| Figura 2- Três tipos de fluxo na desidratação osmótica. | 22 |
| Figura 3- Representação da frequência (f) e do comprimento de onda (λ). | 25 |
| Figura 4- Classificação do ultrassom conforme a frequência. | 26 |
| Figura 5 - Banho ultrassônico..... | 28 |
| Figura 6 - Modelos de sondas ultrassônicas. | 29 |
| Figura 7- Fatiador elétrico (marca Eco)..... | 32 |
| Figura 8- Gengibre fatiado. | 32 |
| Figura 9- Processador ultrassônico..... | 33 |
| Figura 10- Posicionamento do termopar na estrutura de nylon..... | 37 |
| Figura 11- Arranjo experimental para a determinação da potência real..... | 37 |
| Figura 12- Posicionamento do ultrassom na cuba. | 38 |
| Figura 13 - Aplicação de ultrassom sobre a fatia de gengibre..... | 40 |
| Figura 14- Variação de temperatura durante a aplicação do ultrassom na solução de sacarose..... | 52 |
| Figura 15 - Cinética da perda de umidade na desidratação osmótica com $P_N = 320 \text{ W}$ e $T = 28^\circ\text{C}$ | 54 |
| Figura 16 - Cinética da perda de água na desidratação osmótica com $P_N = 320 \text{ W}$ e $T = 28^\circ\text{C}$ | 55 |
| Figura 17 - Cinética do ganho de sólidos na desidratação osmótica com $P_N = 320 \text{ W}$ e $T = 28^\circ\text{C}$ | 55 |
| Figura 18 - Teor de umidade em função do tempo durante a desidratação osmótica do gengibre em uma solução osmótica de 30% ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$) a 28°C | 57 |
| Figura 19 - Perda de água em função do tempo durante desidratação osmótica do gengibre em solução concentrada a 30% ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$) a 28°C | 58 |
| Figura 20 - Ganho de sólidos em função do tempo durante desidratação osmótica do gengibre em uma solução concentrada a 30% ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$) a 28°C | 60 |
| Figura 21 - Modelo de Peleg aplicado aos dados dos testes preliminares para a determinação da umidade de equilíbrio. Legenda: (Δ) solução de sacarose 10% ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$), (\circ) solução de sacarose 20% ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$) e (+) solução de sacarose 30% ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$). | 61 |

| | |
|--|----|
| Figura 22 - Modelo de Peleg para a determinação da umidade de equilíbrio do experimento definitivo 1. Legenda: Aplicação de ultrassom de (●) 30% (120 W), (◆) 40% (160W), (■) 50% (200 W) e (▲) 0% (0W). | 62 |
| Figura 23 - Modelo de Peleg para a determinação da umidade de equilíbrio do experimento definitivo 2. Legenda: Aplicação de ultrassom de (●) 30% (120 W), (◆) 40% (160W), (■) 50% (200 W) e (▲) 0% (0W). | 63 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1- Análise centesimal do gengibre <i>in natura</i> | 20 |
| Tabela 2 - Modelos matemáticos genéricos utilizados para ajustar os dados experimentais de densidade e calor específico das soluções de sacarose em função da temperatura e concentração de sólidos. | 35 |
| Tabela 3 - Densidade ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) de soluções de sacarose em concentrações de 10 a 60% e em temperatura de 0 a 90°C. | 45 |
| Tabela 4 - Densidade ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) de soluções de sacarose em concentrações de 10 a 60% e em temperatura de 0 a 90°C. | 46 |
| Tabela 5 - Calor específico ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$) de soluções de sacarose em concentrações de 10 a 60% e em temperatura de 0 a 90°C. | 48 |
| Tabela 6 - Calor específico ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$) de soluções de sacarose em concentrações de 10 a 60% e em temperatura de 1 a 90°C. | 49 |
| Tabela 7 - Parâmetros dos modelos estudados para a determinação da densidade e calor específico. | 51 |
| Tabela 8 – Potência real acústica da solução de sacarose a 30% ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$) tratada com potência nominal de 30% (120 W), 40% (160 W) e 50% (200 W)..... | 53 |
| Tabela 9- Média e desvio padrão do teor de umidade (b.u) em função do tempo durante a desidratação osmótica do gengibre em uma solução osmótica de 30% ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$) a 28°C..... | 57 |
| Tabela 10 - Perda de água durante desidratação osmótica do gengibre em solução concentrada a 30% ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$) a 28°C. | 57 |
| Tabela 11 - Ganho de sólidos durante desidratação osmótica do gengibre em uma solução concentrada a 30% ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$) a 28°C. | 60 |
| Tabela 12 -Parâmetros determinados a partir do modelo de Peleg para a determinação da umidade de equilíbrio dos testes preliminares. | 62 |
| Tabela 13 - Parâmetros determinados com base no modelo de Peleg para a determinação da umidade de equilíbrio dos experimentos definitivos de desidratação osmótica..... | 63 |
| Tabela 14 - Determinação dos coeficientes de difusão da água para os testes preliminares de desidratação osmótica de gengibre a 28 °C e $P_N=320$ W..... | 64 |

| | |
|---|----|
| Tabela 15 - Determinação dos coeficientes de difusão da água para os experimentos definitivos de desidratação osmótica do gengibre em uma solução osmótica de sacarose a 30% (m·m ⁻¹) e a 28 °C. | 65 |
|---|----|

LISTA DE SIMBOLOS

| | |
|-------------------------|---|
| f | Frequência |
| I | Intensidade |
| P | Potência |
| A | Área da superfície do emissor |
| P_R | Potência real |
| ρ | Densidade |
| V | Volume de solução |
| C_p | Calor específico da solução |
| dT/dt | Gradiente de temperatura |
| D_s | Deslocamento vertical entre as curvas das amostras e a curva do material de referência a uma dada temperatura |
| W_s | Massa da amostra |
| θ | Fluxo de calor |
| A, B e C | Constantes dos modelos matemáticos |
| ¥ | Propriedade termofísica estudada (C _p ou ρ) |
| T | Temperatura da solução |
| X | Concentração da solução |
| R | Constante universal dos gases |
| R² | Coefficiente de determinação |
| EMR | Erro Médio Relativo |
| V_{exp.} | Valor experimental da propriedade termofísica |
| V_{cal.} | Valor calculado da propriedade termofísica através do modelo |
| N | Número de dados experimentais |
| PA | Perda de água |
| U_i | Umidade inicial |
| U_f | Umidade final |
| M_i | Massa inicial |
| M_f | Massa final |
| GS | Ganho de sólidos |
| Ms_t | Matéria seca no tempo t |
| Ms_i | Matéria seca inicial |

| | |
|--------------|--|
| X_t^w | Umidade da amostra no tempo (t) |
| X_0^w | Umidade da amostra no tempo (t=0) |
| t | Tempo de processo |
| k_1^w | Parâmetro 1 do modelo de Peleg |
| k_2^w | Parâmetro 2 do modelo de Peleg |
| dx^w/dt | Taxa inicial de transferência de massa da água |
| X_∞^w | Umidade de equilíbrio |
| MR | Umidade residual |
| U_i | Umidade inicial da amostra |
| U_t | Umidade da amostra no tempo t |
| U_e | Umidade de equilíbrio |
| n | Número de termos da série |
| L | Espessura da amostra |
| D_{efw} | Coeficiente de difusão da água |
| P_N | Potência nominal |
| D_{ef} | Coeficiente de difusão |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 17 |
| 2 OBJETIVOS | 18 |
| 2.1 Objetivo geral | 18 |
| 2.2 Objetivos específicos | 18 |
| 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 19 |
| 3.1 Gengibre..... | 19 |
| 3.1.1 Introdução | 19 |
| 3.2 Desidratação osmótica | 21 |
| 3.2.1 Introdução | 21 |
| 3.2.2 Representação do fenômeno de desidratação osmótica de vegetais | 22 |
| 3.2.3 Variáveis do processo | 23 |
| 3.2.3.1 Tipos de agentes osmóticos..... | 23 |
| 3.2.3.2 Concentração | 23 |
| 3.2.3.3 Temperatura | 24 |
| 3.3 Ultrassom | 24 |
| 3.3.1 Introdução | 24 |
| 3.3.2 Parâmetros ultrassônicos | 25 |
| 3.3.2.2 Intensidade | 26 |
| 3.3.2.3 Potência | 26 |
| 3.3.3 Classificação dos ultrassons | 27 |
| 3.3.4 Fenômenos causados pela aplicação do ultrassom | 27 |
| 3.3.5 Equipamentos de ultrassom de potência..... | 28 |
| 3.3.5.1 Banhos ultrassônicos | 28 |
| 3.3.5.2 Sistemas de sondas | 29 |
| 3.3.6 Determinação da potência real acústica absorvida pela solução osmótica | 30 |
| 3.3.7 Desidratação osmótica e ultrassom | 31 |
| 4 MATERIAL E MÉTODOS | 32 |
| 4.1 Material..... | 32 |
| 4.1.1 Gengibre..... | 32 |
| 4.1.2 Soluções de sacarose | 32 |
| 4.1.3 Descrição do equipamento ultrassônico..... | 33 |

| | |
|--|----|
| 4.2 Métodos..... | 33 |
| 4.2.1 Determinação das propriedades termofísicas das soluções de sacarose | 33 |
| 4.2.1.1 Densidade | 33 |
| 4.2.1.2 Calor específico..... | 34 |
| 4.2.1.3 Modelagem matemática das propriedades termofísicas das soluções de sacarose..... | 35 |
| 4.2.2 Determinação da potência real acústica absorvida pela solução osmótica | 36 |
| 4.2.3 Desidratação osmótica | 38 |
| 4.2.3.1 Testes preliminares | 38 |
| 4.2.3.2 Experimentos definitivos de desidratação osmótica | 39 |
| 4.2.4 Métodos analíticos | 40 |
| 4.2.4.1 Determinação da umidade | 40 |
| 4.2.5 Análises dos dados | 40 |
| 5 RESULTADOS | 42 |
| 5.1 Caracterização da solução osmótica de sacarose | 42 |
| 5.1.1 Densidade | 42 |
| 5.1.2 Calor específico..... | 46 |
| 5.2 Determinação da potência real acústica | 52 |
| 5.3 Desidratação osmótica | 54 |
| 5.3.1 Testes preliminares | 54 |
| 5.3.2 Experimentos definitivos de desidratação osmótica | 56 |
| 5.4 Modelagem matemática | 61 |
| 6 CONCLUSÃO..... | 66 |
| 7 TRABALHOS FUTUROS | 67 |
| 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 67 |
| APÊNDICE A..... | 75 |
| APÊNDICE B..... | 78 |

1 INTRODUÇÃO

O nível de perecibilidade dos alimentos é um fator considerável para os fornecedores e indústrias alimentícias já que a produção de cada determinado alimento é concentrada em específicas regiões e necessita-se abastecer as demais.

Entre os vários alimentos que passam por essa situação, encontra-se o gengibre, alimento perecível devido ao elevado teor de umidade ($78,89 \text{ g}_{\text{água}} \cdot \text{g}_{\text{gengibre}}^{-1}$) (USDA, 2018).

Usualmente o gengibre é aplicado como condimento, com sabor característico picante e refrescante, na produção de bolos, bolachas, bebidas, temperos de carnes, chás, pastilhas, gengibre glaceado e em conserva.

Dadas as dificuldades de se manter um alimento conservado na prateleira por um longo tempo devido sua a perecibilidade, novas tecnologias estão sendo desenvolvidas com base em combinações de técnicas como, por exemplo, o pré tratamento de desidratação osmótica combinado com a aplicação de ultrassom, visando à obtenção de produtos com menores níveis de perecibilidade.

A desidratação osmótica é um pré tratamento usado na conservação de alimentos, que consiste na imersão do alimento em uma solução osmótica e, por meio de diferença de potencial químico e as consequentes transferências de massas, obtém-se o resultado de perda de água e ganho de soluto. Atualmente técnicas combinadas de desidratação osmótica convencional e aplicação do ultrassom têm sido empregadas na busca de melhores resultados na cinética da desidratação.

Assim, o objetivo deste trabalho foi verificar a influência da aplicação do ultrassom de alta intensidade na desidratação osmótica do gengibre em uma solução osmótica de sacarose. Para tanto, foram determinados parâmetros como a densidade e o calor específico para a caracterização da solução de sacarose, cujos resultados têm ampla aplicação em diversos processos alimentícios, e também para a determinação da potência real aplicada ao meio. O ultrassom auxilia na perda de água e no ganho de sólidos durante a desidratação osmótica do gengibre, isso pode ser de grande interesse para as indústrias que trabalham com a secagem de alimentos juntamente com o pré tratamento de desidratação osmótica, pois este complemento no pré tratamento irá gerar redução de tempo de processamento e talvez até mesmo reduzir gastos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

A presente dissertação de mestrado tem como objetivo avaliar a influência da aplicação do ultrassom de alta intensidade sobre a desidratação osmótica do gengibre em uma solução de sacarose.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar as propriedades termofísicas (densidade e calor específico) das soluções de sacarose nas concentrações de 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 60% ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$) na faixa de temperatura de 0 a 90 °C com intervalos de 5° C;
- Modelar matematicamente os dados das propriedades termofísicas (densidade e calor específico);
- Avaliar o comportamento da densidade e do calor específico das soluções de sacarose em função da concentração e temperatura;
- Determinar as potências reais acústicas absorvidas pelas soluções osmóticas de sacarose na concentração de 30% ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$) por meio do método calorimétrico;
- Avaliar a influência da potência ultrassônica e do tempo aplicado sobre a perda de água e ganho de sólidos na desidratação osmótica do gengibre;
- Modelar matematicamente o processo de transferência de massa com base nos modelos de Peleg e Fick.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Gengibre

3.1.1 Introdução

O gengibre é considerado uma planta herbácea, proveniente da família *Zingiberaceae* e nativa da região sudoeste da Ásia (PALHARIN et al., 2008).

A Figura 1 apresenta a parte de maior interesse da planta que é o rizoma, caracterizado pela presença de um caule duro, espesso e subterrâneo de superfície rugosa (GOVINDARAJAN,1982). Possui cor pardenta e dimensões de 30 a 160 mm de comprimento, 20 mm de espessura e 30 a 40 mm de largura. Não apresenta regularidade em seu formato e suas ramificações são conhecidas como “dedos”. Sua endoderme tem coloração amarela e aspecto fibroso (WHO, 1999).

Figura 1- Gengibre in natura (rizoma).



Fonte: Autor

Na parte superior do rizoma encontram-se hastes que podem chegar a uma altura superior a 1500 mm e são compostas por folhas longas, esverdeadas e flores amarelo-esverdeadas. As hastes de onde brotam as flores são mais curtas do que as hastes que contêm apenas as folhas (WHO, 1999).

A produção de gengibre se concentra predominantemente na China, enquanto no cenário brasileiro a produção predomina nas regiões litorâneas do Paraná, Santa Catarina, São Paulo, Espírito Santo, litoral nordestino e pequenas partes das regiões de Goiás, Rio de Janeiro e Minas Gerais (RUCKER, 2007). Essas regiões possuem clima tropical favorável à produção. Todas as etapas de plantio, cultivo e colheita são

realizadas por moradores que vivem nessas localidades e praticam a agricultura familiar, destinando a maior parte da produção à exportação.

De acordo com a síntese da produção agropecuária do Espírito Santo feita a partir de dados do IBGE-LSPA em dezembro de 2014 e com preços determinados pelo Incaper, a produção de gengibre atinge mais de 12.900 toneladas em uma área de 313 ha com valor de produção de R\$ 66.119.763 e com um rendimento médio de 41.214 Kg·há⁻¹. No período estudado, ou seja, 2014, o gengibre teve destaque na exportação brasileira, no grupo de olericultura e outros produtos (GALEANO et al., 2016).

Dentre as plantas medicinais, o gengibre se destaca devido aos benefícios à saúde de pessoas e animais (PALHARIN et al., 2008) pois contém propriedades antiúlceras, antibacterianas, anti-inflamatórias e antináuseas; além disso, ele é capaz de reduzir o teor de glicose no sangue dentre outros benefícios (UTPALENDU; CHATTOPADHYAY; PRASAD 1999; WHO, 1999).

O gengibre é exportado em diferentes formas: *in natura*, em conserva ou cristalizado, desidratado ou em pó. Para o preparo do tipo em conserva ou cristalizado, utilizam-se gengibres com extremidades mais uniformes e os frutos mais imaturos, pois apresentam estruturas menos rígidas. Já para a produção do gengibre desidratado (em pó, em fatias ou peças inteiras), com umidade final de 12%, utilizam-se gengibres que já tenham passado por todo processo de maturação (LORENZETTI, 2018).

O consumo mais habitual do gengibre é na forma de especiaria para carnes, bolos, bolachas e geleias, ou na forma de chá, conservas e pastilhas. Além disso, atualmente também vem sendo utilizado em formulações de produtos cosméticos e aromáticos.

A Tabela 1 apresenta a composição do gengibre. Entre os principais componentes encontrados se destaca a umidade; ele é considerado um alimento com alto teor de umidade, o que lhe confere alto índice de perecibilidade (USDA, 2018).

Tabela 1- Análise centesimal do gengibre *in natura*.

| Componentes | g (100g)⁻¹ |
|--------------------|------------------------------|
| Umidade | 78,89 |
| Carboidratos | 17,77 |
| Proteínas | 1,82 |

| | |
|----------|------|
| Lipídios | 0,75 |
| Cinzas | 0,77 |

Por ser um alimento perecível, o gengibre pode murchar, brotar, sofrer alterações físico-químicas em sua composição e se deteriorar (LANA et al., 1993). Essas modificações podem se acelerar em ambientes mais úmidos ou devido a algum dano físico.

Com o intuito de aumentar a vida de prateleira de alimentos como esse, a ciência e a tecnologia de alimentos têm buscado desenvolver novos processos industriais como a desidratação osmótica (QUEJI; PESSOA, 2011).

3.2 Desidratação osmótica

3.2.1 Introdução

Novas técnicas estão sendo desenvolvidas para melhorar os processos alimentícios e até mesmo as técnicas convencionais vêm sendo aprimoradas. Uma das principais técnicas de preservação dos alimentos é a secagem; porém, existem parâmetros desvantajosos em sua aplicação, tais como a perda dos fatores sensoriais e nutrientes.

A técnica de desidratação osmótica aplicada juntamente ao processo de secagem é uma alternativa que visa obter resultados satisfatórios por meio da secagem, minimizando os parâmetros desvantajosos supracitados (TAYLOR, 2004) e somando vantagens à sua aplicação, tais como a conservação da cor sem o uso de aditivos, a permanência dos compostos voláteis e a inibição do escurecimento enzimático. Além de melhorar as características do produto final, de modo geral, é considerado um processo de baixo custo energético (MERCALI et al., 2011).

A desidratação osmótica é uma das técnicas de pré-tratamento empregadas em alimentos com o objetivo de aumentar a vida de prateleira após a colheita e reduzir a perda de nutrientes; de maneira geral, é uma etapa que melhora a qualidade final do produto (URIBE et al., 2011).

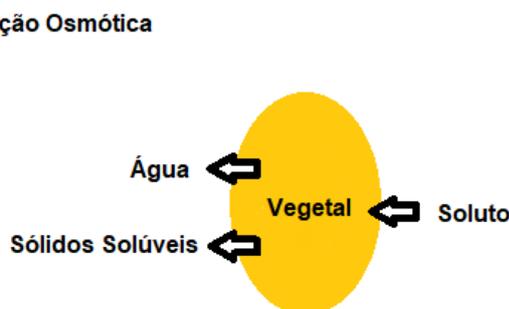
A fim de aperfeiçoar o processo de transferência de massa na desidratação osmótica, utiliza-se a aplicação do ultrassom como um complemento ao processo. Tal conjunto de técnicas denomina-se técnicas combinadas (CÁRCEL et al., 2007a).

3.2.2 Representação do fenômeno de desidratação osmótica de vegetais

A desidratação osmótica caracteriza-se por um processo no qual o vegetal entrará em contato direto com uma solução hipertônica e, por meio da diferença de potenciais químicos entre ambos, ocorrerá uma transferência de massa que removerá parcialmente a água presente no vegetal. Durante a transferência de massa são gerados três fluxos conforme apresentado na Figura 2: saída da água do vegetal para a solução, entrada do soluto da solução osmótica no vegetal e saída de componentes do vegetal para a solução. Esses fluxos ocorrem até que os potenciais químicos entrem em equilíbrio (TONON; BARONI; HUBINGER, 2007, GERMER et al., 2011).

O terceiro fluxo representa a saída dos componentes do vegetal para a solução e ele ocorre devido à falta de seletividade da membrana biológica durante o fluxo de saída. É tratado como um fluxo insignificante quando comparado aos demais, porém é neste fluxo que ocorre a saída de substâncias de baixo peso molecular (vitaminas, sais minerais, entre outros) que refletirá no valor nutricional do produto final (DEVIC et al., 2010).

Figura 2- Três tipos de fluxo na desidratação osmótica.



Fonte: Autor

Estes fluxos em contracorrente que ocorrem entre o vegetal e a solução hipertônica causam transferência de massa, que têm como consequências a redução da umidade e o ganho de sólidos de maneira simultânea, alterando a composição química do vegetal (LENART, 1996).

As células vegetais que compõem o vegetal são de extrema importância para que a desidratação osmótica ocorra, pois são compostas de membranas e parede celular pelas quais os fluxos passam trocando massa. Pela parede celular existe uma maior facilidade de transferência de massa, pois sua estrutura apresenta poros; já a

membrana celular é considerada um obstáculo natural, pois se situa no interior da parede celular (LECH, et al., 2018).

3.2.3 Variáveis do processo

Algumas variáveis de processo podem interferir na transferência de massa e na qualidade final do produto entre elas: o tipo de agente osmótico, concentração do agente osmótico, temperatura, agitação, aditivos e tratamentos prévios (RAOULT-WACK et al., 1992).

3.2.3.1 Tipos de agentes osmóticos

Majoritariamente, os agentes osmóticos utilizados para preparar as soluções osmóticas são a sacarose e o cloreto de sódio. De maneira geral, utiliza-se o cloreto de sódio quando se trata de legumes e a sacarose quando se trata de frutas (YADAV; SINGH, 2012).

Os pesos moleculares dos agentes osmóticos interferem na cinética da desidratação osmótica na medida em que quanto menor o peso molecular do agente osmótico, maior a facilidade de difusão do soluto na matriz do alimento e, conseqüentemente, maior ganho de soluto, e menor perda de água. O oposto ocorre quando se aplica um agente osmótico de alto peso molecular (SANTOS, 2003).

3.2.3.2 Concentração

Existe uma grande faixa de concentrações aplicadas na técnica de desidratação osmótica e sua escolha implicará nos fatores resultantes como, por exemplo, um sabor mais acentuado do agente osmótico utilizado na preparação da solução, modificação química da estrutura do alimento desidratado, variação na umidade e no ganho de sólidos.

Nagay (2012) utiliza soluções osmóticas de sacarose nas concentrações de 40%, 50% e 60% para o processo de desidratação osmótica de manga sem aplicação de ultrassom. A maior perda de umidade e o maior ganho de sólidos ocorrem quando se utilizam soluções com concentrações mais altas devido aos maiores gradientes de concentração. Este fato foi demonstrado nas quatro primeiras horas de desidratação osmótica de fatias de manga.

Cárcel et al. (2007b) realizou estudos de desidratação osmótica de maçã com aplicação de ultrassom em uma solução osmótica de 30% de sacarose. Já Fernandes, Gallão e Rodrigues (2009) realizaram estudos de desidratação osmótica de abacaxi com aplicação de ultrassom, na qual uma das concentrações das soluções osmóticas de sacarose utilizadas foi a de 35° Brix.

Pode-se observar que as soluções osmóticas de menores concentrações são utilizadas em experimentos com aplicação do ultrassom, isto é, devido a influência do ultrassom na perda de água e no ganho de sólidos durante a desidratação osmótica.

3.2.3.3 Temperatura

A temperatura é um fator importante, pois pode agredir a estrutura do alimento, diminuir sua resistência, tornando-o mais flexível e levando-o a adquirir curvas; pode ainda alterar sua cor e levá-lo a perder alguns compostos. Essas consequências são consideradas indesejáveis na desidratação osmótica.

Lech et al (2018 apud Ponting et al., 1996) afirma que, em temperaturas mais elevadas, obtém-se uma melhor transferência de massas e que, a partir de 50°C, começa-se a observar consequências indesejáveis no produto. No entanto, essa temperatura pode variar de acordo com o tipo de produto.

O fato de haver um aumento da transferência de massa com o aumento da temperatura está relacionado à redução da viscosidade da solução hipertônica, que facilita o movimento em contracorrente entre os fluxos.

3.3 Ultrassom

3.3.1 Introdução

Diversos são os tipos de energia encontrados na natureza, dentre eles a energia acústica, utilizada no processo de ultrassom (CÁRCEL, 2003).

O transdutor é o elemento responsável pela conversão da energia elétrica ou mecânica em ultrassom. Os três principais tipos de transdutores são aqueles movidos a gás, a líquido e o eletromecânico. Esse último trabalha a base de efeitos piezoelétricos e magnetoestrictivos, sendo que o efeito piezoelétrico é usualmente mais aplicado em modelos ultrassônicos do tipo banho e sonda (CASTRO; CAPOTE, 2007).

O efeito piezoelétrico ocorre na presença do cristal piezoelétrico, elemento que, a partir da recepção da energia elétrica, gera movimento de oscilação, responsável pela conversão da energia elétrica recebida pelo gerador ultrassônico em energia mecânica, a qual é convertida em energia acústica e dissipada ao meio em forma de ondas ultrassônicas (KOBUS, 2008).

O casal Curie impulsionou o desenvolvimento da tecnologia do ultrassom, já que, em 1880, descobriu o efeito piezoelétrico, atualmente considerado a base dos transdutores ultrassônicos modernos. Decorrentes da descoberta do primeiro transdutor ultrassônico foram os desenvolvimentos do apito por Galton, durante estudos da audição humana, em 1883 e dos “rastreadores de sons” (*eco sounder*) por Paul Lanveginem 1917 (KUTTRUFF, 1991).

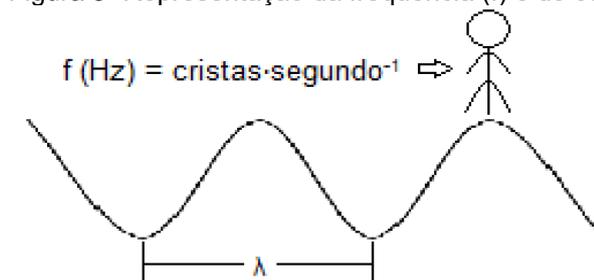
3.3.2 Parâmetros ultrassônicos

Ao se utilizar o ultrassom, é necessário estabelecer parâmetros de modo que os resultados esperados sejam alcançados. Por isso, o conhecimento de tais parâmetros é fundamental e nos próximos itens são apresentados os principais parâmetros ultrassônicos.

3.3.2.1 Frequência

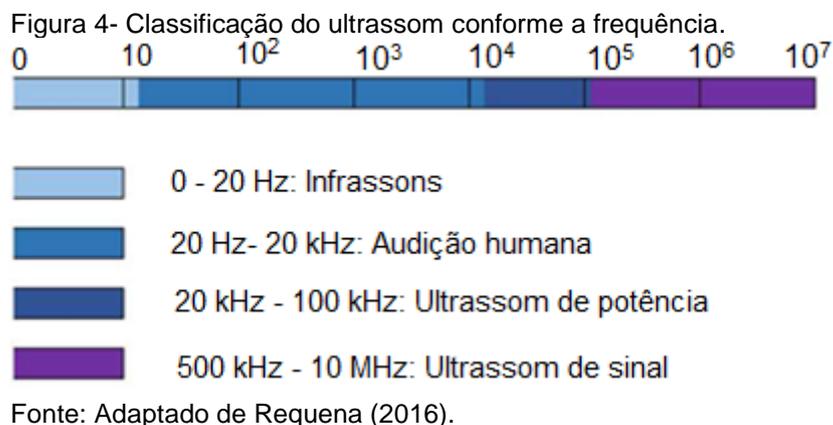
Frequência é um termo que representa o número de oscilações que ocorrem no intervalo de um segundo, como representado na Figura 3. Usualmente representada pela letra f , sua unidade no sistema internacional é Hertz (Hz). O inverso deste termo é chamado de período, representado pela letra T e sua unidade é $1 \cdot s^{-1}$ e ele constitui o tempo necessário para completar um ciclo de oscilações (MARTIN; RAMNARINE, 2010).

Figura 3- Representação da frequência (f) e do comprimento de onda (λ).



Fonte: Adaptado de Martin e Ramnarine (2010).

De acordo com a frequência na qual o ultrassom se propaga no meio, foi elaborada uma classificação do ultrassom por meio de escala, apresentada na Figura 4.



3.3.2.2 Intensidade

A intensidade é descrita pela energia emitida a partir de uma área perpendicular à direção da emissão da onda ultrassônica (SERWAY, 1996). Esse parâmetro pode ser calculado pela Equação 1:

$$I = \frac{P}{A} \quad (1)$$

sendo que I é a intensidade ($W \cdot m^{-2}$), P é a potência (W) e A é a área da superfície do emissor (m^2).

3.3.2.3 Potência

Define-se potência a energia fornecida por meio de uma fonte por unidade de tempo, podendo ser calculada pela Equação 2:

$$P = I \cdot A \quad (2)$$

sendo que P é a potência (W), I é a intensidade ($W \cdot m^{-2}$) e A é a área da superfície do emissor (m^2).

3.3.3 Classificação dos ultrassons

O ultrassom pode ser classificado por intensidade, em dois tipos: ultrassom de baixa intensidade e ultrassom de alta intensidade.

O ultrassom de baixa intensidade é aquele que apresenta uma intensidade inferior a $1 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, com incapacidade de alterações nas propriedades físicas e químicas do alimento. Sua aplicação na área alimentícia tem a finalidade de caracterizar propriedades físicas e químicas (MCCLEMENT; GUNASEKARAN, 1997) em análises de carotenoides, por exemplo. Também é aplicado em outras áreas como, por exemplo, na medicina, para a realização de tratamentos e exames, e na indústria metalúrgica, para a identificação de descontinuidade das peças inspecionadas.

Já o ultrassom de alta intensidade é aquele que apresenta uma intensidade entre 10 e $1000 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, capaz de gerar grandes alterações nas propriedades físicas e químicas do alimento. Tais consequências possibilitam aplicações em diversos processos como homogeneização, ruptura celular e limpeza (MCCLEMENTS; GUNASEKARAN, 1997).

3.3.4 Fenômenos causados pela aplicação do ultrassom

Especificamente quando se trabalha com ultrassom de alta intensidade, obtêm-se diferentes efeitos resultantes de sua aplicação. Dentre eles, o mais conhecido e estudado é um efeito denominado cavitação (LEIGHTON, 1998). Esse fenômeno se caracteriza pela formação de microbolhas na solução, as quais implodem na superfície dos sólidos, perturbando a camada limite, assim gerando microcavidades nos sólidos e, por fim, alterando a transferência de massa (MASON; LORIMER, 2002).

De acordo com Leighton (1998), a cavitação pode receber classificações conforme o comportamento das microbolhas. É chamada de cavitação estável quando as microbolhas têm um comportamento moderado, ocasionando uma pequena agitação do meio. A cavitação transitória, por sua vez, representa um comportamento mais agitado das microbolhas, que causa um colapso entre si durante as transições no meio, assim resultando na liberação de energia e, conseqüentemente, aumentando a temperatura e a pressão do meio.

Outro fator que faz com que haja o aumento da temperatura do meio ocorre durante a propagação das ondas, pois com a vibração das moléculas e com a

presença da resistência viscosa do meio, uma parcela da energia acústica dissipada é convertida em calor, gerando o efeito termoacústico e, conseqüentemente, alterando a transferência de massa (MASON; LORIMER, 2002).

O “efeito esponja” é outro tipo de fenômeno que pode ser obtido ao se trabalhar com ultrassom de alta frequência. Trata-se de sucessivos ciclos de compressão e decompressão do alimento durante a propagação das ondas, causando efeitos na estrutura do alimento e na transferência de massa (GALLEGO-JUÁREZ, 1999).

Temperatura e agitação são critérios importantes a serem tratados quando se aplica o ultrassom, visto que durante a sonicação, as ondas são capazes de se propagarem no meio líquido, de forma que não há necessidade de agitação mecânica. Já o uso de temperatura elevada do meio osmótico não influencia na eficiência da aplicação do ultrassom. Portanto, recomenda-se trabalhar em temperatura ambiente (SIMAL et al., 1998).

3.3.5 Equipamentos de ultrassom de potência

3.3.5.1 Banhos ultrassônicos

Os banhos ultrassônicos são compostos por um tanque de aço inoxidável e transdutores dispersos e fixos em sua base. De acordo com a capacidade de líquido, é necessária uma quantidade maior de transdutores de modo a se obter uma alta intensidade de potência. Como se trata de um equipamento sem a capacidade de regulação de frequência, os ensaios são conduzidos em uma frequência fixa (CASTRO; CAPOTE, 2007).

As pesquisas de desidratação osmótica, quando combinadas com ultrassom, são realizadas por meio de banhos ultrassônicos, por se tratar de um equipamento mais acessível e econômico (MULET et al., 1999), além de possuir várias outras aplicabilidades.

A Figura 5 apresenta um banho ultrassônico comum de aplicação laboratorial.

Figura 5 - Banho ultrassônico.



Fonte: Autor

3.3.5.2 Sistemas de sondas

Os sistemas de sondas são compostos por um transdutor e uma sonda; essa última é a responsável por transferir os sinais ultrassônicos ao meio. Porém, para que este funcionamento se dê, é necessário que o transdutor receba energia elétrica na frequência e intensidade desejadas que será transferida ao transdutor piezoelétrico, que por sua vez transformará a energia elétrica em energia acústica. A energia acústica posteriormente será transmitida ao meio por meio da sonda. De acordo com a alteração feita na potência aplicada ao gerador, a intensidade da potência emitida pela sonda também será alterada. A maioria desses equipamentos oferece a funcionalidade de controle da potência aplicada, além da opção de distribuição de sinais ultrassônicos em forma de pulsos (PINJARI; PANDIT, 2010).

A corrosão causada pelo habitual fenômeno de cavitação reduz a transferência de energia ultrassônica ao meio. Este fenômeno ocorre devido à alta frequência distribuída em uma superfície da sonda considerada pequena, causando assim a formação de microbolhas e, conseqüentemente, a erosão do equipamento (MULLET et al., 2003).

As sondas devem ser fabricadas com materiais resistentes que suportem a fadiga mecânica, as erosões causadas pela cavitação e que tenham baixas perdas acústicas (LINGYU YU; GIURGIUTIU, 2009). Atualmente, são utilizadas diversas ligas de titânio, já que este metal oferece melhores condições de operação.

Na Figura 6 encontram-se três sondas ultrassônicas distintas: as duas primeiras têm emissão de ondas ultrassônicas apenas na direção axial pela ponta da sonda; o terceiro modelo tem diversos “nós” distribuídos que representam os vários pontos de propagação de ondas ultrassônicas.

Figura 6 - Modelos de sondas ultrassônicas.



Fonte: Autor

3.3.6 Determinação da potência real acústica absorvida pela solução osmótica

Existem vários fatores que interferem na transmissão do ultrassom, entre eles o tamanho, formato do recipiente onde será realizado o experimento, características do meio, como a viscosidade, temperatura, pressão, concentração, presença de sólidos, e os parâmetros ultrassônicos, como frequência e intensidade. Como as alterações desses fatores influenciarão a conversão da potência nominal em potência real, é importante determinar a potência real acústica absorvida pelo meio e, conseqüentemente, o fator de conversão (RASO et al.,1999; BERLAN e MASON, 1996).

O método calorimétrico vem sendo utilizado por diferentes pesquisadores para a determinação da potência real acústica, visto que é confiável e tem variações inferiores a 5% para a repetitividade. Sua aplicação é predominante em líquidos, para os quais se entende que toda energia ultrassônica seja convertida em calor, obtendo-se assim um aumento de temperatura com o passar do tempo de aplicação de ultrassom. A determinação da potência real acústica transmitida ao meio pode ser calculada a partir da Equação 3 (RASO et al.,1999):

$$P_R = \rho \cdot V \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} \quad (3)$$

em que P_R é a potência real acústica absorvida pelo sistema em uma determinada posição da sonda (W); ρ é a densidade da solução ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$); V é o volume da solução (m^3); C_p é o calor específico da solução ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$); $dT\cdot dt^{-1}$ é o gradiente de temperatura ao longo do tempo de registro ($\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$); I é a intensidade acústica ($\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$); e A é a área da seção da sonda (cm^2).

Nota-se que a determinação da densidade e do calor específico das soluções de sacarose são essenciais para a determinação da potência real acústica. Além disso essas propriedades têm uma ampla aplicação nas indústrias para predizer o comportamento das soluções de sacarose durante processos que envolvem fenômenos de transporte de calor, massa e quantidade de movimento.

3.3.7 Desidratação osmótica e ultrassom

A aplicação do ultrassom durante a desidratação osmótica tem o intuito de aumentar a eficiência da transferência de massa entre a solução osmótica e o alimento. A mesma faz com que se criem microcanais no alimento facilitando assim a remoção da água (GARCIA-NOGUEIRA et al, 2010) e o ganho de sólidos.

Várias pesquisas estão sendo realizadas com base nessa combinação de técnicas, em diferentes alimentos: yacon (MENDONÇA et al. 2015), maçã (CÁRCEL et al., 2007b), carne bovina (CARVALHO, 2014), batata (GOULA; KOKOLAKI; DAFTSIU, 2017), cenoura (SILVEIRA, 2014), banana (FERNANDES; RODRIGUES, 2007) e mamão (FERNANDES; OLIVEIRA; RODRIGUES, 2008).

Silveira (2014) estudou a desidratação osmótica de cenoura em soluções osmóticas de sacarose, sal e água destilada, com e sem aplicação de ultrassom durante diferentes tempos de aplicação. A partir dos testes, obteve resultados satisfatórios para a maioria dos casos em que aplicou o ultrassom como, por exemplo, em soluções de sacarose de 50° Brix com duração de 20 minutos, resultando em uma perda de água de 11,79% com aplicação de ultrassom e de 6,87% sem aplicação do ultrassom. Também obteve resultados insatisfatórios, como o ganho de água para aplicações de ultrassom em soluções a 1% de concentração de cloreto de sódio e em experimentos com água destilada com e sem a aplicação do ultrassom.

Cárcel et al. (2007b) realizaram experimentos de desidratação osmótica de maçã com solução osmótica de sacarose na concentração de 30% a 30°C. A partir dos resultados experimentais de perda de água foi possível observar que os experimentos com maiores intensidades de ultrassom (10,8 e 11,5 W·cm²) apresentaram maiores perdas de água.

Goula, Kokolaki e Daftsiou (2017) realizaram estudos de desidratação osmótica de batata em soluções osmóticas de cloreto de sódio e maltodextrina. Foram testados três tipos de experimentos de desidratação osmótica: estático, com agitação e com aplicação de ultrassom. Nos experimentos com aplicação de ultrassom a sonicação ocorreu de forma pulsada por meio de uma sonda ultrassônica. Os maiores valores obtidos para a perda de água e ganho de sólidos foram nos experimentos com a aplicação de ultrassom.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

4.1.1 Gengibre

O gengibre (*Zingiber Officinale*) utilizado foi adquirido no mercado local de São José do Rio Preto e, no ato da compra, passou pela primeira inspeção visual referente à cor, ao tamanho e danos físicos.

Após serem adquiridos, os produtos foram higienizados com água corrente e em seguida secos com papel absorvente. O produto não foi descascado antes de ser fatiado para evitar o dano físico em sua estrutura, visto sua característica fibrosa, e também para evitar a perda de umidade pela exposição do produto ao ambiente.

O gengibre foi então fatiado poucos instantes antes do início dos experimentos com o auxílio de um fatiador elétrico da marca Eco (Figura 7) com uma espessura estabelecida de aproximadamente $0,2 \pm 0,02$ cm como apresentado na Figura 8.

Figura 7- Fatiador elétrico (marca Eco).



Fonte: Autor

Figura 8- Gengibre fatiado.



Fonte: Autor

4.1.2 Soluções de sacarose

As soluções de sacarose foram preparadas nas concentrações de 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 60% ($m \cdot m^{-1}$) com água destilada. Para a preparação das soluções utilizou-se uma balança analítica (AUX220, Shimadzu, Japão) para a pesagem do soluto e do solvente; um agitador magnético (C-MAG HS 7, IKA, EUA) foi usado para a completa dissolução. Posteriormente, o conteúdo de sólidos solúveis foi avaliado por meio de um refratômetro portátil (HI 86801, Hanna Instruments, Romênia). Para os experimentos de caracterização das soluções de sacarose foi utilizada sacarose

com alto nível de pureza da marca Synth (nível de pureza > 99%), enquanto para os experimentos de desidratação osmótica, utilizou-se sacarose comercial da marca Guarani (açúcar cristal com 99% de nível de pureza).

4.1.3 Descrição do equipamento ultrassônico

O equipamento ilustrado na Figura 9 é denominado processador ultrassônico. O modelo utilizado nos experimentos de desidratação osmótica foi o UP400S com uma sonda cilíndrica acoplada (modelo H22L2D, Hielscher Ultrasonics GmbH, Alemanha) de 2,2 cm de diâmetro e 20,0 cm de comprimento com capacidade de aplicar uma potência nominal máxima de 400 W em uma frequência fixa de 20 kHz. A potência nominal aplicada pode ser utilizada variando-se de 20% a 100% a potência nominal máxima. O tratamento pode ser realizado em sistema de sonicação contínua ou em pulsos, e é possível controlar o tempo de aplicação de ultrassom durante cada segundo de tratamento.

Figura 9- Processador ultrassônico.



Fonte: Autor

4.2 Métodos

4.2.1 Determinação das propriedades termofísicas das soluções de sacarose

4.2.1.1 Densidade

As densidades (ρ) das soluções de sacarose nas concentrações de 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 60% ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$) foram determinadas em triplicata por meio de um

densímetro (DMA 4500M, Anton Paar, Áustria) previamente calibrado com ar e água deionizada. O equipamento foi programado para realizar as leituras entre as temperaturas de 0°C a 90 °C, em intervalos de 5°C. O volume de amostra utilizada foi de aproximadamente 2 mL. Os resultados obtidos foram transferidos para o computador por meio do sistema de aquisição de dados.

4.2.1.2 Calor específico

Para determinar o calor específico (C_p) da solução de sacarose foi utilizado um calorímetro diferencial de varredura modelo DCS 8000 da marca Perkin Elmer (Shelton, EUA). A metodologia aplicada foi calorimetria diferencial pelo método ASTM E-1269-05 para sólidos e líquidos termicamente estáveis (ASTM-E1269, 2005). O experimento foi realizado em triplicata e as amostras continham cerca de 5 μ L e eram colocadas em painéis de alumínio (ref 0219-0062, Perkin Elmer, EUA) e seladas hermeticamente.

Esta metodologia submete as amostras a um fluxo de calor para avaliação das trocas de energia do material. A etapa de calibração foi realizada a um fluxo de calor de 10 K \cdot min⁻¹ com o elemento químico índio que apresenta características estabelecidas como a temperatura de fusão 429,75 K e variação de entalpia 28,45 kJ \cdot kg⁻¹. Um fluxo de 20 mL \cdot min⁻¹ de nitrogênio com 99,5% de pureza foi aplicado como gás purga no experimento.

Painéis de alumínio com peso de 24,01 \pm 0,04 mg foram utilizadas como linha de base e recipiente para as amostras da solução ou para o material referência. O material referência consiste em discos de safira com diâmetro de 3 mm (ref 0219-1268, Perkin Elmer, Shelton, EUA) (ARCHER, 1993).

As amostras foram pesadas antes e depois de cada análise. O mesmo programa de processos térmicos foi aplicado para amostras, material referência e linha base: isotérmico a 273,13 K por 4 min; fluxo de calor de 10 K \cdot min⁻¹ até atingir a temperatura de 363,13 K, na qual se manteve isotérmico por mais 4 min. Por meio do programa PYRIS 10.1 (Perkin Elmer, Shelton, EUA) os dados foram tratados e em seguida foi possível determinar o calor específico por meio da Equação (4), onde C_p é o calor específico (J \cdot kg⁻¹ \cdot K⁻¹), D_s é o deslocamento vertical entre as curvas das amostras e a curva do material de referência a uma dada temperatura (mW), θ é o fluxo de calor (K \cdot s⁻¹) e W_s é a massa da amostra (kg).

$$C_p = \frac{D_s}{W_s \theta} \quad (4)$$

4.2.1.3 Modelagem matemática das propriedades termofísicas das soluções de sacarose

Cinco modelos matemáticos (Tabela 2) foram ajustados aos dados experimentais de densidade e calor específico das soluções de sacarose nas concentrações de 10 a 60% e nas temperaturas de 0 a 90°C. Os mesmos modelos foram testados para ambas as propriedades termofísicas e estão correlacionados com a temperatura T (°C) e o teor de sólidos solúveis X (g de soluto·100 g de solução⁻¹). Entre os modelos apresentados se encontram: dependências lineares, quadráticas e/ou exponenciais.

Tabela 2 - Modelos matemáticos genéricos utilizados para ajustar os dados experimentais de densidade e calor específico das soluções de sacarose em função da temperatura e concentração de sólidos.

| Modelos matemáticos | Equação |
|---|---------|
| $\forall = A + (B \cdot X) + (C \cdot (T + 273,15))$ | 5 |
| $\forall = A + (B \cdot X) + (C \cdot (T + 273,15)^2)$ | 6 |
| $\forall = A \cdot \exp\left(\frac{B}{R \cdot (T + 273,15)}\right) \cdot \exp(C \cdot X)$ | 7 |
| $\forall = A \cdot \exp\left(\frac{B}{R \cdot (T + 273,15)}\right) \cdot X^C$ | 8 |
| $\forall = A \cdot \exp(B \cdot X) \cdot (T + 273,15)^C$ | 9 |

* \forall se refere à propriedade estudada (c_p ou ρ); A, B e C aos parâmetros do modelo; T à temperatura (°C) e X à concentração de sólidos (g de soluto · 100 g de solução⁻¹).

Com os valores determinados das propriedades termofísicas através da modelagem matemática e os valores experimentais foi determinado o erro médio relativo (EMR) para cada modelo de cada propriedade termofísica da solução de sacarose através da Equação 10.

$$EMR(\%) = \frac{100}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{|V_{exp.} - V_{cal.}|}{V_{exp.}} \quad (10)$$

sendo que EMR é o erro médio relativo; $V_{exp.}$ é valor experimental da propriedade termofísica; $V_{cal.}$ é o valor calculado da propriedade termofísica através do modelo matemático; N é o número de dados experimentais.

4.2.2 Determinação da potência real acústica absorvida pela solução osmótica

Para a determinação da potência real acústica absorvida pela solução osmótica foi estabelecida a concentração de 30% ($m \cdot m^{-1}$) da solução osmótica de sacarose e potências nominais de 120 W, 160 W e 200 W referentes a 30%, 40% e 50% da potência nominal máxima.

Esta concentração de 30% é considerada uma concentração próxima ou até mesmo igual quando comparada a outros trabalhos de desidratação osmótica com soluções de sacarose e aplicação de ultrassom. Cárcel et al. (2007b) utilizaram soluções osmóticas de sacarose com concentração de 30% para a desidratação osmótica de maçã com aplicação de ultrassom. Garcia-Nogueira et al. (2010) utilizaram duas concentrações diferentes de soluções osmóticas de sacarose durante a desidratação osmótica de morango com aplicação de ultrassom, na qual uma das concentrações foi de 25%. Já Corrêa et al. (2017) utilizaram soluções osmóticas de sacarose na concentração de 40% para a desidratação osmótica de abacaxi com aplicação de ultrassom. Além disso, há também a motivação decorrente da atual tendência de consumo de alimentos com reduzido teor de açúcar.

No que se refere à definição das potências, foram escolhidas potências inferiores visando menores danos à estrutura do gengibre.

Os ensaios foram realizados em um béquer de 1L contendo 800 mL de solução osmótica de sacarose na concentração de 30% ($m \cdot m^{-1}$). Ele foi imerso em um banho ultratermostatizado (Marconi, modelo MA-184) até que a temperatura se estabilizasse a 28°C. Uma armação de tela de náilon era inserida no centro do béquer juntamente com um termopar tipo K (MT-455, Minipa, EUA) acoplado no centro da armação de modo que não se deslocasse durante o experimento e que representasse o local onde a amostra se localizaria durante os experimentos. As Figuras 10 e 11 mostram o arranjo experimental para a determinação da potência real acústica.

Figura 10- Posicionamento do termopar na estrutura de nylon.



Fonte: Autor

Figura 11- Arranjo experimental para a determinação da potência real.



Fonte: Autor

As variações de temperaturas foram registradas de maneira manual durante os primeiros 90 segundos de aplicação do ultrassom, em intervalos de 5 segundos.

Para cada condição, foram realizadas cinco repetições e a média das temperaturas foram calculadas para determinação dos parâmetros acústicos.

A partir dos dados, foi possível obter os gradientes de temperatura no intervalo dos primeiros 90 segundos de aplicação do ultrassom de acordo com a metodologia de Raso et al. (1999) para o cálculo da potência real acústica absorvida pelo meio e a intensidade por meio das Equações 1 e 3.

4.2.3 Desidratação osmótica

4.2.3.1 Testes preliminares

Os testes preliminares de desidratação osmótica foram conduzidos em uma cuba de alumínio com capacidade de armazenar 20L de solução e composta por uma estrutura metálica com quatro compartimentos distribuídos em suas extremidades para posicionar cestas de náilon, onde foram depositadas as amostras. Essas cestas de náilon possuem tampa e dois compartimentos, para garantir que as amostras fiquem submersas na solução osmótica. A cuba dispõe de uma circulação externa de água, fornecida por um banho ultratermostatizado (Marconi, modelo MA-184) à temperatura de 28°C. Cerca de 100 gramas de gengibre fatiado instantes antes de iniciar o experimento eram imediatamente homogeneizados. As fatias eram selecionadas aleatoriamente e distribuídas nas quatro cestas de nylon. Cada cesta continha aproximadamente 25 g de amostra, divididas entre os dois compartimentos. O ultrassom era posicionado no centro da cuba e imerso a 1 cm na solução (Figura 12).

Figura 12- Posicionamento do ultrassom na cuba.



Fonte: Autor

O ensaio da desidratação osmótica tinha duração de 120 minutos, sendo que se interrompia o processo em intervalos de 30 minutos para a coleta de algumas amostras de maneira aleatória. A cada intervalo, as fatias coletadas eram escorridas em uma peneira, colocadas em um béquer de 600 ml com água destilada a uma temperatura aproximada de 3°C por 30 segundos e, a seguir, eram dispostas sobre

papel absorvente para a retirada do excesso de água em ambos os lados das fatias. O intuito do enxágue da amostra é retirar o excesso de solução osmótica da superfície e cessar o processo de desidratação osmótica.

Os testes preliminares foram realizados nas condições de 80% (320 W) da potência nominal máxima em soluções osmóticas de sacarose em concentrações de 10%, 20% e 30% ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$). Esta potência escolhida para a realização dos testes preliminares é considerada elevada quando comparada as potências nominais utilizadas nos experimentos definitivos. A utilização desta potência elevada (320 W) é devido ao grande tamanho do recipiente (30 x 30 x 35 cm) de desidratação osmótica, grande quantidade de solução osmótica (20 litros) e pela a aplicação do ultrassom ser direcionada ao centro da cuba e não diretamente nas amostras.

4.2.3.2 Experimentos definitivos de desidratação osmótica

Os ensaios foram realizados em um béquer de 1L contendo 800 mL de solução osmótica de sacarose na concentração de 30% ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$). O béquer foi imerso em um banho ultratermostatizado (Marconi, modelo MA-184) onde teve sua temperatura controlada a 28°C. Uma armação de tela de náilon foi inserida no béquer para o posicionamento da amostra. Esta armação foi projetada para o posicionamento de uma única fatia de amostra, de maneira que a mesma permanecesse fixa durante todo o experimento.

O gengibre foi fatiado poucos instantes antes do início do experimento; após ser fatiado, retirou-se a casca.

A sonda foi imersa na solução em aproximadamente 1 cm, resultando em uma distância de 1 cm entre a amostra e a extremidade da sonda, conforme apresentado na Figura 13.

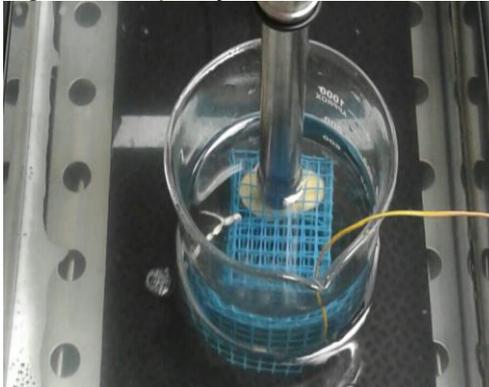
Para os ensaios, foram estabelecidas potências nominais de 120 W, 160 W e 200 W, referindo-se a 30%, 40% e 50% da potência nominal máxima.

Os experimentos tiveram durações de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 minutos.

Após o processo de desidratação osmótica, a fatia foi rapidamente imersa em um béquer com 300 mL de água destilada à temperatura de, aproximadamente, 3°C por 30 segundos para eliminar a solução da superfície do alimento e sequencialmente a mesma era disposta sobre papel absorvente para a retirada do excesso de água de ambos os lados.

Repetiu-se o processo em duplicata para todas as potências nominais e períodos de tempo estabelecidos.

Figura 13 - Aplicação de ultrassom sobre a fatia de gengibre.



Fonte: Autor

4.2.4 Métodos analíticos

4.2.4.1 Determinação da umidade

O teor de umidade foi determinado por meio do método gravimétrico em estufa a vácuo modelo TE-395 (TECNAL), de acordo com o método oficial AOAC 950.46 (AOAC, 1997). Aproximadamente 2,0 gramas de gengibre eram pesados em uma balança analítica modelo AUX220 (Shimadzu, Kyoto, Japão) em pesa filtros e posteriormente colocados na estufa a vácuo a 60°C e 25 mmHg até atingir peso constante. A alteração da temperatura fornecida na metodologia (de 70 °C para 60 °C) deveu-se à presença de açúcar no produto, resultante da desidratação osmótica; sabe-se que temperaturas mais altas causam caramelização e formação de crosta de açúcar que dificultam a saída de água do alimento durante a secagem.

4.2.5 Análises dos dados

Com base nos dados de umidade, foi possível determinar alguns parâmetros para o acompanhamento da cinética da desidratação osmótica. Estes parâmetros são: perda de água e ganho de sólidos (HAWKES; FLINK, 1978) (HENG, GUILBERT e CUQ, 1990) representados pelas Equações 11 e 12:

$$PA(\%) = (((U_i \cdot M_i) - (U_f \cdot M_f)) / M_i) \cdot 100 \quad (11)$$

sendo que PA é a perda de água (%); U_i é a umidade inicial ($\text{g}_{\text{água}} \cdot \text{g}_{\text{amostra}}^{-1}$); U_f é a umidade final ($\text{g}_{\text{água}} \cdot \text{g}_{\text{amostra}}^{-1}$); M_i é a massa inicial (g) e M_f é a massa final (g).

$$\text{GS}(\%) = ((M_{s_t} - M_{s_i}) / M_i) \cdot 100 \quad (12)$$

sendo que GS é o ganho de sólidos (%); M_{s_i} é a matéria seca inicial; M_{s_t} é matéria seca no tempo t; M_i é a massa inicial (g).

Os modelos matemáticos que descrevem os processos de desidratação osmótica baseiam-se na teoria da difusão líquida de água. Essa teoria é representada pela segunda lei de Fick (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2001).

Com base nos dados da cinética da desidratação osmótica, aplicaram-se os modelos matemáticos de Peleg (PELEG, 1988) e Fick (CRANK, 1975).

- **Modelo de Peleg:**

O modelo de Peleg tem por objetivo estimar a umidade de equilíbrio após longos períodos de processamento com base nos dados de curto períodos. Esta estimativa é obtida por meio da curva de adsorção, composta pelo parâmetro de ajuste, k^w , conforme a Equação 13:

$$x_t^w - x_0^w = \frac{t}{k_1^w + k_2^w t} \quad (13)$$

sendo que k_1^w e k_2^w são parâmetros de ajuste do modelo; x_t^w é a umidade ($\text{g}_{\text{água}} \cdot \text{g}_{\text{matéria seca}}^{-1}$) de uma amostra em um determinado tempo (t) na desidratação e x_0^w é a umidade ($\text{g}_{\text{água}} \cdot \text{g}_{\text{matéria seca}}^{-1}$) de uma amostra no tempo inicial da desidratação (t=0).

A constante k_1^w representa a taxa inicial de transferência de massa da água por meio da Equação 14. E a constante x_∞^w da Equação 15 representa a condição de equilíbrio.

$$\frac{dx^w}{dt} = \left| \frac{1}{k_1^w} \right| \quad (14)$$

$$x_\infty^w = x_0^w - \frac{1}{k_2^w} \quad (15)$$

- **Modelo de Fick (placa plana):**

A partir da segunda lei de Fick, tem-se uma solução analítica para placas planas infinitas que, integrada, é apresentada na forma expandida de acordo com a Equação 16 (CRANK, 1975).

$$MR = \frac{U_t - U_e}{U_i - U_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n-1)^2} e^{-\frac{(2n-1)^2 \pi^2 D_{efw} t}{4L^2}} \quad (16)$$

sendo que MR é a umidade residual (adimensional); t é o tempo (min.); U_i é a umidade inicial (g_{água}·g_{m.s}⁻¹) (para t=0); U_t é a umidade média (g_{água}·g_{m.s}⁻¹) no tempo t (s); U_e é a umidade de equilíbrio (g_{água}·g_{m.s}⁻¹); D_{efw} é o coeficiente de difusão efetivo de umidade (cm²·min.⁻¹); L é a espessura inicial da amostra (cm); e n é o número de termos da série.

Algumas considerações foram feitas para a determinação do coeficiente de difusão efetivo de umidade: geometria de placas planas infinitas; transferência de massa unidimensional com a espessura de -L<z<L; a concentração da solução permaneceu constante durante todo o experimento; não houve variação das dimensões do sólido. Utilizaram-se 12 termos da série.

5 RESULTADOS

5.1 Caracterização da solução osmótica de sacarose

5.1.1 Densidade

As análises de densidade foram realizadas para as soluções de sacarose nas concentrações de 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 60% (m·m⁻¹) na faixa de temperatura

de 0°C a 90°C, com intervalos de 5°C. Os valores das densidades variaram entre 970,77 e 1191,08 kg·m⁻³ e podem ser encontrados na Tabela 3.

Os dados experimentais foram submetidos às análises estatísticas: análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey. Nos dois testes foram levados em consideração dois tipos de análises: considerando-se as concentrações constantes (Tabela 3) e considerando-se as temperaturas constantes (Tabela 4).

Nas duas formas de análise, ambos os resultados da ANOVA foram de $p \leq 0,0001$, demonstrando que as amostras apresentam diferença significativa entre elas. Com o teste de Tukey, obteve-se grande quantidade de médias estatisticamente diferentes nos dois casos de análises dos dados. Assim sendo, pode-se afirmar que a temperatura e a concentração de sólidos solúveis influenciam a densidade das soluções de sacarose.

Alguns dados de densidade de solução de sacarose são reportados na literatura, porém com restrições na faixa de temperatura e concentração. Isso se dá porque muitas vezes essas propriedades são obtidas de maneira indireta ou são determinadas de maneira bastante específica como, por exemplo, em Raventós et al. (2007), que apresentam densidades de soluções de sacarose em concentrações entre 5 e 40°Brix e temperaturas entre -2.6 e 22.5 °C; Ali et al. (2014), por outro lado, determinaram-nas para soluções de sacarose nas concentrações de 0,01 a 0,05 mol·kg⁻¹ e nas temperaturas de 298,15; 303,15; 308,15 e 313,15 K; e por fim Darros-Barbosa et al (2003) determinaram as densidades para as soluções de sacarose nas concentrações de 1; 10 e 50°Brix e nas temperaturas de 15; 20; 25 e 40 °C.

Uma vez que Darros-Barbosa et al. (2003) trabalharam com o mesmo tipo de solução e com especificações de concentração e temperatura dentro da faixa de estudo do presente trabalho, foi realizada uma comparação entre tais dados e foram obtidas variações entre eles com erro máximo de 3%.

Essas diferenças mínimas encontradas na comparação com os dados de Darros-Barbosa et al. (2003) podem estar relacionadas à calibração do equipamento.

Com base nos dados de média das densidades (Tabela 3), nota-se que as densidades aumentam com a elevação da concentração de sólidos solúveis. Por outro lado, a densidade se comporta de forma inversamente proporcional à temperatura, ou seja, ela aumenta conforme a temperatura diminui. Este mesmo comportamento é observado para a solução binária de sacarose estudada por Darros-Barbosa, et al (2003) e para diferentes produtos alimentícios como, por exemplo, o suco de uva

(ZURITZ et al., 2005), o purê de manga (GUNDURAO, et al., 2011) e o suco de abacaxi clarificado (GARZA; IBARZ, 2010).

Tais observações feitas nas pesquisas em relação à densidade em função da temperatura e concentração podem ser explicadas por meio da definição de densidade a partir da razão de massa sobre volume. A queda dos valores para a densidade durante a elevação da temperatura está relacionada ao grau de agitação das moléculas. Assim, o aumento da temperatura faz com que as moléculas se afastem umas das outras, provocando um aumento no volume ocupado pelas moléculas para uma mesma massa. Já o aumento da densidade com o aumento da concentração de sacarose na solução deve-se à substituição mássica parcial da água por sacarose; nesta substituição, a sacarose apresenta uma contribuição mais positiva para a densidade da solução do que a água, pois a densidade da sacarose pura ($\rho_{\text{sacarose}} = 1,588 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) é superior à da água pura ($\rho_{\text{água}} = 1,00 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) (PERRY; CHILTON, 1986).

Tabela 3 - Densidade ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) de soluções de sacarose em concentrações de 10 a 60% e em temperatura de 0 a 90°C.

| T (°C) | Concentração (%) ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$) | | | | | |
|--------|---|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| 0 | 1040,16 ± 5,53 ^a | 1068,29 ± 5,89 ^a | 1097,17 ± 6,61 ^a | 1127,15 ± 6,79 ^a | 1158,06 ± 7,55 ^a | 1190,28 ± 5,33 ^{ab} |
| 5 | 1040,37 ± 1,35 ^a | 1068,97 ± 3,72 ^a | 1096,50 ± 5,22 ^a | 1127,24 ± 0,82 ^a | 1157,80 ± 5,30 ^a | 1191,03 ± 2,04 ^a |
| 10 | 1040,04 ± 1,85 ^a | 1067,10 ± 4,38 ^a | 1096,47 ± 2,33 ^a | 1126,67 ± 2,40 ^a | 1158,17 ± 1,39 ^a | 1190,69 ± 2,20 ^{ab} |
| 15 | 1039,16 ± 2,22 ^a | 1066,31 ± 0,89 ^a | 1095,19 ± 1,21 ^a | 1125,60 ± 2,39 ^{ab} | 1157,43 ± 1,38 ^a | 1191,08 ± 3,56 ^a |
| 20 | 1037,64 ± 0,68 ^{ab} | 1064,79 ± 1,61 ^{ab} | 1094,07 ± 3,15 ^{ab} | 1123,39 ± 5,74 ^{abc} | 1156,62 ± 1,32 ^a | 1190,06 ± 3,16 ^{abc} |
| 25 | 1035,68 ± 0,54 ^{ab} | 1062,83 ± 0,43 ^{abc} | 1092,11 ± 1,80 ^{abc} | 1122,80 ± 1,86 ^{abc} | 1155,57 ± 1,87 ^{ab} | 1190,83 ± 7,23 ^{ab} |
| 30 | 1033,44 ± 0,89 ^{abc} | 1060,97 ± 1,76 ^{abc} | 1090,11 ± 0,90 ^{abcd} | 1120,58 ± 4,24 ^{abcd} | 1153,73 ± 1,99 ^{abc} | 1188,68 ± 0,69 ^{abc} |
| 35 | 1030,05 ± 3,92 ^{abcd} | 1057,83 ± 3,34 ^{bcd} | 1087,42 ± 3,43 ^{abcd} | 1118,62 ± 5,63 ^{abcd} | 1152,33 ± 2,45 ^{abc} | 1188,39 ± 5,46 ^{abc} |
| 40 | 1027,59 ± 3,30 ^{bcd} | 1056,32 ± 4,56 ^{cde} | 1085,12 ± 3,43 ^{bcd} | 1117,54 ± 0,81 ^{abcde} | 1151,20 ± 1,91 ^{abcd} | 1185,74 ± 3,61 ^{abcd} |
| 45 | 1023,26 ± 2,53 ^{cde} | 1052,41 ± 1,14 ^{def} | 1083,23 ± 0,82 ^{cdef} | 1114,96 ± 2,49 ^{bcdef} | 1149,73 ± 3,51 ^{abcd} | 1185,32 ± 7,37 ^{abcd} |
| 50 | 1019,88 ± 3,60 ^{def} | 1049,60 ± 3,79 ^{ef} | 1080,65 ± 3,11 ^{defg} | 1112,32 ± 6,86 ^{cdefg} | 1147,20 ± 0,11 ^{bcde} | 1183,60 ± 5,67 ^{abcde} |
| 55 | 1013,58 ± 9,44 ^{efg} | 1045,66 ± 0,35 ^{fg} | 1077,53 ± 0,20 ^{efg} | 1110,69 ± 2,35 ^{defg} | 1145,12 ± 1,35 ^{cdef} | 1181,35 ± 4,20 ^{abcde} |
| 60 | 1010,09 ± 0,54 ^{fg} | 1041,34 ± 2,10 ^{gh} | 1073,59 ± 5,11 ^{fgh} | 1107,29 ± 5,62 ^{efgh} | 1142,70 ± 0,11 ^{defg} | 1177,40 ± 6,24 ^{bcdef} |
| 65 | 1004,84 ± 3,22 ^{gh} | 1037,47 ± 0,1 ^{hi} | 1071,20 ± 1,26 ^{gh} | 1105,32 ± 0,55 ^{fghi} | 1140,47 ± 3,66 ^{efgh} | 1176,50 ± 5,27 ^{cdefg} |
| 70 | 998,77 ± 0,82 ^{hi} | 1032,93 ± 0,08 ^{ij} | 1067,55 ± 0,78 ^{hi} | 1102,47 ± 1,09 ^{ghij} | 1137,57 ± 0,82 ^{fgh} | 1173,18 ± 1,66 ^{defg} |
| 75 | 992,51 ± 0,91 ^{ij} | 1028,29 ± 1,41 ^{jk} | 1063,98 ± 1,94 ^{hij} | 1099,49 ± 2,05 ^{hijk} | 1134,76 ± 1,21 ^{ghi} | 1170,20 ± 1,85 ^{efgh} |
| 80 | 985,68 ± 0,58 ^{jk} | 1022,96 ± 0,09 ^{kl} | 1059,47 ± 1,54 ^{ijk} | 1095,68 ± 1,43 ^{ijk} | 1131,76 ± 1,55 ^{hij} | 1165,73 ± 5,82 ^{fhg} |
| 85 | 978,99 ± 5,03 ^{kl} | 1017,62 ± 0,98 ^{lm} | 1056,13 ± 5,42 ^{jk} | 1092,57 ± 1,09 ^k | 1128,32 ± 0,10 ^j | 1163,20 ± 1,12 ^{gh} |
| 90 | 970,77 ± 0,09 ^l | 1011,66 ± 0,62 ^m | 1051,23 ± 1,05 ^k | 1089,05 ± 1,61 ^k | 1125,48 ± 4,29 ^j | 1159,42 ± 0,98 ^h |

*Média ± desvio padrão

*Letras diferentes em uma mesma coluna indicam diferença significativa entre as amostras segundo teste de Tukey ($p \leq 0,05$)

Tabela 4 - Densidade ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) de soluções de sacarose em concentrações de 10 a 60% e em temperatura de 0 a 90°C.

| Temperatura (°C) | Concentração (%) ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$) | | | | | |
|------------------|---|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| 0 | 1040,16 ^a | 1068,29 ^b | 1097,17 ^c | 1127,15 ^d | 1158,06 ^e | 1190,28 ^f |
| 5 | 1040,37 ^a | 1068,97 ^b | 1096,50 ^c | 1127,24 ^d | 1157,80 ^e | 1191,03 ^f |
| 10 | 1040,04 ^a | 1067,10 ^b | 1096,47 ^c | 1126,67 ^d | 1158,17 ^e | 1190,69 ^f |
| 15 | 1039,16 ^a | 1066,31 ^b | 1095,19 ^c | 1125,60 ^d | 1157,43 ^e | 1191,08 ^f |
| 20 | 1037,64 ^a | 1064,79 ^b | 1094,07 ^c | 1123,39 ^d | 1156,62 ^e | 1190,06 ^f |
| 25 | 1035,68 ^a | 1062,83 ^b | 1092,11 ^c | 1122,80 ^d | 1155,57 ^e | 1190,83 ^f |
| 30 | 1033,44 ^a | 1060,97 ^b | 1090,11 ^c | 1120,58 ^d | 1153,73 ^e | 1188,68 ^f |
| 35 | 1030,05 ^a | 1057,83 ^b | 1087,42 ^c | 1118,62 ^d | 1152,33 ^e | 1188,39 ^f |
| 40 | 1027,59 ^a | 1056,32 ^b | 1085,12 ^c | 1117,54 ^d | 1151,20 ^e | 1185,74 ^f |
| 45 | 1023,26 ^a | 1052,41 ^b | 1083,23 ^c | 1114,96 ^d | 1149,73 ^e | 1185,32 ^f |
| 50 | 1019,88 ^a | 1049,60 ^b | 1080,65 ^c | 1112,32 ^d | 1147,20 ^e | 1183,60 ^f |
| 55 | 1013,58 ^a | 1045,66 ^b | 1077,53 ^c | 1110,69 ^d | 1145,12 ^e | 1181,35 ^f |
| 60 | 1010,09 ^a | 1041,34 ^b | 1073,59 ^c | 1107,29 ^d | 1142,70 ^e | 1177,40 ^f |
| 65 | 1004,84 ^a | 1037,47 ^b | 1071,20 ^c | 1105,32 ^d | 1140,47 ^e | 1176,50 ^f |
| 70 | 998,77 ^a | 1032,93 ^b | 1067,55 ^c | 1102,47 ^d | 1137,57 ^e | 1173,18 ^f |
| 75 | 992,51 ^a | 1028,29 ^b | 1063,98 ^c | 1099,49 ^d | 1134,76 ^e | 1170,20 ^f |
| 80 | 985,68 ^a | 1022,96 ^b | 1059,47 ^c | 1095,68 ^d | 1131,76 ^e | 1165,73 ^f |
| 85 | 978,99 ^a | 1017,62 ^b | 1056,13 ^c | 1092,57 ^d | 1128,32 ^e | 1163,20 ^f |
| 90 | 970,77 ^a | 1011,66 ^b | 1051,23 ^c | 1089,05 ^d | 1125,48 ^e | 1159,42 ^f |

*Média \pm desvio padrão

*Letras diferentes em uma mesma coluna indicam diferença significativa entre as amostras segundo teste de Tukey ($p \leq 0,05$)

5.1.2 Calor específico

As análises de calor específico para as soluções de sacarose foram realizadas a partir da técnica de calorimetria diferencial de varredura. Esta técnica vem sendo utilizada em diversas pesquisas (vide POLACHINI et al., 2017; CASTILHOS et al., 2017; CASTILHOS et al., 2018; CARVALHO, 2014) por apresentar grande precisão na determinação desta propriedade.

Os parâmetros estabelecidos para a determinação do calor específico do presente estudo foram concentrações a 10%, 20%, 30%, 40%, 50% e 60% ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$) na faixa de temperatura de 0°C a 90°C, em intervalos de 5°C. Os valores do calor

específico variaram entre 2,89 e 4,11 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$ e podem ser encontrados na Tabela 5.

Os dados experimentais foram submetidos às análises estatísticas: análise de variância (ANOVA) e teste de Tukey. Nos dois testes, foram levados em consideração dois tipos de análises: considerando-se as concentrações constantes (Tabela 5) e considerando-se as temperaturas constantes (Tabela 6).

Nas duas formas de análise, ambos os resultados da ANOVA foram de $p \leq 0,0001$, demonstrando que as amostras apresentam diferença significativa entre si. No teste de Tukey, houve grande quantidade de médias estatisticamente diferentes nos dois casos de análises dos dados. Portanto, pode-se afirmar que a temperatura e a concentração de sólidos solúveis influenciam no calor específico das soluções de sacarose.

Com base no comportamento dos dados experimentais (Tabela 5), é possível verificar que os dados do calor específico apresentaram um comportamento inverso ao da densidade, ou seja, o calor específico diminui com o aumento da concentração de sólidos. Com relação à temperatura, o calor específico aumenta ligeiramente com a elevação da temperatura.

As mesmas tendências de comportamento da solução de sacarose foram observadas para o suco de uva tipo Cabernet Sauvignon (CASTILHOS et al., 2017) e Merlot (CASTILHOS et al., 2018), suco de cajá (TADINI et al., 2005), purê de manga (GUNDURÃO et al., 2011), extrato de carne (POLACHINI et al., 2017) e polpa de pequi (SOUZA et al., 2016).

Dados de calor específico de soluções de sacarose são raramente encontrados na literatura, mesmo que em condições restritas de temperatura e concentração. Logo, é pertinente fazer uma comparação dos dados com outros tipos de fluidos alimentícios, embora alguns fatores possam interferir nos resultados, tais como a diferença da composição de cada produto e a metodologia aplicada. Dessa forma, é válido ressaltar a importância em se determinar o calor específico de soluções de sacarose, pois são dados fundamentais para o desenvolvimento de processos de troca de calor como, por exemplo, a pasteurização, a esterilização, a concentração etc.

Tabela 5 - Calor específico (kJ·kg⁻¹·°C⁻¹) de soluções de sacarose em concentrações de 10 a 60% e em temperatura de 0 a 90°C.

| T (°C) | Concentração (%) (m·m ⁻¹) | | | | | |
|--------|---------------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| 0 | 3,88 ± 0,04 ^h | 3,68±0,02 ^e | 3,52±0,00 ^f | 3,35±0,04 ⁱ | 3,13±0,01 ⁱ | 2,89±0,01 ^l |
| 5 | 3,92 ± 0,01 ^{gh} | 3,71±0,04 ^{de} | 3,56±0,05 ^{ef} | 3,39±0,04 ^{hi} | 3,12±0,03 ⁱ | 2,91±0,02 ^{kl} |
| 10 | 3,94 ± 0,03 ^{gh} | 3,72±0,07 ^{bcde} | 3,57±0,04 ^{def} | 3,39±0,05 ^{hi} | 3,16±0,03 ^{hi} | 2,93±0,03 ^{kl} |
| 15 | 3,96 ± 0,05 ^{fgh} | 3,71±0,04 ^{cde} | 3,58±0,02 ^{def} | 3,40±0,04 ^{ghi} | 3,18±0,02 ^{ghi} | 2,93±0,03 ^{kl} |
| 20 | 3,97 ± 0,03 ^{efgh} | 3,72±0,03 ^{cde} | 3,59±0,04 ^{def} | 3,42±0,01 ^{efghi} | 3,19±0,03 ^{fghi} | 2,95±0,02 ^{ijkl} |
| 25 | 3,99 ± 0,05 ^{cdefg} | 3,76±0,05 ^{abcde} | 3,58±0,04 ^{cdef} | 3,42±0,04 ^{efghi} | 3,19±0,02 ^{fghi} | 2,96±0,01 ^{ijkl} |
| 30 | 4,00± 0,01 ^{bcdefg} | 3,77±0,04 ^{abcde} | 3,61±0,01 ^{bcdef} | 3,44±0,03 ^{defghi} | 3,21±0,01 ^{efghi} | 2,98±0,03 ^{ghij} |
| 35 | 3,98 ± 0,01 ^{defgh} | 3,78±0,01 ^{abcde} | 3,61±0,01 ^{bcdef} | 3,41±0,01 ^{fghi} | 3,20±0,08 ^{fghi} | 2,97±0,01 ^{ijk} |
| 40 | 4,00 ± 0,02 ^{bcdefg} | 3,76±0,01 ^{abcde} | 3,61±0,04 ^{bcdef} | 3,44±0,04 ^{defghi} | 3,22±0,06 ^{efghi} | 2,99±0,04 ^{ghij} |
| 45 | 4,01 ± 0,05 ^{bcdefg} | 3,78±0,04 ^{abcde} | 3,61±0,01 ^{bcdef} | 3,44±0,05 ^{cdeefghi} | 3,24±0,01 ^{defgh} | 3,02±0,00 ^{fghi} |
| 50 | 4,02 ± 0,06 ^{abcdefg} | 3,79±0,04 ^{abcde} | 3,63±0,03 ^{abcde} | 3,46±0,04 ^{bcdefgh} | 3,25±0,06 ^{defgh} | 3,05±0,01 ^{efgh} |
| 55 | 4,05 ± 0,02 ^{abcdef} | 3,81±0,05 ^{abcd} | 3,64±0,05 ^{abcde} | 3,46±0,01 ^{bcdefgh} | 3,27±0,01 ^{cdefg} | 3,06±0,03 ^{efg} |
| 60 | 4,05 ± 0,05 ^{abcdef} | 3,81±0,03 ^{abcd} | 3,65±0,02 ^{abcd} | 3,49±0,02 ^{abcdefg} | 3,29±0,04 ^{bcdef} | 3,09±0,01 ^{def} |
| 65 | 4,08 ± 0,01 ^{abcd} | 3,83±0,04 ^{abcd} | 3,66±0,01 ^{abcd} | 3,51±0,05 ^{abcdef} | 3,31±0,01 ^{abcde} | 3,12±0,01 ^{cde} |
| 70 | 4,08 ± 0,02 ^{abc} | 3,80±0,05 ^{abcde} | 3,67±0,01 ^{abc} | 3,51±0,04 ^{abcde} | 3,33±0,01 ^{abcd} | 3,14±0,01 ^{cd} |
| 75 | 4,09 ± 0,01 ^{ab} | 3,83±0,03 ^{abc} | 3,68±0,00 ^{ab} | 3,54±0,01 ^{abcd} | 3,33±0,01 ^{abcd} | 3,16±0,04 ^{bcd} |
| 80 | 4,07 ± 0,02 ^{abcde} | 3,83±0,04 ^{abc} | 3,67±0,03 ^{abc} | 3,54±0,02 ^{abc} | 3,36±0,01 ^{abc} | 3,19±0,02 ^{abc} |
| 85 | 4,09 ± 0,05 ^{ab} | 3,84±0,01 ^{ab} | 3,70±0,01 ^{ab} | 3,54±0,02 ^{ab} | 3,37±0,01 ^{ab} | 3,22±0,04 ^{ab} |
| 90 | 4,11 ± 0,02 ^a | 3,85±0,01 ^a | 3,71±0,07 ^a | 3,57±0,01 ^a | 3,40±0,02 ^a | 3,25±0,03 ^a |

*Média ± desvio padrão±

*Letras diferentes em uma mesma coluna indicam diferença significativa entre as amostras segundo teste de Tukey (p ≤ 0,05)

Tabela 6 - Calor específico ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{°C}^{-1}$) de soluções de sacarose em concentrações de 10 a 60% e em temperatura de 1 a 90°C.

| Temperatura (°C) | Concentração (%) ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$) | | | | | |
|------------------|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | 10 | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 |
| 0 | 3,88 ^a | 3,68 ^b | 3,52 ^c | 3,35 ^d | 3,13 ^e | 2,89 ^f |
| 5 | 3,92 ^a | 3,71 ^b | 3,56 ^c | 3,39 ^d | 3,12 ^e | 2,91 ^f |
| 10 | 3,94 ^a | 3,72 ^b | 3,57 ^c | 3,39 ^d | 3,16 ^e | 2,93 ^f |
| 15 | 3,96 ^a | 3,71 ^e | 3,58 ^e | 3,40 ^b | 3,18 ^c | 2,93 ^d |
| 20 | 3,97 ^a | 3,72 ^b | 3,59 ^c | 3,42 ^d | 3,19 ^e | 2,95 ^f |
| 25 | 3,99 ^a | 3,76 ^b | 3,58 ^c | 3,42 ^d | 3,19 ^e | 2,96 ^f |
| 30 | 4,00 ^a | 3,77 ^b | 3,61 ^c | 3,44 ^d | 3,21 ^e | 2,98 ^f |
| 35 | 3,98 ^a | 3,78 ^b | 3,61 ^c | 3,41 ^d | 3,20 ^e | 2,97 ^f |
| 40 | 4,00 ^a | 3,76 ^b | 3,61 ^c | 3,44 ^d | 3,22 ^e | 2,99 ^f |
| 45 | 4,01 ^a | 3,78 ^b | 3,61 ^c | 3,44 ^d | 3,24 ^e | 3,02 ^f |
| 50 | 4,02 ^a | 3,79 ^b | 3,63 ^c | 3,46 ^d | 3,25 ^e | 3,05 ^f |
| 55 | 4,05 ^a | 3,81 ^b | 3,64 ^c | 3,46 ^d | 3,27 ^e | 3,06 ^f |
| 60 | 4,05 ^a | 3,81 ^b | 3,65 ^c | 3,49 ^d | 3,29 ^e | 3,09 ^f |
| 65 | 4,08 ^a | 3,83 ^b | 3,66 ^c | 3,51 ^d | 3,31 ^e | 3,12 ^f |
| 70 | 4,08 ^a | 3,80 ^b | 3,67 ^c | 3,51 ^d | 3,33 ^e | 3,14 ^f |
| 75 | 4,09 ^a | 3,83 ^b | 3,68 ^c | 3,54 ^d | 3,33 ^e | 3,16 ^f |
| 80 | 4,07 ^a | 3,83 ^b | 3,67 ^c | 3,54 ^d | 3,36 ^e | 3,19 ^f |
| 85 | 4,09 ^a | 3,84 ^b | 3,70 ^c | 3,54 ^d | 3,37 ^e | 3,22 ^f |
| 90 | 4,11 ^a | 3,85 ^b | 3,71 ^c | 3,57 ^d | 3,40 ^e | 3,25 ^f |

*Letras diferentes em uma mesma coluna indicam diferença significativa entre as amostras segundo teste de Tukey ($p \leq 0,05$)

5.1.3 – Modelagem matemática das propriedades termofísicas da solução de sacarose

A Tabela 7 exibe os resultados das constantes, coeficiente de determinação (R^2) e o erro médio relativo (EMR) para todos os modelos (Tabela 2) de ambas propriedades.

De forma geral, todos os modelos estudados apresentaram boa representatividade, com coeficientes de determinação variando entre 0,9279 e 0,9915 para a densidade e entre 0,9112 e 0,9913 para o calor específico. De forma análoga,

o erro médio relativo máximo para a densidade foi de 1,25 % e de 2,47 % para o calor específico. Porém, comparando os modelos (Equação 5-9), o modelo da Equação 6 que apresenta uma dependência linear da variável estudada com relação à concentração de sólidos frente a uma dependência quadrática da mesma variável pela temperatura, representou o melhor modelo para o cálculo da densidade ($R^2 = 0,9915$ e $EMR = 0,37\%$) e do calor específico ($R^2 = 0,9913$ e $EMR = 0,71\%$).

Existe uma ampla gama de modelos que podem ser aplicados para determinar as propriedades termofísicas. Um deles é o modelo de Arrhenius, considerado um modelo clássico na área de fenômenos de transporte e operações unitárias, visto que uma de suas constantes é a energia de ativação que tem grande importância e aplicabilidade nos processos industriais. Tal energia de ativação representa a energia necessária para que as moléculas das soluções se interajam resultando assim em uma reação química. No presente trabalho, as Equações 7 e 8 foram semelhantes à equação de Arrhenius, assim como Telis et al. (2007) e Lazaridou et al. (2004) que também aplicaram um modelo semelhante à equação de Arrhenius para a determinação da viscosidade de soluções de carboidratos.

De acordo com alguns modelos apresentados neste trabalho, muitos autores relatam dependência linear do calor específico com a concentração de sólidos nos estudos de diferentes produtos alimentícios, como o suco clarificado de maçã (CONSTENLA et al., 1889), o extrato de carne (POLACHINI et al., 2017) e o suco de cajá (ASSIS et al., 2006).

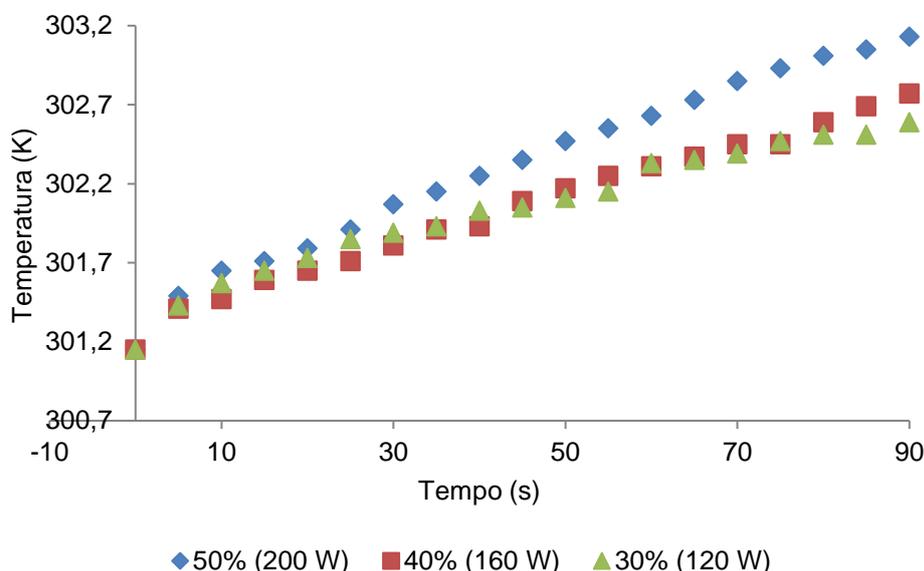
Tabela 7 - Parâmetros dos modelos estudados para a determinação da densidade e calor específico.

| Equações | Densidade (ρ) | | | Calor específico (C_p) | | |
|----------|---|----------------|---------|---|----------------|---------|
| | Parâmetros Matemáticos | R ² | EMR (%) | Parâmetros Matemáticos | R ² | EMR (%) |
| 5 | A= 1145,69 B= 3,28325 C= -0,512512 | 0,9905 | 0,40 | A=3,41161 B= -1,8888·10 ⁻² C= 2,44502·10 ⁻³ | 0,9112 | 0,72 |
| 6 | A= 1065,43 B= 3,28325 C= - 8,11915·10 ⁻⁴ | 0,9915 | 0,37 | A=3,79768 B=-1,8888·10 ⁻² C=3,84253·10 ⁻⁶ | 0,9913 | 0,71 |
| 7 | A= 857,461 B= 369,771 C= 2,98995·10 ⁻³ | 0,9863 | 0,47 | A=5,23323 B= -555,767 C= -5,33702·10 ⁻³ | 0,9868 | 0,87 |
| 8 | A= 716,579 B= 369,815 C= 8,35931·10 ⁻² | 0,9279 | 1,25 | A= 6,99227 B= -559,394 C= -0,139629 | 0,9152 | 2,47 |
| 9 | A=2251,94 B= 2,98988·10 ⁻³ C= -0,143213 | 0,9877 | 0,45 | A= 1,24333 B= -5,3369·10 ⁻³ C=0,212813 | 0,9871 | 0,87 |

5.2 Determinação da potência real acústica

A Figura 14 representa o comportamento da temperatura durante 90 segundos de aplicação do ultrassom em três diferentes potências nominais, 30% (120 W), 40% (160 W) e 50% (200 W). O aumento da temperatura correspondeu à faixa de temperatura que partiu de 301,2 K e atingiu aproximadamente 303 K, apresentando um comportamento linear ($R^2 > 0,960$). Os maiores aumentos de temperaturas prevaleceram nas potências nominais mais altas, fato que foi atribuído ao fenômeno de cavitação, que ocorre durante a propagação das ondas ultrassônicas.

Figura 14- Variação de temperatura durante a aplicação do ultrassom na solução de sacarose.



Com base nos dados de temperatura em função do tempo, o coeficiente angular foi determinado por meio da regressão linear descrita pela Equação 17.

$$T = \frac{dT}{dt} \cdot t + c \quad (17)$$

Na Tabela 8 encontram-se as taxas de aquecimento $dT \cdot dt^{-1}$ que foram obtidas por meio dos coeficientes angulares das regressões lineares, com $R^2 > 0,960$. Para o cálculo dos parâmetros acústicos, foi utilizada a temperatura média de aquecimento no intervalo de 90 segundos de aplicação do ultrassom, tendo como temperatura máxima 303,13 K e mínima 301,15 K, resultando em uma temperatura média de

aproximadamente 302,14 K. A partir dessa temperatura média de aquecimento, foram determinadas a densidade e o calor específico da solução osmótica de sacarose na concentração de 30% ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$) de acordo com a Equação 6, a qual apresentou os melhores ajustes. A densidade resultou no valor de $1089,81 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e um calor específico de $3581,82 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.

Na Tabela 8, encontram-se os valores de potência real acústica (P_R) e de intensidade acústica (I). Ambos os parâmetros aumentaram com o aumento da potência nominal aplicada, assim como o número de colisões entre as bolhas, que aumentou devido ao índice mais elevado de cavitação; essa por sua vez libera energia na forma de calor, levando à elevação da temperatura e da pressão (CÁRCEL et al., 2012).

Tabela 8 – Potência real acústica da solução de sacarose a 30% ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$) tratada com potência nominal de 30% (120 W), 40% (160 W) e 50% (200 W).

| P_N (W) | V (mL) | ρ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) | C_p ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$) | $dT\cdot dt^{-1}$ ($\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$) | P_R (W) | I ($\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$) |
|-----------|--------|--|---|--|-----------|---------------------------------------|
| 120 | 800 | 1089,81 | 3581,82 | 0,014 | 43,72 | 11,50 |
| 160 | 800 | 1089,81 | 3581,82 | 0,016 | 49,96 | 13,14 |
| 200 | 800 | 1089,81 | 3581,82 | 0,020 | 62,46 | 16,43 |

Fonte: Autor.

Os valores das potências reais acústicas obtidas, a saber: 43,72, 49,96 e 62,46 W, representam 36,4%, 31,23% e 31,23% da potência nominal fornecida pelo equipamento. Dessa forma, pode-se observar que nem toda a potência nominal fornecida pelo equipamento é convertida em energia acústica, ressaltando-se a necessidade de se determinar a potência real acústica dos meios utilizados nos processos alimentícios assistidos por ultrassom.

Cárcel et al. (2007a) utilizaram a mesma metodologia para a determinação da potência real acústica absorvida pelo meio, seguido pela determinação do fator de conversão. O fator de conversão foi de 28,2 % para a potência nominal de 90 W em uma solução saturada de cloreto de sódio. Assim, este dado é considerado próximo ao fator de conversão do presente trabalho para a potência nominal de 120 W.

Atualmente este método está sendo bastante utilizado por vários pesquisadores entre eles, Polachini, Carvalho e Telis- Romero (2017), Pingret et al., (2012) e McDonnell et al., (2014).

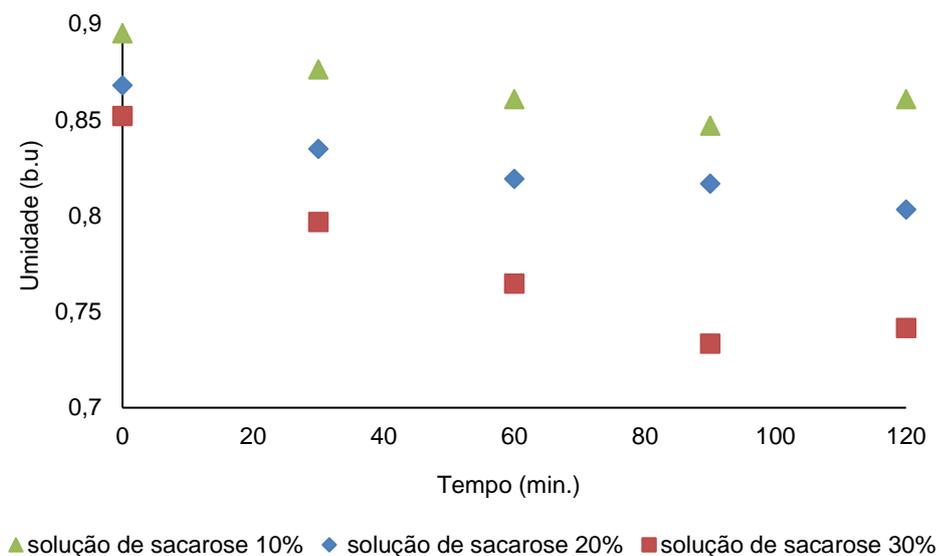
5.3 Desidratação osmótica

5.3.1 Testes preliminares

A Figura 15 mostra a influência da concentração da solução osmótica sobre o processo de desidratação no qual as amostras que estavam na solução com concentração de 30% perderam mais umidade durante o experimento do que as amostras que estavam na solução com concentração de 10% e 20%. Essa diferença se deve à existência de um maior diferencial de potencial químico entre a solução osmótica mais concentrada e o alimento, favorecendo assim uma maior transferência de massa, resultando em maior perda de umidade.

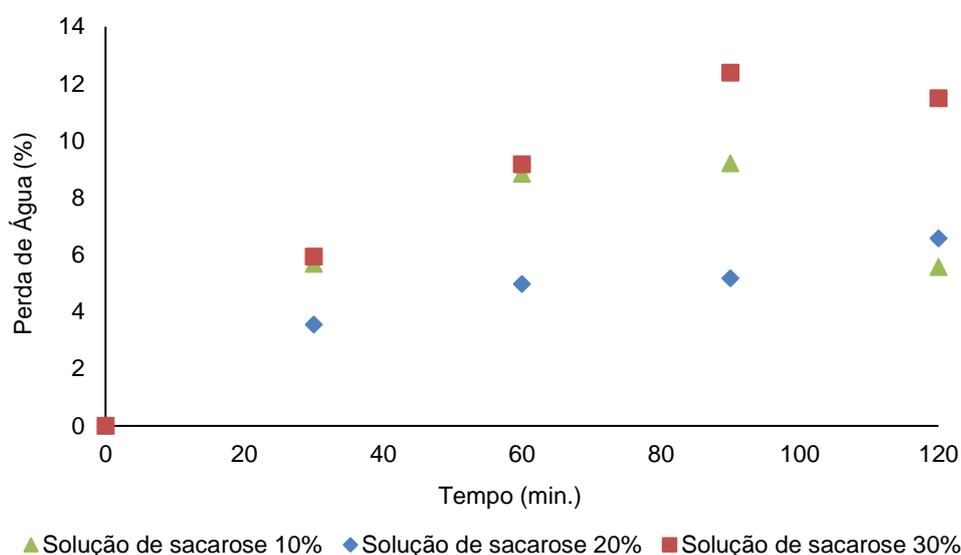
É possível notar que os menores valores de umidade prevaleceram nos últimos intervalos de tempo; esse fato se deve ao maior tempo de contato da solução osmótica com o alimento, desidratando-o.

Figura 15 - Cinética da perda de umidade na desidratação osmótica com $P_N = 320$ W e $T = 28^\circ\text{C}$.



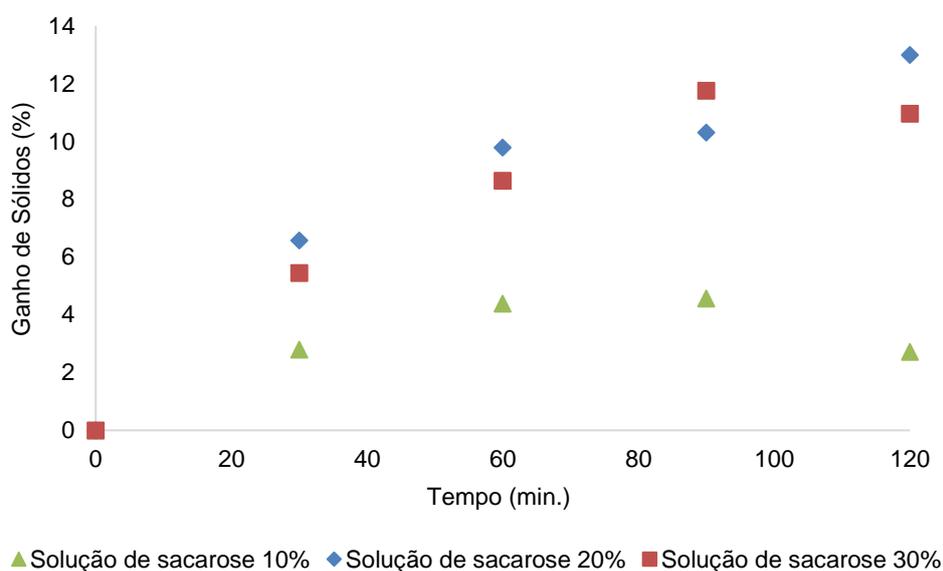
A Figura 16 representa a perda de água na desidratação osmótica do gengibre com soluções de sacarose nas concentrações de 10%, 20 % e 30% ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$). As perdas de água aconteceram de forma gradativa com o passar do tempo durante a desidratação; no entanto, as maiores perdas de água ocorreram no intervalo de 90 minutos para as soluções de 10% e 30% e no intervalo de 120 minutos para a solução de 20%. O experimento que utilizou a solução de 30%, ou seja, a de maior concentração gerou maiores perdas de água.

Figura 16 - Cinética da perda de água na desidratação osmótica com $P_N= 320 \text{ W}$ e $T= 28^\circ\text{C}$.



A Figura 17 apresenta a cinética do ganho de sólidos durante a desidratação osmótica em que maiores ganhos de sólidos foram verificados nos experimentos com as soluções de 20% e 30%, consideradas soluções de maior concentração, quando comparadas com a solução de 10%. Este fato é devido a maior quantidade de soluto na solução favorecendo a um maior diferencial de potencial químico entre a solução osmótica e o gengibre, conseqüentemente maior ganho de sólidos durante a transferência de massa.

Figura 17 - Cinética do ganho de sólidos na desidratação osmótica com $P_N= 320 \text{ W}$ e $T= 28^\circ\text{C}$.



O mesmo comportamento dos dados de perda de umidade, perda de água e ganho de sólidos foram relatados por Abraão et al. (2013) que apresentaram índices maiores tanto para perda de umidade quanto para ganho de sólidos nas soluções osmóticas de maiores concentrações de sacarose durante a desidratação osmótica de abóboras. Eren e Kaymak-Ertekin (2007), por sua vez, desidrataram batatas com soluções osmóticas de sacarose e cloreto de sódio; como resultado, os experimentos com solução de maior concentração de sacarose obtiveram melhores índices de perda de água e de ganho de sólidos.

5.3.2 Experimentos definitivos de desidratação osmótica

A Tabela 9 e a Figura 18 apresentam os resultados do teor de umidade em função do tempo e da potência nominal durante os processos de desidratação osmótica do gengibre com soluções de 30% ($m \cdot m^{-1}$) de sacarose.

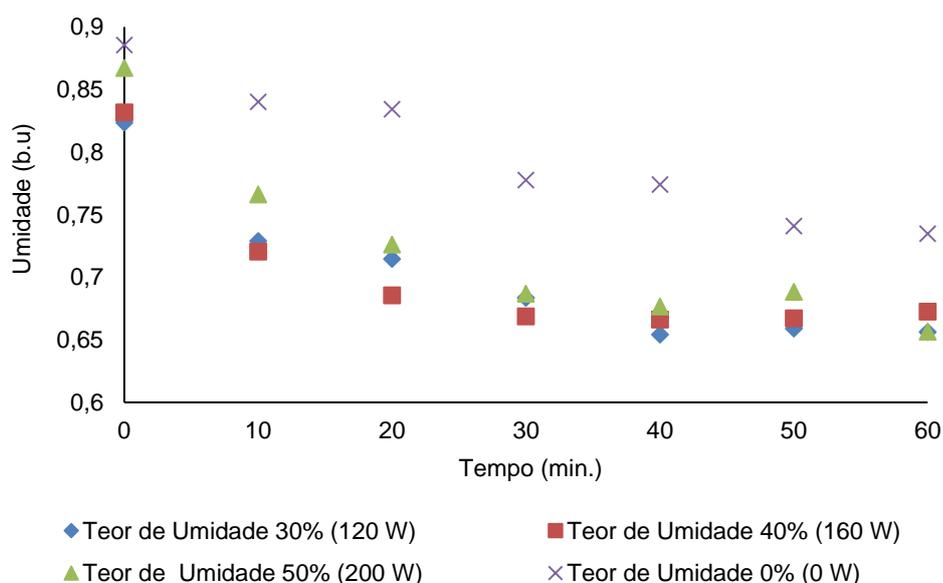
Sabe-se que a diferença de potenciais químicos entre a solução osmótica e o alimento é decrescente com o passar do tempo, até que o equilíbrio seja alcançado. Com isso, no início do processo de desidratação osmótica, haverá uma transferência de massas mais intensa. Tal observação se dá nos primeiros 30 minutos do processo de desidratação osmótica, quando maiores variações do teor de umidade podem ser notadas. Cárcel et al. (2007b) apresentaram o mesmo comportamento durante o estudo de desidratação osmótica de maçã com a aplicação de ultrassom em uma solução de 30% de sacarose a uma temperatura de 30 °C.

Durante os 60 minutos de desidratação osmótica, os índices de umidade variaram de 0,8235 a 0,6563, de 0,8318 a 0,6725 e de 0,8671 a 0,6566 para as potências nominais de 120 W, 160 W e 200 W e de 0,8857 a 0,7349 para a potência nominal de 0 W (sem a aplicação de ultrassom). Isso demonstra que a aplicação de ultrassom tem influência considerável na desidratação osmótica, uma vez que as maiores umidades foram obtidas nos ensaios sem aplicação do ultrassom e essas diminuíram conforme a potência nominal aumentou. Tal comportamento de redução do teor de umidade com aplicação do ultrassom é devido à ausência de resistências externas ou zonas de estagnação ao redor do alimento.

Tabela 9- Média e desvio padrão do teor de umidade (b.u) em função do tempo durante a desidratação osmótica do gengibre em uma solução osmótica de 30% ($m \cdot m^{-1}$) a 28°C.

| Tempo (minutos) | Potências Nominais | | | |
|-----------------|--------------------|---------------|---------------|---------------|
| | 30% (120 W) | 40% (160 W) | 50% (200 W) | 0% (0 W) |
| 0 | 0,8235 ± 0,01 | 0,8318 ± 0,01 | 0,8671 ± 0,01 | 0,8857 ± 0,02 |
| 10 | 0,7290 ± 0,01 | 0,7205 ± 0,01 | 0,7662 ± 0,01 | 0,8402 ± 0,03 |
| 20 | 0,7147 ± 0,00 | 0,6857 ± 0,01 | 0,7263 ± 0,01 | 0,8344 ± 0,03 |
| 30 | 0,6834 ± 0,01 | 0,6688 ± 0,02 | 0,6868 ± 0,00 | 0,7778 ± 0,05 |
| 40 | 0,6541 ± 0,02 | 0,6661 ± 0,01 | 0,6765 ± 0,01 | 0,7741 ± 0,01 |
| 50 | 0,6592 ± 0,02 | 0,6673 ± 0,01 | 0,6885 ± 0,00 | 0,7408 ± 0,05 |
| 60 | 0,6563 ± 0,00 | 0,6725 ± 0,00 | 0,6566 ± 0,03 | 0,7349 ± 0,05 |

Figura 18 - Teor de umidade em função do tempo durante a desidratação osmótica do gengibre em uma solução osmótica de 30% ($m \cdot m^{-1}$) a 28°C.



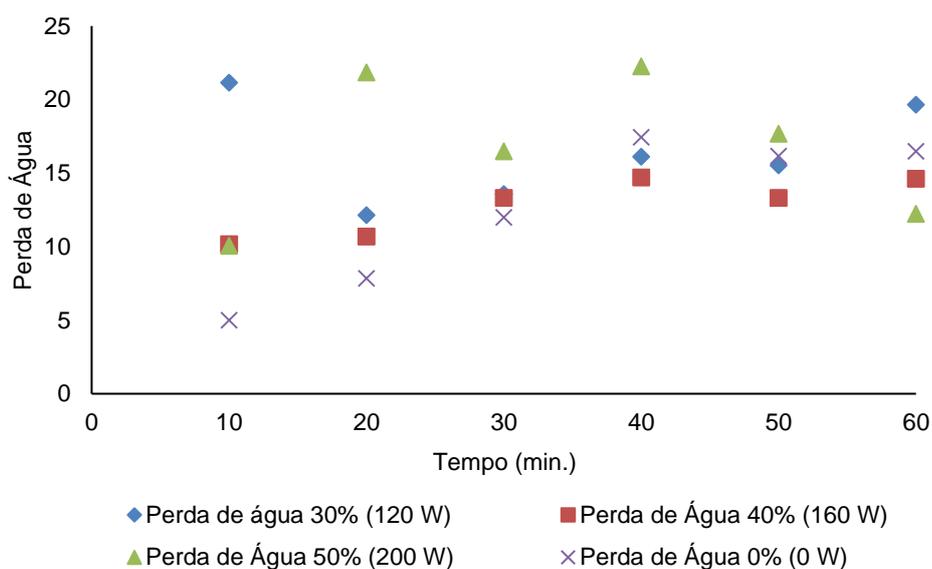
Na Tabela 10 e na Figura 19 encontram-se os dados de perda de água em função do tempo e da potência nominal durante a desidratação osmótica do gengibre em uma solução osmótica de 30% ($m \cdot m^{-1}$) de sacarose.

Tabela 10 - Perda de água durante desidratação osmótica do gengibre em solução concentrada a 30% ($m \cdot m^{-1}$) a 28°C.

| Tempo (min.) | Potência Nominal | | | |
|--------------|------------------|--------------|--------------|-------------|
| | 30% (120 W) | 40% (160 W) | 50% (200 W) | 0% (0 W) |
| 10 | 21,16 ± 15,07 | 10,16 ± 3,49 | 10,06 ± 2,65 | 5,00 ± 3,98 |

| | | | | |
|----|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 20 | 12,15 ± 3,29 | 10,69 ± 1,47 | 21,85 ± 1,48 | 7,84 ± 0,84 |
| 30 | 13,57 ± 1,03 | 13,33 ± 2,39 | 16,49 ± 1,36 | 11,99 ± 2,25 |
| 40 | 16,13 ± 0,43 | 14,71 ± 4,25 | 22,26 ± 7,04 | 17,44 ± 4,91 |
| 50 | 15,54 ± 0,68 | 13,33 ± 2,31 | 17,68 ± 3,76 | 16,16 ± 0,52 |
| 60 | 19,65 ± 0,39 | 14,61 ± 5,76 | 12,24 ± 3,22 | 16,48 ± 0,84 |

Figura 19 - Perda de água em função do tempo durante desidratação osmótica do gengibre em solução concentrada a 30% ($m \cdot m^{-1}$) a 28°C.



É possível observar a partir dos dados da Tabela 10 que as maiores perdas de água foram verificadas com a aplicação do ultrassom, exceto para a aplicação de 120 W e 160 W durante os intervalos de 40 e 50 minutos e para 160 W e 200 W no intervalo de 60 minutos. Este comportamento pode ser explicado devido à turbulência causada ao meio como efeito da aplicação do ultrassom, reduzindo a resistência externa e a camada limite de difusão (Cárcel et al., 2007b). Outros fatores que podem justificar esta maior perda de água são, primeiramente, o efeito de cavitação, que é capaz de criar microcanais na estrutura do alimento, além do “efeito esponja”, devido aos movimentos de compressão e descompressão do alimento.

As menores perdas de água foram observadas durante os primeiros trinta minutos dos experimentos sem aplicação do ultrassom; o fato pode ser justificado pelos efeitos da resistência externa, gerada devido à ausência da agitação do meio.

Este mesmo fato foi também comprovado por Garcia-Nogueira et al. (2010) quando descreveram o comportamento de perda de água durante a desidratação

osmótica de morangos em três diferentes concentrações de soluções osmóticas de sacarose (0%; 25%; 50%), três frequências de ultrassom (0 kHz, 25 kHz e 40 kHz) e quatro períodos de tempo de aplicação (10; 20; 30 e 45 minutos). Nesses experimentos, os dados de perda de água com a aplicação de ultrassom a 25 kHz foram superiores aos dados tratados sem a aplicação de ultrassom.

Farhaninejad et al. (2017) também evidenciaram esse comportamento durante os experimentos de desidratação osmótica de banana; os pesquisadores estudaram três tipos de processamento: sistema sob agitação, ultrassom indireto (banho ultrassônico) e ultrassom direto (sonda ultrassônica). Determinaram por meio desses testes que a aplicação de ultrassom direto ao meio osmótico proporcionava índices de perda de água superiores quando comparados aos resultantes de outros tipos de processamento.

Fernandes, Oliveira e Rodrigues (2008) trabalharam com a desidratação osmótica de mamão e relataram valores de 11,29 % para a perda de água durante o experimento convencional de desidratação osmótica (sem ultrassom) e de 13,42% para a aplicação da técnica combinada (ultrassom e desidratação osmótica). Ambos os experimentos tinham condições experimentais iguais, solução osmótica de 35°Brix, a 30°C e duração de 20 minutos do tratamento.

Na Figura 19 observa-se que maiores perdas de água prevaleceram nos pontos em que se utilizou a aplicação do ultrassom com a potência nominal de 50% (200 W), porém, tal comportamento não permaneceu constante. Logo, o comportamento mais irregular observado nas cinéticas foi encontrado nessas amostras, fato que pode ser justificado pela variabilidade das amostras e pelos efeitos de cavitação e “efeito esponja” ocorridos durante o uso do ultrassom com maior potência.

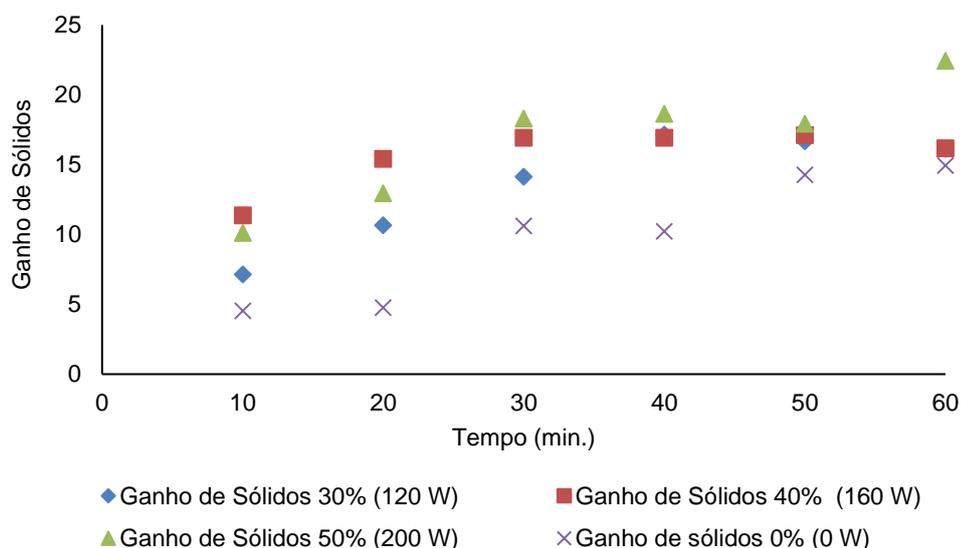
As menores potências 30% (120 W) e 40% (160 W) apresentaram resultados contínuos com intervalos sem mudanças abruptas; tal resultado pode ser explicado pela menor potência aplicada ao alimento, ou seja, uma potência considerada aceitável para a realização da desidratação osmótica, gerando perdas gradativas de água.

Por meio da Tabela 11 e da Figura 20 é possível analisar a cinética do ganho de sólidos em função do tempo e da potência nominal durante a desidratação osmótica do gengibre em uma solução osmótica de 30% ($m \cdot m^{-1}$) de sacarose.

Tabela 11 - Ganho de sólidos durante desidratação osmótica do gengibre em uma solução concentrada a 30% ($m \cdot m^{-1}$) a 28°C.

| Tempo (min.) | Potência Nominal | | | |
|--------------|------------------|--------------|--------------|--------------|
| | 30% (120 W) | 40% (160 W) | 50% (200 W) | 0% (0 W) |
| 10 | 7,13 ± 2,39 | 11,35 ± 2,11 | 10,10 ± 1,42 | 4,52 ± 4,47 |
| 20 | 10,65 ± 0,75 | 15,41 ± 0,65 | 12,93 ± 0,10 | 4,76 ± 0,77 |
| 30 | 14,12 ± 2,34 | 16,90 ± 0,38 | 18,29 ± 0,97 | 10,61 ± 2,35 |
| 40 | 17,14 ± 0,03 | 16,92 ± 2,99 | 18,62 ± 0,86 | 10,22 ± 1,42 |
| 50 | 16,65 ± 0,73 | 17,10 ± 2,03 | 17,92 ± 0,46 | 14,26 ± 2,00 |
| 60 | 16,11 ± 1,31 | 16,16 ± 1,83 | 22,42 ± 3,65 | 14,92 ± 2,95 |

Figura 20 - Ganho de sólidos em função do tempo durante desidratação osmótica do gengibre em uma solução concentrada a 30% ($m \cdot m^{-1}$) a 28°C.



A partir da análise dos dados experimentais mostrados na Tabela 11, pode-se afirmar que o ganho de sólidos foi mais elevado nos experimentos com a aplicação de ultrassom. Tal resultado também foi reportado por Farhaninejad et al. (2017) com aplicação direta do ultrassom na desidratação osmótica de banana.

As amostras que foram tratadas com potências de 40% (160 W) e 50% (200 W) tiveram um maior ganho de sólidos, possivelmente devido ao fato de o ultrassom ter causado efeito de cavitação e “efeito esponja” mais intensos, assim favorecendo a difusão do soluto no sólido.

Os experimentos com aplicação de ultrassom, não apresentaram um ganho de sólidos de forma gradativa; isto se deve aos efeitos de cavitação e “efeito esponja” verificados durante a aplicação do ultrassom.

Garcia-Nogueira et al. 2010 além de apresentarem índices mais elevados para ganho de sólidos nos experimentos de desidratação osmótica de morango com aplicação de ultrassom, também não relataram ganho de sólidos de forma gradativa. Tal comportamento é igual ao descrito pelos experimentos nesta pesquisa.

5.4 Modelagem matemática

A modelagem matemática dos dados foi realizada inicialmente com o modelo de Peleg para a determinação da umidade de equilíbrio, seguido pelo ajuste do modelo de Fick para a determinação do coeficiente de difusão da água. Esta modelagem foi realizada com os dados dos testes preliminares e com os dados dos experimentos definitivos de desidratação osmótica.

A Figura 21 representa o gráfico elaborado a partir do tratamento de dados dos testes preliminares para a determinação da umidade de equilíbrio com base no modelo de Peleg (Equação 15). A Tabela 12 apresenta os parâmetros que foram determinados após o tratamento dos dados, entre eles: K_2 , umidade de equilíbrio (X_{∞}^w) e o coeficiente de determinação (R^2).

Figura 21 - Modelo de Peleg aplicado aos dados dos testes preliminares para a determinação da umidade de equilíbrio. Legenda: (Δ) solução de sacarose 10% ($m \cdot m^{-1}$), (\circ) solução de sacarose 20% ($m \cdot m^{-1}$) e ($*$) solução de sacarose 30% ($m \cdot m^{-1}$).

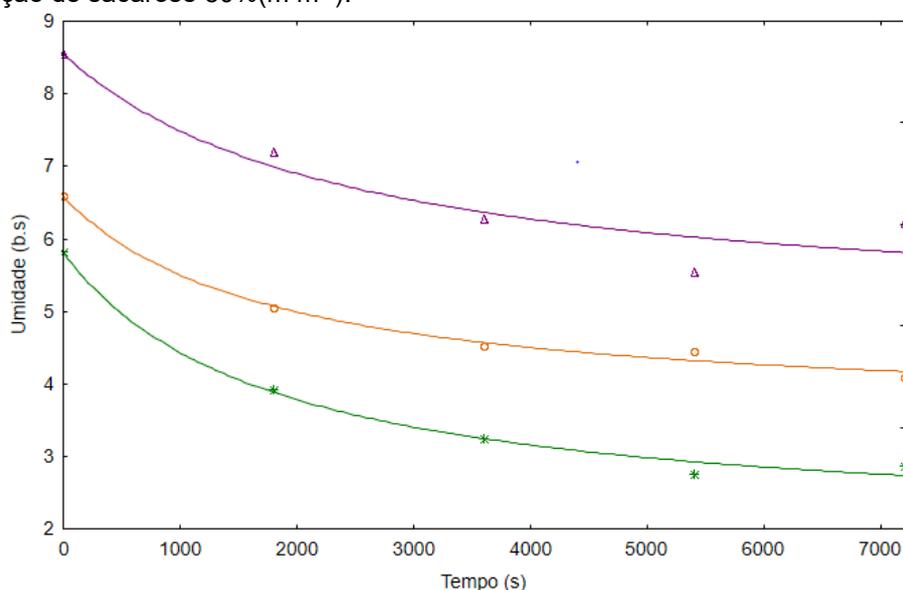


Tabela 12 -Parâmetros determinados a partir do modelo de Peleg para a determinação da umidade de equilíbrio dos testes preliminares.

| Parâmetros | Concentração (%) ($m \cdot m^{-1}$) | | |
|----------------|---------------------------------------|--------|--------|
| | 10 | 20 | 30 |
| k_2 | 0,2720 | 0,3324 | 0,2607 |
| X_{∞}^w | 4,8761 | 3,5778 | 1,9772 |
| R^2 | 0,9168 | 0,9928 | 0,9921 |

Os dados dos testes preliminares apresentaram bom ajuste ao modelo de Peleg, com coeficientes de determinação (R^2) $\geq 0,9168$. Os índices de umidade de equilíbrio foram de 4,8761, 3,5778 e 1,9772 para as soluções de 10%, 20% e 30%, respectivamente. O menor valor de umidade de equilíbrio foi obtido para a solução de maior concentração de sacarose; isso se deve à maior diferença de potencial químico da solução osmótica com o alimento, que favorece um maior poder desidratante para a solução.

As Figuras 22 e 23 representam os gráficos elaborados a partir do tratamento de dados dos experimentos definitivos de desidratação osmótica para a determinação da umidade de equilíbrio com base no modelo de Peleg (Equação 15). A Tabela 13 apresenta os parâmetros que foram determinados após o tratamento dos dados, entre eles: K_2 , ganho de sólidos de equilíbrio (X_{∞}^w) e o coeficiente de determinação (R^2).

Figura 22 - Modelo de Peleg para a determinação da umidade de equilíbrio do experimento definitivo 1. Legenda: Aplicação de ultrassom de (●) 30% (120 W), (◆) 40% (160W), (■) 50% (200 W) e (▲) 0% (0W).

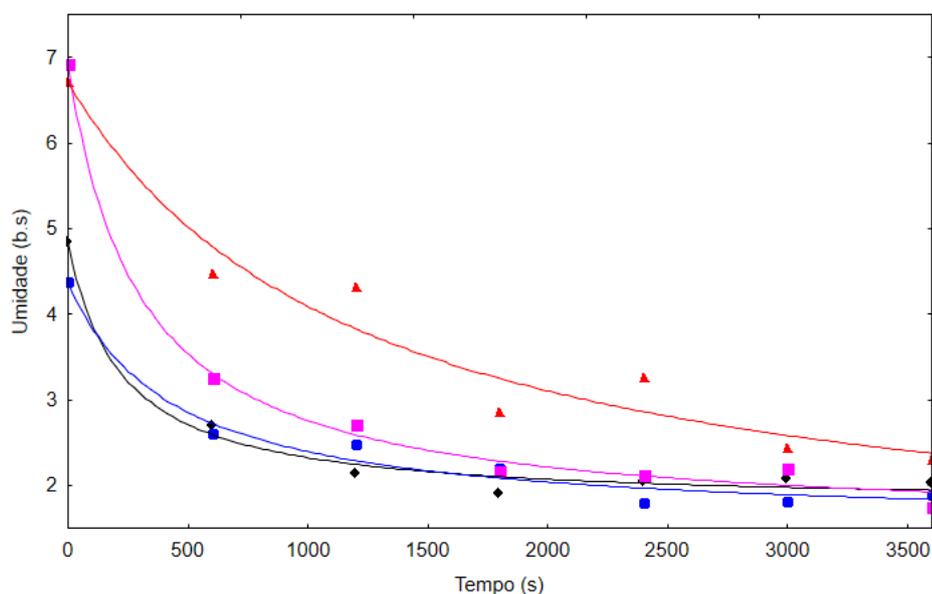


Figura 23 - Modelo de Peleg para a determinação da umidade de equilíbrio do experimento definitivo 2. Legenda: Aplicação de ultrassom de (●) 30% (120 W), (◆) 40% (160W), (■) 50% (200 W) e (▲) 0% (0W).

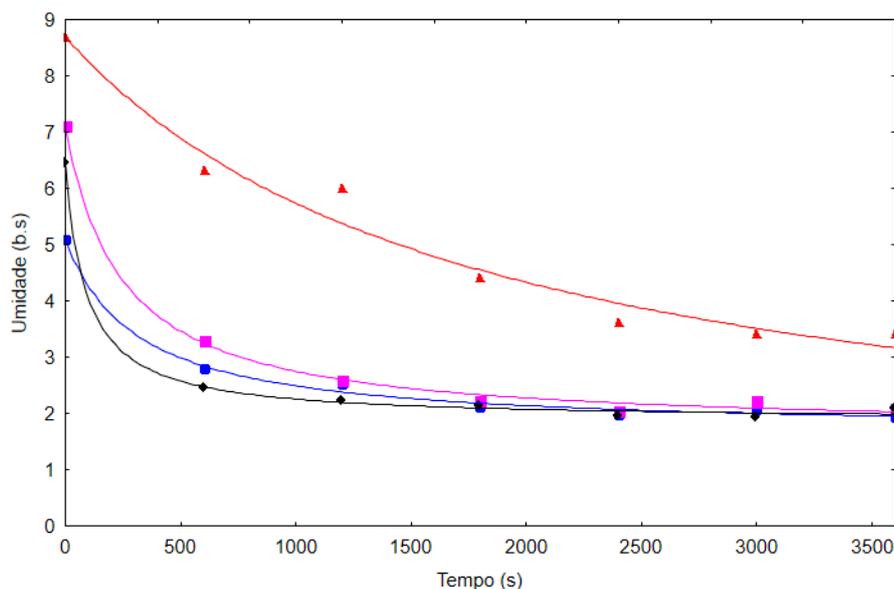


Tabela 13 - Parâmetros determinados com base no modelo de Peleg para a determinação da umidade de equilíbrio dos experimentos definitivos de desidratação osmótica.

| Potência | | Experimento1 | Experimento 2 | Média $X_{\infty}^w \pm dp$ |
|-------------|----------------|--------------|---------------|-----------------------------|
| 30% (120 W) | k_2 | 0,3519 | 0,2928 | |
| | X_{∞}^w | 1,5285 | 1,6801 | 1,6043 \pm 0,11 |
| | R^2 | 0,9786 | 0,9943 | |
| 40% (160 W) | k_2 | 0,324566 | 0,218226 | |
| | X_{∞}^w | 1,7646 | 1,8754 | 1,82 \pm 0,08 |
| | R^2 | 0,9885 | 0,9984 | |
| 50% (200 W) | k_2 | 0,184559 | 0,184595 | |
| | X_{∞}^w | 1,5091 | 1,6869 | 1,60 \pm 0,13 |
| | R^2 | 0,9947 | 0,9972 | |
| 0% (0W) | k_2 | 0,1722482 | 0,120538 | |
| | X_{∞}^w | 0,9142 | 0,3967 | 0,66 \pm 0,37 |
| | R^2 | 0,9533 | 0,9713 | |

A partir dos gráficos apresentados nas Figuras 22 e 23, pode-se verificar que os dados dos experimentos definitivos apresentaram bom ajuste ao modelo de Peleg. Tal fato foi confirmado pelos valores dos coeficientes de determinação (R^2) \geq 0,95 apresentados na Tabela 13.

Os índices de umidade de equilíbrio dos experimentos com a aplicação do ultrassom foram superiores aos dos experimentos sem a aplicação do mesmo. A justificativa para tal resultado é de que, dependendo do tempo de aplicação de ultrassom, a matéria-prima pode sofrer alteração em sua estrutura permitindo a entrada de água.

Na Tabela 14 encontram-se os coeficientes de difusão da água dos testes preliminares, em que foram determinados por meio do modelo de Fick. Os dados apresentaram bom ajuste ao modelo de Fick, com coeficientes de determinação $\geq 0,89$. Os coeficientes de difusão da água (D_{efw}) variaram entre $7,33 \cdot 10^{-11}$ e $9,50 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Tabela 14 - Determinação dos coeficientes de difusão da água para os testes preliminares de desidratação osmótica de gengibre a 28 °C e $P_N=320 \text{ W}$.

| Concentração da solução (°Brix) | D_{efw} ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$) | Coefficiente de determinação (R^2) |
|--|---|--|
| 10 | $7,33 \cdot 10^{-11}$ | 0,8994 |
| 20 | $9,33 \cdot 10^{-11}$ | 0,9829 |
| 30 | $9,50 \cdot 10^{-11}$ | 0,9794 |

De acordo com Silva et al. (2008) os coeficientes de difusão (D_{ef}) para materiais biológicos devem estar entre os valores de 10^{-11} e 10^{-9} . Isto demonstra que os coeficientes de difusão da água determinados na presente pesquisa estão entre esta faixa de grandezas. Mundada et al. (2011) apresentaram coeficientes de difusão de água entre $2,71 \cdot 10^{-10}$ e $5,12 \cdot 10^{-10}$ durante a desidratação osmótica de romã. Coimbra et al. (2017) apresentaram coeficientes de difusão de água entre $0,00 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e $1,858 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ durante a desidratação osmótica de sapoti. Mercali et al. (2011) apresentaram coeficientes de difusão de água entre $5,27 \cdot 10^{-10}$ e $6,47 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, durante a desidratação osmótica de banana (*Musa sapientum*, shum.).

Esta variação entre os valores de coeficiente de difusão de água (D_{efw}) (Tabela 14) está relacionada à concentração de sacarose na solução. A solução com maior concentração apresentou maior coeficiente de difusão de água (D_{efw}). Siqueira (2014) reportou o mesmo comportamento em seus dados experimentais durante a desidratação osmótica de gengibre com soluções de sacarose, no qual os coeficientes

de difusão da água obtidos foram de 0,333 e $0,506 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para as soluções nas concentrações de 15% e 50%, respectivamente.

Os pesquisadores Azoubel e Murr (2004) e Garcia – Nogueira et al. (2010) relatam o mesmo comportamento do coeficiente de difusão da água em suas pesquisas. Azoubel e Murr (2004) estudaram a desidratação osmótica de tomate cereja usando soluções osmóticas de cloreto de sódio e soluções binárias de cloreto de sódio e sacarose em concentrações de 10% e 25%. Garcia – Nogueira et al. (2010), por meio de experimentos de desidratação osmótica de morangos com soluções de sacarose a 25% e a 50%, obteve o mesmo comportamento.

Alguns fatores como o tipo de alimento, a estrutura do alimento, a composição do alimento, a metodologia e os modelos empregados no tratamento dos dados experimentais podem influenciar na determinação dos coeficientes de difusão (D_{ef}) dificultando a comparação de dados com outros autores (AZOUBEL; MURR, 2004).

A Tabela 15 apresenta os coeficientes de difusão da água (D_{efw}) para os experimentos definitivos de desidratação osmótica de gengibre em uma solução osmótica de sacarose a 30% e a 28°C juntamente com a aplicação de ultrassom, variando a potência nominal a 0%, 30%, 40% e 50%.

Tabela 15 - Determinação dos coeficientes de difusão da água para os experimentos definitivos de desidratação osmótica do gengibre em uma solução osmótica de sacarose a 30% ($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$) e a 28 °C.

| Potência Nominal | $D_{efw1} (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ (experimento 1) | $D_{efw2} (\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$ (experimento 2) | Média \pm dp |
|--------------------|--|--|---|
| 30% (120 W) | $3,27 \cdot 10^{-10}$ | $4,38 \cdot 10^{-10}$ | $3,83 \cdot 10^{-10} \pm 0,78 \cdot 10^{-10}$ |
| 40% (160 W) | $6,13 \cdot 10^{-10}$ | $1,13 \cdot 10^{-9}$ | $8,72 \cdot 10^{-10} \pm 3,66 \cdot 10^{-10}$ |
| 50% (200 W) | $4,53 \cdot 10^{-10}$ | $5,52 \cdot 10^{-10}$ | $5,03 \cdot 10^{-10} \pm 0,70 \cdot 10^{-10}$ |
| 0% (0 W) | $1,47 \cdot 10^{-10}$ | $1,03 \cdot 10^{-10}$ | $1,25 \cdot 10^{-10} \pm 0,31 \cdot 10^{-10}$ |

Os coeficientes de difusão da água (D_{efw}) mais elevados foram obtidos durante os experimentos com a aplicação de ultrassom devido ao surgimento de microcanais na estrutura do alimento, que facilita a difusão da água. Resultado semelhante também foi relatado em duas outras pesquisas. A primeira foi a partir da desidratação osmótica de maçã em uma solução osmótica de sacarose a 30% ($\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$) e a 30 °C, que apresentou o coeficiente de difusão de água de $2,18 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para os experimentos sem aplicação de ultrassom e de $4,73 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para os experimentos com a aplicação de ultrassom (11,5 $\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$ e 20 kHz) (CARCÉL et al., 2007b). A segunda foi durante a desidratação osmótica de morango em solução de sacarose a

25% ($\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$) e a 30°C , que apresentou coeficiente de difusão de água de $1,53\cdot 10^{-7} \text{ m}^2\cdot\text{min}^{-1}$ no experimento sem a aplicação de ultrassom e de $1,64\cdot 10^{-7} \text{ m}^2\cdot\text{min}^{-1}$ e $1,78\cdot 10^{-7} \text{ m}^2\cdot\text{min}^{-1}$ nos experimentos com a aplicação de ultrassom de 20 kHz e 40 kHz, respectivamente (GARCIA-NOGUEIRA et al., 2010).

Ozuna et al. (2013) apresentaram o mesmo comportamento do coeficiente de difusão da água na desidratação osmótica de carne de porco em soluções saturadas de cloreto de sódio com e sem aplicação de ultrassom. O coeficiente de difusão da água foi de $0,62\cdot 10^{-10}$ para o experimento sem aplicação de ultrassom e de $1,09\cdot 10^{-10}$ para o experimento com aplicação de ultrassom.

6 CONCLUSÃO

As soluções de sacarose foram caracterizadas experimentalmente por meio da determinação da densidade e do calor específico em uma ampla faixa de concentração e temperatura. Entre os cinco modelos matemáticos ajustados aos dados experimentais de ambas as propriedades, o modelo que varia linearmente com a concentração e quadraticamente com a temperatura foi o modelo que teve o melhor ajuste aos dados, com um EMR $< 1,0$. Os dados experimentais obtidos têm grande utilidade na indústria, desde aplicações para projeções de equipamentos até para determinar o comportamento da solução em um dado processo.

Foi determinada a potência real acústica absorvida pela solução osmótica de sacarose ($30\% \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$) que obteve um fator de conversão de aproximadamente 30%. Isto mostra a necessidade de se determinar a potência real acústica, já que a maior parte da energia acústica não se propaga no meio.

Para os testes preliminares de desidratação osmótica do gengibre, conclui-se que a solução de maior concentração ($30\% \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$) apresentou maior influência na perda de água e ganho de sólidos.

Para os experimentos definitivos de desidratação osmótica do gengibre com soluções osmótica de sacarose na concentração de 30% e a 28°C , conclui-se que a aplicação de ultrassom influencia na cinética da perda de água e do ganho de sólidos.

Nos testes preliminares foi apresentado um maior coeficiente de difusão da água para a desidratação osmótica do gengibre em uma solução de maior concentração ($30\% \text{ m}\cdot\text{m}^{-1}$). Já para os experimentos definitivos de desidratação

osmótica do gengibre os maiores coeficientes de difusão da água foram determinados nos experimentos com aplicação do ultrassom.

7 TRABALHOS FUTUROS

- Trabalhar com uma quantidade maior de amostras;
- Elaboração de uma estrutura para o posicionamento das fatias de gengibre de uma maneira que elas não fiquem sobrepostas uma sobre a outra;
- Trabalhar com uma espessura maior da fatia de gengibre;
- Utilizar uma sonda ultrassônica com vários pontos de distribuição de ultrassom ou um banho ultrassônico;
- Aplicar menores potências nominais ao meio osmótico durante a desidratação osmótica do gengibre.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAÃO, A. S.; LEMOS, A. M.; VILELA, A.; SOUSA, J. M.; NUNES, F. M. Influence of osmotic dehydration process parameters on the quality of candied pumpkins. **Food and Bioproducts Processing**, v. 9, n. 1, p. 481– 494, 2013.

ALI, A.; BIDHURI, P.; MALIK, N. A.; UZAIR, S. Density, viscosity, and refractive index of mono-, di-, and tri-saccharides in aqueous glycine solutions at different temperatures. **Arabian Journal of Chemistry**, p. 1-11, 2014.

AOAC. **Official methods of analysis international**. 16 th. Gaithersburg: Association of Official Analytical Chemists International, 1997.

Archer, D. G. Thermodynamic Properties of Synthetic Sapphire (α -Al₂O₃), Standard Reference Material 720 and the Effect of Temperature-Scale Differences on Thermodynamic Properties. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, v. 22, n. 6, p. 1441-1453, 1993.

ASSIS, M. M. M.; LANNES, S. C. S.; TADINI, C. C.; TELIS, V. R. N.; TELIS-ROMERO, J. Influence of temperature and concentration on thermophysical properties of yellow mombin (*Spondias mombin*, L.). **European Food Research and Technology**, v. 223, p. 585–593, 2006.

ASTM-E1269. Standard test method for determining specific heat capacity by differential scanning calorimetry. West Conshohocken: ASTM Internacional, 2005.

AZOUBEL, P.M.; MURR, F.E.X. Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. **Journal of Food Engineering**, v.61, p.291-295, 2004.

BERLAN, J.; MASON, T. J. Dosimetry for power ultrasound and sonochemistry. In MASON T. J. (Ed.). **Advances in sonochemistry**. London: JAI Press Inc, 1996. v. 4, p. 1–73.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. **Transport Phenomena**, 2nd ed. New York, John Wiley and Sons, 2001.

CÁRCEL J. A.; BENEDITO J.; BON, J.; MULET A. High intensity ultrasound effects on meat brining. **Meat Science**, v. 76, p. 611–619, 2007a.

CÁRCEL J.A.; BENEDITO J.; ROSSELLÓ C.; MULET A. Influence of ultrasound intensity on mass transfer in apple immersed in a sucrose solution. **Journal of Food Engineering**, v. 78, p. 472–479, 2007b.

CÁRCEL, J. A. **Influencia de los ultrasonidos de potencia en procesos de transferencia de material**. 2003. 318 (PhD). Departamento de Tecnología de Alimentos, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2003.

CÁRCEL, J.A.; GARCÍA-PÉREZ, J.V.; BENEDITO, J.; MULET, A. Food process innovation through new technologies: Use of ultrasound. **Journal of Food Engineering**, v. 110, p. 200–207, 2012.

CARVALHO, G. **Influência da aplicação de ultrassom em desidratação osmótica de carne bovina**. 2014. 58 p. Dissertação (mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto, 2014.

CASTILHOS, M. B. M.; BETIOL, L. F. L.; CARVALHO, G. R.; TELIS- ROMERO, J. Experimental study of physical and rheological properties of grape juice using different temperatures and concentrations. Part I: Cabernet Sauvignon. **Food Research International**, v. 100, p. 724–730, 2017.

CASTILHOS, M. B. M.; BETIOL, L. F. L.; CARVALHO, G. R.; TELIS- ROMERO, J. Experimental study of physical and rheological properties of grape juice using different temperatures and concentrations. Part II: Merlot. **Journal Food Research International**, v. 105, p. 905–912, 2018.

CASTRO, L; CAPOTE, F.P. Introduction: Fundamentals of Ultrasound and Basis of its Analytical Uses. In: CASTRO, L; CAPOTE, F.P. **Analytical Applications of Ultrasound**. 1 st ed. Elsevier, 2007. v. 26, p.1-34.

COIMBRA, L. M. P. L., ARRUDA, H. A. S., MACHADO, E. C. L., SALGADO, S. M., ALBUQUERQUE, S. S. M. C., ANDRADE, S. A. C. A. Water and sucrose diffusion coefficients during osmotic dehydration of sapodilla (*Achras zapota L.*). **Ciência Rural**, v.47, n.8, p. 1-7, 2017.

CONSTENLA, D. T.; LOZANO, J. E.; CRAPISTE, G. H. Thermophysical properties of clarified apple juice as a function of concentration and temperature. **Journal Food Science**, v. 54, n. 3, p. 663-668, 1889.

CORRÊA, J. L. G.; RASIA, M. C.; MULET, A.; CÁRCEL, J. A. Influence of ultrasound application on both the osmotic pretreatment and subsequent convective drying of pineapple (*Ananas comosus*). **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 41, p. 284–291, 2017.

CRANK, J. **The mathematics of Diffusion**. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1975.

DARROS - BARBOSA, R.; BALABAN, M. O.; TEIXEIRA, A. A. Temperature and Concentration Dependence of Density of Model Liquid Foods. **International Journal of Food Properties**, v. 6, n. 2, p. 195–214, 2003.

DEVIC, E.; GUYOT, S.; DAUDIN, J.D.; BONAZZI C. Kinetics of polyphenol losses during soaking and drying of cider apples. **Food and Bioprocess Technology**, v.3, n. 6, p. 867-877, 2010.

EREN, I.; KAYMAK-ERTEKIN, F. Optimization of osmotic dehydration of potato using response surface methodology. **Journal of Food Engineering**, v. 79, p. 344–352, 2007.

FARHANINEJAD, Z.; FATHI, M.; SHAHEDI, M.; SADEGHI, M. Osmotic dehydration of banana slices using direct and indirect sonication: optimization and microstructure analysis. **Journal of Food Process Engineering**, v. 40, p. 1-10, 2017.

FERNANDES, F. A. N.; GALLÃO, M.I.; RODRIGUES, S. Effect of osmosis and ultrasound on pineapple cell tissue structure during dehydration. **Journal of Food Engineering**, v. 90, p. 186–190, 2009.

FERNANDES, F. A. N.; OLIVEIRA, F. I. P.; RODRIGUES S. Use of Ultrasound for Dehydration of Papayas. **Food Bioprocess Technology**, v. 1, p. 339–345, 2008.

FERNANDES, F. A. N.; RODRIGUES, S. Ultrasound as pre-treatment for drying of fruits: Dehydration of banana. **Journal of Food Engineering**, v. 82, p. 261–267, 2007.

GALEANO, E. A. V.; BORGES V. A. J; OLIVEIRA, L. R; CHIPOLESCH, J. M. A. **Síntese da Produção Agropecuária do Espírito Santo 2013/2014**. Vitória: Incaper, 2016. p 51-60.

GALLEGO-JUÁREZ, J. A. Some applications of air-borne power ultrasound to food processing. In: POVEY, M. J. W. e MASON, T. J. **Ultrasound in Food Processing**. Londres: Chapman & Hall, 1999. 127-143 p.

GARCIA-NOGUERA, J.; OLIVEIRA, F. I. P.; GALLÃO, M. I.; WELLER, C. L.; RODRIGUES, S.; FERNANDES, F. A. N. Ultrasound-assisted osmotic dehydration of strawberries: Effect of pre treatment time and ultrasonic frequency. **Drying Technology**, v. 28, n. 2, p. 294–303, 2010.

GARZA, S.; IBARZ, A. Effect of temperature and concentration on the density of clarified pineapple juice. **International Journal of Food Properties**, v. 13 n. 4, p. 913–920, 2010.

GERMER, S. P. M.; de QUEIROZ, M. R.; AGUIRRE, J. M.; BERBARI, S. A. G.; ANJOS, V. D. Desidratação osmótica de pêssegos em função da temperatura e concentração do xarope de sacarose. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.2, p. 161–169, 2011.

GOVINDARAJAN, V. S. Ginger-Chemistry, Technology and Quality Evaluation: Part I. **CRC Critical Reviews in Food Science and Nutrition**. v. 17, p. 98, 1982.

GOULA, A. M.; KOKOLAKI, M.; DAFTSIU, E. Use of ultrasound for osmotic dehydration. The case of potatoes. **Food and Bioproducts Processing**, n. 1, v. 5, p. 157–170, 2017.

GUNDURAO A.; RAMASWAMY H. S.; AHMED J. Effect of Soluble Solids Concentration and Temperature on Thermo-Physical and Rheological Properties of Mango Puree. **International Journal of Food Properties**, v. 14, n. 5, p. 1018-1036, 2011.

HAWKES, J.; FLINK, J. Osmotic concentration of papaya: influence of process variables on the quality. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.2, p.265-284, 1978.

HENG, K.; GUILBERT, S.; CUQ, J.L. Osmotic dehydration of papaya: influence of process variables on the product quality. **Sciences des Aliments**, v.10, n.4, p.831-847, 1990.

KOBUS, Z.; KUSINSKA, E. Influence of physical properties of liquid on acoustic power of ultrasonic processor. **Teka Komisji Motoryzacji i Energetyki Rolnictwa**, v. 8, p. 71-78. 2008.

KUTTRUFF, H. **Ultrasonics: Fundamentals and Applications**. London: Elsevier Science Publishers Limited, 1991.

LANA, M.M.; CASALI, V.W.D.; FINGER, F.L.; REIS, F.P. Avaliação da conservação pós-colheita de rizomas de gengibre. **Horticultura Brasileira**, v. 11, n. 2, p. 139-141, 1993.

LAZARIDOU, A.; BILIADERIS, C. G.; BACANDRITSOS, N.; SABATINI, A. G. Composition, thermal and rheological behaviour of selected Greek honeys. **Journal Food Engineering**, v. 64, p. 9–21, 2004.

LECH, K.; MICHALSKA, A.; WOJDYLO, A.; NOWICKA, P.; FIGIEL, A. The influence of physical properties of selected plant materials on the process of osmotic dehydration. **LWT - Food Science and Technology**, v. 91, p. 588–594, 2018.

LEIGHTON, T. G. The principles of cavitation. In: M. J. W. Povey & T. J. Mason (Eds.), **Ultrasound in Food Processing**. London: Chapman & Hall, 1998. p. 151–182.

LENART, A. Osmo-convective drying of fruits and vegetables: technology and application. **Drying Technology**, v. 14 n. 2, p. 391-413, 1996.

LINGYU YU; GIURGIUTIU, V. Multi-mode Damage Detection Methods with Piezoelectric Wafer Active Sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 20, n. 11, p. 1329-1341, 2009.

LORENZETTI, E. R. **Cultivo de Gengibre**. Disponível em: <<http://www.portaldahorticultura.xpg.com.br/Cultivogengibre.pdf>>. Acesso em: 20 de julho, 2018.

MARTIN, K.; RAMNARINE, K. Chapter 2 – Physics. In: HOSKINS P.; MARTIN K.; THRUSH A. **Diagnostic Ultrasound – Physics and Equipment**. 2 nd. New York: Cambridge University Press, 2010. p. 4- 22.

MASON, T. J.; LORIMER, J. P. **Applied sonochemistry: the uses of power ultrasound in chemistry and processing**. Weinheim; Wiley-VCH Verlag, 2002. 303 p.

MCCLEMENTS, D. J.; GUNASEKARAN, S. Ultrasonic characterization of foods and drinks: Principles, methods, and applications. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 37, n. 1, p. 1-46, 1997.

MCDONNELL, C. K.; LYNG, J. G.; ARIMI, J. M.; ALLEN, P., The acceleration of pork curing by power ultrasound: A pilot-scale production. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 26, p. 191-198, 2014.

MENDONÇA, K. S; CORRÊA J. L. G; JUNQUEIRA J. R. J; PEREIRA M. C. A; VILELA, M. B. Optimization of Osmotic Dehydration of Yacon Slices. **Drying Technology: An International Journal**, v.34, n. 4, p. 1-31, 2015.

MERCALI, G.D.; MARCZAK, L.D.F.; TESSARO, I.C.; NOREÑA, C.P.Z. Evaluation of water, sucrose and NaCl effective diffusivities during osmotic dehydration of banana (*Musa sapientum*, shum.). **LWT Food Science and Technology**, v. 44, n. 1, p. 82-91, 2011.

MULET, A.; BENEDITO, J.; BON, J.; SANJUÁN, N. Low intensity ultrasonics in food technology. **Journal of Food Engineering**, v. 5, n. 4, p. 285-297, 1999.

MULET, A.; CÁRCEL J. A.; SANJUÁN N.; BON, J. New Food Drying Technologies – Use of Ultrasound. **Food Science and Technology International**, p. 1-8, 2003.

MUNDADA, M., HATHAN, B.S. & MASKE, S. Mass transfer kinetics during osmotic dehydration of pomegranate arils. **Journal of Food Science**, v.76, p.31–39, 2011.

NAGAY, L. Y. **Desidratação osmótica de manga cv. palmer em solução de sacarose com e sem adição de ácido ascórbico**. 2012. 112 p. Dissertação (mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, São José do Rio Preto, 2012.

OZUNA, C.; PUIG, A.; GARCÍA-PEREZ, J. V.; MULET, A.; CÁRCEL, J. A. Influence of high intensity ultrasound application on mass transport, microstructure and textural

properties of pork meat (*Longissimus dorsi*) brined at different NaCl concentrations. **Journal of Food Engineering**, v. 119, p.84–93, 2013.

PALHARIN, L.H.D.C; FIGUEIREDO, N.E; CAMARGO, L.M.P; BOSQUÊ G.G. Estudo sobre gengibre na medicina popular. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, n. 14, 2008.

PELEG, M. An Empirical Model for the Description of Moisture Sorption Curves. **Journal of Food Science**, v. 53, n. 4, p. 1216-1217, 1988.

PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. **Manual de Engenharia Química**. 5ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1986.

PINGRET, D.; FABIANO-TIXIER, A. S.; BOURVELLEC, C. L.; RENARD, C. M. G. C.; CHEMAT, F. Lab and pilot-scale ultrasound-assisted water extraction of polyphenols from apple pomace. **Journal of Food Engineering**, v. 111, n. 1, p. 73-81, 2012.

PINJARI, D. V.; PANDIT, A. B. Cavitation milling of natural cellulose to nanofibrils. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 17, p. 845-852, 2010.

POINTING, J. D.; WATTERSS, G. G.; FORREY, R. R.; STANGLY, W. L.; JACKSON, R. Osmotic dehydration of fruits. **Journal Food Science and Technology**, v. 20, n. 10, p.125-128, 1996.

POLACHINI, T. C.; BETIOL, L. F. L.; BASTOS, M. G.; TELIS, V. R. N.; TELIS-ROMERO, J. Boiling point and specific heat of meat extract. **International Journal of Food Properties**, p. 1-11, 2017.

POLACHINI, T. C.; CARVALHO, G. R.; TELIS-ROMERO, J. Determination of acoustic fields in acidic suspensions of peanut shell during pretreatment with high-intensity ultrasound. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 34, n. 2, p. 385-394, 2017.

QUEJI M. F. D; PESSOA L. S. Influência do tratamento osmótico na produção de tomate desidratado. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 5, n. 1, p. 282-292, 2011.

RAOULT-WACK, A. L.; LENART, A; GUILBERT, S. Recent Advances in Dewatering Trough in Concentrated Solutions (“Osmotic dehydration”). In: MUJUMDAR A. S. **Drying of Solids**. New York: International Science Publisher, 1992. p. 21-51.

RASO, J.; MANÃS, P.; PAGÁN, R.; SALA, F. J. Influence of different factors on the output power transferred into medium by ultrasound. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 5, n. 4, p. 157-162, 1999.

RAVENTÓS, M.; HERNÁNDEZ, E.; AULEDA, J.; IBARZ, A. Concentration of aqueous sugar solutions in a multi-plate cryoconcentrator. **Journal Food Engineering**, v. 79, n. 2, p. 577-585, 2007.

REQUENA, D. S. J. **Caracterización del sistema de aplicación de ultrasonidos sin contacto directo de um secadero piloto de liofilización a presión atmosférica.**

2016. 40 p. Trabalho de Conclusão do Curso de Ciência e Tecnologia dos Alimentos, Universidade Politécnica de Valência. Valência, 2016.

RUCKER, N. G. A.; SERPE ELPO, E. R.; GIROTTO, A. Gengibre: Aspectos econômicos da cultura do gengibre. In: SILVA, R. R. M.; BIANCHINI V.; ALMEIDA H. G.; SIMIONI F. C. **Análise da Conjuntura Agropecuária SAFRA 2007/2008**. Curitiba: SEAB, 2007.p. 70-79.

SANTOS, C. de N. P. dos. **Elaboração de um estruturado de polpa de manga (*Mangifera indica* L. cv *Tommy Atkins*) parcialmente desidratada por osmose**. 2003. 79 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP. Campinas, 2003.

SERWAY, R.A. **Física 2 – Movimento Ondulatório e Termodinâmica**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1996. p. 22-29.

SILVA, W. P.; MATA, M. E. R. M. C.; SILVA, C. D. P. S.; GUEDES, M. A.; LIMA, A. G. B. Determinação da difusividade e da energia de ativação para feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), variedade sempre-verde, com base no comportamento da secagem. **Engenharia Agrícola**, v. 28, p. 325-333, 2008.

SILVEIRA, M. S. **Efeitos da desidratação osmótica e desidratação osmótica assistida por ultrassom na secagem convectiva de cenoura (*Daucus carota* L.)**. 2014. 102 p. Dissertação (doutorado em Engenharia de Química) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

SIMAL, S.; BENEDITOH, J.; SANCHEZ, E. S.; ROSSEM, C. Use of ultrasound to increase mass transport rates during osmotic dehydration. **Journal of Food Engineering**, v.36, p. 323–336, 1998.

SIQUEIRA, L. P. **DESIDRATAÇÃO OSMÓTICA COMO ALTERNATIVA TECNOLÓGICA PARA A PRESERVAÇÃO DO GENGIBRE**. 2014. 109 p. Tese (doutorado em Nutrição) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

SOUZA, E. P.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; SANTOS, J. E. A.; LEMOS, D. M. Thermophysical properties of the pequi pulp in different concentrations. **Bioscience Journal**, v. 32, n. 1, p. 20-28, 2016.

TADINI, C. C.; TELIS, V. R. N.; TELIS-ROMERO, J. Influence of temperature and concentration on thermophysical properties of caja juice (*Spondia mombin*, L). **Eurotherm Seminar 77 – Heat and Mass Transfer in Food Processing**, 2005.

TAYLOR, S. **Advances in Food and Nutrition Research**. 1st ed. London: Elsevier Academic Press, 2004. v. 48, 297 p.

TELIS, V. R. N.; TELIS-ROMERO, J.; Mazzotti, H.B.; GABAS, A. L. Viscosity of Aqueous Carbohydrate Solutions at Different Temperatures and Concentrations. **International Journal of Food Properties**, v. 10, p. 185–195, 2007.

TONON, R. V.; BARONI, A. F.; HUBINGER, M. D. Osmotic dehydration of tomato in ternary solutions: Influence of process variables on mass transfer kinetics and an evaluation of the retention of carotenoids. **Journal of Food Engineering**, v. 82, n. 4, p. 509-517, 2007.

URIBE, E.; MIRANDA, M.; VEGA-GÁLVEZ, A.; QUISPE, I.; CLAVERÍA, R.; DI SCALA, K. Mass transfer modelling during osmotic dehydration of jumbo squid (*Dosidicus gigas*): influence of temperature on diffusion coefficients and kinetic parameters. **Food and Bioprocess Technology**, v. 4, n. 2, p. 320-326, 2011.

USDA. United States Department of Agriculture. National Agriculture Library. National Nutrient Database for Standard Reference. Disponível em: < <https://ndb.nal.usda.gov/ndb/search/>>. Acesso em: 11 de setembro de 2018.

UTPALENDU, J.; CHATTOPADHYAY, R.N.; PRASAD, S.B. Preliminary studies on anti-inflammatory activity of *Zingiber officinale* Roscoe, *Vitex negundo* Linn and *Tinospora cordifolia* (Willid) Miers in albino rats. **Indian Journal of Pharmacology**, v.31, n.3. p. 232-233, 1999.

WHO. **Monographs on selected medicinal plants**. v. 1. Geneva, 1999. p. 277-287.

YADAV, A. K., SINGH, S. V. Osmotic dehydration of fruits and vegetables: a review. **Journal of Food Science and Technology**, v. 51, n. 9, p.1654 – 1673, 2012.

ZURITZ, C. A.; PUNTES, M. E.; MATHEY, H. H.; PÉREZ E. H. A.; GASCÓN, A.; RUBIO, L. A.; CARULLO, C. A.; CHERNIKOFF, R. E.; CABEZA, M. S. Density, viscosity and coefficient of thermal expansion of clear grape juice at different soluble solid concentrations and temperatures. **Journal Food Engineering**, v. 71, p. 143-149, 2005.

APÊNDICE A- Gráficos dos cinco modelos matemáticos ajustados aos dados de densidade das soluções de sacarose.

Figura 1- Representação gráfica do modelo matemático 1.

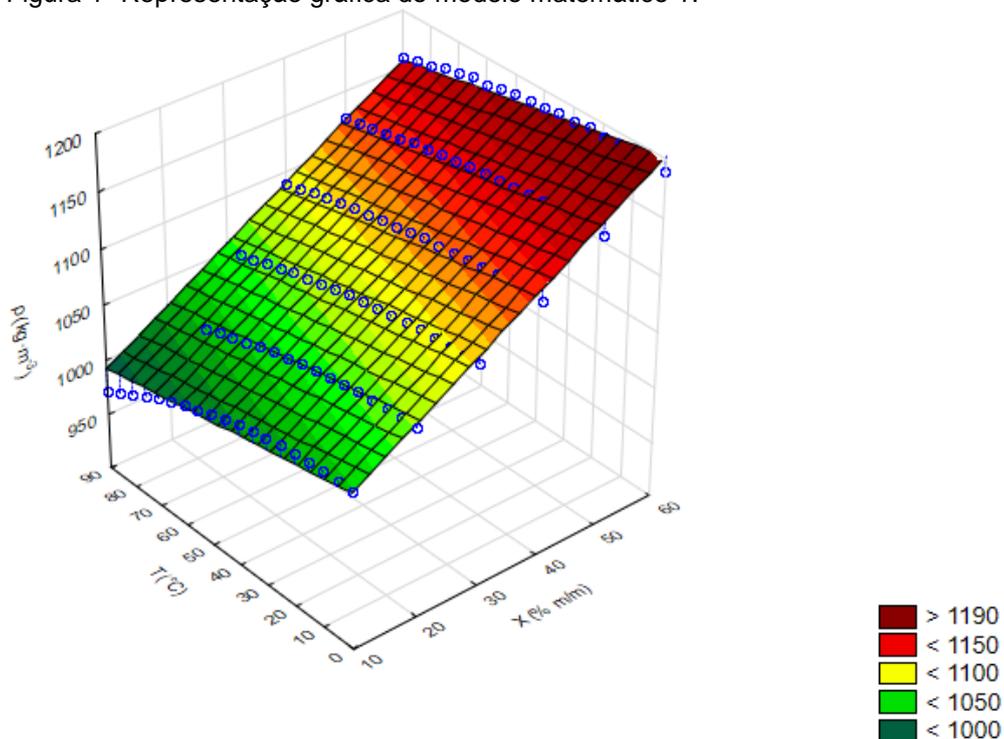


Figura 2- Representação gráfica do modelo matemático 2.

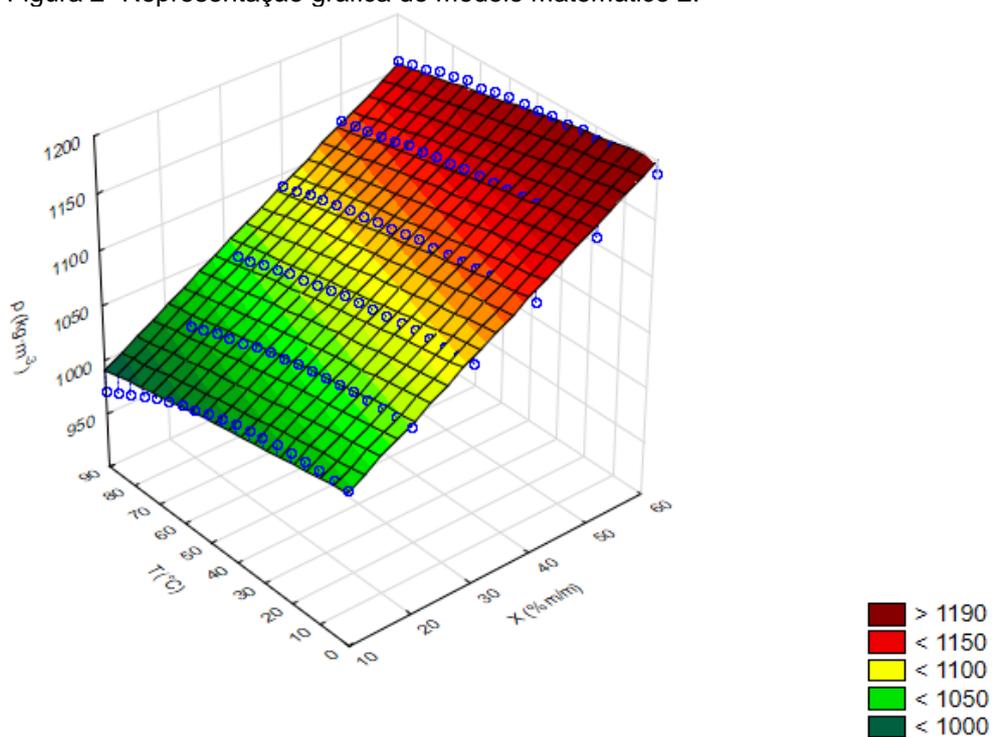


Figura 3- Representação gráfica do modelo matemático 3.

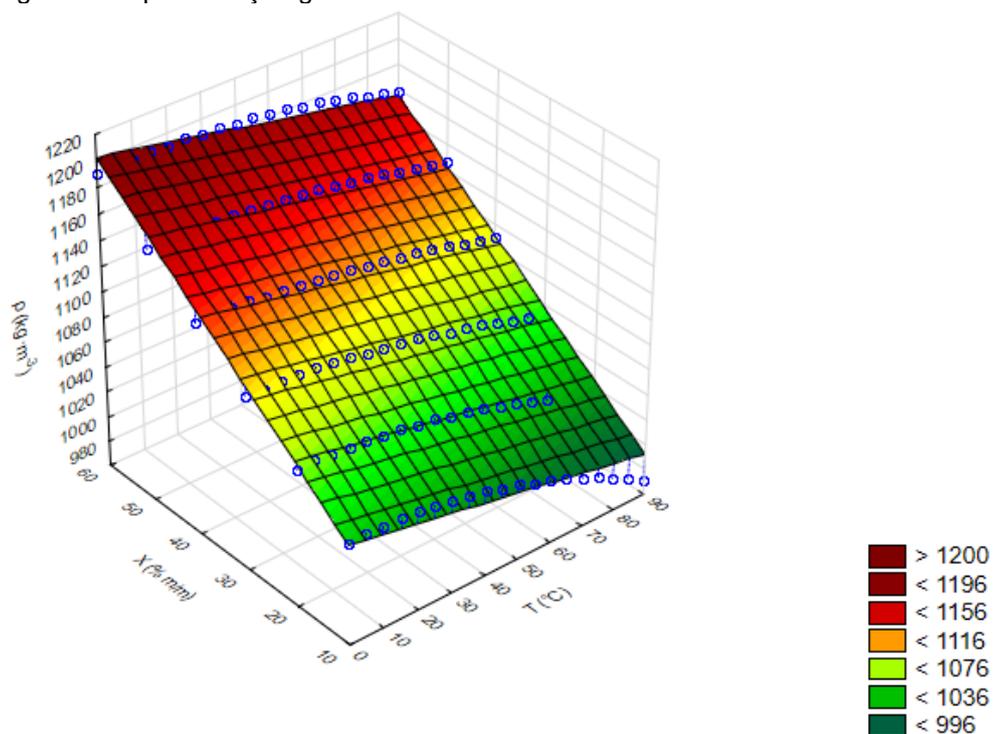


Figura 4- Representação gráfica do modelo matemático 4.

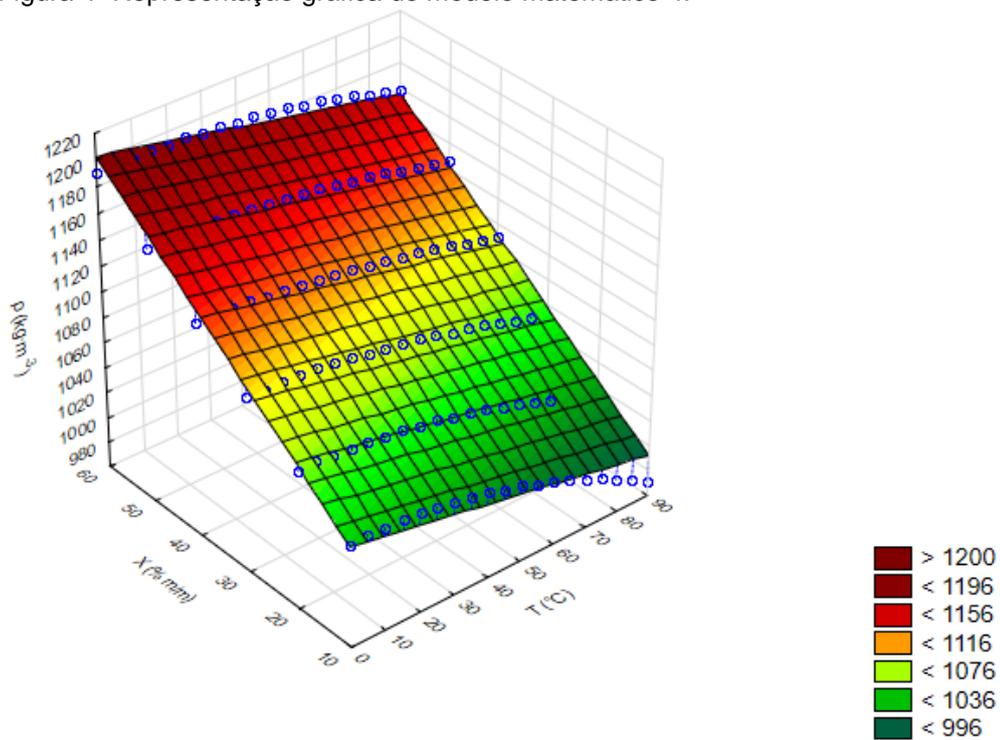
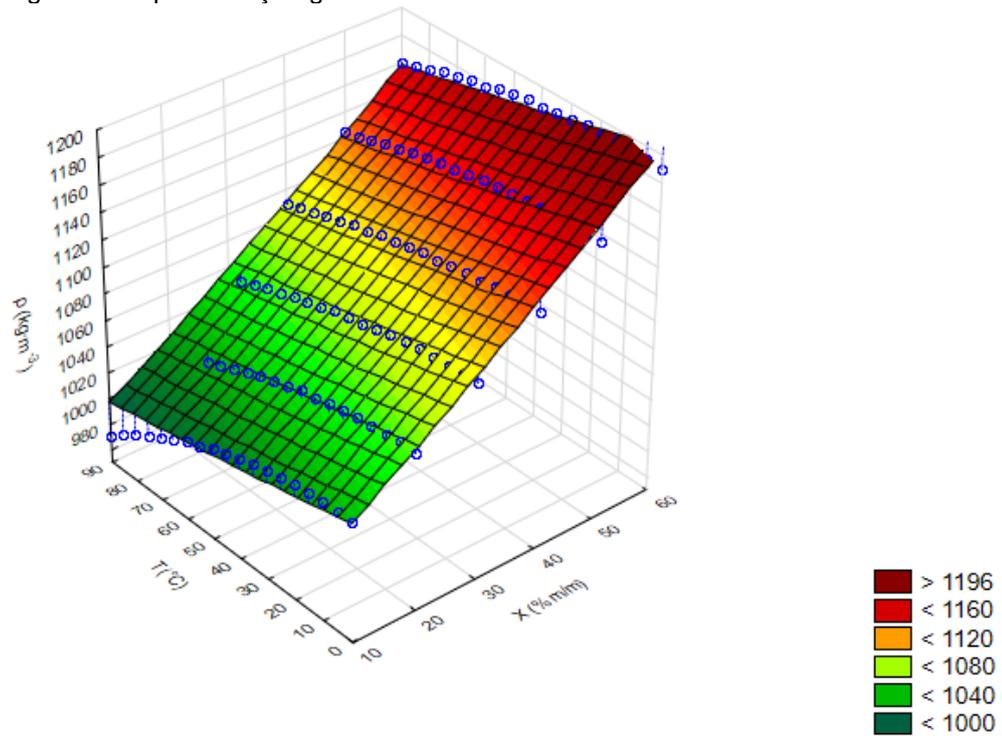


Figura 5- Representação gráfica do modelo matemático 5.



APÊNDICE B- Gráficos dos cinco modelos matemáticos ajustados aos dados de calor específico das soluções de sacarose.

Figura 1- Representação gráfica do modelo matemático 1.

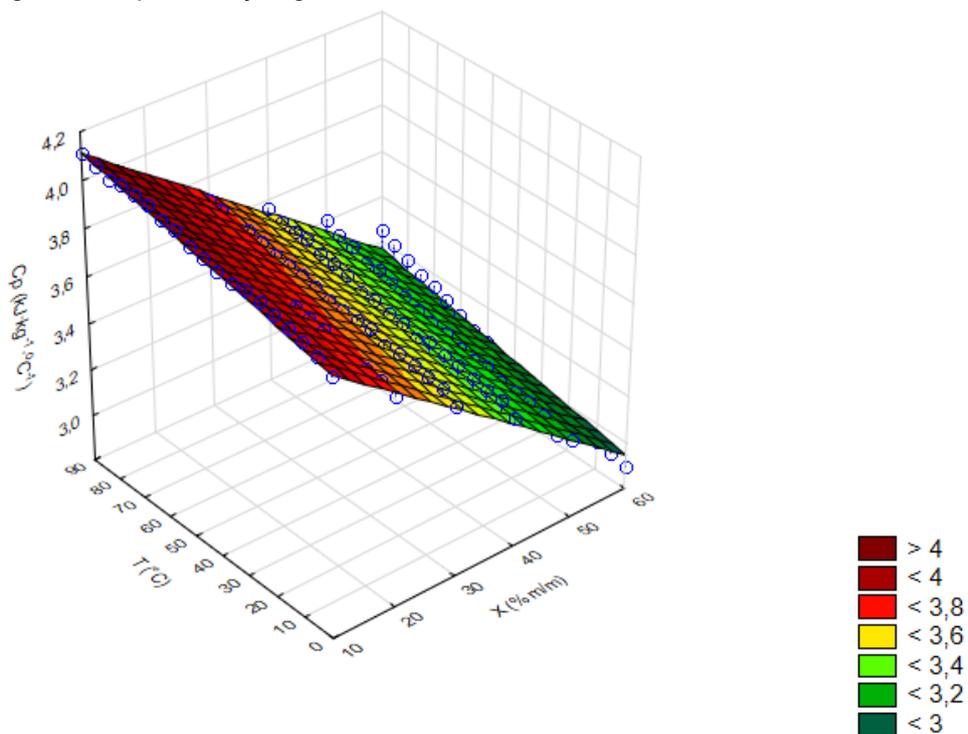


Figura 2- Representação gráfica do modelo matemático 2.

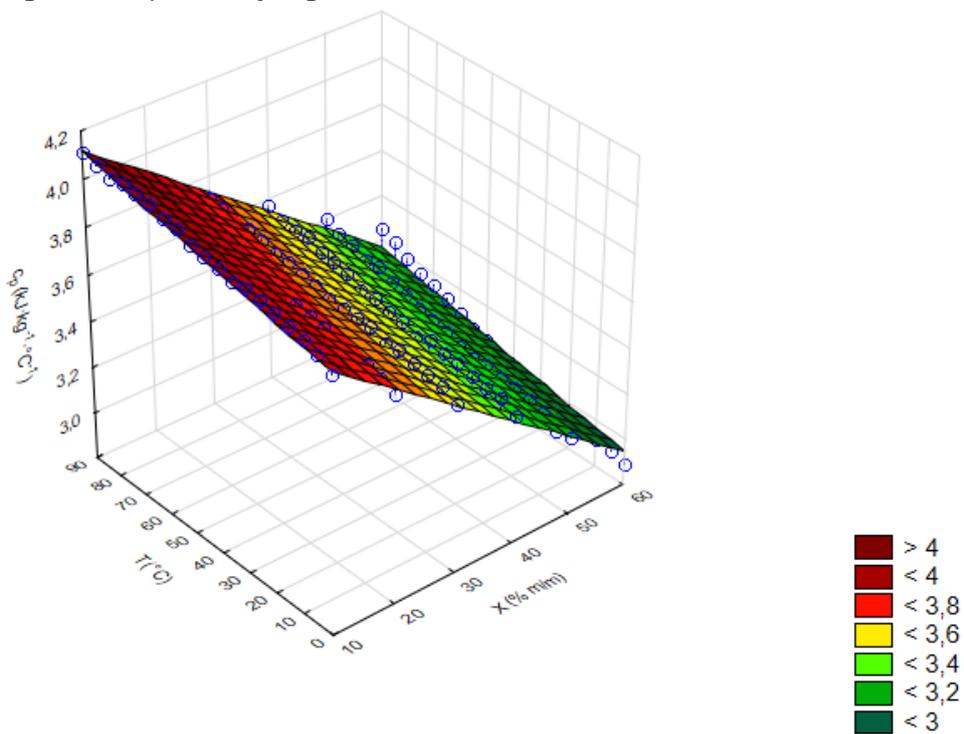


Figura 3- Representação gráfica do modelo Matemático 3.

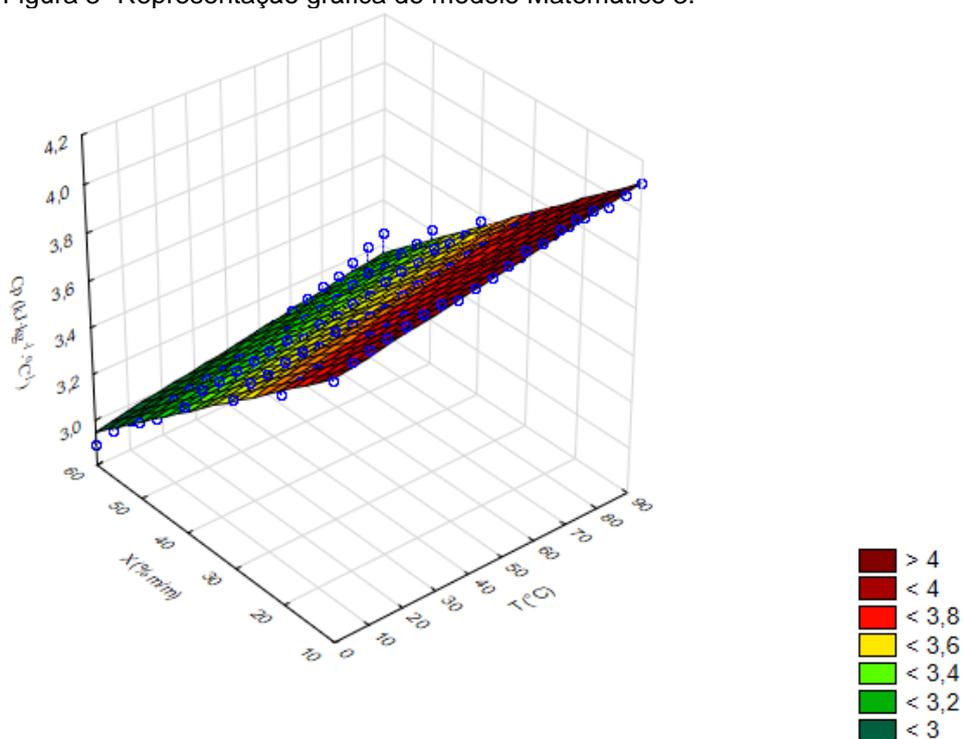


Figura 4- Representação gráfica do modelo matemático 4.

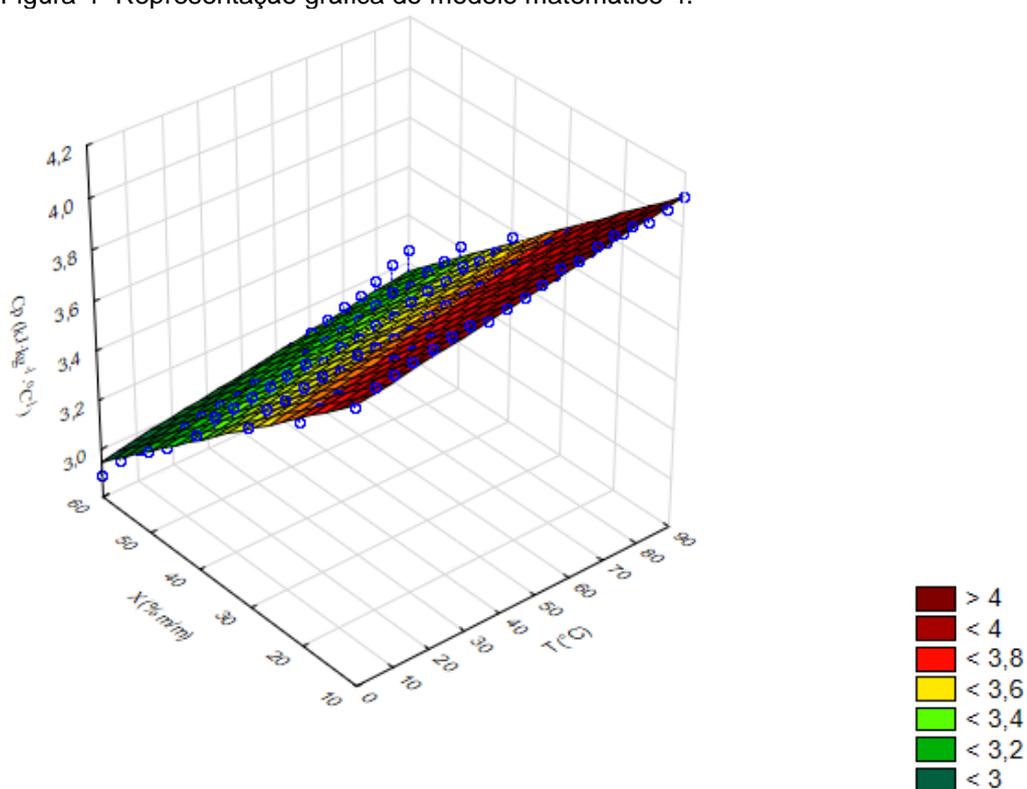


Figura 5- Representação gráfica do modelo matemático 5.

