



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

DISSERTAÇÃO

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO
DE PRODUTOS AGRÍCOLAS**

**INCERTEZAS NA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS
DE MAÇÃS DURANTE O RESFRIAMENTO**

NEWTON CARLOS SANTOS

Campina Grande – Paraíba

Fevereiro - 2020

NEWTON CARLOS SANTOS

**INCERTEZAS NA DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS
DE MAÇÃS DURANTE O RESFRIAMENTO**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento as exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola na área de concentração em Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas.

Orientadores: Dra. Josivanda Palmeira Gomes

Dr. Wilton Pereira da Silva

**Campina Grande – Paraíba
Fevereiro - 2020**

S237i Santos, Newton Carlos.
Incertezas na determinação de propriedades termofísicas de maçãs durante o resfriamento. / Newton Carlos Santos. – Campina Grande, 2020.
102 f.: il.

Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2020.
"Orientação: Profa. Dra. Josivanda Palmeira Gomes".
"Coorientação: Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva".
Referências.

1. Propriedades termofísicas. 2. Transferência de calor. 3. Otimização. 4. Solução numérica e analítica. 5. Maçãs - resfriamento. I. Gomes, Josivanda Palmeira. II. Silva, Wilton Pereira da. III. Título.

CDU 66-97(043)

FICHA CATALOGráfICA ELABORADA PELO BIBLIOTECÁRIO JESIEL FERREIRA GOMES CRB-15/256




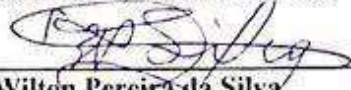
PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO


NEWTON CARLOS SANTOS

APROVADO (A): 17 de fevereiro de 2020


BANCA EXAMINADORA

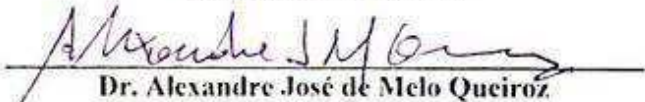

Dra. Josivanda Palmeira Gomes
Orientadora - UAEA/CTRN/UFPG


Dr. Wilton Pereira da Silva
Orientador - UAEA/CTRN/UFPG


Dra. Cleide Maria Diniz Pereira da Silva e Silva
Examinadora - UAF/CCT/UFPG


Dr. Jossyl Amorim Ribeiro de Souza
Examinador - UAF/CCT/UFPG


Dra. Angela Maria Santiago
Examinadora - UEPB


Dr. Alexandre José de Melo Queiroz
Examinador - UAEA/CTRN/UFPG

A Cruz Sagrada seja a minha luz, não seja o dragão
o meu guia. Retira-te, satanás! Nunca me
aconselhes coisas vãs. É mau o que tu me ofereces,
bebe tu mesmo os teus venenos!

(Oração da medalha de São Bento)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades enfrentadas nesta jornada acadêmica.

Ao meu pai Nilton, a minha mãe Lúcia, por toda educação que souberam me passar e por mostrar que sou capaz de realizar todos os meus objetivos. E aos meus irmãos, que mesmo distante me deram apoio e força.

À minha orientadora, Dr.^a Josivanda Palmeira Gomes, por toda paciência, dedicação e oportunidades. Além de ser um exemplo de professora, servindo de inspiração para mim como profissional.

Ao meu orientador, Dr. Wilton Pereira da Silva, pela confiança, ensinamentos e contribuições para minha formação acadêmica.

A banca examinadora.

Aos meus amigos Raphael Almeida e Ana Júlia, que estiveram ao meu lado me apoiando e auxiliando durante o tempo de trabalho, proporcionando momentos de alegria.

À minha dupla de trabalho Sâmela Leal, por todo companheirismo durante esses dois anos, os dias de trabalho foram mais animados e produtivos com a sua presença.

Aos colegas que a UFCG proporcionou: Amanda, Tamires, Vírginia, Mylena, Semirames, Renata, Anastácia, Manoel, Victor, Shênia pelos laços de amizade ali criados que vou levar por toda a minha vida.

As professoras Dr.^a Ângela Maria Santiago, Dr.^a Pablícia Oliveira Galdino e Dr.^a Márcia Ramos Luiz que foram minhas professoras durante a graduação por todo incentivo e apoio para realização desse mestrado.

A CNPQ e a UFCG pelo apoio financeiro e estrutural para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS.....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xiii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT.....	xv
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.1.1 Objetivo Geral.....	2
1.1.2 Objetivos Específicos.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 PRODUÇÃO BRASILEIRA DE MAÇÃ.....	4
2.2 MAÇÃS.....	6
2.2.1 Maçã Fuji.....	8
2.3 PERDAS PÓS-COLHEITA.....	9
2.4 CONSERVAÇÃO DOS ALIMENTOS.....	10
2.4.1 Resfriamento.....	11
2.4.1.1 Armazenamento refrigerado de algumas frutas.....	13
2.4.2 Congelamento.....	14
2.5 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS.....	14
2.5.1 Densidade e massa específica.....	15
2.5.2 Condutividade térmica.....	15
2.5.3 Difusividade térmica.....	16
2.5.4 Calor específico.....	16
2.5.5 Coeficiente de transferência convectivo de calor.....	17
2.6 EQUAÇÃO DE TRANSPORTE E DE DIFUSÃO.....	17
2.6.1 Equação de difusão.....	18
2.7 ESTADO DA ARTE.....	20
3. METODOLOGIA.....	23
3.1 LOCAL DE ESTUDO.....	23
3.2 MATÉRIA-PRIMA.....	23
3.3 ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS.....	23

3.3.1	Seleção/Higienização.....	24
3.3.2	Determinação das propriedades físicas.....	24
3.3.2.1	Densidade e massa específica.....	24
3.3.2.2	Raio (R) e diâmetro (D).....	24
3.3.2.3	Teor de umidade.....	25
3.3.3	Resfrigeração.....	25
3.3.4	Determinação das propriedades térmicas.....	26
3.3.4.1	Difusividade térmica (α).....	26
3.3.4.2	Calor específico (c_p).....	27
3.4	SOLUÇÕES DA EQUAÇÃO DE DIFUSÃO PARA ESFERA.....	27
3.4.1	Solução analítica da equação de difusão para a esfera.....	27
3.4.1.1	Posição do sensor.....	30
3.4.1.2	Método da Bissecção.....	31
3.4.2	Posição no qual o valor se aproxima o máximo da difusividade obtida pela equação de Riedel.....	32
3.4.3	Solução numérica da equação de difusão para a esfera.....	33
3.5	MODELO PROPOSTO.....	37
3.5.1	Problema inverso: Determinação de parâmetros.....	37
3.5.1.1	Cálculo médio e desvio de medidas similares.....	38
3.5.2	Problema direto: Solver.....	38
3.6	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, FÍSICO-QUÍMICA E COMPOSTOS BIOATIVOS DA MAÇÃ.....	39
3.6.1	Caracterização física.....	39
3.6.1.1	Umidade e sólidos totais.....	39
3.6.1.2	Atividade de água (A_w).....	39
3.6.1.3	Sólidos solúveis totais (SST).....	39
3.6.1.4	Perfil de textura.....	39
3.6.1.5	Cor.....	40
3.6.1.6	Perda de massa.....	40
3.6.2	Caracterização físico-química.....	40
3.6.2.1	pH.....	40
3.6.2.2	Acidez total titulável (ATT).....	40
3.6.2.3	<i>Ratio</i> (SST/ATT).....	41

3.6.2.4	Resíduo mineral fixo (cinzas).....	41
3.6.3	Caracterização de compostos bioativos.....	41
3.6.3.1	Vitamina C.....	41
3.6.3.2	Compostos fenólicos totais.....	41
3.6.3.3	Antocianinas totais e flavonoides totais.....	42
3.6.3.4	Teores de clorofila (a, b e total).....	43
3.7	ARMAZENAMENTO.....	43
3.8	ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	43
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	44
4.1	PROBLEMA INVERSO: DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DA MAÇÃ.....	44
4.1.1	Experimento 1.....	44
4.1.2	Experimento 2.....	46
4.1.3	Distribuição do erro experimental.....	49
4.1.4	Valores médios de α e h	51
4.2	PROBLEMA DIRETO: SIMULAÇÃO PARA MAÇÃ.....	52
4.2.1	Problema direto: simulação para maçãs com outras dimensões.....	53
4.2.1.1	Condição 1.....	53
4.2.1.2	Condição 2.....	54
4.3	SOLUÇÃO ANALÍTICA.....	55
4.3.1	Experimento 1.....	55
4.4	CARACTERIZAÇÕES FÍSICAS, FÍSICO-QUÍMICAS E COMPOSTOS BIOATIVOS NA MAÇÃ <i>IN NATURA</i>	57
4.5	CARACTERIZAÇÕES FÍSICAS, FÍSICO-QUÍMICAS E COMPOSTOS BIOATIVOS DAS MAÇÃS DURANTE ARMAZENAMENTO.....	62
5.	CONCLUSÃO.....	78
	REFERÊNCIAS.....	79
	APÊNDICES.....	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 -	Representação esquemática simplificada dos componentes mais importantes das maçãs.....	7
Figura 2.2 -	Maçã variedade Fuji.....	8
Figura 3.1 -	Etapas das principais etapas a serem realizadas no desenvolvimento do projeto.....	23
Figura 3.2 -	Modelo esquemático do processo de resfriamento da maçã.....	25
Figura 3.3 -	Sistema montado com maçã na temperatura ambiente para coleta dos dados da cinética de seu resfriamento.....	26
Figura 3.4 -	Esfera de raio R	28
Figura 3.5 -	(a) Malha uniforme com N volumes de controles com espessura Δr ; (b) Volume de controle P e seus vizinhos a oeste (W) e leste (E).....	34
Figura 4.1 -	Pontos experimentais 1 da cinética de resfriamento da maçã.....	44
Figura 4.2 -	Gráfico da cinética de resfriamento da maçã simulada pelo modelo proposto, utilizando os valores de α e h obtidos na otimização para o experimento 1.....	46
Figura 4.3 -	Pontos experimentais 2 da cinética de resfriamento da maçã.....	47
Figura 4.4 -	Gráfico da cinética de resfriamento da maçã simulada pelo modelo proposto, utilizando os valores de α e h obtidos na otimização para o experimento 2.....	48
Figura 4.5 -	Distribuição de erro do experimental: a) experimento 1; b) experimento 2.....	49
Figura 4.6 -	Gráficos de histograma para o erro experimental: a) experimento 1; b) experimento 2.....	50
Figura 4.7 -	Distribuição de temperatura no interior da maçã em diferentes de tempo: a) 3250 s; b) 5000 s; c) 6500 s; d) 7500 s; e) 14000 s.....	52
Figura 4.8 -	Gráfico da simulação da cinética de resfriamento da maçã “Fuji” com raio $R = 0,045$ m.....	53
Figura 4.9 -	Gráfico da simulação da cinética de resfriamento da maçã “Fuji” com raio $R = 0,0301$ m.....	54
Figura 4.10 -	Ajuste da Equação (3.13c) aos dados experimentais da cinética de resfriamento da maçã.....	55

Figura 4.11 - Ajuste da Equação (3.15a) para determinação da posição do termopar na esfera equivalente através do método da Bisseção.....	56
Figura 4.12 - Maçãs com 21 dias de armazenamento na temperatura ambiente.....	63
Figura 4.13 - Maçãs com 42 dias de armazenamento na temperatura de refrigeração (4 °C).....	64
Figura 4.14 - Perda de massa fresca das maçãs no decorrer do armazenamento na temperatura de ambiente.....	66
Figura 4.15 - Perda de massa fresca das maçãs no decorrer do armazenamento na temperatura de refrigeração (4 °C)	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Principais estados brasileiros produtores de maçã safra 2016/2017.....	4
Tabela 2.2 -	Números de áreas colhidas e produção da maçã brasileira por safra.....	5
Tabela 2.3 -	Principais destinos da exportação brasileira de maçã.....	5
Tabela 2.4 -	Composição nutricional da maçã tipo “Fuji” por 100g.....	9
Tabela 2.5 -	Perdas pós-colheitas de algumas frutas e hortaliças no Brasil.....	10
Tabela 4.1 -	Propriedades térmicas determinadas para maçã no experimento 1.....	45
Tabela 4.2 -	Propriedades térmicas determinadas para maçã no experimento 2.....	47
Tabela 4.3 -	Valores médios de α e h e das suas incertezas (95,4%) de confiabilidade..	51
Tabela 4.4 -	Caracterização física e físico-químicas da maçã <i>in natura</i>	57
Tabela 4.5 -	Caracterização dos compostos bioativos da cascas de maçã <i>in natura</i>	60
Tabela 4.6 -	Teor de umidade, sólidos totais e atividade de água das maçãs durante armazenamento ambiente e refrigerado (4 °C).....	62
Tabela 4.7 -	Perfil instrumental de textura das maçãs durante armazenamento ambiente e refrigerado (4 °C).....	65
Tabela 4.8 -	Coordenadas cromáticas (L*, a*, b* e C*) das cascas das maçãs durante armazenamento ambiente e refrigerado (4 °C).....	68
Tabela 4.9 -	Teor de sólidos solúveis totais, pH e acidez titulável das maçãs durante armazenamento ambiente e refrigerado (4 °C).....	69
Tabela 4.10 -	Relação sólidos solúveis totais/acidez total titulável (SST/ATT) e teor de cinzas das maçãs durante armazenamento ambiente e refrigerado (4 °C)..	71
Tabela 4.11 -	Teor de ácido ascórbico (vitamina C) das maçãs durante seu armazenamento ambiente e refrigerado (4 °C).....	73
Tabela 4.12 -	Compostos fenólicos totais, antocianinas e flavonoides totais nas cascas das maçãs durante armazenamento ambiente e refrigerado (4 °C).....	74
Tabela 4.13 -	Clorofila ‘a’, ‘b’ e total presente nas cascas das maçãs durante armazenamento ambiente e refrigerado (4 °C).....	77

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

A_w, A_p, A_e, B	Constantes da equação de difusão discretizada
AT	Antocianinas Totais
ATT	Acidez total titulável (% ácido málico)
a_w	Atividade de água (adimensional)
A_l, B_l	Parâmetros de ajuste
Bi	Número de Biot
CFT	Compostos Fenólicos Totais
C_n	Coefficientes da solução analítica
c_p	Calor específico ($J.Kg^{-1}.K^{-1}$)
FT	Flavonóides Totais
h	Coefficiente de transferência convectiva ($m.s^{-1}$)
h_H	Coefficiente convectivo de transferência de calor ($W.m^{-2}.K^{-1}$)
k	Condutividade térmica ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
r	Posição dentro da esfera (m)
r_w, r_p, r_e	Posições no volume de controle: interface oeste, ponto nodal P e interface leste (m)
R	Raio da esfera (m)
R^2	Coefficiente de determinação
SST	Sólidos Solúveis Totais (°Brix)
T, T_0	Temperatura e temperatura inicial (K)
T_b, T_∞	Temperaturas: no limite e ar de refrigeração (K)
T_w, T_P, T_E	Temperaturas nos volumes de controle: oeste, ponto nodal P, leste (K)
t	Tempo de resfriamento (s)
X	Teor de umidade (g/100g)
α	Difusividade térmica ($m^2.s^{-1}$)
μ_1, μ_n	Raízes características da equação
ρ	Densidade ($Kg.m^{-3}$)
χ^2	Função qui-quadrado

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo determinar as propriedades termofísicas de maçãs durante o seu resfriamento, bem como avaliar o efeito do tempo de armazenamento sobre a manutenção das características físicas, químicas e de compostos bioativos das mesmas mantidas em temperatura ambiente e refrigerada. A maçã “Fuji” foi submetida a uma cinética de resfriamento em um refrigerador doméstico por convecção natural e suas propriedades termofísicas foram determinadas pressupondo a geometria de uma esfera equivalente. A posição do termopar dentro da maçã não foi determinada durante o experimento sendo, portanto, desconhecida e determinada fazendo-se o uso de soluções analíticas e numéricas. Um *software* (Solver) de condução de calor foi desenvolvido para a solução do problema inverso, usando a geometria esférica da equação de difusão e a condição de contorno do terceiro tipo, obtendo-se os valores das propriedades térmicas e as suas incertezas. O problema direto consistiu na solução da equação diferencial parcial, onde a partir do solver desenvolvido foi possível simular a cinética de resfriamento de um ponto previamente especificado dentro da esfera. E por fim foi feito um estudo de armazenamento das maçãs na temperatura ambiente (25 °C) e na temperatura de refrigeração (4 °C) sendo avaliados os parâmetros físicos, químicos de compostos bioativos em intervalos de 7 dias até que as mesmas apresentassem podridões. Os valores médios da difusividade e do coeficiente convectivo de transferência de calor foram $\alpha = (1,42 \pm 0,11) \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e $h = (3,196 \pm 0,039) \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, respectivamente. Sendo o valor da difusividade obtido pelo modelo proposto, mostrou-se coerente com o valor obtido a partir da estimativa da correlação de Riedel ($\alpha = 1,38 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). O ajuste da curva simulada aos pontos experimentais apresentou coeficiente de determinação (R^2) maior que 0,99 e baixos valores da função qui-quadrado (χ^2). A posição do termopar na esfera equivalente por solução numérica e analítica foi de $r = 6,6 \text{ mm}$ e $r = 7,7 \text{ mm}$, respectivamente. Apresentando uma diferença de 14,3% entre os dois métodos utilizados. Observou-se no decorrer do armazenamento nas duas condições estudadas aumento nos teores de sólidos solúveis totais, acidez total titulável, atividade de água, umidade, antocianinas, flavonoides e nas coordenadas cromáticas (a^* , b^* e C^*); redução nos valores de pH, firmeza, coordenada cromática (L^*), vitamina C, compostos fenólicos totais e teores de clorofila (“a”, “b” e total). Portanto, pode-se concluir que a geometria esférica e a condição de contorno do terceiro tipo foi adequada para descrever o processo de transferências de calor para a maçã e a refrigeração apresentou-se como uma técnica viável na conservação pós colheita das maçãs, possibilitando um armazenamento de até 42 dias com maior preservação dos compostos bioativos.

Palavras-chave: Otimização, Solução numérica e analítica, Transferência de calor.

ABSTRACT

The present work aimed to determine the thermophysical properties of apples during cooling, as well as to evaluate the effect of storage time on the maintenance of physical, chemical and bioactive compounds characteristics kept at room temperature and refrigerated. The Fuji apple was subjected to cooling kinetics in a natural convection household refrigerator and its thermophysical properties were determined assuming the geometry of an equivalent sphere. The position of the thermocouple inside the apple was not determined during the experiment and is therefore unknown and determined using analytical and numerical solutions. A heat conduction software (Solver) was developed to solve the inverse problem, using the spherical geometry of the diffusion equation and the boundary condition of the third type, obtaining the values of the thermal properties and their uncertainties. The direct problem was the solution of the partial differential equation, where from the developed solver it was possible to simulate the cooling kinetics of a previously specified point within the sphere. Finally, a storage study of apples at room temperature (25 °C) and refrigeration temperature (4 °C) was carried out. The physical and chemical parameters of bioactive compounds were evaluated at 7-day intervals until they were rotten. The mean values of diffusivity and convective coefficient of heat transfer were $(\alpha = 1.42 \pm 0.11) \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ and $(\alpha = 3.196 \pm 0.039) \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, respectively. Since the diffusivity value obtained by the proposed model was consistent with the value obtained from the Riedel correlation estimate ($\alpha = 1.38 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). The adjustment of the simulated curve to the experimental points presented coefficient of determination (R^2) greater than 0.99 and low values of the chi-square function (χ^2). The thermocouple position in the equivalent sphere by numerical and analytical solution was $r = 6.6 \text{ mm}$ and $r = 7.7 \text{ mm}$, respectively. Presenting a difference of 14.3% between the two methods used. It was observed during the storage under the two studied conditions an increase in the total soluble solids contents, total titratable acidity, water activity, humidity, anthocyanins, flavonoids and chromatic coordinates (a^* , b^* and C^*); reduction in pH, firmness, color coordinate (L^*), vitamin C, total phenolic compounds and chlorophyll (“a”, “b” and total). Therefore, it can be concluded that the spherical geometry and the boundary condition of the third type was adequate to describe the heat transfer process for the apple and cooling was a viable technique for postharvest conservation of apples, allowing a storage up to 42 days with greater preservation of bioactive compounds.

Keywords: Optimization, Numerical and Analytical Solution, Heat Transfer.

1. INTRODUÇÃO

As maçãs pertencem a uma das culturas de frutas mais cultivadas em todo o mundo, apresentando também elevada importância econômica. A colheita desses frutos deve ser realizada no estágio de maturação adequado, pois este é um fator determinante para a sua vida de prateleira e qualidade. Maçãs colhidas em maturidade avançada são mais propensas a lesões mecânicas, vida de armazenamento curta, maior suscetibilidade ao desenvolvimento de agentes patogênicos e distúrbios fisiológicos, causando sérias perdas pós-colheita. A aplicação de técnicas de conservação é imprescindível para a diminuição da sua atividade metabólica e consequentemente o aumento da sua vida de prateleira (SILVA et al., 2017; SOUZA et al., 2017; GANAI et al., 2018; CHO et al., 2020).

Existem diversos métodos de conservação alimentos que atendem ao mesmo objetivo que é manter os mesmos adequados ao consumo pelo maior tempo possível, e um deles é o resfriamento que consiste em uma rápida diminuição de calor após a colheita e é aplicado para reduzir o tempo de exposição do fruto em temperaturas inapropriadas. Neste processo está envolvida a transferência de calor, onde um mecanismo de condução atua dentro do produto e uma convecção se desenvolve fora do produto (GUADARRAMA et al., 2017; GALO et al., 2018).

Analisar os gradientes de temperatura durante o transporte dos frutos é um dos principais aspectos de segurança da qualidade a serem implementadas pelas empresas, evitando-se alterações das condições de conservação destes produtos nos diferentes elos da cadeia produtiva (CARULLO et al., 2009; RUIZ-GARCIA e LUNADEI, 2011; SPAGNOL et al., 2018).

Os conhecimentos das propriedades térmicas dos alimentos nesses processos são essenciais para a simulação da variação de temperatura em seu interior, estimativas do tempo de resfriamento e carga térmica do produto. No entanto, as determinações de propriedades termofísicas são muitos difíceis de estimar devido à grande variação da composição do fruto e temperatura. Estimar estas propriedades utilizando soluções exatas, métodos aproximados semi-analíticos ou numéricos é uma alternativa viável para a determinação, eliminando, assim, os efeitos da composição e da temperatura (RESENDE e SILVEIRA Jr., 2002; USDA, 2008; BARBIN et al., 2010).

Para Silva et al. (2019a), o uso dos valores dessas propriedades para simular outros processos de conservação como a pasteurização, resfriamento e congelamento ficam comprometidos devido à falta de informações sobre a precisão dos resultados obtidos, já que

não é tão comum determinar propriedades térmicas de produtos agrícolas, incluindo suas incertezas (SILVA et al., 2019b).

Portanto, o presente trabalho justifica-se por apresentar uma abordagem sobre as propriedades termofísicas de uma fruta pressupondo a geometria de uma esfera equivalente, e não de sua geometria real, durante o processo de resfriamento, que é pouco comum na literatura quando se trata de geometrias não convencionais fazendo-se o uso de soluções exatas (Analíticas) e aproximadas (Numéricas). Será desenvolvido um *software* (Solver) de condução de calor para a geometria esférica, e utilizado um otimizador, que serão capazes de determinar os parâmetros termofísicos a partir de dados experimentais da cinética de resfriamento do produto estudado.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Determinar as propriedades termofísicas de maçãs e avaliar o efeito do tempo de armazenamento sobre as características físicas, químicas e compostos bioativos nas temperaturas ambiente e de refrigeração.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar a cinética de resfriamento, considerando as maçãs com geometria esférica e pressupondo os parâmetros do processo constante;
- Usar o método de separação de variáveis para obter a solução analítica da equação de calor em coordenadas esféricas;
- Utilizar o método dos volumes finitos para obter uma solução numérica da equação de difusão (equação de condução de calor) em coordenadas esféricas, pressupondo condições de contorno de terceiro tipo (Condição de Cauchy);
- Utilizar um *software* de otimização para determinar os parâmetros termofísicos do produto bem como suas incertezas utilizando, dados experimentais da cinética de resfriamento;
- Determinar as propriedades físicas da maçã: massa unitária, volume, massa específica, raio (R), teor de umidade, coeficiente de transferência convectivo de calor,

condutividade térmica, difusividade térmica, calor específico e a incerteza de cada uma destas propriedades estudadas;

- Predizer a distribuição de temperatura no interior da maçã, utilizando-se modelos matemáticos a serem desenvolvidos e a duração do tempo de resfriamento para maçãs da mesma variedade, mas com dimensões diferentes;
- Realizar a caracterização física (umidade, sólidos totais, atividade de água, perfil de textura, cor, perda de massa e sólidos solúveis totais (SST)), físico-química (acidez total titulável (ATT), pH, *ratio* (SST/ATT) e cinzas) e compostos bioativos (vitamina C, compostos fenólicos totais (CFT), antocianinas totais (AT), flavonoides totais (FT) e clorofila) das maçãs durante seu armazenamento a temperatura ambiente e sob refrigeração;
- Selecionar o melhor tempo de armazenamento das maçãs nas temperatura ambiente e refrigeração.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 PRODUÇÃO BRASILEIRA DE MAÇÃ

A produção brasileira de maçã se expandiu significativamente nas últimas décadas. De acordo com os dados do ABPM (KITS, 2018), os estados com maiores produções desta fruta encontram-se na região Sul (Tabela 2.1), dentre eles a maior produção da safra 2016/2017 foi registrada no estado de Santa Catarina. Além da tradição de mais de trinta anos no cultivo comercial da fruta, alguns fatores, como a produção de variedades modernas, disponibilidade de terras, regiões com condições climáticas favoráveis, bem como preocupações com produtividade e com a infraestrutura de embalagem e conservação, transformaram o Brasil em um grande produtor mundial (BITTENCOURT et al., 2011).

Tabela 2.1 – Principais estados brasileiros produtores de maçã na safra 2016/2017.

Estado	Produção (Toneladas)
Santa Catarina	638.351
Rio Grande do Sul	577.774
Paraná	29.700

Fonte: KITS (2018).

Na Tabela 2.2 pode-se observar a produção de maçã desde a safra de 2015 até a estimativa de produção total para a safra do ano de 2018 no Brasil. No entanto, a maior parte da produção brasileira provém de três cultivares, sendo elas: Gala, Fuji e *Golden Delicious*. A Gala, representa 46% do total produzido sendo a primeira a ser colhida no mês de fevereiro; a Fuji representa 45% da produção e sua colheita ocorre em abril; *Golden Delicious* é colhida em março, representando cerca de 6% da produção total e outras com 3% que representam os demais cultivares (COMPARINI, 2009).

Tabela 2.2 – Números de áreas colhidas e produção da maçã brasileira por safra.

Safra	Área colhida (ha)	Produção (toneladas)
2015/2016	33.981	1.049.251
2016/2017	33.244	1.254.614
2017/2018*	-	Entre 1.000.000 a 1.100.000

Fonte: KITS (2018) *Estimativa da ABMP, maio de 2018.

Segundo a Associação Brasileira dos Produtores Exportadores de Frutas e Derivados (2016), a produção de maçã é uma das mais importantes frações do agronegócio da fruticultura brasileira, sendo responsável pela geração de empregos e renda para produtores de grandes e pequenas propriedades rurais. Devido à grande produção, conforme apresentado na Tabela 2.2, uma boa parte dessa produção é exportada para alguns países, principalmente aqueles da Tabela 2.3, onde estão listados os países no qual a produção brasileira foi destinada na safra 2016/2017.

Tabela 2.3 – Principais destinos da exportação brasileira de maçã na safra 2016/2017.

Países	Quantidade (kg)
Bangladesh	18.813.883
Irlanda	8.593.938
Portugal	5.729.483
Reino Unido	4.189.774
França	3.141.672
Rússia	2.307.312
Espanha	2.190.716
Emirados Árabes Unidos	2.148.384
Países Baixos	2.001.129
Suécia	1.614.971

Fonte: KITS (2018).

Segundo o ABPM (KITS, 2017), o consumo *per capita* anual de maçã no Brasil é de 3,2 kg, enquanto na Europa, o continente que mais compra a fruta brasileira, o consumo é de 35 kg considerando o mesmo período analisado. O consumo de frutas frescas no mercado interno está em torno de 600 mil toneladas anuais, para uma capacidade de produção superior

a 900 mil toneladas nas próximas safras, demonstrando-se que a produção brasileira já supera o seu consumo interno (KITS, 2017).

2.2 MAÇÃS

A maçã é um dos quatro frutos mais consumidos no mundo. Este fruto pode ser consumido principalmente *in natura*, ou em outras formas que envolvam processos tecnológicos, ou seja, na forma de suco concentrado, vinagre, desidratada e em bebidas fermentadas, a exemplo da sidra. Além de ser uma fruta rica em fenóis, substâncias pécnicas e celulose, que juntamente com a lignina constituem as fibras alimentares (AIRES, 2016). Segundo Khanizadeh et al. (2008) as maçãs são uma excelente fonte de vários compostos fenólicos e também possuem alta capacidade antioxidante total. As propriedades antioxidantes das maçãs dependem altamente da sua variedade, práticas agrícolas, clima, condições de armazenamento e processamento. As maçãs mais abundantes em compostos fenólicos tendem consequentemente a ter uma maior atividade antioxidante (KALINOWSKA et al., 2014).

As frutas da macieira têm uma grande variedade e composição equilibrada, sendo moderadamente energética e bem proporcionada em açúcar e ácido, dando-lhe um sabor agradável. A composição química da maçã varia de acordo com a cultivar, região de produção e práticas hortícolas (PIRES et al., 2017).

A colheita de maçãs no Brasil ocorre durante o verão e grande parte da produção é armazenada para a disponibilização aos consumidores ao longo do ano. Portanto, é indispensável realizar a colheita no momento ideal para que os frutos preservem sua qualidade e reduzam as perdas da produção durante e após o armazenamento. Maçãs colhidas antes do ponto ideal de colheita (imaturas), apesar de exibirem boa conservação pós-colheita de alguns aspectos de qualidade, apresentam características indesejáveis como menor tamanho, pouca coloração, sabor e aroma e maior suscetibilidade a alguns distúrbios fisiológicos. Por outro lado, maçãs colhidas em estágios mais avançados de maturação são mais suscetíveis à ocorrência de danos mecânicos, podridões e alguns distúrbios fisiológicos (MAGRIN et al., 2017).

O acúmulo de antocianinas, pigmentos que conferem a cor avermelhada em maçãs, é maior em dias com alta luminosidade e noites frias, nas semanas que antecedem o início da maturação e colheita. Por isso, as colheitas de maçãs bicolores tendem a ser retardada quando as condições climáticas são desfavoráveis ao acúmulo de antocianinas. Esse procedimento implica em colheita de maçãs mais maduras, com maior taxa de produção de etileno, menor

firmeza de polpa, maior incidência de rachaduras peduncular e menor potencial de armazenagem (ARGENTA et al., 2015).

Na Figura 2.1 estão esquematizados os componentes mais importantes das maçãs.

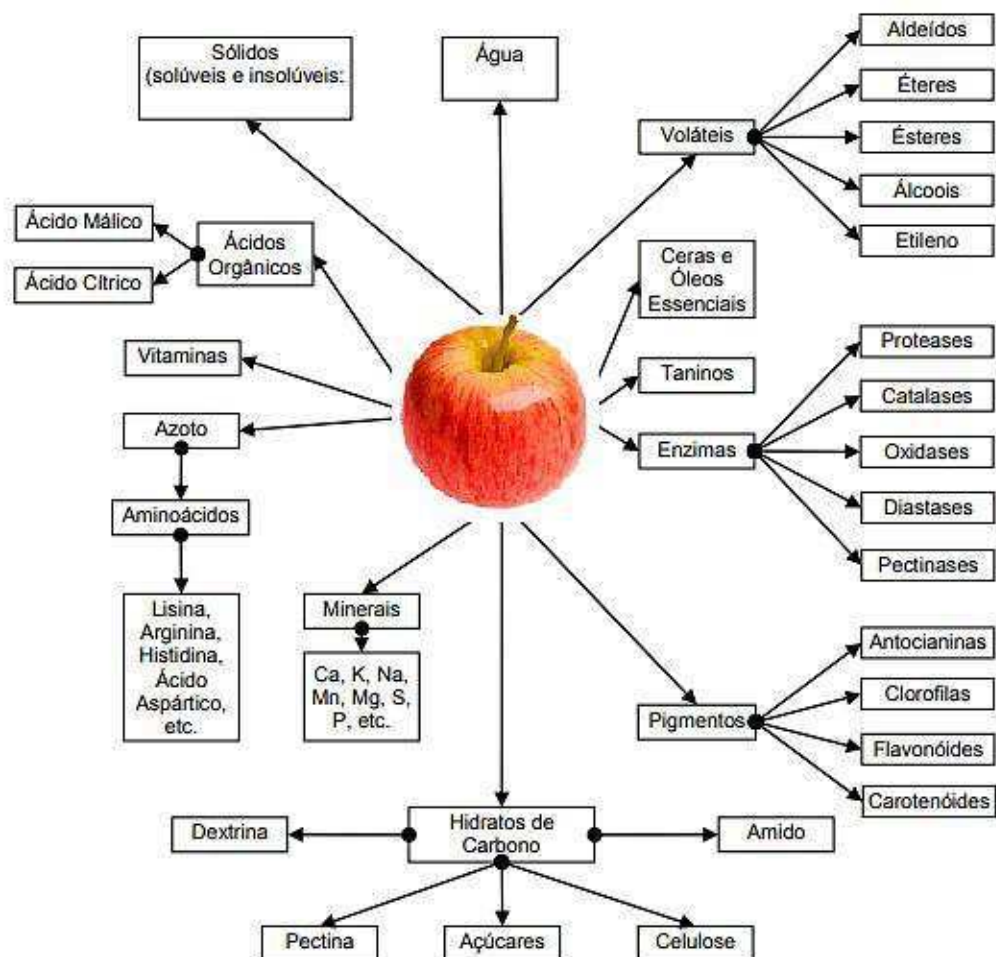


Figura 2.1- Representação esquemática simplificada dos componentes mais importantes presentes nas maçãs. Fonte: Adaptado de FRANCO (2014).

As maçãs são conhecidas por possuírem um sabor agradável e ligeiramente ácido, por outro lado, o sabor das maçãs é também adocicado, devido ao teor elevado em açúcares que evidenciam nomeadamente frutose, galactose, sacarose, glucose e sorbitol. A conjugação entre estes dois fatores contribui para a diferenciação do sabor das suas diversas variedades (FRANCO, 2014; FELICIANO et al., 2010).

A maçã é uma fruta da época, com colheita em um curto período específico, assim como seu tempo de armazenamento devido à alta taxa de respiração e processo de amadurecimento rápido, podendo ser consumido como *in natura*, processado em suco, espumante, doces, geléia

e/ou compota. Além disso, pode ser seco para prolongar a vida de prateleira e disponibilidade ao longo do ano (HORUZ et al., 2018).

2.2.1 Maçã Fuji

A cultivar Fuji foi obtida através de um cruzamento entre as variedades “*Ralls Janet*” x “*Delicious*”, realizado no Japão, por H. Niitsu no ano de 1939. Sua introdução no Brasil deu-se por volta do ano de 1967. As frutas, vermelho estriadas sobre fundo verde, são doces, com baixa acidez, crocantes e muito suculentas, muito apreciadas pelo consumidor brasileiro. As cultivares do grupo “*Fuji*” destacam-se pelos atributos de qualidade, especialmente aroma, sabor, crocância e suculência (MACEDO, 2014; IGLESIAS et al., 2012; CAMILO e DENARDI, 2006).

A maçã da variedade Fuji (*Malus Communis*) é excelente para prevenir e manter a taxa de colesterol em níveis aceitáveis, através da ingestão de uma unidade por dia. Esse efeito é devido ao alto teor de pectina, encontrada na casca. Também tem um efeito acentuado para emagrecimento, pois a pectina dificulta a absorção das gorduras, da glicose e elimina o colesterol (OLIVEIRA, 2017).

Na Figura 2.2 está apresentada a maçã variedade Fuji e sua morfologia.

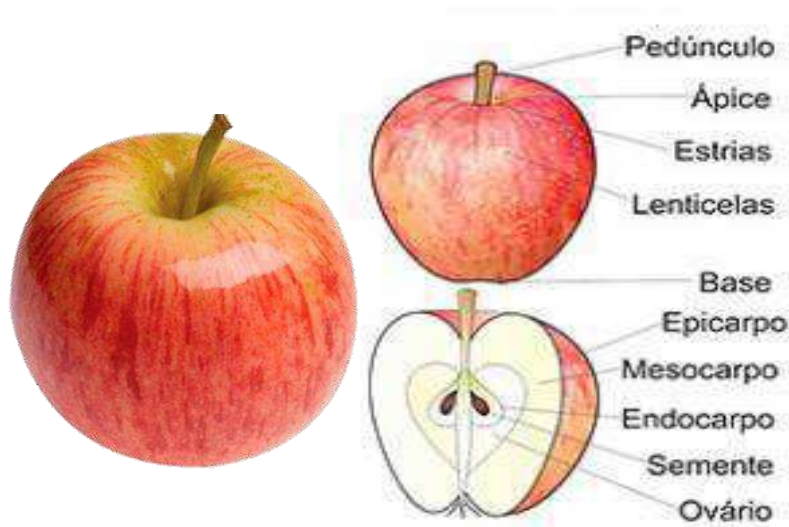


Figura 2.2 - Maçã variedade Fuji. Fonte: Borges Filho (2018).

Os principais constituintes da maçã tipo “Fuji” estão expressos na Tabela 2.4, os quais são valores médios de vitaminas e minerais de acordo com a Tabela Brasileira de Composição dos Alimentos (TACO, 2011).

Tabela 2.4 – Composição nutricional da maçã tipo “Fuji” por 100g.

Composição	Quantidade
Umidade (g/100g)	84,3
Proteína (g)	0,3
Lipídeos (g)	*
Carboidratos (g)	15,2
Fibra Alimentar (g)	1,3
Cinzas (g)	0,2
Cálcio (mg)	2
Magnésio (mg)	2
Energia (KJ)	232

Fonte: TACO, 2011. *-traços

O mercado consumidor é altamente exigente para a qualidade das frutas, o que demanda um beneficiamento capaz de selecionar criteriosamente as frutas com potencial de mercado *in natura*, com bases em infestações de doenças e em defeitos físicos, o que tem elevado nos últimos anos o percentual de descarte da produção nacional (SEBRAE, 2018).

2.3 PERDAS PÓS-COLHEITA

De modo geral, na produção total de frutas no Brasil são perdidos cerca de 30%, as quais estão relacionadas com às alterações físicas e químicas após a colheita, como modificações da textura, aroma, sabor e cor (GALO et al., 2014). A maior parte do desperdício em países desenvolvidos se dá no final da cadeia produtiva; já os países em desenvolvimento apresentam a maior perda na produção, sendo que o Brasil reproduz ambos os cenários, com um desperdício que vai de 30 a 50% dos alimentos, dependendo do produto (FERNANDES et al., 2016).

As perdas se iniciam na colheita e ocorrem em todos os elos da cadeia produtiva, ou seja, durante a embalagem, o transporte, o armazenamento e em nível de atacado, varejo e consumidor. Portanto, o produtor deve gerenciar a cadeia produtiva, enfatizando os principais aspectos que interferem na qualidade do produto (CENCI, 2006). O conhecimento da fisiologia pós-colheita do fruto é de grande importância para que se tenham subsídios técnicos que visem

à ampliação do tempo de armazenamento sem alterar suas características físicas, organolépticas e nutricionais (ANTUNES et al., 2003).

Encontra-se, na Tabela 2.5, o percentual de perdas de algumas frutas no Brasil, segundo os dados fornecidos pelo manual de perdas pós-colheita de frutas e hortaliças da EMBRAPA (2018).

Tabela 2.5 - Perdas pós-colheitas de algumas frutas e hortaliças no Brasil.

Produto	Percentual de perdas (%)
Abacaxi	23,7
Banana	40,1
Mamão	30,4
Manga	27,5
Alface	42,5
Tomate	40,5
Batata	23,7
Mandioca	32,8

Fonte: EMBRAPA (2018).

Além das perdas quantitativas registradas na pós-colheita, as perdas qualitativas dos produtos poderão comprometer seu aproveitamento e rentabilidade, principalmente para o mercado externo, especialmente exigente em qualidade, tanto no seu aspecto interno como externo (aparência) (EMBRAPA, 2018). As principais razões dessas perdas podem ser atribuídas à falta de mão-de-obra qualificada, ao desconhecimento do ponto ideal de colheita para alguns frutos, ao uso de tecnologias inadequadas de colheita, armazenamento, embalagem e transporte (SOARES, 2014). Para garantir maior competitividade no mercado de exportação de frutas, é necessário produzir em épocas adequadas à comercialização, assim como garantir a qualidade dos frutos que atendam aos padrões internacionais de segurança alimentar (SOUZA et al., 2011; HOJO et al., 2009).

2.4 CONSERVAÇÃO DOS ALIMENTOS

Frutas e hortaliças quando são colhidas possuem um metabolismo acelerado, após a colheita continuam ocorrendo transformações químicas que promovem a utilização de reservas e os compostos orgânicos ricos em energia, como açúcares e amido, com o fim de manutenção

da respiração e da produção de energia necessárias para se manterem vivas. De todos os processos metabólicos que podem ocorrer após a colheita, a respiração é o mais importante, sendo a temperatura o fator de maior influência (TERUEL, 2008).

Após a colheita, a vida útil das frutas é limitada pela deterioração fisiológica, devido ao seu amadurecimento, desenvolvimento de patógenos e perda de água, causando enrugamento e murchamento, prejudicando assim, o seu valor comercial. Cerca de 50% das perdas de produtos hortícolas frescos se deve à falta do tratamento pós-colheita adequado. Por exemplo, a diminuição da temperatura até os níveis recomendados para cada produto é o procedimento mais adequado para que se aumente a vida útil dos produtos (ROCHA et al., 2016; TERUEL et al., 2003).

Para melhorar o transporte a longa distância, as vendas de frutas e legumes e melhorar o desempenho econômico em toda a cadeia, um fator-chave é garantir que estes sejam transportados em ambiente com condições climáticas favoráveis durante toda a jornada de modo a prolongar o seu prazo de validade. A preservação da qualidade dos alimentos perecíveis é determinada principalmente pela atmosfera modificada, pois reduz as trocas gasosas no que se refere à respiração do produto. Os baixos níveis de O₂ e a elevação de CO₂ no ambiente de atmosfera modificada colaboram para a redução do efeito de O₂ no metabolismo dos frutos pela temperatura (HAN et al., 2016; FALCÃO et al., 2017). Muitos métodos de conservação são utilizados na tentativa de reduzir os efeitos adversos durante a pós-colheita (SILVA et al., 2017). Dentre eles a refrigeração e o congelamento.

2.4.1 Refrigeração

O resfriamento é a operação unitária na qual a temperatura do alimento é reduzida entre -1 e 8 °C. É usada para reduzir as taxas de variações biológicas e microbiológicas e, assim, prolongar a vida de prateleira dos alimentos frescos e processados. Isso causa mínimas mudanças em suas características sensoriais e nas propriedades nutricionais dos alimentos e, como resultado, os alimentos resfriados são percebidos pelos consumidores como convenientes, fáceis de preparar, de alta qualidade, “saudáveis”, “naturais” e “frescos” (FELLOWS, 2006).

Um aumento na temperatura de 10 °C induz tipicamente de 2 a 3 vezes maior a taxa de deterioração dos frutos, por isso a importância de se resfriar as frutas rapidamente após a colheita (WU et al., 2018). A taxa de resfriamento e uniformidade dos produtos hortícolas dependem de seu tamanho, forma e propriedades térmicas, mas também da taxa de fluxo de ar,

temperatura de resfriamento e acessibilidade do ar de resfriamento para o produto (DEFRAEYE et al., 2014).

Durante o resfriamento, o calor é conduzido do interior do alimento para a superfície e removido pelo meio externo (FELLOWS, 2006). Os principais fatores que influem na taxa de transferência de calor, segundo Fellows (2006) são:

- i) A condutividade térmica do alimento;
- ii) A área superficial do alimento, onde ocorre a transferência de calor;
- iii) A distância que o calor deve percorrer dentro do alimento;
- iv) A diferença de temperatura entre o alimento e o meio;
- v) O efeito isolante da camada de ar que envolve o alimento;
- vi) A embalagem, se o alimento possuir, pois, constitui uma barreira adicional ao fluxo de calor.

A refrigeração geralmente é associada a outras técnicas de conservação, como a fermentação ou pasteurização. As temperaturas empregadas dependem diretamente da natureza do alimento, pois cada alimento tem uma temperatura ótima de refrigeração. O resfriamento deve ser realizado de maneira rápida, principalmente nos alimentos perecíveis que apresentam grande variação de respiração ao longo da vida (VASCONCELOS e MELO FILHO, 2010).

O ciclo de resfriamento depende de vários fatores, tais como: tamanho, forma e propriedades térmicas da fruta, temperatura do ar, umidade relativa do ar, circulação de ar, luz, composição da atmosfera e velocidade do ar. No entanto, diferentes velocidades do ar afetam a distribuição de temperatura do produto durante o resfriamento por convecção forçada de frutas individuais (ELANSARI e MOSTAFA, 2018).

O armazenamento refrigerado reduz perdas pós-colheita e prolonga o período pós-colheita dos frutos, possibilitando sua oferta na entressafra com melhor remuneração ao produtor. A redução da temperatura constitui o principal fator que influencia a manutenção da qualidade dos frutos durante o armazenamento, visto que a temperatura utilizada é baixa e quase nunca inferior a 0°C, obtendo, uma conservação por dias ou semanas, dependendo do produto (SOARDI et al., 2017; STEFFENS et al., 2007).

2.4.1.1 Armazenamento refrigerado de algumas frutas

Vários métodos de armazenamento vêm sendo desenvolvidos e aprimorados para prolongar a vida útil dos frutos, como por exemplo, a utilização de biofilmes comestíveis, atmosfera modificada, absorvedores de etileno entre outros. No entanto, em muitos casos, apenas o armazenamento sob refrigeração, tornam-se eficazes para prolongar a vida útil do fruto (SILVA, 2017).

O armazenamento refrigerado representa a principal técnica utilizada para a manutenção e extensão do período pós-colheita de frutas e hortaliças. Segundo Nath et al. (2011) na maioria das vezes, os consumidores ao comprarem frutas e hortaliças (depois da compra se não forem consumir imediatamente) mantêm esses produtos sob condições refrigeradas.

Octavia e Choo (2017) avaliaram morangos durante o armazenamento refrigerado a 4 °C por um período de 6 dias, observaram que do dia 0 ao dia 6 de armazenamento, a percentagem de perdas dos compostos bioativos variou de 17,5% a 88,1% (antocianina), 24,7% a 55,5% (ácido ascórbico) e 21,3% a 93,2% (folato), e ressaltaram que é melhor consumir os morangos frescos após a colheita, uma vez que a redução dos três compostos bioativos ocorreu mesmo após um dia de armazenamento refrigerado.

Mannozi et al. (2018) em seus estudos com mirtilos revestidos com quitosana, observaram o seu armazenamento refrigerado a 4 °C por um período de 14 a 80 dias e concluíram que o armazenamento apresentou efeito positivo principalmente na manutenção da firmeza e no aumento da atividade antioxidante do fruto.

Nath et al. (2011) armazenaram brócolis em temperatura de refrigeração e ambiente. Estes autores observaram que brócolis sob condições ambientais, apresentaram maiores perdas na clorofila, teor de ácido ascórbico, b-caroteno e antioxidante total, que as amostras sob condições refrigeradas (4 °C) as quais nesta temperatura foram capazes de reter fitoquímicos máximos durante o armazenamento por até 144 h.

Oliveira et al. (2017) trabalharam com goiabas revestidas durante o armazenamento refrigerado a 0,5 °C por um período de 10 dias, perceberam que as goiabas apresentaram teores mais elevados de sólidos solúveis, tornaram-se mais ácidas e não apresentaram diferença na sua coloração.

Zhao et al. (2019) avaliaram o armazenamento de cerejas em temperaturas entre 0 a 5 °C e concluíram que, o armazenamento nestas temperaturas pode efetivamente prolongar a vida útil retardando as mudanças de cor, reduzindo a taxa de respiração e melhorando a qualidade

sensorial da fruta, podendo portanto ser uma estratégia promissora para melhorar a qualidade e o transporte da cereja após a colheita.

2.4.2 Congelamento

Para as frutas e hortaliças, a manutenção da temperatura adequada é o fator mais importante e mais simples, para retardar os processos de metabolismo que permanecem após a sua colheita e que conduzem à rápida deterioração. Em uma cadeia do frio, a vida útil, a qualidade e a segurança de frutas e hortaliças sofrem enorme influência dos fatores ambientais em todas as etapas da logística, especialmente da temperatura e da umidade relativa (SPAGNOL et al., 2018).

O congelamento rápido produz cristais de gelo extra e intracelular finos e uniformes e causa pouco dano às estruturas dos alimentos; o congelamento lento produz cristais de gelo extracelulares grandes e irregulares, o que leva à destruição da estrutura muscular e reduz a aceitabilidade sensorial dos alimentos (SUN et al., 2019a). De acordo com Zilio et al. (2018), o tempo de congelamento é essencial para obter um projeto adequado do sistema de refrigeração.

2.5 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

As propriedades termofísicas estão entre aquelas de maior importância no processo de transferência de calor e seu conhecimento é fundamental, pois está associado às diversas formas de transformação industrial, bem como às variadas formas de utilização em diferentes produtos (BONDUELLE et al., 2015).

Determinar as propriedades termofísicas, condutividade e difusividade térmica, calor específico, coeficiente de transferência convectiva de calor e densidade são muito importantes para projetar o tratamento térmico aplicado a qualquer alimento. Além disso, essas propriedades são essenciais em estudos de modelagem, simulação e otimização de processos industriais, principalmente quando os custos operacionais bem como a qualidade e segurança alimentar são os principais elementos a serem avaliados (COSTA et al., 2018).

Essas propriedades são de suma importância na elaboração, otimização e implementação de projetos. Ainda que existam modelos de predição teórica presentes na literatura, no qual são baseados na composição centesimal do alimento é comum que tais

modelos apresentem erros. Assim, em muitos casos, vê-se a indispensabilidade da obtenção de dados de forma prática, bem fundamentados e confiáveis (MOURA et al., 2016a).

Uma outra forma de também se determinar as propriedades termofísicas dos alimentos são pelos métodos inversos, que são baseados na solução analítica ou numérica do problema de transferência de calor transiente, seguido por um procedimento de otimização para obter os parâmetros nele considerados. No entanto, essa metodologia é complexa devida a grande quantidade de informação necessária (ZABALAGA et al., 2016).

2.5.1 Densidade e massa específica

A densidade dos materiais não é constante e altera-se com a temperatura, pois ambientes com elevadas temperaturas tendem a reduzir a densidade dos materiais o que também acontece com a diminuição da pressão (FELLOWS, 2006).

Para a simulação de processos, há a necessidade da quantificação das mudanças da massa específica do alimento durante o seu processamento. Em operações como secagem e refrigeração, no qual ocorrem transferências simultâneas de calor e massa, estes causam variações nos volumes dos alimentos, tanto de contração, devido à perda de umidade, como de expansão devido à dilatação de gases e/ou líquidos ou à formação de poros no material, transformando a sua massa (SILVA, 2014).

2.5.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica dos alimentos e a sua relação com o teor de água é uma das propriedades de transporte mais importantes e necessárias para a modelagem de processos envolvendo trocas de massa e energia. Esta é considerada uma das propriedades mais influentes durante o processamento que envolve a transferência de calor e é altamente dependente da composição e temperatura do alimento. A condutividade térmica mede a capacidade de um material para conduzir energia térmica relativamente à sua capacidade de armazenamento (GUINÉ et al., 2016).

A condutividade térmica é inerente a uma substância e está relacionada à condução de calor e ao desempenho de qualquer sistema. A quantidade de calor conduzida e/ou transferida dentro de um gradiente de temperatura a uma espessura unitária perpendicular a uma área de superfície unitária é chamada de condutividade térmica. É denotado pelo símbolo k ou λ e a

unidade é W/m.K. Condutividade térmica depende principalmente do volume de partículas, tamanho e forma das partículas e da temperatura das partículas (MAHBUBUL, 2019).

De acordo com Giarola et al. (2016), a fração de água presente no alimento durante o congelamento afeta muito sua condutividade térmica, devido à condutividade do gelo que é quatro vezes maior do que a da água líquida.

2.5.3 Difusividade térmica

A difusividade térmica é de fundamental importância, por ser uma propriedade de transporte necessária na modelagem e nos cálculos de transferência de calor transiente. Esta é essencial para a simulação durante o resfriamento no interior de um alimento, tornando-se de grande valia para a indústria, pois sem esta propriedade termofísica não seria possível calcular a transferência de calor nas substâncias (FEITOSA et al., 2017).

Materiais de difusividade alta irão responder mais rapidamente às mudanças na temperatura ambiente, enquanto os materiais de menor difusividade irão responder mais lentamente, levando mais tempo para chegar à nova condição de equilíbrio (GOMES et al., 2016).

2.5.4 Calor específico

O calor específico é uma propriedade termofísica primária, que pode ser usada para calcular outras propriedades, como o coeficiente de expansão térmica e a compressibilidade isotérmica (LIN e KEDZIERSKI, 2018).

É importante determinar a quantidade de energia a ser adicionada ou removida no processo de aquecimento e resfriamento. O calor específico dá uma indicação do gasto de energia, que em um processo contínuo, tende a influenciar o tamanho do equipamento. O calor específico do alimento é significativamente afetado pela quantidade de água e estado físico. Um alimento congelado com alto teor de água pode ter valores de calor específico aproximadamente metade dos valores correspondentes em um no estado fresco (GIAROLA et al., 2016).

2.5.5 Coeficiente de transferência convectiva de calor

Os modelos baseados nas leis de Fourier, de resfriamento de Newton e de Stefan-Boltzmann tratam, respectivamente, de processos de condução, convecção e radiação. Estes constituem as três formas pela qual o calor é transferido entre dois corpos que se encontram em temperaturas distintas (GARCIA et al., 2017). A transferência de calor por convecção, geralmente, desempenha um papel decisivo no processo geral de transferência de calor (SUN et al., 2019b).

A obtenção da temperatura na superfície da amostra é necessária para determinar o coeficiente de transferência de calor. No entanto, as medições usando métodos experimentais convencionais, com termômetros e termopares são feitas com relativa dificuldade, devido à colocação e fixação de sensores. Esses dispositivos podem alterar as propriedades de fluxo na superfície do produto. Quando a superfície tem formato simples e pequeno, apenas alguns termopares são necessários para a medição. No entanto, quando existem formas mais complexas, o número de termopares deve ser aumentado para descrever adequadamente a distribuição do coeficiente de transferência de calor. Este fato pode agravar as mudanças nas propriedades do fluxo de ar na superfície do produto (PEREIRA et al., 2017).

A principal desvantagem dessa e de outras estimativas experimentais das propriedades térmicas é a heterogeneidade alimentar. A capacidade térmica pode ser determinada por calorimetria adiabática ou diferencial. Os produtos alimentícios são misturas heterogêneas de diferentes componentes e, portanto, requerem uma amostra grande o suficiente para determinar a capacidade de calor. Além disso, em termos de estrutura, as diferenças nas propriedades térmicas são significativamente dependentes do tipo de alimento (CORNEJO et al., 2016).

2.6 EQUAÇÃO GERAL DE TRANSPORTE E DE DIFUSÃO

A equação geral de transporte Equação (2.1) para um volume de controle infinitesimal é dado por (PATANKAR, 1980; MALISKA, 2004):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\lambda\Phi) + \nabla \cdot (\lambda \vec{v}\Phi) = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + S^\Phi \quad (2.1)$$

onde:

Φ é a variável dependente de interesse;

λ e Γ^Φ são coeficientes de transporte;

\vec{v} é o vetor velocidade do meio;

S^Φ é o termo fonte;

$\nabla \cdot$ é o operador matemático divergente.

Na Equação (2.1), a variação temporal da grandeza de interesse em um volume infinitesimal é representado pelo primeiro termo da equação (termo transiente). A variação da grandeza na unidade de tempo em consequência do seu movimento é dada pelo segundo termo (termo advectivo). A variação da grandeza na unidade de tempo por difusão é representada pelo terceiro termo (termo difusivo). Por fim, o quarto termo (termo fonte) fornece a taxa de geração da grandeza dentro de um volume de controle (ATAÍDE, 2014).

2.6.1 Equação de difusão

A equação que descreve o fenômeno de difusão para uma variável genérica é obtida da Equação (2.1) fazendo o vetor velocidade do meio $\vec{v} = 0$, já que neste caso o meio encontra-se em repouso, ou seja, com velocidade nula e a variação da grandeza dentro do volume de controle ocorre unicamente por difusão. Assim, a equação de difusão Equação (2.2) pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\lambda\Phi) = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + S^\Phi \quad (2.2)$$

Considerando $\lambda = \rho c_p$, $\Phi = T$ e $\Gamma^\Phi = k$ na equação de difusão, obtém-se a equação de difusão de calor Equação (2.3), dado por:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + S^\Phi \quad (2.3)$$

onde:

T é a temperatura no instante t em um volume infinitesimal [K];

k é a condutividade térmica do meio [W/m.K];

ρ é a densidade do meio [Kg/m³];

c_p é o calor específico a pressão constante [J/kg.K];

S^Φ é o termo fonte.

Nos casos em que a densidade (ρ) e o calor específico à pressão constante (c_p) forem constantes, isto é, a variação de temperatura durante o resfriamento não alteram significativamente estas propriedades, a Equação (2.3), pode ser escrita da seguinte forma Equação (2.4):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\alpha \nabla T) + S^\Phi \quad (2.4)$$

Dessa forma α representa a difusividade térmica e é expressa pela Equação (2.5):

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2.5)$$

A Equação (2.4) pode ser escrita em coordenadas esféricas de acordo com Incropera et al. (2008).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\alpha r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(\alpha \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\alpha \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + S \quad (2.6)$$

A fim de descrever o processo de resfriamento, considerando a hipótese que a difusão seja unidimensional na direção do eixo r , devido à sua simetria e supondo que não há geração de energia.

$$\frac{\partial T}{\partial \phi} = \frac{\partial T}{\partial \theta} = 0 \text{ e } S = 0 \quad (2.7)$$

A equação de difusão unidimensional em coordenadas esféricas para o processo de resfriamento pode ser escrita através da substituição das condições dadas pela Equação (2.7) na Equação (2.6):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\alpha r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.8)$$

onde:

T – é a temperatura [K];

t- é o tempo de resfriamento [s];

r – define uma posição dentro da esfera [m];

α – é difusividade térmica, expressa pela Equação (2.5) [m²/s].

2.7 ESTADO DA ARTE

Silva et al. (2019a), propuzeram um modelo para determinar as propriedades térmicas de produtos agrícolas durante seu resfriamento, considerando uma esfera. Estes autores observaram que o modelo proposto apresentou resultados para os valores de propriedades térmicas de morangos compatíveis com os valores obtidos por outros modelos disponíveis na literatura. Além disso, o modelo proposto possibilitou determinar a incerteza de cada propriedade térmica estudada, bem como o coeficiente de correlação entre essas propriedades, tornando possível apresentar um gráfico para a banda de confiança da cinética de resfriamento de um ponto dentro do produto.

Silva et al. (2019b) estudaram um modelo numérico bidimensional para determinar as propriedades térmicas (suas incertezas e a matriz de covariância) de produtos com geometria cilíndrica no caso de em estudo com pepino, utilizando um conjunto de dados experimentais obtidos durante seu resfriamento, poderem concluir que os valores médios dos parâmetros são compatíveis com resultados da literatura para o mesmo produto, e os indicadores estatísticos qui-quadrado e coeficiente de determinação foram $\chi^2 = 2,6981 \times 10^{-3}$ e $R^2 = 0,9991$, respectivamente. Por outro lado, devido à matriz de covariância calculada durante o processo de otimização, foi possível simular uma nova curva de resfriamento para o pepino semelhante, mas com outras dimensões, incluindo uma faixa de confiança que permitiu avaliar, por inspeção gráfica, a precisão dessa nova simulação.

Silva et al. (2018) objetivaram, em seus estudos, propor um modelo bidimensional para descrever a condução de calor dentro de um cilindro finito representando uma banana madura com casca. Ao determinarem as propriedades termofísicas, puderam concluir que a resistência superficial ao fluxo de calor deve ser considerada, ou seja, a condição de contorno apropriada

é realmente do terceiro tipo, ao descrever o resfriamento de uma banana inteira com casca. Por outro lado, o valor da difusividade térmica das bananas com casca obtida neste trabalho, considerando o modelo proposto ($\alpha = 1,45 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$) foi ligeiramente inferior ao valor obtido na literatura ($\alpha = 1,50 \times 10^{-7} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$), considerando o modelo simplificado (método de cilindro infinito e inclinação). Então, o efeito geométrico e a técnica de otimização para determinar parâmetros tornam-se importantes, se maior precisão for necessária nos cálculos.

Queiroz (2016), ao realizar a modelagem e simulação do resfriamento com ar forçado da laranja valência adotando-se a geometria de esfera equivalente, observou uma grande influência do coeficiente de transferência convectiva de calor na cinética de resfriamento. Quanto maior o valor deste parâmetro, maiores são os gradientes de temperatura do leito e mais rápido ocorre o resfriamento das laranjas. O autor concluiu que o tempo de resfriamento máximo do processo foi inferior a 30000s, não sendo suficiente para se ter mudanças na massa total do produto, garantindo que não haja ressecamento das laranjas e nem a perda de qualidade.

Pessôa et al. (2016), ao estudarem teoricamente o resfriamento de frutos de forma arbitrária via método integral com particular referência a banana, laranja, morango e limão, concluíram que o tempo de resfriamento para obter 7°C no centro do fruto para banana e limão foi de 4000s, para morango 600s, enquanto que para a laranja atingiu 7,92°C após 4000s. A distribuição de temperatura em laranja e limão ocorreu de forma homogênea na direção do raio, enquanto a distribuição de temperatura em banana e morango foi bidimensional. Portanto, concluíram que a dependência cinética do resfriamento dos frutos foi verificada apenas com a forma da fruta e não com as propriedades termofísicas e temperatura inicial e de equilíbrio dos frutos.

Han et al. (2016) simularam o fluxo de ar e a transferência de calor em uma maçã utilizando diferentes velocidade de fluxos de ar e aplicando um modelo CFD tridimensional (3D) abrangente. Assim, pode-se prever as variações temporais e espaciais de temperatura durante o resfriamento do produto, pressupondo a geometria real da maçã e não de uma esfera equivalente. Os resultados obtidos indicaram que uma velocidade de fluxo de ar superior a 2,5 m/s não afeta fortemente os fluxos de resfriamento e transferência de calor através da superfície da maçã. E que o calor respiratório teve pouca influência nas variações de temperatura da fruta, comparando a diferença de temperatura em um determinado momento com e sem contabilizar o calor respiratório durante a simulação.

Erdogdu et al. (2014) visaram em seus estudos, retardar o processo de amadurecimento de bananas maduras e imaturas com casca (variedade *Cavendish*). Para evitar perdas, utilizaram

a refrigeração como técnica de conservação submetendo as bananas a uma temperatura de 13 °C. Contudo, as propriedades térmicas das bananas, tais como difusividade térmica e condutividade térmica foram determinadas experimentalmente usando apenas o primeiro termo da solução analítica da equação de difusão unidimensional para um cilindro infinito. Os autores usaram o conhecido método de inclinação. Este método consiste na aplicação do logaritmo ao primeiro termo da série que representa a solução analítica da equação de difusão unidimensional, ajustando-a aos pontos experimentais da região linear. Os valores da difusividade térmica mudaram de 0,303 para 0,338 $\text{Wm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ e o da condutividade térmica mudaram de $1,442 \times 10^{-7}$ para $1,500 \times 10^{-7} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$. Os conhecimentos dessas comparações tornam-se importantes para projetar e aperfeiçoar um processo de refrigeração.

Silva et al. (2011), a partir de métodos de soluções analíticas e numéricas da condução de calor, determinaram o coeficiente de transferência convectiva de calor de morangos, no qual foi considerado a geometria de uma esfera equivalente com a posição do termopar não definida na geometria real, e sim determinado por otimização. O resultado obtido numericamente para o coeficiente de transferência convectiva de calor, dado por $h_H = 12,2 \text{ W m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, concorda com valor encontrado por meio de solução analítica e a diferença entre eles foi de apenas 2,9%. A vantagem do método numérico utilizado nesta pesquisa foi descrever toda a cinética de resfriamento, e não apenas a parte em que o número de Fourier é maior que 0,2, usando apenas o primeiro termo da solução analítica.

Silva et al. (2010), ao determinarem o coeficiente de transferência convectiva de calor no fruto da figueira com aproximação geométrica de uma esfera equivalente, a posição exata do termopar dentro do fruto foi determinada. Os resultados obtidos no presente estudo sugeriram que a metodologia pode ser usada para descrever o resfriamento de muitos produtos com geometria esférica. Portanto, a simulação numérica com o termopar na posição correta dentro da esfera equivalente fornece as informações necessárias para o completo conhecimento da cinética de resfriamento da fruta do figo.

No presente trabalho o resfriamento será utilizado como técnica de conservação através da remoção do calor em uma maçã variedade “Fuji”, no qual será considerada a geometria de uma esfera equivalente com a posição do termopar não definida na geometria real da maçã. A partir dos dados experimentais da cinética do seu resfriamento serão obtidas as propriedades termofísicas do fruto em estudo, fazendo-se o uso de soluções analíticas e numéricas, através do desenvolvimento de um *software* de condução de calor para a geometria esférica, e um otimizador que serão capazes de determinar os parâmetros termofísicos e as suas incertezas.

3. METODOLOGIA

3.1 LOCAL DE ESTUDO

O presente trabalho foi desenvolvido nos seguintes laboratórios: Transferência de Calor e Massa (LTCM) da Unidade Acadêmica de Física (UAF), Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA) da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola (UAEA), Engenharia Bioquímica (LEB) da Unidade Acadêmica de Engenharia Química (UAEQ) e de Propriedades Físicas (LPF) da Unidade Acadêmica de Engenharia de Alimentos (UAELi) ambos da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), no estado da Paraíba.

3.2 MATÉRIA-PRIMA

A matéria-prima utilizada no desenvolvimento desse trabalho consistiu de frutos da macieira variedade Fuji (*Malus communis*) adquiridos no município de Campina Grande – PB.

3.3 ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DOS ENSAIOS

Na Figura 3.1 encontram-se as principais etapas de desenvolvimento do projeto.

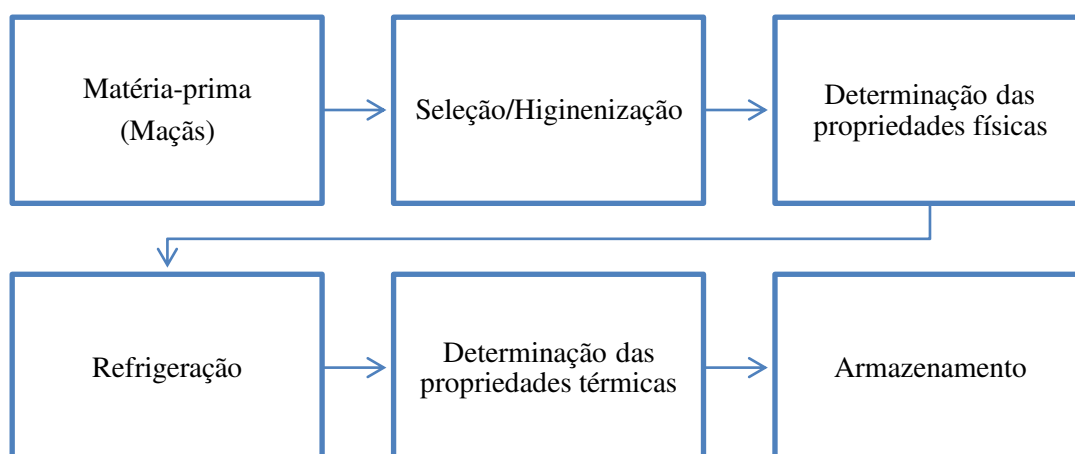


Figura 3.1 – Principais etapas realizadas no estudo de resfriamento de maçãs.

3.3.1 Seleção/Higienização

Os frutos com casca, sem lesões e danos físicos foram selecionados, lavados e higienizados com hipoclorito de sódio em solução (200 mg.L⁻¹ de cloro livre).

3.3.2 Determinação das propriedades físicas

3.3.2.1 Densidade e massa específica

A partir da seleção dos frutos, uma amostra foi pesada e, em seguida, imersa em uma proveta graduada de volume conhecido. A partir da diferença dos volumes antes e após da imersão, foi determinado seu volume, no qual, foi utilizado para calcular a densidade e massa específica dos maçã pela seguinte Equação (3.1):

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (3.1)$$

onde:

ρ é a densidade expressa em [kg.m⁻³];

m é a massa dos frutos [kg];

V é volume deslocado pela imersão dos frutos [m³].

3.3.2.2 Raio (R) e diâmetro (D)

O raio e o diâmetro da esfera equivalente de cada fruto foi determinado a partir do deslocamento de volume empregando-se a Equação (3.2):

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 \quad (3.2)$$

onde:

R é o raio da esfera [m].

Sendo que $D = 2R$, é o diâmetro da esfera equivalente, que fica determinado ao se determinar o raio.

3.3.2.3 Teor de umidade

O teor de umidade foi determinado conforme o método descrito pelo Instituto Adolfo Lutz (BRASIL, 2008), no qual aproximadamente 10 g da amostra foi levada à estufa a 105 °C durante 24 horas, realizado em triplicata.

3.3.3 Refrigeração

Foi utilizado em um refrigerador doméstico da marca comercial Brastemp® com temperatura ajustada em torno de 4 °C. O resfriamento ocorreu por convecção natural.

A Figura 3.2 apresenta um esquema base de como o experimento foi realizado no refrigerador.

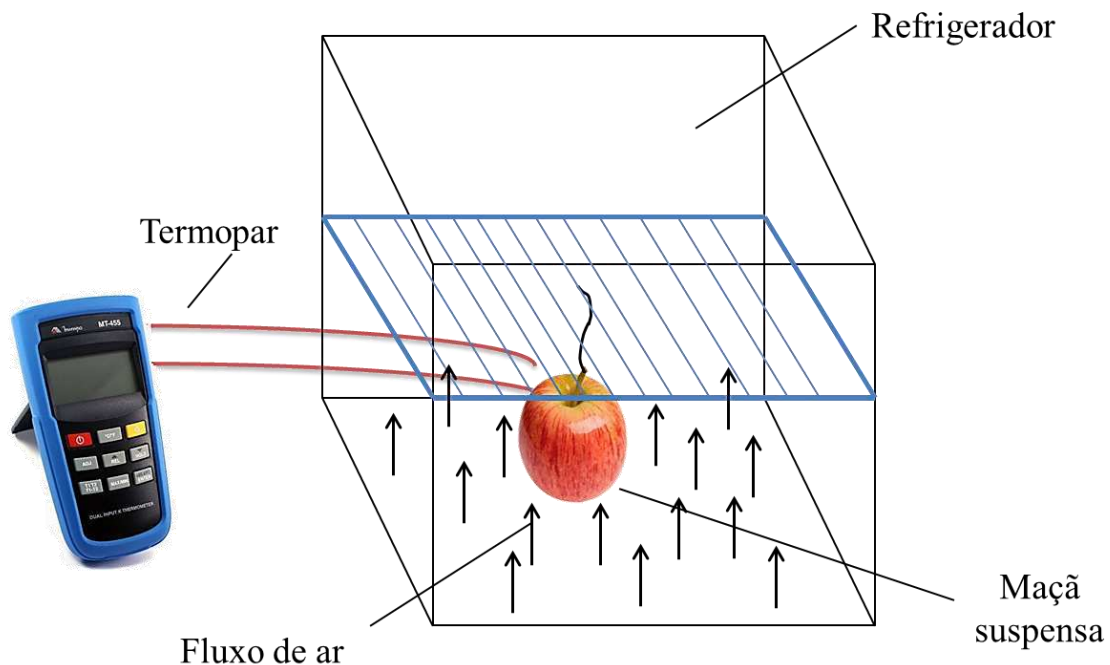


Figura 3.2 – Modelo esquemático do processo de resfriamento da maçã.

A maçã foi suspensa dentro do refrigerador para que as transferências de calor ocorressem por convecção e não por condução. Para o controle de temperatura foi utilizado um

termopar na esfera equivalente, no qual sua posição não foi determinada na geometria real e sim, após a realização do experimento por otimização para a esfera equivalente.

Os dados foram coletados por meio de equipamento eletrônico, *Cole Parmer*, com faixa de temperatura de -180 a 370 °C e precisão de 0,1 °C que recebeu e armazenou as informações dos valores de temperatura dentro da fruta tirada no intervalo regular de 1 segundo até que a fruta, inicialmente à temperatura ambiente, entrasse em equilíbrio com a temperatura do refrigerador, Figura 3.3.

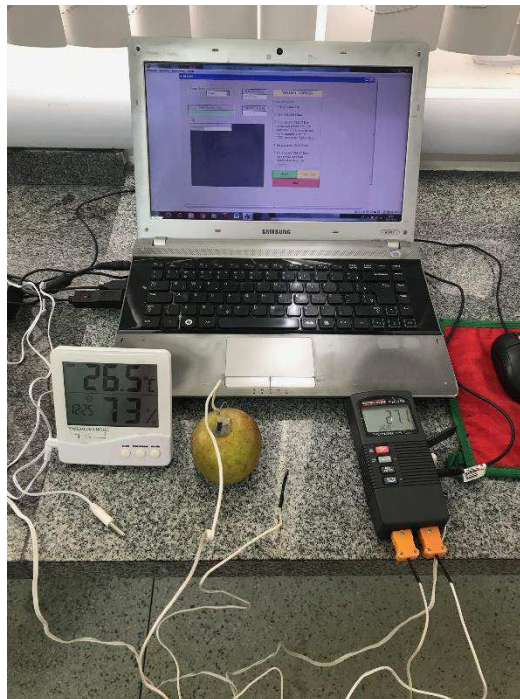


Figura 3.3 - Sistema montado com maçã na temperatura ambiente para coleta dos dados da cinética de seu resfriamento.

3.3.4 Determinação das propriedades térmicas

3.3.4.1 Difusividade térmica (α)

A difusividade térmica (α) foi estimada através da correlação de Riedel de acordo com (RIEDEL, 1969; DINCER, 1995). A partir da seguinte Equação (3.3):

$$\alpha = 8,8 \times 10^{-8} + 6,0 \times 10^{-8} X \quad (3.3)$$

onde:

X é o teor de umidade dado em base úmida. Vale salientar que, quando X é dado na forma decimal, α é dado em $[m^2.s^{-1}]$.

3.3.4.2 Calor específico (c_p)

O calor específico (c_p) foi estimado a partir do modelo de Fikiin utilizado por Dincer (1995) e sua expressão é dada pela Equação (3.4):

$$c_p = 1,381 + 2,930X \quad (3.4)$$

onde:

X é o teor de umidade dado em base úmida. Vale salientar que, quando X é dado na forma decimal, c_p é dado em $[J.kg^{-1}.K^{-1}]$.

3.4 SOLUÇÕES DA EQUAÇÃO DE DIFUSÃO PARA ESFERA

3.4.1 Solução analítica da equação de difusão para esfera

Foram consideradas as seguintes hipóteses para a obtenção da solução analítica:

- A esfera com raio equivalente R (m).
- Esfera homogênea e isotrópica.
- A distribuição da temperatura no interior da esfera deve apresentar simetria radial e deve ser inicialmente uniforme.
- A condução é o único mecanismo de transporte de calor dentro esfera.
- O raio da esfera equivalente é constante durante o resfriamento.
- Os parâmetros de processo são constantes durante o resfriamento.
- A condição de contorno é de terceiro tipo, e o coeficiente convectivo de transferência de calor é constante.
- A perda de massa e o termo fonte devido ao calor da respiração são insignificantes durante o resfriamento da fruta.

Diante das hipóteses expostas, a equação de difusão tem solução analítica para várias geometrias simples, incluindo a esfera. A geometria de uma esfera de raio R foi utilizada para apresentar a solução analítica da equação de difusão esta apresentada na Figura 3.4.

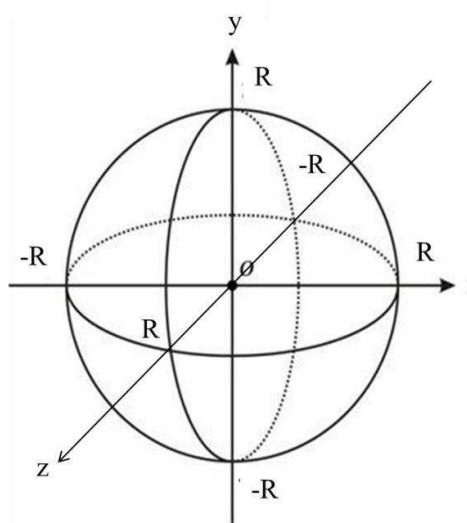


Figura 3.4 – Esfera de raio R.

Para as hipóteses estabelecidas, a equação de difusão unidimensional de calor em coordenadas esféricas pode ser escrita de acordo com a Equação (3.5):

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right), \quad (3.5)$$

Ou, dividindo a Equação (3.5) por ρc_p :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\alpha r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.6)$$

onde:

T é a temperatura [K];

t é o tempo de resfriamento [s];

r define uma posição dentro da esfera [m];

α é a difusividade térmica definida pela equação (2.5).

Para as Equações (3.5) e (3.6) a condição limite do terceiro tipo podem ser expressa, respectivamente, pelas Equações (3.7) e (3.8):

$$-k \frac{\partial T}{\partial t} = h_H (T_b - T_\infty) \quad (3.7)$$

ou dividindo a Equação (3.7) por ρc_p :

$$-\alpha \frac{\partial T}{\partial r} = h(T_b - T_\infty) \quad (3.8)$$

onde:

$$h = \frac{h_H}{(\rho c_p)} \text{ expresso em [m.s}^{-1}\text{];}$$

T_b é a temperatura na fronteira [K];

T_∞ é o valor da temperatura do ar [K];

h_H é o coeficiente convectivo de transferência de calor [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$];

α é a difusividade térmica [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$] definida pela equação (2.5).

Para a esfera homogênea com raio (R) constante, com temperatura inicialmente uniforme T_0 e temperatura de equilíbrio T_∞ , a solução $T(r,t)$ da Equação (3.6) com condição de contorno dada pela Equação (3.8) é obtida por separação de variáveis (LUIKOV, 1968; CRANK, 1992), como mostra a Equação (3.9).

$$T(r,t) = T_\infty + (T_0 - T_\infty) \sum_{n=1}^{\infty} C_n \exp\left(-\mu_n^2 \frac{\alpha}{R^2} t\right) \times \frac{R}{\mu_n r} \text{sen}\left(\frac{\mu_n}{R} r\right) \quad (3.9)$$

Esta equação possibilita conhecer a temperatura em qualquer posição r a qualquer instante. Por outro lado, nesta equação, o coeficiente C_n é definido na Equação (3.10):

$$C_n = \frac{4[\text{sen}\mu_n - \mu_n \cos\mu_n]}{2\mu_n - \text{sen}(2\mu_n)}, \quad (3.10)$$

em que μ_n são raízes da equação característica para a esfera, dada pela Equação (3.11):

$$Bi = 1 - \frac{\mu_n}{\text{tg}\mu_n}, \quad (3.11)$$

em que Bi é o número de Biot, definido pela Equação (3.12):

$$Bi = \frac{hR}{\alpha}. \quad (3.12)$$

Na Equação (3.9), $T(r, t)$ é a temperatura na posição r é definido a partir do centro da esfera, no tempo t .

3.4.1.1 Posição do sensor

Uma simplificação para a Equação (3.9) é obtida reescrevendo-a para $n=1$, o que implica $\text{supor } F_0 > 0,2$, através da Equação (3.13a) ou (3.13b):

$$T(r, t) = T_\infty + (T_0 - T_\infty) B_1 \exp(-A_1 t), \quad (3.13a)$$

ou ainda:

$$\frac{T(r, t) - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = B_1 \exp(-A_1 t) \quad (3.13b)$$

onde, muitas vezes, é feita a seguinte simplificação:

$$T^* = \frac{T(r, t) - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = B_1 \exp(-A_1 t), \quad (3.13c)$$

Os parâmetros A_1 e B_1 da Equação (3.13b) podem ser determinados por ajuste de curva a dados experimentais, sem os pontos iniciais da cinética de resfriamento, isto é, a partir de instantes em que $F_0 > 0,2$. Pois se apenas os dados experimentais correspondentes a um número

de Fourier $F_0 > 0.2$ forem analisados, a cinética de resfriamento será bem descrita pela Equação (3.9) com o somatório dado por apenas um termo. Deve-se observar que:

$$A_1 = \mu_1^2 \frac{\alpha}{R^2}, \quad (3.14)$$

e

$$B_1 = \frac{4R[\text{sen}\mu_1 - \mu_1 \cos\mu_1]}{r[2\mu_1^2 - \mu_1 \text{sen}(2\mu_1)]} \text{sen}\left(\frac{\mu_1}{R} r\right). \quad (3.15)$$

ou ainda, pode ser feita a seguinte ordenação dos termos:

$$f(r) = B_1 r (2\mu_1^2 - \mu_1 \text{sen}(2\mu_1)) - 4R(\text{sen}\mu_1 - \mu_1 \cos\mu_1) \text{sen}\left(\frac{\mu_1 r}{R}\right) \quad (3.15a)$$

Uma vez conhecido o valor de A_1 por ajuste de curvas (Equação 3.14) e conhecida a difusividade térmica (α), estimada pela Equação de Riedel (Equação 3.3), pode-se determinar a raiz μ_1 da Equação (3.14). Por outro lado, B_1 também é determinado por ajuste de curvas. Assim, a Equação (3.15a) permite estimar a posição (r) onde o termopar seria colocado na esfera equivalente. Deve-se observar que a Equação (3.15a) é uma equação transcendental, e foi resolvida pelo *software* LABFit (SILVA e SILVA, 2018), que possui os recursos necessários para resolver este tipo de equação usando o método da Bissecção.

3.4.1.2 Método da Bissecção

Para se calcular analiticamente raízes de funções polinomiais de grau até 4 existem vários métodos. Apesar de existir amplas funções de grau superior a quatro assim como as funções transcendentais, no qual não possibilitam a utilização de métodos diretos para o cálculo de suas raízes. Sendo assim para estes casos, devemos utilizar métodos diretos que encontrem uma solução aproximada, ou seja, processos iterativos, que buscam convergir para a raiz e um deles é o método de bissecção (SOUZA et al., 2018).

O método de bissecção é o método de busca em arcos que divide um intervalo repetidamente e seleciona um subintervalo no qual uma raiz deve estar para processamento posterior, de modo que a faixa de soluções possíveis seja reduzida a metade em cada iteração (MANSOURI et al., 2015). Ou seja, objetivo deste método é reduzir o tamanho do intervalo que contém zero até que seja atingida uma precisão desejada.

3.4.2 Posição no qual o valor se aproxima o máximo da difusividade obtida pela equação de Riedel

Se o valor do coeficiente convectivo de transferência de calor (h) for considerado constante, a difusividade efetiva poderá ser dada pela Equação (3.16):

$$D = f(X, a, b), \quad (3.16)$$

onde, “a” e “b” são parâmetros que se ajustam à solução numérica dos dados experimentais e podem ser determinados por otimização.

Os parâmetros do processo foram determinados através da minimização da função objetivo, que é realizada em ciclos envolvendo as seguintes etapas:

Etapa 1) Forneça os valores iniciais para os parâmetros “a”, “b” e “h”. Resolva a equação de difusão e determine o qui-quadrado;

Etapa 2) Forneça o valor para a correção de “h”;

Etapa 3) Corrija o parâmetro “h”, mantendo o parâmetro “a” e “b” com valores constantes. Resolva a equação de difusão e calcule o qui-quadrado;

Etapa 4) Compare o último valor calculado do qui-quadrado com o anterior. Se o valor mais recente for menor, retorne para a etapa 2; caso contrário, diminua a última correção do valor de “h” e prossiga para a etapa 5;

Etapa 5) Forneça o valor para a correção de “a”;

Etapa 6) Corrija o parâmetro “a”, mantendo os parâmetros “b” e “h” com valores constantes. Resolva a equação de difusão e calcule o qui-quadrado;

Etapa 7) Compare o último valor calculado do qui-quadrado com o anterior. Se o valor mais recente for menor, retorne para a etapa 5; caso contrário, diminua a última correção do valor de “a” e prossiga para a etapa 8;

Etapa 8) Forneça o valor para a correção de “b”;

Etapa 9) Corrija o parâmetro “b”, mantendo os parâmetros “a” e “h” com valores constantes. Resolva a equação de difusão e calcule o qui-quadrado;

Etapa 10) Compare o último valor calculado do qui-quadrado com o anterior. Se o valor mais recente for menor, retorne para a etapa 8; caso contrário, diminua a última correção do valor de “b” e prossiga para a etapa 11;

Etapa 11) Comece um novo ciclo voltando ao passo 2 até que a convergência estipulada para os parâmetros “a”, “b” e “h” seja alcançada.

Em cada ciclo, o valor da correção de cada parâmetro pode ser inicialmente modesto, compatível com a tolerância de convergência imposta ao problema. Então, para um dado ciclo, em cada retorno para o passo 2, 5 ou 8, o valor da nova correção pode ser multiplicado pelo fator 2. Se a modesta correção inicialmente informada não minimizar a função objetivo, no próximo ciclo seu valor pode ser multiplicado pelo fator -1. Note que se a difusividade de massa efetiva é suposta constante, os passos 8, 9 e 10 não são necessários. Por outro lado, os valores iniciais para os parâmetros podem ser estimados através de valores obtidos para produtos similares disponíveis na literatura, ou através de alguma correlação empírica.

3.4.3 Solução numérica da equação de difusão para a esfera

O método numérico utilizado para discretização da equação de difusão foi o dos volumes finitos com uma formulação totalmente implícita (PATANKAR, 1980; MALISKA, 2013).

Nas Figuras (3.5) estão expostos uma esfera e sua malha unidimensional uniforme. Os volumes de controle com espessura dada por Δr (m) e o número do volume de controle “i” com um ponto nodal “P”

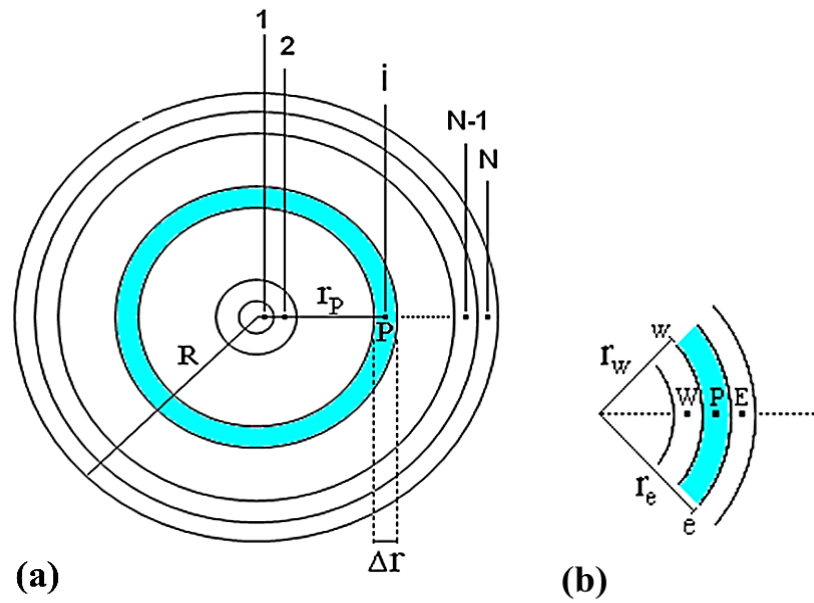


Figura 3.5 - (a) Malha uniforme com N volumes de controles com espessura Δr ; (b) Volume de controle P e seus vizinhos a oeste (W) e leste (E). Fonte: SILVA et al. (2011).

Para o volume de controle P, integrando a Equação (3.6) no espaço ($4\pi r_p^2 \Delta r$) e no tempo (Δt), o seguinte resultado é obtido para o volume de controle P (Equação 3.16):

$$\frac{T_p - T_p^0}{\Delta t} r_p^2 \Delta r = r_e^2 \alpha \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_e - r_w^2 \alpha \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_w \quad (3.17)$$

Deve-se observar que o sobrescrito 0 (zero) indica que o termo deve ser avaliado no tempo anterior ao de interesse (t); enquanto que os termos com ausência de sobrescrito são avaliados no tempo atual de interesse ou seja em $t + \Delta t$. Os subscritos “e” e “w” representam as interfaces dos volumes de controle leste e oeste respectivamente. E o subscrito “P” representa o ponto nodal deste volume de controle.

Para um volume de controle interno (do volume de controle 2 até N-1), as derivadas parciais na Equação (3.17) podem ser obtidas a partir das Equações (3.18a) e (3.18b).

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_e \cong \frac{T_E - T_P}{\Delta r} \quad (3.18a)$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_w \cong \frac{T_p - T_w}{\Delta r} \quad (3.18b)$$

Então, da Equação (3.17) a Equação discretizada para um volume interno pode ser escrita conforme a Equação (3.19).

$$A_p T_p = A_w T_w + A_e T_e + B \quad (3.19)$$

onde:

$$A_p = \frac{r_p^2 \Delta r}{\Delta t} + \frac{r_e^2}{\Delta r} \alpha + \frac{r_w^2}{\Delta r} \alpha \quad (3.19a)$$

$$A_w = \frac{r_w^2}{\Delta r} \alpha \quad (3.19b)$$

$$A_e = \frac{r_e^2}{\Delta r} \alpha \quad (3.19c)$$

$$B = \frac{r_p^2 \Delta r}{\Delta t} T_p^0 \quad (3.19d)$$

Para o volume de controle 1, devido à condição de simetria, ou seja, o fluxo é igual a zero no centro da geometria, logo o terceiro termo da Equação (3.17) é zero, daí a Equação (3.17) pode ser escrita pela Equação (3.20).

$$A_p T_p = A_e T_e + B \quad (3.20)$$

onde:

$$A_p = \frac{r_p^2 \Delta r}{\Delta t} + \frac{r_e^2}{\Delta r} \alpha \quad (3.20a)$$

$$A_e = \frac{r_e^2}{\Delta r} \alpha \quad (3.20b)$$

$$B = \frac{r_p^2 \Delta r}{\Delta t} T_p^0 \quad (3.20c)$$

Para o volume de controle N (limite), a Equação (3.18a) é dada da seguinte maneira (Equação 3.21):

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_e \cong \frac{T_b - T_p}{\Delta r/2} \quad (3.21)$$

Logo, a Equação (3.8), pode ser expressa da seguinte forma (Equação 3.22):

$$-\alpha \frac{T_b - T_p}{\Delta r/2} = h(T_b - T_\infty) \quad (3.22)$$

onde T_b é obtido pela Equação (3.23):

$$T_b = \frac{T_\infty + \frac{\alpha}{h\Delta r/2} T_p}{1 + \frac{\alpha}{h\Delta r/2}} \quad (3.23)$$

Substituindo a Equação (3.23) na Equação (3.22), obtém-se a Equação (3.24):

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_e \cong \frac{T_\infty - T_p}{\Delta r/2 + \alpha/2} \quad (3.24)$$

Então, a substituição das Equações (3.18b) e (3.24) na Equação (3.17) obtêm a Equação (3.25):

$$A_p T_p = A_w A_w + B \quad (3.25)$$

onde:

$$A_p = \frac{r_p^2 \Delta r}{\Delta t} + \frac{r_e^2 \alpha}{\Delta r/2 + \alpha/h} + \frac{r_w^2 \alpha}{\Delta r} \quad (3.25a)$$

$$A_w = \frac{r_w^2 \alpha}{\Delta r} \quad (3.25b)$$

$$B = \frac{r_p^2 \Delta r}{\Delta t} T_p^0 + \frac{r_e^2 \alpha}{\Delta r/2 + \alpha/h} T_\infty \quad (3.25c)$$

A vantagem da utilização deste método numérico é para descrever toda a cinética de resfriamento, e não apenas a parte em que o número de Fourier é maior que 0,2. Além disso, o método numérico poderia prever parâmetros termofísicos variáveis, enquanto o método analítico não.

3.5 MODELO PROPOSTO

3.5.1 Problema inverso: Determinação de parâmetros

De modo a determinar o melhor ajuste da temperatura simulada aos dados experimentais ao longo do tempo, os valores de h e de α são determinados iterativamente. Para isso, utiliza-se o solver desenvolvido e um conjunto de dados experimentais. O processo de otimização será realizado através do *LS Optimizer Software* (SILVA e SILVA, 2018). O *LS Optimizer* é um *software* pronto para uso que determina parâmetros de uma equação diferencial ordinária ou parcial (e também funções) através de dados experimentais conhecidos, usando o Algoritmo de Levenberg-Marquardt (LEVENBERG, 1944; MARQUARDT, 1963; SILVA et al., 2006; SILVA et al., 2018).

Como um solver foi desenvolvido para a solução do problema direto, este *software* de otimização executará o solver a fim de obter as informações necessárias para a determinação das propriedade térmicas α e h . Assim, a partir dos valores iniciais h_0 e α_0 , o Otimizador LS fornecerá os valores ótimos para h e α , as suas incertezas e a matriz de covariância entre eles.

3.5.1.1 Cálculo médio e desvio de medidas similares

Foram realizados vários experimentos de cinéticas de resfriamento das maçãs, no entanto apenas, dois experimentos foram selecionados e obtidos os valores para os parâmetros α e h , por terem precisões diferentes, são chamadas de medidas não similares, embora tenham sido obtidas através de conjuntos de leituras efetuadas nas mesmas condições e expressam a mesma quantidade. Diante disso, o novo valor médio e o desvio de cada parâmetro foi calculado de acordo com as Equações (3.26) e (3.27) conforme proposto por Silva e Silva (1998).

$$\bar{X} = \frac{\bar{X}_1 \cdot \frac{1}{\sigma_{x1}^2} + \bar{X}_2 \cdot \frac{1}{\sigma_{x2}^2}}{\frac{1}{\sigma_{x1}^2} + \frac{1}{\sigma_{x2}^2}}, \quad (3.26)$$

$$\sigma_{xm} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{\sigma_{x1}^2} + \frac{1}{\sigma_{x2}^2}}} \quad (3.27)$$

onde:

\bar{X} é o valor médio das duas medidas não similares (α e h);

σ_{xm} é o desvio padrão do valor médio das duas medidas não similares (α e h).

3.5.2 Problema direto: Solver

O problema direto consiste na solução da equação diferencial parcial, quando se conhece os valores de h e α , o que foi feito a partir de um solver que possibilitou a simulação da cinética de resfriamento de um ponto previamente especificado dentro da esfera, e tal solver foi criado em FORTRAN. O *software* a ser desenvolvido foi criado no estúdio do denominado Compaq Visual Fortran Profissional Edição V. 6.6.0, usando uma opção de linguagem de programação chamada *QuickWin Application*. Deste modo, a solução numérica da Equação (3.6) pode ser utilizada para se determinar $T(r, t)$ para os valores previamente definidos de h e α .

3.6 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA, FÍSICO-QUÍMICA E COMPOSTOS BIOATIVOS DA MAÇÃ

A maçã foi caracterizada segundo os parâmetros: físicos (umidade e sólidos totais, sólidos solúveis totais (SST), atividade de água (A_w), perfil de textura, cor e perda de massa); físico-químicos (pH, acidez total titulável (ATT), *ratio* (SST/ATT) e cinzas); compostos bioativos (vitamina C, compostos fenólicos totais (CFT), antocianinas totais (AT), flavonoides totais (FT) e Clorofila).

3.6.1 Caracterização física

3.6.1.1 Umidade e sólidos totais

O teor de umidade foi determinado conforme metodologia descrita no item 3.3.2.3 e os sólidos totais foram obtidos por diferença (100- Umidade).

3.6.1.2 Atividade de água (A_w)

A atividade de água foi determinada por leitura direta da amostra, fazendo o uso do equipamento Aqualab, modelo 3TE (Decagon, WA, EUA), na temperatura de 25 °C.

3.6.1.3 Sólidos solúveis totais (SST)

Os sólidos solúveis totais foram determinados com o uso de refratômetro portátil (Abbe-RT32), com escala de 0 a 32 °Brix, os resultados expressos em °Brix segundo (BRASIL, 2008).

3.6.1.4 Perfil de textura

A análise do perfil de textura das maçãs foi realizada em texturômetro TA-XT2 (Stable Micro Systems, Surrey, Reino Unido). Foram realizados testes de compressão a uma velocidade de 2 mm/s e distância de 20 mm. Os dados obtidos foram referentes a firmeza expressos em Newton (N).

3.6.1.5 Cor

Os parâmetros de cor foram determinados utilizando-se o espectrofotômetro Mini Scan Hunter Lab XE Plus (Reston, VA, EUA), no sistema de cor Cielab. O qual permitiu a obtenção dos parâmetros: L* (luminosidade); a* (transição da cor verde (-a*) para o vermelho (+a*)); e b* (transição da cor azul (-b*) para a cor amarela (+b*)). Após a aferição dos dados de a* e b*, pode-se estabelecer os valores do croma (C*), que representa a saturação ou intensidade da cor, sendo 0 = cor impura e 60 = cor pura conforme Equação (3.28):

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (3.28)$$

3.6.3.5 Perda de massa

A perda de massa das maçãs foi calculada a partir das diferenças de massas experimentais observadas entre o início e o decorrer do armazenamento, sendo os resultados expressos em porcentagem (%).

3.6.2 Caracterização físico-química

3.6.2.1 pH

O pH foi determinado pelo método potenciométrico com medida direta em medidor de pH da marca Tecnal, modelo TEC-2, previamente calibrado com soluções tampão de pH 4,0 e 7,0 conforme descrito pelo Instituto Adolfo Lutz (BRASIL, 2008).

3.6.2.2 Acidez total titulável (ATT)

A acidez total titulável foi determinada em triplicata, através do método titulométrico segundo a metodologia descrita por Brasil (2008). Os resultados foram expressos em percentual de ácido málico.

3.6.2.3 *Ratio* (SST/ATT)

É a relação entre os sólidos solúveis totais (SST) e a acidez total titulável (ATT).

3.6.2.4 Resíduo mineral fixo (cinzas)

O teor de cinzas foi realizado através da incineração da amostra em mufla aquecida a 550 °C, até a obtenção de um material isento de carvão, com coloração acinzentada, conforme BRASIL (2008). Os resultados foram expressos em percentual.

3.6.3 Caracterização de compostos bioativos

3.6.3.1 Vitamina C

A determinação do ácido ascórbico foi obtida pela AOAC (1997), modificada por Benassi e Antunes (1988). Nesse método foi utilizado o ácido oxálico como solução extratora a qual consiste na titulação da amostra com o 2,6 diclorofenol-indofenol sódio, que exprime coloração rosácea em solução ácida e coloração azulada em solução alcalina. Os resultados foram expressos em mg de ácido ascórbico/100g de amostra.

3.6.3.2 Compostos fenólicos totais

Os compostos fenólicos totais presentes na casca da maçã foram quantificados a partir do método de Folin-Ciocalteu descrito por Waterhouse (2006), utilizando ácido gálico como padrão. Os extratos foram preparados a partir da diluição de 1g de amostra em 50 mL de água destilada e deixados em repouso por 30 min. Uma alíquota de 50 µL do extrato foi transferida para um tubo de ensaio, adicionados 2.075 µL de água e 125 µL do reagente Folin Ciocalteu. A mistura permaneceu em repouso por 5 minutos e logo após, adicionou-se 250 µL de carbonato de sódio a 20%, seguido de agitação e repouso em banho maria a 40 °C, por 30 minutos. Os cálculos realizados para a determinação dos compostos fenólicos foram baseados em uma curva padrão com ácido gálico, e as leituras realizadas em espectrofotômetro a 765 nm, com os resultados expressos em mg.100g⁻¹ de ácido gálico.

3.6.3.3 Antocianinas totais e flavonoides totais

O método utilizado para leitura das antocianinas totais e flavonoides totais presentes na casca da maçã foi o método do pH único descrito pro Francis (1982). O método consiste em fazer uma transferência quantitativa de uma alíquota do extrato concentrado para um recipiente e então essa alíquota é diluída com uma quantidade de solução Etanol – HCl a 1,5 mol.L⁻¹ tendo assim um volume de extrato diluído. A quantidade de antocianinas totais foi calculada pela Equação (3.29) e quantidade de flavonoides totais foi calculado pela Equação (3.30).

$$Ant_{mg} = \frac{Abs_{535} \times V_{ec} \times V_{ed} \times 1000}{V_{alq} \times m \times 982} \quad (3.29)$$

em que: Ant_{mg} é a quantidade de antocianinas totais expressas em mg de antocianinas por 100 gramas de amostra (mg/100); Abs_{535} é a absorbância lida do extrato diluído a 535 nm; V_{ec} é o volume do extrato concentrado (mL); V_{ed} é o volume do extrato diluído (mL); V_{alq} é o volume da alíquota tomada do extrato concentrado para fazer o extrato diluído (mL); m é a massa da casca de maçã utilizada para realizar a extração; O valor de 982 é o coeficiente de extinção para antocianinas.

$$Fla_{mg} = \frac{Abs_{374} \times V_{ec} \times V_{ed} \times 1000}{V_{alq} \times m \times 766} \quad (3.30)$$

em que: Fla_{mg} é a quantidade de flavonoides totais expressas em mg de flavonoides por 100 gramas de amostra (mg/100); Abs_{374} é a absorbância lida do extrato diluído a 374 nm; V_{ec} é o volume do extrato concentrado (mL); V_{ed} é o volume do extrato diluído (mL); V_{alq} é o volume da alíquota tomada do extrato concentrado para fazer o extrato diluído (mL); m é a massa da casca de maçã utilizada para realizar a extração; O valor de 766 é o coeficiente de extinção para flavonoides.

3.6.3.4 Teores de clorofila (a, b e total)

Os teores de clorofila da casca das maçãs foram quantificados após a sua extração utilizando 80% de acetona e carbonato de cálcio, com as leituras de absorvância em espectrofotômetro nos seguintes comprimentos de onda 470, 646 e 663 nm, de acordo com Lichtenthaler (1987).

3.7 ARMAZENAMENTO

As maçãs foram armazenadas em duas condições distintas sendo elas: I) temperatura ambiente, no qual as maçãs foram mantidas expostas em uma sala climatizada com temperatura ajustada para $25\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$; II) temperatura de refrigeração no qual as maçãs foram mantidas em uma refrigerador doméstico da marca comercial Brastemp[®] com temperatura ajustada em torno de 4 °C . Para as duas condições estudadas as maçãs foram avaliadas a cada 7 dias até que as mesmas apresentassem podridões. Os parâmetros físicos, químicos e de compostos bioativos avaliados durante o armazenamento estão alocados no item 3.6.

3.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados experimentais no decorrer dos dias de armazenamento foram analisados em triplicata e os resultados submetidos à análise de variância de fator único (ANOVA) de 5% de probabilidade e as respostas qualitativas significativas foram submetidas ao teste de *Tukey* adotando-se o mesmo nível de 5% de significância. Para o desenvolvimento das análises estatísticas foi utilizado o software Assistat 7.7 (SILVA e AZEVEDO, 2016).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PROBLEMA INVERSO: DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DA MAÇÃ

Dentre os experimentos da cinética de resfriamento das maçãs realizados, apenas dois foram selecionados e estão apresentados a seguir.

4.1.1 Experimento 1

Para o experimento 1 o teor de umidade da maçã obtido foi de 84,68% (base úmida), sendo assim, neste experimento o valor estimado da difusividade (α) da maçã, através da correlação de Riedel Equação (3.3), foi de $\alpha = 1,388 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. A maçã em estudo apresentou massa de 20,652g e volume de 178,84 cm^3 , conseqüentemente, apresentando uma densidade de 675 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ e raio da esfera equivalente de 0,0365 m. Inicialmente a maçã encontrava-se a uma temperatura de 24,6 °C e a temperatura de equilíbrio foi de 8,4 °C. Na Figura 4.1 estão apresentados os pontos experimentais da cinética de resfriamento da maçã, ou seja, sua variação de temperatura ao longo do tempo.

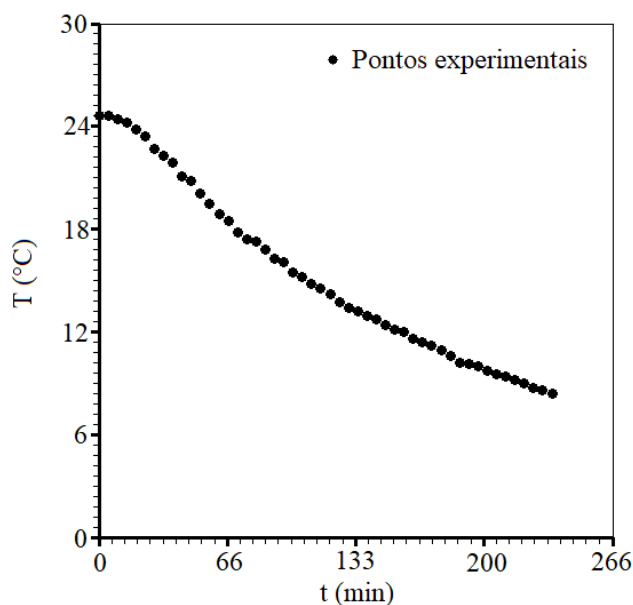


Figura 4.1 - Pontos experimentais 1 da cinética de resfriamento da maçã.

Através da otimização do modelo proposto, foram determinados os parâmetros α e h . A otimização foi realizada pelo *LS Optimizer*, no qual foi possível também determinar as incertezas desses dois parâmetros para um nível de 95,4% de confiança. Para este intervalo de confiança o *software* de otimização recomendou que as incertezas fossem multiplicadas pelo fator 2,0. Na Tabela 4.1 estão apresentados os resultados para dois intervalos de confiança: 68,3% e 95,4%.

Tabela 4.1 – Propriedades térmicas determinadas para maçã no experimento 1.

Parâmetros	Intervalo de confiança	
	68,3 %	95,4%
α (m ² .s ⁻¹)	$(1,389 \pm 0,037) \times 10^{-7}$	$(1,39 \pm 0,07) \times 10^{-7}$
h (m.s ⁻¹)	$(1,364 \pm 0,009) \times 10^{-6}$	$(1,364 \pm 0,018) \times 10^{-6}$

Na Figura 4.2 estão apresentados os pontos experimentais obtidos e a simulação do modelo proposto com os valores obtidos para α e h . Vale salientar que o resultado obtido para a difusividade térmica ($\alpha = 1,39 \times 10^{-7}$ m².s⁻¹) através da simulação do modelo proposto foi próximo ao obtido através da estimativa da correlação de Riedel ($\alpha = 1,38 \times 10^{-7}$ m².s⁻¹), como era obviamente esperado. Entretanto, através do método envolvendo otimização, foi possível associar uma incerteza ao valor obtido. Além desses dois parâmetros conhecidos, segundo Erdogdu (2008), os dados tempo-temperatura obtidos experimentalmente também podem ser atribuídos como um parâmetro conhecido.

Pode-se observar na Figura 4.2 uma compatibilidade entre os pontos experimentais e a linha simulada, com um pequeno desvio padrão de apenas 0,113 °C para o modelo proposto. Este ajuste do modelo simulado aos dados experimentais apresentou indicadores estatísticos, tais como, o coeficiente de determinação (R^2) próximo a 1 ($R^2 = 0,9995$) e função qui-quadrado (χ^2) com valor de 0,61807. Segundo Silva et al. (2019) e Santos et al. (2019a), para um modelo adequar-se adequadamente aos dados experimentais é essencial que além do R^2 ser maior que 0,99, o valor do qui-quadrado deve ser o mais baixo possível.

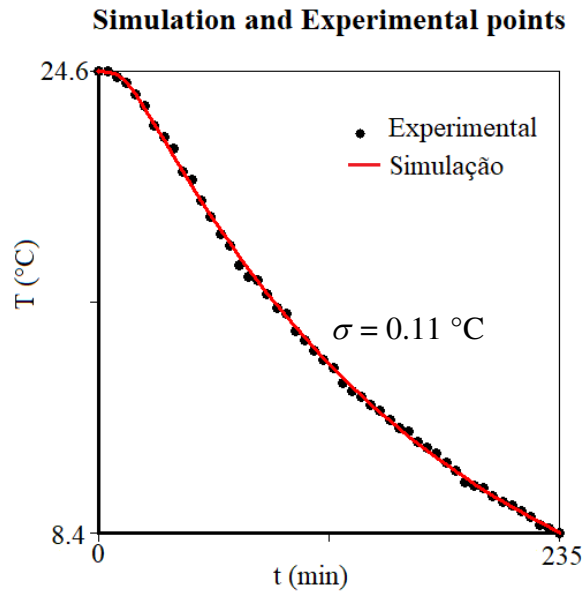


Figura 4.2 – Gráfico da cinética de resfriamento da maçã simulada pelo modelo proposto, utilizando os valores de α e h obtidos na otimização para o experimento 1.

Para a obtenção dos parâmetros k e h_H , os valores obtidos de α e h foram multiplicados por (ρc_p) , onde o calor específico foi estimado a partir da Equação (3.4), utilizando o modelo de Fikiin. E o valor da densidade da maçã foi determinada pela Equação (3.1) ($\rho = 675 \text{ kg.m}^{-3}$), obtendo respectivamente os valores de ($k = 2,306 \times 10^{-4} \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) e ($h_H = 0,2273 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) para o intervalo de 95,4% de confiança.

4.1.2 Experimento 2

Para o experimento 2 o teor de umidade da maçã obtido foi de 83,55% (base úmida), sendo assim, neste experimento o valor estimado da difusividade (α) da maçã, através da correlação de Riedel Equação (3.3), foi de $\alpha = 1,38 \times 10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$. A maçã em estudo apresentou massa de 113,032g e volume de $146,17 \text{ cm}^3$, conseqüentemente, apresentando uma densidade de 773 kg.m^{-3} e raio da esfera equivalente de 0,0345 m. Inicialmente a maçã encontrava-se a uma temperatura de 26,3 °C e a temperatura de equilíbrio foi de 7,0 °C. Na Figura 4.3 estão apresentados os pontos experimentais da cinética de resfriamento da maçã, ou seja, sua variação de temperatura ao longo do tempo.

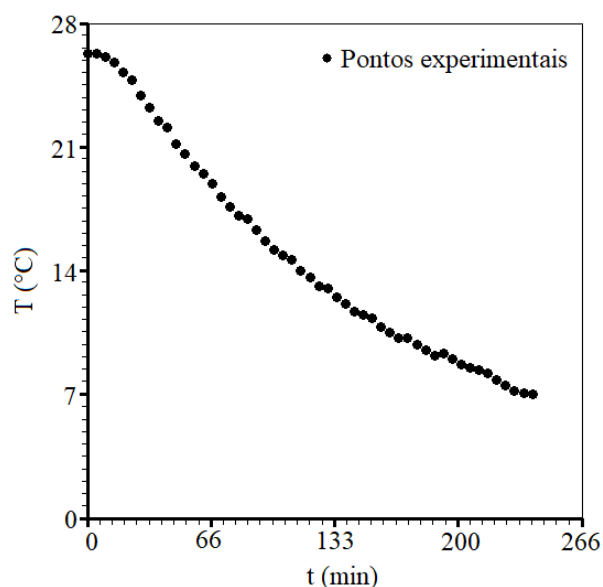


Figura 4.3 - Pontos experimentais 2 da cinética de resfriamento da maçã.

Através da otimização do modelo proposto, foram determinados os parâmetros α e h . A otimização foi realizada pelo *LS Optimizer*, no qual foi possível também determinar a incertezas desses dois parâmetros para um nível de 95,4% de confiabilidade. Para este intervalo de confiança o *software* de otimização recomendou que os as incertezas fossem multiplicadas pelo fator 2,0. Na Tabela 4.2 estão apresentados os resultados para dois intervalos de confiança: 68,3% e 95,4%.

Tabela 4.2 – Propriedades térmicas determinadas para maçã no experimento 2.

Parâmetros	Intervalo de confiança	
	68,3 %	95,4%
α (m ² .s ⁻¹)	$(1,382 \pm 0,035) \times 10^{-7}$	$(1,38 \pm 0,07) \times 10^{-7}$
h (m.s ⁻¹)	$(1,396 \pm 0,008) \times 10^{-6}$	$(1,396 \pm 0,016) \times 10^{-6}$

Na Figura 4.4 estão apresentados os pontos experimentais obtidos e a simulação do modelo propostos com os valores obtidos para α e h . Vale salientar que, o resultado obtido para a difusividade térmica ($\alpha = 1,38 \times 10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$) através da simulação do modelo proposto foi igual ao obtido através da estimativa da correlação de Riedel ($\alpha = 1,381 \times 10^{-7} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$). Representando assim segundo Araújo et al. (2004), uma boa aproximação dos valores preditos, empregando a correlação citada.

Pode-se observar também na Figura 4.2 uma compatibilidade entre os pontos experimentais e a linha simulada, com um pequeno desvio padrão de apenas 0,124 °C para o modelo proposto.

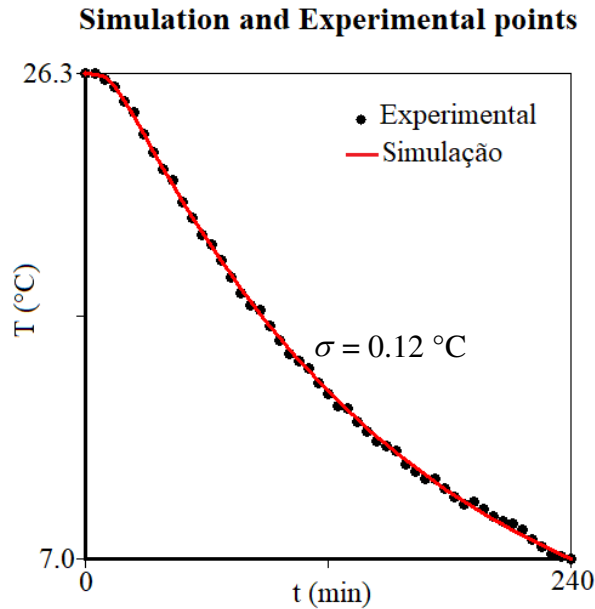


Figura 4.4 – Gráfico da cinética de resfriamento da maçã simulada pelo modelo proposto, utilizando os valores de α e h obtidos na otimização para o experimento 2.

Verifica-se que existe um adequado ajuste da curva simulada aos pontos experimentais, e isto se reflete no baixo valor do erro. Assim como, este ajuste também apresentou indicadores estatísticos, tais como, o coeficiente de determinação (R^2) próximo a 1 ($R^2=0,9996$) e função qui-quadrado (χ^2) com valor de 0,74916 sendo esta superior ao valor obtido para o experimento 1.

Para a obtenção dos parâmetros k e h_H , os valores obtidos de α e h foram multiplicados por (ρc_p) , onde o calor específico foi estimado a partir da Equação (3.4), utilizando o modelo de Fikiin. E o valor da densidade da maçã foi determinada pela Equação (3.1) ($\rho = 773 \text{ kg.m}^{-3}$), obtendo respectivamente os valores de ($k = 2,626 \times 10^{-4} \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) e ($h_H = 0,2645 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) para o intervalo de 95,4% de confiança.

4.1.3 Distribuição dos erros experimentais

Nas Figuras 4.5a e 4.5b estão apresentados a distribuição residual do erro experimental referente à cinética de resfriamento para os dois experimentos selecionados. Os resíduos foram calculados através das diferenças entre temperaturas adimensionais experimentais e simuladas, para todos os pontos experimentais, utilizando o *software LS Optimizer*.

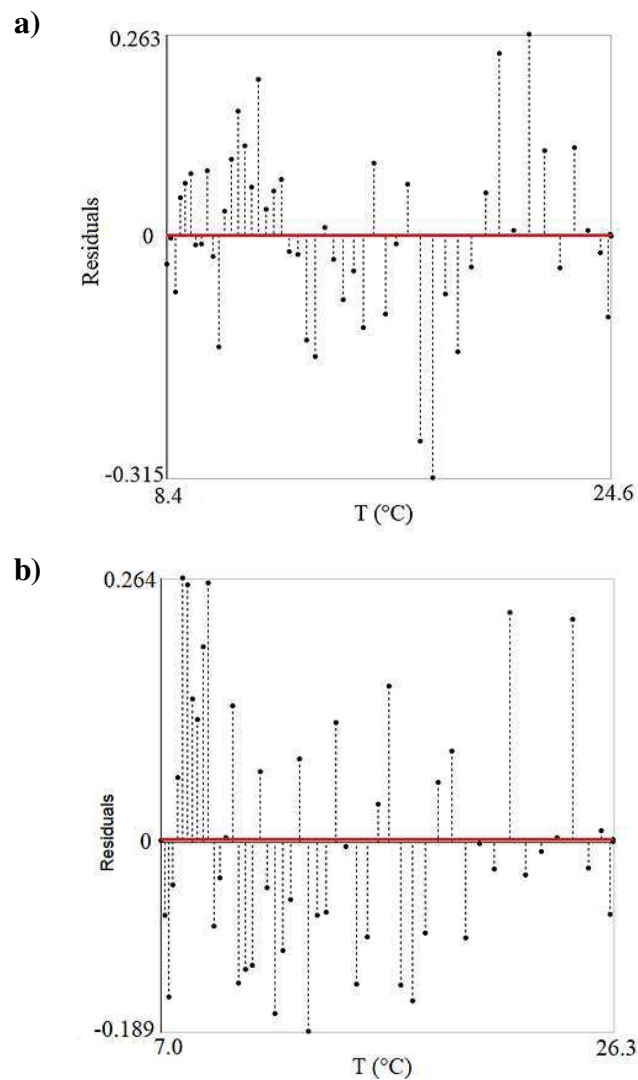


Figura 4.5 - Distribuição dos erros experimentais: a) experimento 1; b) experimento 2.

A linha contínua representa o erro médio e seu valor para o experimento 1 foi de $7,92 \times 10^{-4}$ e para o experimento 2 foi de $2,65 \times 10^{-3}$ em boa concordância com o valor zero, teoricamente esperado para os dois experimentos. Além disso pode-se observar na Figura 4.5 que os resíduos apresentaram-se dispersos aleatoriamente. De acordo com Baptistini et al.

(2015), mesmo quando os parâmetros estatísticos apresentam bons resultados, o modelo pode ser ineficaz se apresentar distribuição de resíduo tendenciosa (SANTOS et al., 2019b).

As Figuras 4.6a e 4.6b, apresenta de forma geral a distribuição do erro através dos gráficos de histograma.

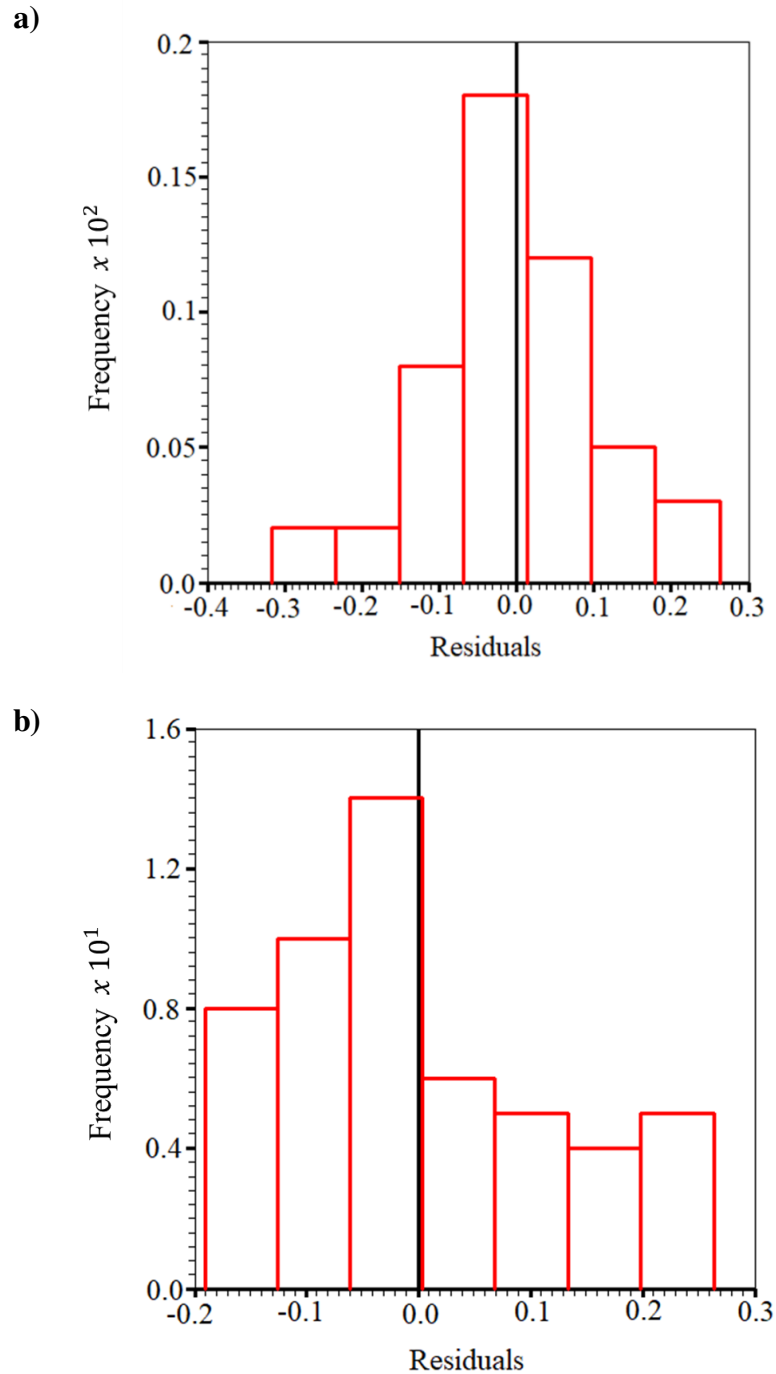


Figura 4.6 – Gráficos de histograma para o erro experimental: a) experimento 1; b) experimento 2.

É perceptível na Figura 4.6a que o valor médio está no meio da amplitude dos dados, com decréscimo gradual para os extremos e com forma tendendo a serem simétricas, próximo de uma distribuição Gaussiana. Diferentemente do encontrado na Figura 4.6b, onde os maiores valores de frequência estão a esquerda do gráfico, possuindo geometria assimétrica negativa. Onde Segundo Kume (1993), a frequência decresce de modo um tanto abrupto em direção a direita do gráfico, porém de modo suave em direção a esquerda. Segundo Chen e Dobra (2013), independentemente do tipo de histograma as frequências dos itens são aproximadas pela sua frequência média, e essa média será usada em vez das frequências originais em qualquer cálculo.

4.1.4 Valores médios de α e h

Na Tabela 4.3, estão apresentados os valores médios dos parâmetros térmicos, obtidos por otimização e calculados através da Equação (3.26), assim como sua incerteza média que foi calculada pela Equação (3.27). As médias apresentadas foram calculadas para o intervalo de 95,4% de confiabilidade e foram utilizados os valores iniciais de $\alpha_0 = 1,0 \times 10^{-7}$ e $h_0 = 1,0 \times 10^{-6}$.

Tabela 4.3 – Valores médios de α e h e das suas incertezas (95,4%) de confiabilidade.

Parâmetros	Valores médios
α ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	$(1,38 \pm 0,05) \times 10^{-7}$
h ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$(1,381 \pm 0,001) \times 10^{-6}$

Silva et al. (2019a) ao determinarem por otimização as propriedades térmicas de morangos considerando a geometria de uma esfera equivalente, obtiveram os seguintes valores $\alpha = (1,42 \pm 0,11) \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e $h = (3,196 \pm 0,039) \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Soares et al. (2012), obtiveram valor de difusividade de $\alpha = 1,03 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ para polpas de mangaba dispostas em placas circulares durante o seu congelamento. Silva et al. (2019b) ao determinarem por otimização as propriedades térmicas de um pepino considerado a geometria cilíndrica obtiveram os seguintes valores: $\alpha = (1,48 \pm 0,12) \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ e $h = (6,35 \pm 0,25) \times 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Segundo Erdogdu et al. (2014), um produto com baixo valor de difusividade térmica pode resfriar mais rapidamente do que uma amostra com uma difusividade térmica mais alta,

dependendo do coeficiente de transferência de calor (h_H) e dos termos individuais de k e ρc_p . Pois, no caso de baixos valores de h_H combinado com a difusividade térmica, o processo de transferência de calor é afetado de forma significativa.

Segundo Silva et al. (2019a) o programa LS *Optimizer* minimiza o qui-quadrado obtido pelos desvios calculados pelas diferenças entre os valores simulados e os valores dos pontos experimentais correspondentes, e o valor mínimo de qui-quadrado é usado para determinar as incertezas de cada parâmetro calculado. Esse procedimento é semelhante à determinação de incertezas de parâmetros no ajuste de uma função a dados experimentais por meio de regressão não-linear (LEVENBERG, 1944; MARQUARDT, 1963).

4.2 PROBLEMA DIRETO: SIMULAÇÃO PARA MAÇÃ

Através do solver desenvolvido para o modelo proposto, tornou-se possível visualizar a distribuição espacial de temperatura no interior da maçã (Experimento 1) em qualquer instante, durante o seu resfriamento como pode ser observada na Figura 4.7. Além disso, também nos permite obter informações para determinar as tensões térmicas.

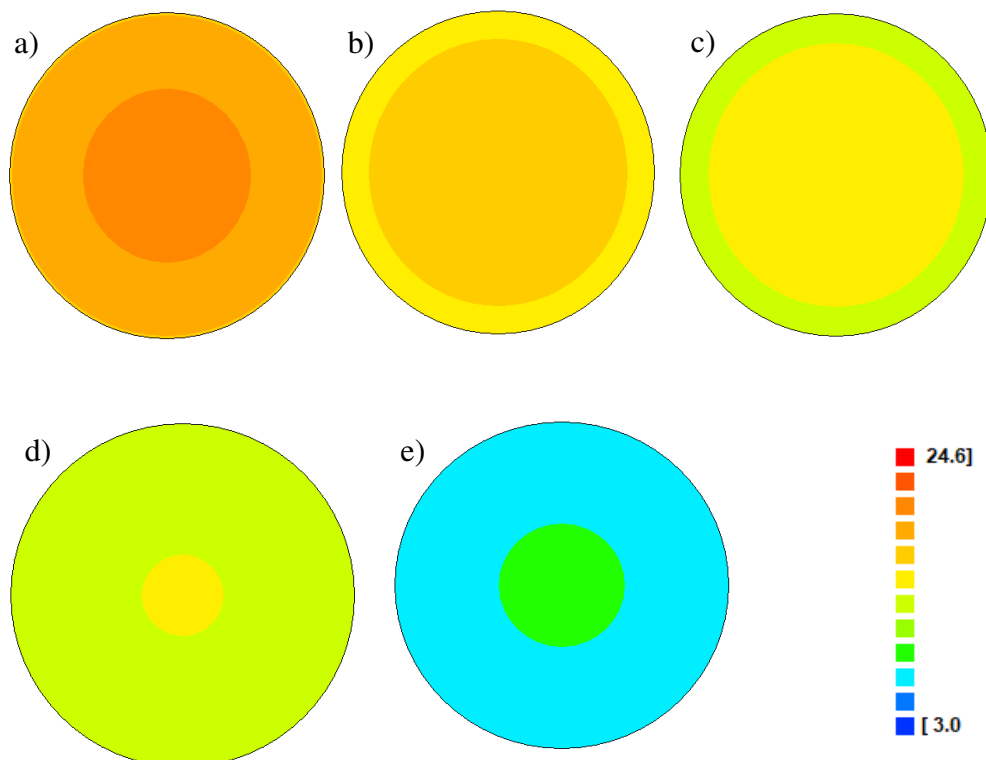


Figura 4.7: Distribuição de temperatura no interior da maçã em diferentes tempo: a) 3250 s; b) 5000 s; c) 6500 s; d) 7500 s; e) 14000 s

Ao longo do tempo pode-se observar que a temperatura do produto, diminui lentamente das regiões periféricas para a região central, ou seja, o processo de resfriamento das maçãs se deu de fora para dentro do produto e que as menores temperaturas no seu interior só foram alcançadas em um maior intervalo de tempo.

4.2.1 Problema direto: simulação para maçãs com outras dimensões

4.2.1.1 Condição 1

A partir dos parâmetros α e h obtidos (Tabela 4.3) nesta pesquisa, foi possível simular uma cinética de resfriamento para o ponto central de uma maçã da mesma variedade, mas com dimensões diferentes, sendo assim, podendo prever a duração do tempo de resfriamento. Na Figura 4.8 têm-se a simulação para a cinética de resfriamento de uma maçã da variedade “Fuji” considerando o raio da esfera equivalente (R) de 0,0445 m, ou seja, a maçã usada para essa simulação possui um raio maior que o das maçãs usadas nos experimentos 1 e 2. Inicialmente a maçã encontrava-se a uma temperatura de 25,4 °C e a temperatura de equilíbrio foi de 6,3 °C.

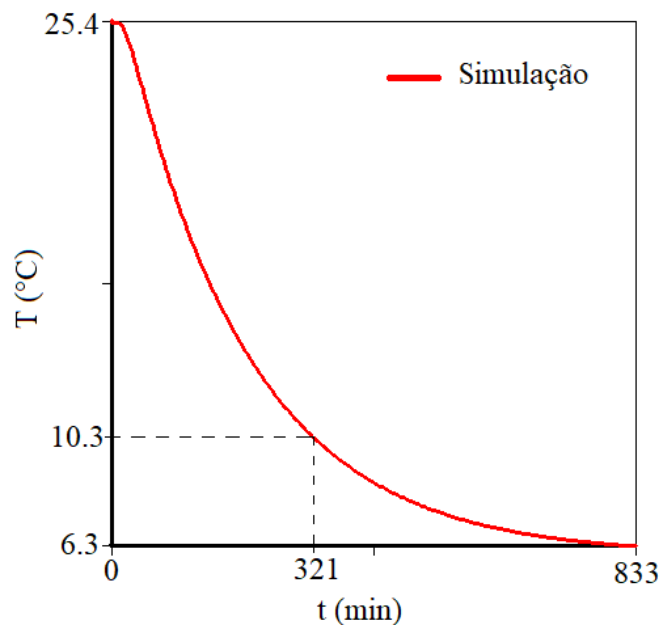


Figura 4.8 – Gráfico da simulação da cinética de resfriamento da maçã “Fuji” com raio $R = 0,045$ m, utilizando os valores de α e h determinados pela otimização.

Através desta simulação foi possível observar que devido a maçã apresentar um maior raio (R), obteve-se um maior tempo de duração de sua cinética e para a maçã atingir $10,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ é necessário um tempo de cerca de 321 minutos.

4.2.1.2 Condição 2

Na Figura 4.9 têm-se a simulação para a cinética de resfriamento para o ponto central de uma maçã da variedade “Fuji” considerando o raio da esfera equivalente (R) de $0,0301\text{ m}$, ou seja, a maçã usada para essa simulação possui um raio menor que o das maçãs usadas nos experimentos 1 e 2. Inicialmente a maçã encontrava-se a uma temperatura de $26,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a temperatura de equilíbrio foi de $8,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

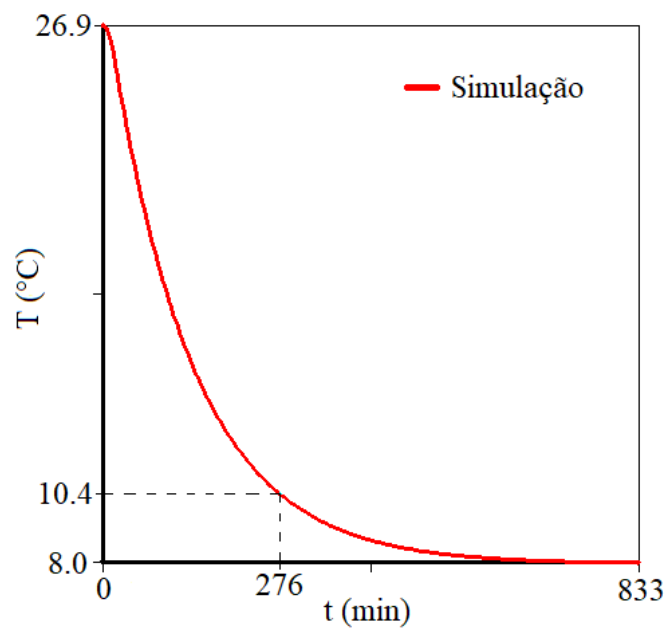


Figura 4.9 – Gráfico da simulação da cinética de resfriamento da maçã “Fuji” com raio $R = 0,0301\text{ m}$, utilizando os valores de α e h determinados pela otimização.

Através desta simulação foi possível observar que mesmo em condições diferentes de temperatura, devido a maçã apresentar um menor raio (R), obteve-se um menor tempo de duração de sua cinética; e para a maçã atingir $10,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ é necessário um tempo de 276 minutos.

Sendo assim, ter o conhecimento dos parâmetros α ($1,38 \times 10^{-7}\text{ m}^2.\text{s}^{-1}$) e h ($1,381 \times 10^{-6}\text{ m}.\text{s}^{-1}$) determinados por otimização são úteis para se realizar as simulações de maçãs com outras dimensões e condições, embora que para as maçãs com outras dimensões o ponto mais

quente durante o resfriamento, não seja exatamente conhecido, no entanto, pode ser estimado através da solução analítica.

4.3 SOLUÇÃO ANALÍTICA

4.3.1 Experimento 1

Para garantir $F_0 > 0,2$ a Equação (3.13c) foi ajustada aos dados experimentais sem considerar os pontos iniciais da cinética (os pontos foram removidos por uma inspeção visual do gráfico, não havendo um critério sobre a remoção ideal) obtendo, assim os seguintes parâmetros $B_1 = 1,0969467$ e $A_1 = 1,042347 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. O ajuste desta Equação aos dados experimentais podem ser observados na Figura 4.10, apresentando bons parâmetros estatísticos de ajuste com coeficientes de determinação ($R^2 = 0,9993$) e função qui-quadrado $\chi^2 = 0,579965$.

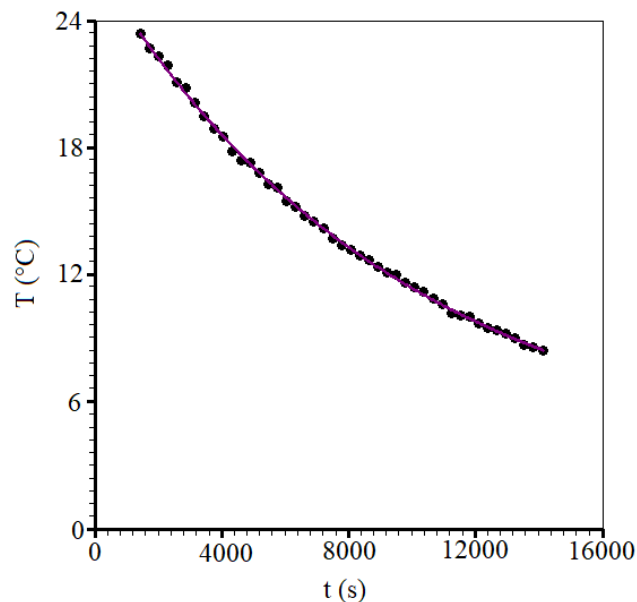


Figura 4.10 - Ajuste da Equação (3.13c) aos dados experimentais da cinética de resfriamento da maçã.

Obtidos os valores de B_1 e A_1 por ajuste de curva, podemos obter o valor da raiz μ_1 pela Equação (3.14) que apresentou valor de $\mu_1 = 1,003135$. Sendo assim, o número de Biot foi obtido pela Equação (3.11) e apresentou valor $Bi = 0,97775$. Usando a Equação (3.12), o coeficiente convectivo de transferência de calor foi calculado obtendo valor de $h = 3,6966 \times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$. Segundo Silva et al. (2012), o número *Biot* de vários produtos agrícolas, para os quais

o resfriamento é um método útil de preservação, é menor que 2,0, mesmo em alta velocidade do ar.

Finalmente, para determinar a posição do termopar, a equação transcendental dada pela Equação (3.15a) foi resolvida através do método da bissecção (Figura 4.11) e o seguinte resultado foi obtido: $r = 7,7$ mm, afirmando que o termopar foi colocado na posição de $r = 7,7$ mm na esfera equivalente.

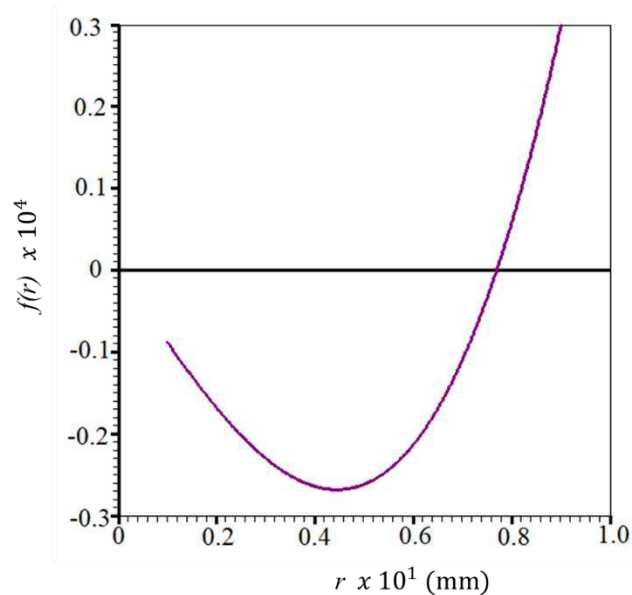


Figura 4.11 – Ajuste da Equação (3.15a) para determinação da posição do termopar na esfera equivalente através do método da Bissecção.

Uma comparação entre as posições do termopar determinada pelos dois métodos indica uma diferença de 14,3%, sendo o maior valor obtido por solução analítica. Embora o método analítico seja simples e rápido, a vantagem do método numérico é que ele descreve corretamente toda a cinética de resfriamento, e não apenas a parte na qual o número de Fourier é maior que 0,2.

A solução analítica apresenta algumas limitações, como a quantidade de pontos removidos da cinética, que ocorre de maneira arbitrária. Apesar destas limitações, a solução analítica pode ser utilizada como recurso caso não existam outras opções disponíveis. O conhecimento dos resultados obtidos por essa solução segundo Silva et al. (2011) podem ser empregados para estimar os valores iniciais a serem utilizados no processo de otimização envolvendo a solução numérica, o que torna esse processo muito mais rápido.

4.4 CARACTERIZAÇÕES FÍSICAS, FÍSICO-QUÍMICAS E COMPOSTOS BIOATIVOS NA MAÇÃ *IN NATURA*

Na Tabela 4.4 estão apresentados os valores médios e desvio padrão dos parâmetros físicos e físico-químicos analisados na maçã *in natura*.

Tabela 4.4 – Caracterização física e físico-químicas da maçã *in natura*

Parâmetros	Maçã <i>in natura</i>
Umidade (%)	82,84 ± 0,28
Sólidos totais (%)	17,16 ± 0,28
Atividade de água (A_w)	0,988 ± 0,003
Firmeza (N)	11,51 ± 0,92
L*	49,09 ± 1,52
a*	32,72 ± 1,13
b*	24,60 ± 2,45
C*	41,69 ± 3,22
Sólidos solúveis totais (°Brix)	11,17 ± 0,32
pH	4,38 ± 0,17
Acidez total titulável (% ácido málico)	0,177 ± 0,012
Ratio (SST/ATT)	63,11 ± 3,28
Cinzas (%)	0,165 ± 0,45

O teor de umidade obtido para maçã *in natura* foi de 82,84%, este alto teor apresenta-se dentro da faixa indicada para frutas pelo Instituto Adolfo Lutz (65-95%) (BRASIL, 2008). Cuccurullo et al. (2018) obtiveram 85,6% de umidade em maçãs *in natura*. Altos valores de teor de umidade indicam baixa estabilidade do produto durante o armazenamento, fator que reduz a sua vida útil pós colheita. Quanto ao teor de sólidos totais, foi obtido teor de 17,16% que é considerado como sendo um valor relativamente baixo, devido ao componente em maior abundância em sua constituição ser a água. Os sólidos totais retratam o potencial nutricional e mineral da fruta, valores próximos ao do presente estudo foram obtidos por Dermesonlouoglou et al. (2019), ao analisarem pêssegos, cujos valores foram de 87,99% de umidade e 12,01% de sólidos totais.

Com relação ao parâmetro de atividade de água (A_w) foi obtido um valor de 0,988, este alto valor está relacionado ao alto teor de umidade da maçã. Segundo Fellows (2006) alimentos com atividade de água maior que 0,90 ($A_w > 0,90$), são classificados como alimentos de alta perecibilidade, o que justifica o resfriamento dos frutos como uma opção à conservação deste produto devido a sua alta perecibilidade e susceptibilidade ao ataque de microrganismos. Valores próximos ao do presente estudo foram observados por Meneses et al. (2018) para diferentes resíduos de frutas sendo 0,985, 0,902, 0,971 para os resíduos de manga, goiaba e acerola, respectivamente. Sousa et al. (2019), obtiveram os valores de atividade de água 0,980 para cajá, cajarana e ciriguela; e 0,990 para umbu-cajá e umbu.

De acordo com Garrido et al. (2015), a firmeza é definida como sendo a força necessária para atingir uma dada deformação, no contexto da análise sensorial, representa a força necessária para comprimir o alimento entre os molares na primeira mordida. Portanto, foi necessário aplicar uma força de 11,51N para que a maçã atingisse uma deformação. Segundo Ghnimi et al. (2018) os parâmetros de textura das frutas dependem da sua anatomia, estrutura da parede celular, especificamente o tamanho das células da pele e a forma das camadas do tecido subjacente do pericarpo (ALHAMDAN et al., 2016).

A avaliação das coordenadas de cor, através dos valores de L^* , a^* e b^* assumem relevante importância para os frutos *in natura*. Vale salientar que estas coordenadas foram obtidas quando se analisou o fruto inteiro, ou seja, com cascas. Portanto, a coordenada L^* é um parâmetro que pode variar de zero (preto) a 100 (branco), apresentou valor de 49,09. Valores inferiores para esta coordenada foram obtidos por Silva et al. (2019) em frutos de mandacaru em dois estádios de maturação que variou de 31,94 a 36,74.

Quanto à intensidade de a^* (valores positivos representam o vermelho), foi obtido valor de 32,72 e na intensidade de b^* (valores positivos representam o amarelo), foi obtido valor de 24,60. Esses resultados refletem a cor amarela avermelhada, sendo uma característica deste fruto.

Segundo Dar et al. (2019) a cor da casca de maçã é um dos fatores mais importantes que determinam a aceitação do mercado de maçã. Em geral, as cultivares vermelhas são as mais preferidas. No entanto, as preferências dos consumidores variam de país para país e região a região.

O Croma (C^*) é um parâmetro que representa a intensidade da cor (BOLZAN e PEREIRA, 2017). O resultado do presente trabalho apresenta alto valor para este parâmetro

(41,69) indicando que as maçãs apresentaram uma cor escura, ou seja, mais intensa, pois Segundo Pathare et al. (2013) quanto maior o seu valor, maior a intensidade da cor percebida.

O teor de sólidos solúveis totais obtidos para maçã foi de 11,17 °Brix. Valor este próximo aos também obtidos para maçãs *in natura* por Cuccurullo et al. (2018), que foi de 12,4 °Brix e por Monteiro et al. (2015) para frutos do murici (11,1 °Brix). Segundo Pimentel Junior et al. (2019), este parâmetro indica o grau de maturação da fruta, valores superiores deste parâmetro indicam elevado grau de maturação.

O teor de sólidos solúveis é um indicativo dos teores de açúcares solúveis presentes em um alimento e, conseqüentemente, da doçura deste, sendo influenciado por diversos fatores como cultivar, clima, solo, entre outros (QUEIROZ et al., 2012).

O valor de pH encontrado para maçã *in natura* foi de 4,38, estando próximo ao relatado por Cuccurullo et al. (2018) ao também analisarem maçãs *in natura* que foi de 4,1 e superior ao obtido por Queiroz et al. (2012) ao estudarem os constituintes químicos das frações de lichia *in natura* onde obtiveram pH de 3,87 na polpa. Segundo Santos e Boênio (2016), baixos valores de pH em frutas garantem sua conservação sem a necessidade de tratamento térmico muito severo, não comprometendo sua qualidade nutricional.

Observa-se uma acidez total titulável de 0,177 % de ácido málico, corroborando com o percentual obtido por Cuccurullo et al. (2018) em seus estudos com maçã (0,18 % de ácido málico). Morzelle et al. (2015) ao analisarem as características físico-químicas de diferentes frutos do cerrado brasileiro obtiveram acidez titulável de 0,12 %, 0,19% e 0,17% para os frutos de curriola, gabirola e murici, respectivamente.

A acidez indica sabor ácido ou azedo dos frutos, o que é representado pela presença de ácidos orgânicos nos vegetais, sendo um importante parâmetro, não somente para determinar a relação de doçura de um produto, mas pela sua grande utilidade na indústria de alimentos (AROCHA et al., 2010).

Para a relação sólidos solúveis totais/acidez total titulável obteve-se um alto valor (63,11), indicando que a maçã apresenta elevado grau de doçura. Valor inferior foi reportado por Chaves Neto e Silva (2019) em seus estudos com frutos cajá-mangueira de diferentes microrregiões do estado da Paraíba que variaram de 13,36 a 21,68.

Como a maçã em estudo apresentou valor elevado com relação ao parâmetro *ratio*, constata-se que a fruta apresenta elevada palatabilidade para o consumo *in natura* e pode ser utilizada como matéria-prima em diversos processos produtivos. Segundo Nascimento et al. (2011), esta fruta é indicada para a industrialização de produtos adocicados, tais como, doces,

geleias, picolés e sorvetes; entretanto, o seu alto valor de *ratio* foi devido à sua baixa acidez e ao seu elevado teor de sólidos solúveis.

O teor de cinzas obtidos no presente estudo foi de 0,165%, semelhante ao expresso na Tabela de Composição de Alimentos (TACO, 2011) que apresenta teor de cinzas de 0,20% para maçã “fuji” e 0,30% para maçã Argentina . Segundo Nunes et al. (2017a), os teores de cinzas variam em função da localidade, onde a variedade foi plantada e da composição do solo onde crescem. Valores próximos ao do presente estudo foram obtidos na polpa do abacaxi (0,21%) por Barros et al. (2019).

Estão apresentados na Tabela 4.5 os valores médios e o desvio padrão para os compostos bioativos analisados na casca da maçã *in natura*.

Tabela 4.5 – Caracterização dos compostos bioativos da cascas de maçã *in natura*

Parâmetros	Maçã <i>in natura</i>
Vitamina C (mg de ácido ascórbico/100g de maçã)	7,39 ± 0,11
Compostos fenólicos totais (mg.100g ⁻¹ de ácido gálico)	359,29 ± 19,21
Antocianinas totais (mg/100g)	14,52 ± 0,58
Flavonoides totais (mg/100g)	1,62 ± 0,15
Clorofila a (mg/100g)	0,0166 ± 0,002
Clorofila b (mg/100g)	0,0457 ± 0,003
Clorofila total (mg/100g)	0,0564 ± 0,001

Foi obtido uma pequena quantidade de vitamina C para maçã em estudo (7,39 mg de ácido ascórbico/100g de maçã). Dibanda et al. (2019) em estudos com diferentes cascas de frutas obtiveram os seguintes teores de vitamina C para Laranja (14,54 mg/100g), banana (13,93 mg/100g) e maçã (12,37 mg/100g). Matos et al. (2019) ao caracterizarem o coco catolé obtiveram teor inferior desta vitamina (1,52 mg/100g). Oliveira et al. (2017) obtiveram teor de 0,40 mg/100g em mangas “Rosa”. O valor da vitamina C na alimentação humana está associado à produção de colágeno, fixação de ferro, metabolismo da tirosina, a conversão do ácido fólico em ácido folínico, metabolismo de carboidratos, a síntese de lipídios e proteínas (CANACUAN et al., 2016).

A casca da maçã apresentou alto teor de compostos fenólicos totais (359,29 mg.100g⁻¹ de ácido gálico). Morais et al. (2019) ao analisarem cascas de maçã em estágio de maturação maduro obtiveram teor de compostos fenólicos totais de 212,12 mg.100g⁻¹ de ácido gálico, utilizando extrato hidroalcoólico. Lima et al. (2017) obtiveram teor de compostos fenólicos

totais de 87,3 mg.100g⁻¹ de ácido gálico para frutos do kikan. Teixeira et al. (2016) ao quantificarem fenóis totais com extrato etanólico da fruta *Physalis Peruviana L* a mesma apresentou uma quantidade equivalente a 149.3 mgGAE.100g⁻¹.

Saleem & Saeed (2019) ao quantificarem o teor de compostos fenólicos totais presentes em cascas de laranja, limão e banana, utilizando diferentes solventes, obtiveram valores que variaram entre 12,4 a 21,21 mg/g extrato; 16,29 a 29,72 mg/g extrato; 8,6 a 15,6 mg/g extrato, respectivamente.

As antocianinas são pigmentos relativamente instáveis, sendo que sua maior estabilidade ocorre sob condições ácidas. A casca da maçã *in natura* apresentou teor de antocianinas de 14,52 mg/100g. Para mesma variedade em estudo Kokalj et al. (2019) obtiveram teor de antocianinas de 66,5 mg/kg. Essa diferença poderá estar relacionada a diversos fatores externos, em particular a luz, pois a formação das antocianinas é afetada principalmente por este fator.

De acordo com Fennema et al. (2010), embora a maior parte da cor amarela dos alimentos seja atribuída à presença de carotenoides, essa cor em alguns alimentos é atribuída à presença de flavonoides do tipo não antociânico. No referido estudo a casca da maçã apresentou teor de 1,62 mg/100g para flavonoides. Moreira et al. (2018) obtiveram 2,88 mg/100g de flavonoides em kiwis *in natura*. Entre os flavonóis, os glicosídeos da quercetina são quase exclusivamente encontrados na casca da maçã (AWAD et al., 2000; KOKALJ et al., 2019). Segundo Bi et al. (2014) os principais fenólicos encontrados em maçãs são flavonóis, antocianinas, ácidos fenólicos e di-hidrochalconas.

Baixas concentrações de clorofila foram obtidas para as cascas de maçã sendo para clorofila a (0,0166 mg/100g), clorofila b (0,0457 mg/100g) e clorofila total (0,0564 mg/100g). Baixas concentrações também foram obtidas nos estudos de Santos et al. (2019c) ao analisarem a casca de kiwi, obtiveram os seguintes teores de clorofila a (0,145 mg/100g), clorofila b (0,028 mg/100g) e clorofila total (0,173 mg/100g).

Os pigmentos de clorofila são altamente apreciados como componentes funcionais em frutas e vegetais, tanto por suas propriedades de coloração verde quanto por seus benefícios à saúde para o consumo humano derivados de suas propriedades biológicas. (DOMÍNGUEZ et al., 2016).

4.5 CARACTERIZAÇÕES FÍSICAS, FÍSICO-QUÍMICAS E COMPOSTOS BIOATIVOS DAS MAÇÃS DURANTE ARMAZENAMENTO.

Na Tabela 4.6 estão apresentados os resultados obtidos para os parâmetros de umidade, sólidos totais e atividade de água (A_w) no decorrer do armazenamento das maçãs nas condições ambiente e sob refrigeração (4 °C).

Tabela 4.6 – Teor de umidade, sólidos totais e atividade de água das maçãs durante armazenamento ambiente e refrigerado (4 °C).

Tempo de armazenamento (Dias)	Umidade (%)		Sólidos totais (%)		Atividade água (A_w)	
	Ambiente	Refrigerado	Ambiente	Refrigerado	Ambiente	Refrigerado
0	82,84 ^b	82,84 ^d	17,16 ^a	17,16 ^a	0,988 ^b	0,988 ^c
7	84,04 ^{ab}	86,77 ^c	15,96 ^{ab}	13,23 ^b	0,990 ^{ab}	0,990 ^{bc}
14	85,21 ^a	87,21 ^{bc}	14,79 ^b	12,79 ^{bc}	0,993 ^{ab}	0,991 ^{abc}
21	85,45 ^a	87,36 ^{abc}	14,55 ^b	12,64 ^{bcd}	0,996 ^a	0,994 ^{abc}
28	-	87,41 ^{abc}	-	12,59 ^{bcd}	-	0,996 ^{ab}
35	-	87,77 ^{ab}	-	12,23 ^{cd}	-	0,997 ^a
42	-	88,03 ^a	-	11,97 ^d	-	0,996 ^{ab}
CV (%)	0,71	0,29	3,86	1,91	0,26	0,22

Nota: Letras minúsculas iguais sobrescritas na mesma coluna não diferem significativamente no tempo de armazenamento estudado quando aplicado o de *Tukey* ao nível de 5% de probabilidade.

O teor de umidade apresentou uma ganho percentual de 2,61% para o armazenamento na temperatura ambiente no decorrer de 21 dias, não apresentando diferença significativa entre si. Para a condição de armazenamento sob refrigeração, um maior percentual de ganho de umidade (5,18%) foi obtido no decorrer dos 42 dias de armazenamento. Quando se comparou estatisticamente os valores de umidade, nota-se que entre o período de 21 a 28 dias as maçãs não apresentaram diferença significativa a um nível de 5% de probabilidade.

Essa variação de umidade é consequência do cultivar, estágio de maturação da colheita e disponibilidade de água no fruto, mas a deterioração dos frutos começam desde a sua colheita. No entanto, o uso de baixa temperatura pode reduzir a respiração e evitar a deterioração microbiana (AADIL et al., 2019a).

Observa-se redução no teor de sólidos totais em decorrência do aumento do teor de umidade, e consequentemente aumento no teor de sólidos solúveis totais mostrando que, a

redução deste aumentou o nível dos constituintes solúveis na fruta. A redução do teor de sólidos totais na temperatura ambiente não apresenta diferenças estatística, mas em condições de refrigeração no intervalo de 14 a 35 dias também não apresentam variações significativas entre si ($p < 0,05$).

Assim, como observado para o teor de umidade a atividade de água também apresentou comportamento semelhante, aumentando no decorrer do armazenamento. Segundo Santos et al. (2016) alta atividade de água indica maiores quantidades de água livre disponível para as reações bioquímicas e, conseqüentemente, vida útil mais curta. Os valores de atividade de água na condição (ambiente) apresentou valor máximo de 0,996 com 21 dias de armazenamento não diferindo estatisticamente entre o período de 7 a 14 dias. Em decorrência do alto teor de umidade e conseqüentemente altos valores de atividade de água as maçãs apresentaram podridões e lesões em sua superfície (Figura 4.12) com 21 dias de armazenamento, comprovando a alta perecibilidade desses frutos.



Figura 4.12- Maçãs com 21 dias de armazenamento na temperatura ambiente.

A atividade de água na condição de refrigeração também apresentou altos valores e sofreu tendência de aumento com o avanço dos tempo de armazenamento. O maior valor (0,997) deste parâmetro nesta condição foi observado com 35 dias de armazenamento, no entanto, estatisticamente apenas os valores obtidos no 7º e no 35º dia de armazenamento apresentaram diferença significativa entre si. Apesar das maçãs mantidas na temperatura de refrigeração apresentarem comportamento semelhante de umidade e atividade de água, apenas após 42 dias de armazenamento, as mesmas começaram a apresentar lesões em suas estrutura (Figura 4.13).

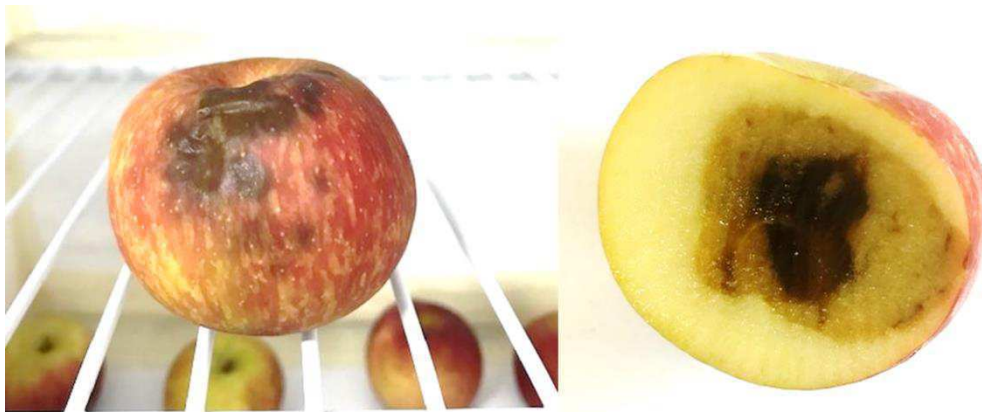


Figura 4.13 - Maçãs com 42 dias de armazenamento na temperatura de refrigeração (4 °C).

Segundo Brackmann et al. (2008) um dos principais motivos que geralmente impede longos períodos de armazenamento e comercialização dos frutos de consumo “*in natura*” é a incidência de podridões, que constituem a maior parte de refugo nos galpões de embalagens, atingindo perdas de 35%. Quando utilizadas todas as recomendações de manejo, esse volume atinge 0,5 a 3% das maçãs frigorificadas. A redução das perdas por podridões é obtida com o uso das práticas recomendadas para o manejo correto da fruta, com medidas profiláticas e com controle químico (SANHUEZA, 2004).

De acordo com Gutpa e Prakash (2019), a degradação nutricional e a qualidade inadequada das frutas durante seu armazenamento, podem resultar na rejeição dos consumidores e redução de vendas, além de aumentar os riscos associados à segurança alimentar.

A textura é um termo coletivo que engloba as propriedades estruturais e mecânicas de um alimento e sua percepção sensorial na mão ou na boca (JHA et al., 2019) e segundo Freitas et al. (2018) uma das principais preferências dos consumidores de maçã é a textura, entretanto, diversos fatores afetam este parâmetro nos frutos, tais como, condições climáticas, estágio de maturação, composição química entre outros (CHARLES et al., 2017).

Na Tabela 4.7 estão apresentados os resultados obtidos para o parâmetros de textura no decorrer do armazenamento das maçãs nas condições ambiente e sob refrigeração (4 °C).

Tabela 4.7 – Perfil instrumental de textura das maçãs durante armazenamento ambiente e refrigerado (4 °C).

Tempo de armazenamento (Dias)	Firmeza (N)	
	Ambiente	Refrigerado
0	11,51 ^a	11,51 ^a
7	11,36 ^a	11,34 ^a
14	10,80 ^a	10,91 ^a
21	10,35 ^a	10,84 ^a
28	-	10,83 ^a
35	-	10,28 ^a
42	-	10,01 ^a
CV (%)	6,39	6,52

Nota: Letras minúsculas iguais sobrescritas na mesma coluna não diferem significativamente no tempo de armazenamento estudado quando aplicado o de *Tukey* ao nível de 5% de probabilidade.

Para as duas condições de armazenamento, pode-se observar que a firmeza das maçãs decresceram com o decorrer dos dias de armazenamento, não apresentando diferença estatística significativas entre si. Comportamento semelhante foi observado por Nunes et al. (2017b) ao avaliarem o armazenamento de mamão ‘formosa’ na temperatura de 10 °C e no decorrer de 12 dias.

Foi observado também que as maçãs na temperatura ambiente sofreram maiores reduções quando se comparou os primeiros 21 dias de armazenamento das duas condições em análise. Segundo Giongo et al. (2019) esta redução está relacionada com o amolecimento geral de todas as camadas de tecido constituinte do fruto e com a desintegração das paredes celulares.

Frutas carnudas sofrem um processo de amadurecimento que resultam na modificação das propriedades texturais, adquirindo primeiro a textura desejada para a alimentação, mas posteriormente uma textura indesejável que leva a perdas pós-colheita economicamente importantes (MERCADO et al., 2019).

Frutas como maçã, marmelo, pêra, cranberry e melancia amaciam moderadamente à medida que amadurecem (BOURNE, 1979). Têm vida longa de armazenamento, mas apresenta textura quebradiça e frágil na colheita e após armazenamento (MERCADO et al., 2019).

Nas Figuras 4.14 e 4.15 pode-se observar a perda de massa fresca das maçãs no decorrer do armazenamento nas condições ambiente e sob refrigeração (4 °C).

A perda de massa é um aspecto importante e comum durante o armazenamento de frutas e hortaliças, que ocorre pelo consumo de nutrientes no próprio metabolismo do produto ocasionada pelos processos transpiratórios e devido à diferença de pressão de vapor entre a superfície da fruta e o meio ambiente (SARMENTO et al., 2015; SIDDIQUI, 2018).

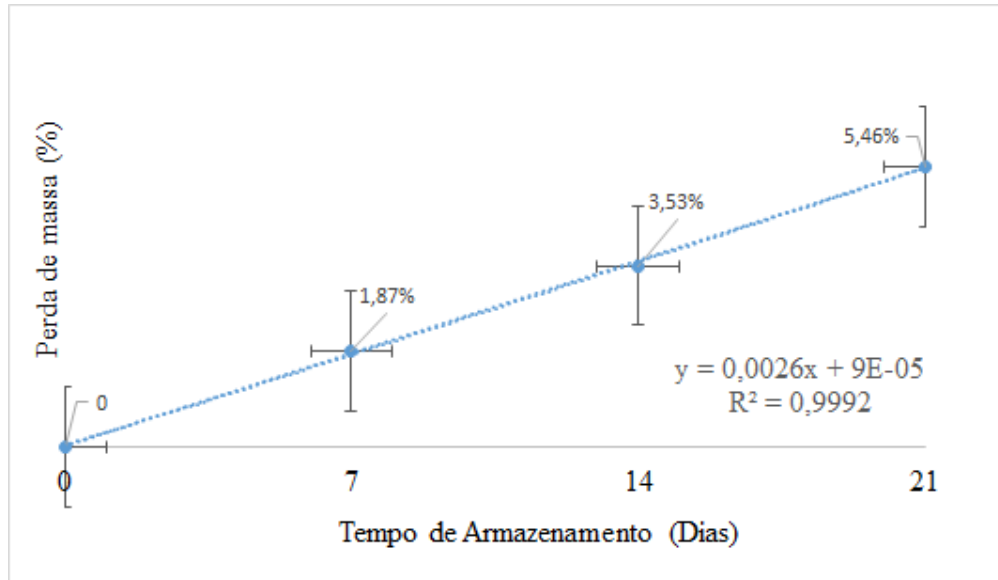


Figura 4.14 - Perda de massa fresca das maçãs no decorrer do armazenamento na temperatura de ambiente.

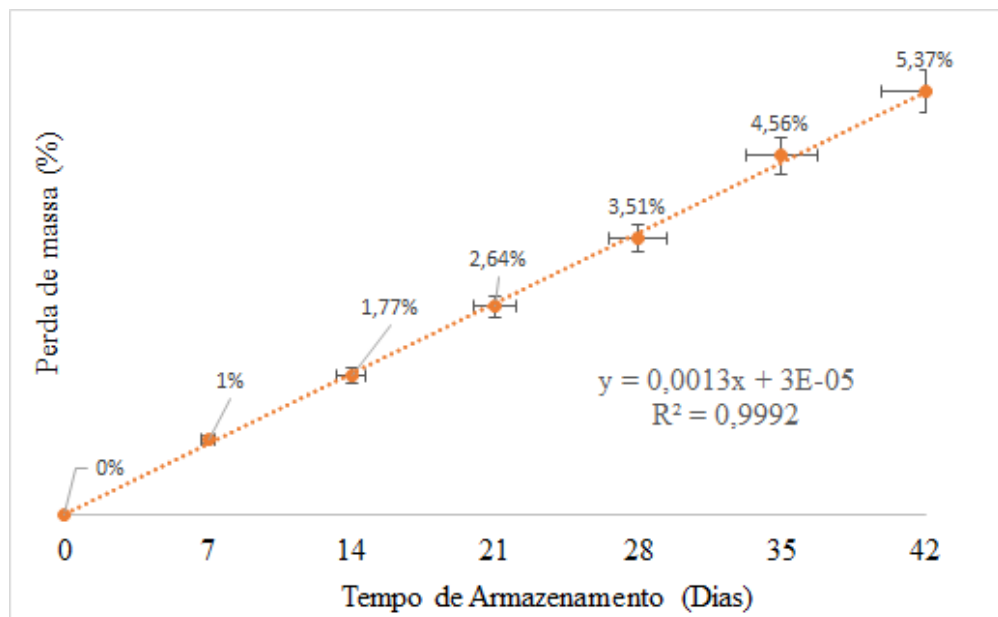


Figura 4.15 - Perda de massa fresca das maçãs no decorrer do armazenamento na temperatura de refrigeração (4 °C).

Verificou-se aumento no percentual de perda durante o armazenamento, sendo observado que a maior perda de massa fresca foi para as maçãs na temperatura ambiente, que atingiu ao fim do armazenamento (21 dias) com uma perda de massa de 5,46%, enquanto as maçãs mantidas sob refrigeração apresentaram 5,37% de perda de massa fresca ao final dos 42 dias de armazenamento. Portanto, as maçãs mantidas sob temperatura de refrigeração apresentaram menor percentual de perda de massa. Menores reduções nos percentuais de perda de massa também foram observados por Goulart et al. (2017) ao avaliarem no decorrer de 10 dias de pêssegos na temperatura de 1 °C. Segundo Mukama et al. (2019) o tamanho do fruto pode influenciar a perda de peso, uma vez que afeta a área da superfície.

Sarmento et al. (2015) em seus estudos com banana ‘prata catarina’ no decorrer do armazenamento em temperatura ambiente, observaram 2,75% de perda de massa no decorrer de 8 dias de armazenamento. Souza et al. (2009) ao avaliarem o armazenamento de berinjelas obtiveram um percentual de perda de massa de 13,2% ao fim de 15 dias de armazenamento sob temperatura ambiente.

A respiração e a transpiração no fruto armazenado a frio aumentam com a extensão dos períodos de armazenamento, levando a um aumento na porcentagem de perda de peso (SUN et al., 2019c). Ao comparar os gráficos referentes ao armazenamento nas temperaturas ambiente e de refrigeração, observa-se que o processo de refrigeração proporciona a redução da taxa respiratória do fruto, possibilitando assim valores reduzidos com relação a perda de massa durante o armazenamento e a manutenção da superfície lisa da fruta, fatores que influenciam na aceitação sensorial do produto. Geralmente as frutas são selecionadas apenas com base na aparência, porque não é possível conhecer a doçura ou acidez da maçã durante a compra (JHA et al., 2012).

Na Tabela 4.8 estão apresentados os resultados obtidos para as coordenadas de cor (L*, a*, b* e C*) avaliadas nas cascas das maçãs no decorrer do armazenamento nas condições ambiente e sob refrigeração (4 °C).

Tabela 4.8 – Coordenadas cromáticas (L*, a*, b* e C*) das cascas das maçãs durante armazenamento ambiente e refrigerado (4 °C).

Parâmetros	Tempo de armazenamento (Dias)							CV (%)
	0	7	14	21	28	35	42	
L* (ambiente)	49,09 ^a	46,54 ^a	45,33 ^a	43,66 ^a	-	-	-	7,91
L* (refrigerado)	49,09 ^a	44,64 ^a	43,40 ^a	43,28 ^a	40,85 ^a	40,76 ^a	40,50 ^a	7,31
a* (Ambiente)	32,72 ^b	34,49 ^{ab}	35,60 ^a	34,75 ^a	-	-	-	3,63
a*(Refrigerado)	32,72 ^d	33,36 ^{cd}	34,01 ^{bcd}	35,63 ^{abc}	35,70 ^{abc}	36,43 ^a	36,67 ^{ab}	4,43
b* (Ambiente)	24,90 ^a	25,85 ^a	26,09 ^a	28,09 ^a	-	-	-	2,69
b*(Refrigerado)	24,90 ^a	24,23 ^a	25,10 ^a	26,32 ^a	26,77 ^a	26,84 ^a	27,07 ^a	1,22
C* (Ambiente)	41,70 ^a	43,13 ^a	44,50 ^a	44,72 ^a	-	-	-	6,88
C*(Refrigerado)	41,70 ^a	41,44 ^a	42,71 ^a	44,42 ^a	44,63 ^a	45,41 ^a	45,66 ^a	6,71

Nota: Letras minúsculas iguais sobrescritas na mesma linha não diferem significativamente no tempo de armazenamento estudado quando aplicado o de *Tukey* ao nível de 5% de probabilidade.

O valor de L* diminuiu levemente durante o tempo de armazenamento (ambiente e refrigerado), não apresentando diferenças estatísticas entre si ($p < 0,05$). Segundo Kim et al. (2019) este parâmetro (L*) representa a luminosidade com valores que podem variar de 0 (preto) a 100 (branco) estabelecendo assim uma escala cinza. Segundo Dar et al. (2019) as mudanças de cor são mais intensas no armazenamento ambiente do que no armazenamento refrigerado, isso ocorre porque todas as reações de degradação, incluindo as responsáveis pela cor, ficam mais lentas sob condições de baixa temperatura.

As médias da intensidade a* para as duas condições de armazenamento, apresentaram valores positivos, no qual correspondem à cor vermelha característica da casca da maçã, que no armazenamento ambiente se tornou mais intensa no 14º dia de armazenamento não apresentando diferença significativa entre si. No entanto, as maçãs mantidas sob refrigeração apresentaram maior intensidade da coordenada (a*) no decorrer do armazenamento, atingindo valor máximo de 36,67 com 48 dias de armazenamento, não diferindo estatisticamente no período de 21 a 48 dias.

Os valores da intensidade b* para as duas condições de armazenamento também apresentaram valores positivos, que correspondem à cor amarela onde não foram observadas diferenças significativas no decorrer do armazenamento (ambiente e refrigerado) a 5% de probabilidade. O maior valor desta coordenada (28,09) foi obtido no armazenamento ambiente com 21 dias de armazenamento.

Segundo Shamili et al. (2019) os valores de a^* e b^* devem ser considerados para uma melhor discriminação das alterações de cor durante todo o período de armazenamento e amadurecimento. De acordo com Patras (2019) geralmente, as alterações de cor observadas durante o armazenamento são devidas à influência do pH e de diferentes copigmentações, mas também devido à polimerização e escurecimento das antocianinas.

O tempo de armazenamento ambiente e refrigerado alterou levemente a coordenada cromática (C^*) para 44,72 na temperatura ambiente e 45,66 para a refrigerada ambos com 21 e 42 dias de armazenamento, respectivamente, não apresentando diferenças significativas ($p < 0,05$). Segundo Wibowo et al. (2015) o croma (C^*), ou índice de saturação, caracteriza o atributo quantitativo da cor e é proporcional à sua intensidade.

Na Tabela 4.9 estão apresentados os resultados obtidos para o teor de sólidos solúveis totais (SST), pH e acidez total titulável (ATT) no decorrer do armazenamento das maçãs nas condições ambiente e sob refrigeração (4 °C).

Tabela 4.9 – Teor de sólidos solúveis totais, pH e acidez titulável das maçãs durante armazenamento ambiente e refrigerado (4 °C).

Tempo de armazenamento (Dias)	Sólidos Solúveis Totais (°Brix)		pH		Acidez titulável (% ácido málico)	
	Ambiente	Refrigerado	Ambiente	Refrigerado	Ambiente	Refrigerado
0	11,17 ^c	11,17 ^b	4,38 ^b	4,38 ^a	0,177 ^a	0,177 ^c
7	11,67 ^{bc}	12,00 ^{ab}	4,36 ^{ab}	4,30 ^{ab}	0,179 ^a	0,181 ^c
14	12,17 ^{ab}	12,33 ^{ab}	4,24 ^{ab}	4,21 ^{abc}	0,185 ^a	0,205 ^{bc}
21	13,00 ^a	12,67 ^a	4,14 ^b	4,08 ^{abc}	0,198 ^a	0,217 ^{bc}
28	-	12,83 ^a	-	4,01 ^{bc}	-	0,234 ^{ab}
35	-	13,00 ^a	-	4,00 ^{bc}	-	0,247 ^{ab}
42	-	13,17 ^a	-	3,91 ^c	-	0,267 ^a
CV (%)	2,95	4,20	2,06	2,96	2,32	3,17

Nota: Letras minúsculas iguais sobrescritas na mesma coluna não diferem significativamente no tempo de armazenamento estudado quando aplicado o de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Observa-se aumento no teor de sólidos solúveis totais (SST) no decorrer do armazenamento, sendo obtido maiores teores (13,17 °Brix) para as maçãs mantidas sob refrigeração no decorrer de 42 dias de armazenamento, no entanto, não apresentando aumento significativo no período de 21 a 42 dias. Os teores de SST podem aumentar de acordo com a

evolução da maturação, devido aos processos de biossíntese ou através da degradação de polissacarídeos em açúcares (MOURA et al., 2016b).

Em condições ambientes o teor de SST teve um aumento de até 1,83 °Brix no decorrer de 21 dias, não apresentando diferença estatística no período de 7 a 14 dias; e de 14 a 21 dias de armazenamento, indicando um processo de maturação mais rápido. As oscilações nos valores de sólidos solúveis durante o armazenamento provavelmente devem-se às características da matéria-prima, à atividade respiratória do produto e também à excessiva perda de massa fresca dos frutos ocorrida durante todo o armazenamento (RINALDI et al., 2017).

Garcia et al. (2019) ao avaliarem o armazenamento de mangas nas temperaturas de 7,5, 10 e 12,5 °C no decorrer de 3 semanas, observaram que a temperatura de 7,5 °C foi a que apresentou menor desenvolvimento do teor de SST, cujo efeito se manifestou até a maturidade.

Estes autores atribuem as diferenças nos valores de sólidos solúveis totais aos diferentes estádios de maturação da fruta, pois quanto mais elevado for este grau, maior o teor de sólidos solúveis totais (GUEIROS et al., 2019).

Os valores de pH obtidos apresentaram redução com o tempo de armazenamento, sendo sempre inferior a 5 ($\text{pH} < 5,0$) nas duas condições de armazenamento. Para a temperatura ambiente houve uma redução para 4,14 não apresentando diferença significativa entre si durante 21 dias. Observou-se que no armazenamento refrigerado, houve uma ligeira queda para 3,91 nos valores de pH com o decorrer dos 42 dias de armazenamento, demonstraram que nesta condição as maçãs apresentaram valores de pH mais ácidos e não diferiram estatisticamente do 14° a 42° dias de armazenamento.

Segundo Motta et al. (2015) as alterações nos valores de pH são decorrentes das mudanças nas concentrações dos ácidos orgânicos durante o desenvolvimento da fruta, que difere conforme a espécie, podendo aumentar ou diminuir em função da sua maturação (CHITARRA e CHITARRA, 2005).

Para o processamento de frutos, baixos valores de pH favorece a conservação dos produtos oriundos destes, visto que dificulta o desenvolvimento de microrganismos, por outro lado para o mercado de frutas frescas são apreciados valores de pH mais elevados, o que têm maior preferência por parte do consumidor (BENEVIDES et al. 2008; GONDIM et al., 2013; CHAVES NETO e SILVA, 2019).

Com relação aos valores de acidez total titulável (ATT), as duas condições de armazenamento apresentaram aumento no decorrer do armazenamento, sendo que na temperatura ambiente foi observado menores valores (variação de até 0,021 % de ácido málico)

não apresentando diferença significativa entre si no decorrer de 21 dias de armazenamento. Fato este também observado por Falcão et al. (2017) que ao avaliarem bananas no decorrer 30 dias nas temperaturas de 27 e 13 °C, os menores valores de acidez também foram observados para maior temperatura.

Já para condição de refrigeração, observou-se maiores valores de acidez (variação de até 0,09 % de ácido málico) no decorrer de 42 dias de armazenamento, em virtude das maiores reduções nos valores de pH, porém não houve diferença estatística significativa entre 14 a 35 dias de armazenamento. Mendonça et al. (2015) ao avaliaram o armazenamento de caquis ‘Rama Forte’ sob refrigeração (7 °C), também observaram tendência de aumento nos valores de acidez titulável no decorrer de 20 dias, variando de 0,22 a 0,46 % de ácido málico.

Na Tabela 4.10 estão apresentados os resultados obtidos para a relação sólidos solúveis totais/acidez total titulável (SST/ATT) e para o teor de cinzas no decorrer do armazenamento das maçãs nas condições ambiente e sob refrigeração (4 °C)

Tabela 4.10 – Relação sólidos solúveis totais/acidez total titulável (SST/ATT) e teor de cinzas das maçãs durante armazenamento ambiente e refrigerado. (4 °C).

Tempo de armazenamento (Dias)	Ratio (SST/ATT)		Cinzas (%)	
	Ambiente	Refrigerado	Ambiente	Refrigerado
0	63,28 ^a	63,28 ^{ab}	0,165 ^b	0,165 ^b
7	65,24 ^a	66,48 ^a	0,167 ^b	0,253 ^a
14	65,98 ^a	60,40 ^{ab}	0,273 ^a	0,265 ^a
21	66,43 ^a	58,51 ^{abc}	0,132 ^b	0,252 ^a
28	-	54,99 ^{bc}	-	0,286 ^a
35	-	52,72 ^{bc}	-	0,247 ^a
42	-	49,49 ^c	-	0,267 ^a
CV (%)	7,77	6,63	2,65	2,18

Nota. Letras minúsculas iguais sobrescritas na mesma coluna não diferem significativamente no tempo de armazenamento estudado quando aplicado o de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

De acordo com Sousa et al. (2018), o parâmetro ratio é um índice tecnológico utilizado para indicar a relação entre o teor de sólidos solúveis totais e acidez total titulável (SST/ATT) e é capaz de avaliar qual o sabor predominante – o doce ou o ácido – ou ainda se há equilíbrio entre eles (BRASIL, 1996).

Portanto, foi possível observar na Tabela 4.10 que durante o armazenamento em temperatura ambiente os valores desta relação aumentaram com o tempo, sendo superior a 60 e inferior a 70 e não apresentaram diferença significativa entre si. Já para condição de refrigeração os valores diminuíram no decorrer do armazenamento ($70 > \text{ratio} > 40$) apresentando efeitos significativos ($p < 0,05$) durante os 42 dias de armazenamento. A diminuição dos valores nesta condição, são relacionados aos maiores valores de acidez (ATT) obtidos.

Brunini et al. (2004) em seus estudos com jabuticaba armazenadas em diferentes embalagens na temperatura ambiente e refrigerada também observaram aumento desta relação na condição ambiente e redução na temperatura de refrigeração.

Durante o armazenamento ambiente e refrigerado, não foi observado relação direta entre o teor de cinzas e o tempo de armazenamento. Modesto Júnior et al. (2016) também não observaram correlação direta do teor de cinzas da polpa de ginja (*Eugênia uniflora L.*) durante 60 dias armazenamento na temperatura de 8 °C, apenas apresentou variação de 0,26 a 0,431%.

Para o armazenamento na temperatura ambiente, observa-se variação de até 0,108%, sendo que o maior percentual de cinzas (0,273%) foi obtido com 14 dias de armazenamento, apresentando diferenças significativas entre os demais dias de armazenamento. Segundo Liu (2019) o teor de cinzas refere-se ao resíduo inorgânico remanescente após a ignição ou oxidação completa da matéria orgânica em um material biológico.

No decorrer do tempo de armazenamento os resultados da ANOVA mostraram que, para as maçãs submetidas ao armazenamento refrigerado não tiveram efeitos significativos com relação ao teor de cinzas ($p < 0,05$), sendo obtido o maior teor (0,286%) com 28 dias de armazenamento. Santos et al. (2019) ao analisarem o teor de cinzas em diferentes frutas após serem congeladas (-18 °C) durante 60 dias, obtiverem os seguintes teores para maçã (0,39%); mamão (0,47%); morango (0,41%); ameixa (0,26%).

De acordo com Fennema (2000), dentre os nutrientes presentes nas frutas, as vitaminas são os mais facilmente degradados em virtude dos fatores externos ambientais, principalmente o ácido ascórbico.

Na Tabela 4.11 estão apresentados os teores de ácido ascórbico (vitamina C) no decorrer do armazenamento das maçãs nas condições ambiente e sob refrigeração (4 °C).

Tabela 4.11 – Teor de ácido ascórbico (vitamina C) das maçãs durante seu armazenamento ambiente e refrigerado (4 °C).

Tempo de armazenamento (Dias)	Vitamina C (mg de ácido ascórbico/100g de maçã)	
	Ambiente	Refrigerado
0	7,39 ^a	7,39 ^a
7	6,43 ^b	7,06 ^{ab}
14	5,95 ^b	6,93 ^{ab}
21	4,77 ^c	5,98 ^{bc}
28	-	5,40 ^{cd}
35	-	4,64 ^d
42	-	4,51 ^d
CV (%)	3,43	6,49

Nota: Letras minúsculas iguais sobrescritas na mesma coluna não diferem significativamente no tempo de armazenamento estudado quando aplicado o de *Tukey* ao nível de 5% de probabilidade.

A vitamina C diminuiu durante o período do armazenamento, sinalizando que ocorre uma degradação deste componente. Na temperatura ambiente houve uma redução de 64,55% no decorrer de 21 dias de armazenamento, não havendo diferença estatística significativa para o período de 7 a 14 dias.

Sob condições de refrigeração apenas (2,88 mg de ácido ascórbico/100g de maçã) foi reduzido para um período de 42 dias, estatisticamente o período entre 7 e 14 dias; 35 e 42 dias não apresentaram diferença significativas ao nível de 5% de probabilidade.

Embora a vitamina C também seja perdida em condições refrigeradas, a perda é mais pronunciada sob condições ambientais, devido a exposição do produto a temperaturas mais elevadas e maior exposição as fontes luminosas. Ao se considerar o mesmo intervalo de armazenamento (21 dias) as seguintes reduções de vitamina C foram observadas (2,62 e 1,41 mg de ácido ascórbico/100g de maçã) para o armazenamento ambiente e refrigerado, respectivamente.

Medeiros et al. (2012) também observaram redução da vitamina C em melões armazenados no período de 35 dias sob temperatura de 10 °C. Para Gabriel et al. (2019) o ambiente também interferiu na concentração de vitamina C em morangos. Veberic et al. (2014) ao avaliaram o efeito do congelamento rápido e lento em frutos da amoreira-preta, observaram que o conteúdo de vitamina C apresentaram perdas de até 80 %.

Segundo Rebouças et al. (2013) e Silva et al. (2018) as vitaminas são compostos muito sensíveis e podem ser degradadas por vários fatores, como temperatura, presença de oxigênio, luz, umidade, pH, duração do tratamento a que o fruto foi submetido, entre outros.

Na Tabela 4.12 estão apresentados os resultados dos compostos bioativos (compostos fenólicos totais (CFT), antocianinas totais (AT) e flavonoides totais (FT)) das cascas das maçãs no decorrer do armazenamento nas condições ambiente e sob refrigeração (4 °C).

Tabela 4.12 – Compostos fenólicos totais, antocianinas e flavonoides totais nas cascas das maçãs durante armazenamento ambiente e refrigerado (4 °C).

Tempo de armazenamento (Dias)	Compostos fenólicos totais (mg.100g ⁻¹ de ácido gálico)		Antocianinas totais (mg/100g)		Flavonoides totais (mg/100g)	
	Ambiente	Refrigerado	Ambiente	Refrigerado	Ambiente	Refrigerado
	0	359,29 ^a	359,29 ^a	14,52 ^d	14,52 ^f	1,62 ^c
7	349,77 ^a	333,08 ^b	15,49 ^c	40,15 ^e	1,67 ^c	2,65 ^e
14	202,35 ^b	276,18 ^c	36,10 ^a	42,25 ^d	3,83 ^b	2,69 ^e
21	197,42 ^b	224,43 ^d	20,43 ^b	42,74 ^d	5,25 ^a	10,98 ^d
28	-	210,11 ^d	-	44,30 ^c	-	15,17 ^c
35	-	205,29 ^d	-	47,45 ^b	-	35,67 ^b
42	-	200,09 ^d	-	49,82 ^a	-	72,08 ^a
CV (%)	4,78	3,44	1,36	0,73	0,92	0,50

Nota: Letras minúsculas iguais sobrescritas na mesma coluna não diferem significativamente no tempo de armazenamento estudado quando aplicado o de *Tukey* ao nível de 5% de probabilidade.

Houve uma redução de (161,87 mg.100g⁻¹ de ácido gálico) no teor de compostos fenólicos totais no decorrer de 21 dias de armazenamento na temperatura ambiente. No entanto, estatisticamente no período entre 14 e 21 dias não houve diferença significativa, assim como, também não foi obtido diferença entre o dia inicial e os 7 primeiros dias do seu armazenamento.

Foi observado menores reduções (até 159,20 mg.100g⁻¹ de ácido gálico) no teor de compostos fenólicos nas maçãs armazenadas sob refrigeração. A partir do 21° até 42° dia de armazenamento refrigerado o teor de compostos fenólicos totais não apresentou diferenças estatísticas significativas ao nível de 5% de probabilidade. Sendo assim, o método de conservação aplicado (refrigeração) preserva maiores concentrações destes compostos, quando comparado com as maçãs que estavam expostas a uma temperatura ambiente.

Segundo Aadil et al. (2019b) durante o armazenamento, a fruta respira reduzindo sua qualidade e comprometendo ou afetando a qualidade dos componentes bioativos da fruta, promotores de saúde, nas suas concentrações e atividades antioxidantes devido a alterações nos padrões de maturação.

Segundo Mendonça et al. (2015) esta diminuição de compostos fenólicos pode ser cominada a uma série de alterações bioquímicas e enzimáticas de determinados fenóis durante o processo de amadurecimento. Estes incluem hidrólises de glicosídeos por glicosidases, oxidação de fenóis por fenoloxidasas e polimerização de fenóis livres (ROBARDS et al., 1999).

O teor de antocianinas das maçãs armazenadas na temperatura ambiente apresentaram diferença estatística significativa no decorrer dos dias, no entanto, pode-se observar uma variação de até 21,58 mg/100g, sendo a maior concentração (36,10 mg/100g) deste composto obtido com 14 dias de armazenamento. Este maior teor está relacionado com a cor da casca da maçã, pode-se observar na Tabela 4.8 que para o mesmo intervalo de tempo, conseqüentemente obteve-se o maior valor da coordenada a*, ou seja, maior intensidade da cor vermelha.

Já para as maçãs armazenadas sob refrigeração, apenas os teores obtidos nos dias 14 e 21 de armazenamento não apresentaram diferença estatística significativa entre si. Houve um aumento de até 35,30 mg/100g no decorrer dos dias de armazenamento, sendo a maior concentração obtida com 42º dia. O maior valor da coordenada a* também foi obtido para o mesmo período de maior concentração de antocianinas no armazenamento.

Zhang et al. (2018) ao avaliaram o teor de antocianinas em morangos no decorrer do tempo após a sua floração, observaram uma tendência de mudança das quantidades de antocianina e proantocianidina como padrões de desenvolvimento fortemente consistentes, geralmente aumentando a antocianina e diminuindo proantocianidina como o fruto em desenvolvimento.

As antocianinas são pigmentos naturais solúveis em água que são responsáveis pela coloração de flores e frutos, além de aumentar a resistência das plantas ao estresse. Nos humanos, as antocianinas funcionam como antioxidantes naturais que eliminam os radicais livres e outras substâncias nocivas ao corpo, conseqüentemente trazendo diversos benefícios à saúde humana (WANG et al., 2019).

Além disso, o processo de amadurecimento de frutos está associado as transformações químicas e/ou enzimáticas específicas desses pigmentos tornando-os indicadores de qualidade

de produtos finais e demonstrando um potencial de aplicabilidade como ferramenta para rastreabilidade do processamento (DOMÍNGUEZ et al., 2016).

A quantidade de flavonoides totais variou significativamente para as maçãs armazenadas na temperatura ambiente obtendo teor máximo (5,25 mg/100g) no seu período de 21 dias armazenamento. Contudo, as maçãs na temperatura de refrigeração no período de 7 a 14 dias não apresentaram diferença estatística significativas. Observa-se que maiores concentrações de flavonoides totais ocorreu no armazenamento refrigerado, alcançando valores de até 72,06 mg/100g no decorrer de 42 dias de armazenamento, indicando que a formação deste composto foi em resposta a defesa ao avanço do seu estágio de maturação.

Savi et al. (2017) ao analisarem flavonoides totais em diferentes frutas com cultivo orgânico e convencional obtiveram os seguintes teores de flavonoides para maçã de cultivo orgânico (14,3 mg/100g) e cultivo convencional (12,1 mg/100g); banana cultivo orgânico (8,8 mg/100g) e cultivo convencional (8,7 mg/100g).

De acordo com Savi et al. (2017) a biodiversidade das espécies resultam em variações de componentes básicos, como carboidratos, proteínas, lipídeos, fibra alimentar, minerais, vitaminas e também dos compostos bioativos como flavonoides. Estes são produzidos em resposta as condições ambientais, por isso, pode-se explicar a diferença nos teores de flavonoides de uma mesma fruta no decorrer do seu armazenamento (TOLEDO e BURLINGAME, 2006).

A determinação dos teores de clorofila ('a', 'b' e total) presentes nas cascas das maçãs no decorrer do seu armazenamento em temperatura ambiente e sob refrigeração (4 °C) são apresentados na Tabela 4.13.

Segundo Muharfiza et al. (2017) a clorofila consiste principalmente de células moles de clorofila 'a' e clorofila 'b'. Destes, a clorofila 'a' apresenta um papel fundamental nas plantas fotossintéticas que evoluem com oxigênio, enquanto a clorofila 'b' é um componente da clorofila verde-amarela e funciona para assimilar a energia da luz azul (XIE et al., 2019).

Tabela 4.13 – Clorofila ‘a’, ‘b’ e total presente nas cascas das maçãs durante armazenamento ambiente e refrigerado (4 °C).

Tempo de armazenamento (Dias)	Clorofila a (mg/100g)		Clorofila b (mg/100g)		Clorofila total (mg/100g)	
	Ambiente	Refrigerado	Ambiente	Refrigerado	Ambiente	Refrigerado
0	0,0166 ^a	0,0166a	0,0457 ^a	0,0457 ^a	0,0564 ^a	0,0564 ^a
7	0,0400 ^b	0,0083b	0,0053 ^b	0,0093 ^d	0,0092 ^b	0,0175 ^b
14	0,0026 ^c	0,0061c	0,0046 ^c	0,0064 ^c	0,0072 ^c	0,0124 ^c
21	0,0019 ^d	0,0045d	0,0044 ^d	0,0063 ^c	0,0064 ^d	0,0107 ^d
28	-	0,0040e	-	0,0051 ^d	-	0,0091 ^e
35	-	0,0026f	-	0,0033 ^e	-	0,0059 ^f
42	-	0,0021g	-	0,0033 ^e	-	0,0053 ^g
CV (%)	1,12	0,85	0,67	1,06	0,96	1,41

Nota: Letras minúsculas iguais sobrescritas na mesma coluna não diferem significativamente no tempo de armazenamento estudado quando aplicado o de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Observa-se que para todos os teores de clorofila analisados (a, b e total) nas duas condições de armazenamento (ambiente e refrigerada) os mesmos apresentaram redução com o decorrer dos dias, além de apresentarem diferenças significativas ao nível de 5% de probabilidade. No entanto, durante o armazenamento sob refrigeração foi perceptível menores reduções destes parâmetros. A presença de diversos compostos de clorofila significa que diferentes estruturas de clorofila exibem propriedades funcionais distintas (CHEN e ROCA, 2018).

Kirigia et al. (2019) ao analisarem o pretinho africano (*Solanum scabrum*) na temperatura de 5 °C durante seu armazenamento, observaram que a clorofila permaneceu significativamente estável, enquanto na temperatura ambiente, mais de 50% de degradação da clorofila ocorreu no decorrer de 6 a 8 dias em armazenamento.

Segundo Arruda et al. (2011) a perda da cor verde deve-se à decomposição da clorofila, processo que é causado por um ou mais fatores atuando em conjunto ou isoladamente. São eles: alteração de pH, atividade de enzimas (clorofilase), presença de sistemas oxidantes (enzimáticos ou químicos) (JACOMINO et al., 2008).

Os pigmentos de clorofila são muito apreciados como componentes funcionais de frutas e vegetais, tanto por suas propriedades de coloração verde quanto por seus benefícios à saúde para o consumo humano derivado de suas propriedades biológicas (DOMÍNGUEZ et al., 2016).

5. CONCLUSÃO

A geometria esférica e a condição de contorno do terceiro tipo foi adequada para descrever o processo de transferências de calor para a maçã. O ajuste da curva simulada aos pontos experimentais apresentou coeficiente de determinação (R^2) maior que 0,99 e baixos valores da função qui-quadrado. Na otimização foi possível determinar ao mesmo tempo a difusividade térmica, o coeficiente convectivo de transferência de calor e as suas incertezas. A difusividade térmica da maçã obtido pelo modelo mostrou-se coerente com o valor obtido a partir da estimativa da correlação de Riedel.

A partir dos parâmetros obtidos por otimização, foi possível simular uma nova curva de resfriamento para uma maçã da mesma variedade, mas com outras dimensões, aumentando o raio da mesma, conseqüentemente, o tempo foi maior para que a mesma entrasse em equilíbrio com o meio e as menores temperaturas no seu interior só foram alcançadas em um maior intervalo de tempo.

A posição do termopar na esfera equivalente foi determinada numericamente ($r = 6,6$ mm) e analiticamente ($r = 7,7$ mm), apresentando uma diferença de 14,3% entre esses dois métodos utilizados. Sendo que a simulação numérica com o termopar na posição correta dentro da esfera equivalente, forneceu as informações necessárias para o conhecimento completo da cinética de resfriamento da maçã.

Nas condições de armazenamento ocorreram variações em todos os parâmetros físicos e físico-químicos analisados; a refrigeração apresentou-se como uma técnica viável na conservação pós colheita das maçãs, possibilitando um armazenamento de até 42 dias com maior preservação dos compostos bioativos. No entanto, nas duas condições estudadas ocorreu aumento nos teores de sólidos solúveis totais, acidez total titulável, atividade de água, umidade, antocianinas, flavonoides e nas coordenadas cromáticas (a^* , b^* e C^*); redução nos valores de pH, firmeza, coordenada cromática (L^*), vitamina C, compostos fenólicos totais e teores de clorofila (“a”, “b” e total).

REFERÊNCIAS

AADIL, R. M.; ROOBAB, U.; MAAN, A. A.; MADNI, G. M. Effect of heat on food properties. **Encyclopedia of Food Chemistry**, p.70-75, 2019a. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21660-0>

AADIL, R. M.; ROOBAB, U.; KHAN, M. K. I.; RAHMAN, U. U. Effect of Storage on Fruit Bioactives. **Encyclopedia of Food Chemistry**, p.83-91, 2019b. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21667-3>

ABRAFRUTAS - Associação Brasileira dos Produtores Exportadores de Frutas e Derivados. (2016) Disponível em: http://abrafrutas.org/index.php?option=com_content&view=article&id=235:estatisticade-exportacoes-brasileiras-de-frutas-frescas-2016&catid=95&Itemid=259&lang=pt-br. Acesso em: 31 de Agosto de 2018.

AIRES, K. L. C. A. F. **Desidratação osmótica e secagem convectiva de maçã cortada em forma de paralelepípedo descritas por solução numérica tridimensional da equação de difusão**. 272f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2016.

ALHAMDAN, A.; ABDELKARIM, D.; ATIA, A. Textural properties of date pastes as influenced by date cultivars. **International Journal of Natural and Social Sciences**, v.4, p.99-106, 2016.

ANTUNES, L. E. C.; DUARTE FILHO, J.; SOUZA, C. M. Conservação pós-colheita de frutos de amoreira-preta. **Pesquisa Agropecuária brasileira**, v. 38, n. 3, p. 413-419, 2003. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2003000300011>

AOAC – ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **Official Methods of Analysis**, Williams, S. (Ed) 14 ed. Arlington, 1997. 1141p.

ARAÚJO, J. L.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F. Thermophysical properties of cupuaçu pulp at different solids contents. **Ciência e Agrotecnologia**, v.28, n.1, p.126-134, 2004.

ARGENTA, L. C.; COUTO, M.; KATSURAYAMA, J. M.; FIORAVANÇO, J. C.; BETINELLI, K.; VIEIRA, M. J.; BARTNICKI, V.; SCOLARO, A. M.; MUELLER, L. Comparação de maçãs de cultivares mutantes de gala e de fuji à maturação e qualidade na colheita e após a armazenagem. 2015. **Anais...** In: XIV Encontro Nacional sobre Fruticultura de Clima Temperado, Fraiburgo - SC. XIV ENFRUTE, 2015.

AROUCHA, E. M. M.; GOIS, V. A.; LEITE, R. H. L.; SANTOS, M. C. A.; SOUZA, M. S. Acidez em frutas e hortaliças. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.5, n.2, p.1-4, 2010.

ARRUDA, M. C.; FISCHER, I. H.; JERONIMO, E. M.; ZANETTE, M. M.; SILVA, B. L. Postharvest of yellow passion fruit: effect of chemicals and storage temperature. **Semina:**

Ciências Agrárias, v.32, n.1, p.201-208, 2011. Doi: <http://dx.doi.org/10.5433/1679-0359.2011v32n1p201>

ATAÍDE, J. S. P. **Transferência de calor durante o processo de pasteurização de polpas de frutas armazenadas em recipientes obtidos por revolução de áreas planas**. 259f. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB. 2014.

AWAD, M. A.; DE JAGER, A.; VAN WESTING, L. M. Flavonoid and chlorogenic acid levels in apple fruit: characterisation of variation. **Science Horticulture**, v.83, p.249-263, 2000. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0304-4238\(99\)00124-7](https://doi.org/10.1016/S0304-4238(99)00124-7).

BAPTESTINI, F. M.; CORRÊA, P. C.; JUNQUEIRA, M. S.; RAMOS, A. M.; VANEGAS, J. D. B.; COSTA, C. F. Modelagem matemática da secagem de espuma de graviola. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.12, p.1203-1208, 2015. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n12p1203-1208>

BARBIN, D. F.; DAVILA, L. S. M.; SILVEIRA JÚNIOR, V. Avaliação da estabilidade de soluções modelo (cmc-sacarose) em recongelamentos. **Boletim do CEPPA**, v. 28, p. 125-132, 2010.

BARROS, S. L.; SILVA, W. P.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; ARAÚJO, T. J.; SANTOS, N. C.; GOMES, J. P. Efeito da adição de diferentes tipos de açúcar sobre a qualidade físico-química de geleias elaboradas com abacaxi e canela. **Revista Principia**, v.1, n.45, p.150-157, 2019. Doi:<http://dx.doi.org/10.18265/1517-03062015v1n45p150-157>

BENASSI, M. T.; ANTUNES, A. J. A. Comparison of meta-phosphoric and oxalic acids as extractant solutions for the determination of vitamin C in selected vegetables. **Arquivos de Biologia e Tecnologia**, v. 31, n. 4, p. 507-513, 1998.

BENEVIDES, S. D.; RAMOS, A. M.; STRINGHETA, P. C.; CASTRO, V. C. Qualidade da manga e polpa da manga Uba. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.28, n.3, p.571-578, 2008. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S010120612008000300011>

BI, X.; ZHANG, J.; CHEN, C.; ZHANG, D.; LI, P.; MA, F. Anthocyanin contributes more to hydrogen peroxide scavenging than other phenolics in apple peel. **Food Chemistry**, v.152, p.205–209, 2014. Doi:[10.1016/j.foodchem.2013.11.088](https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.11.088)

BITTENCOURT, C. C.; MATTEI, L. F.; SANT'ANNA, P. R.; LONGO, O. C.; BARONE, F. M. A cadeia produtiva da maçã em Santa Catarina: competitividade segundo produção e *packing house*. **Revista de Administração Pública**, v.45, n.4, 2011. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0034-76122011000400013>

BOLZAN, A. B.; PEREIRA, E. A. Preparation and characterization of a sweet creamy persimmon pudding with the addition of Brazilian pine seeds. **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 20, e2016061, 2017. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1981-6723.6116>

BONDUELLE, G. M.; IWAKIRI, S.; TRIANOSKI, R.; PRATA, J. G.; ROCHA, V. Y. Análise da massa específica e da retratibilidade da madeira de *tectona grandis* nos sentidos axial e radial

do tronco. **Revista Floresta**, v.45, n.4, p.671-680, 2015.
Doi: <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v45i4.31991>

BORGES FILHO, B. Hortipedia: **Guia de informações sobre produtos – Maçã**. 2018. Disponível em: <<http://www.hortiescolha.com.br/hortipedia/produto/maca>>. Acesso em: 12 de Novembro de 2018.

BOURNE, M. C. Texture of temperate fruits. **Journal of Texture Studies**, v.10, p.25-44, 1979.
Doi: <https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.1979.tb01306.x>

BRACKMANN, A.; PETERLE, M. E.; PINTO, J. A. V.; WEBER, A.; SAUTTER, C. K.; EISERMANN, A. C. Temperature and relative humidity during cold storage of ‘Montenegrina’ tangerine. **Ciência Rural**, v.38, n.2, p. 340-344, 2008. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782008000200007>.

BRASIL, Instituto Adolfo Lutz. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos** (4th ed., Volume 1, p.1020). São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008.

BRASIL. **Ministério da Agricultura**. Portaria nº 691 de 22 de Novembro de 1996. Métodos analíticos. Brasília, DF: 1996. Disponível em: http://www.codapar.pr.gov.br/arquivos/File/pdf/cevadaindus691_96.pdf. Acesso em: 26 de Agosto de 2019.

BRUNINI, M. A.; OLIVEIRA, A. L.; SALADINI, C. A. R.; BAZZO, F. R. Influência de embalagens e temperatura no armazenamento de jabuticabas (*Myrciaria jabuticaba* (Vell) Berg) cv ‘SAbará’. **Ciências e Tecnologia dos Alimentos**, v.24, n.3, p. 378-383, 2004. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-20612004000300013>.

CAMILO, A. P.; DENARDI, F. Cultivares: descrição e comportamento no sul do Brasil. In: **A cultura da macieira**. Florianópolis: EPAGRI, p. 113-168, 2006.

CANACUAN, H. G. C.; MURILLO, B. L. V.; SANTOS, L. E. O. Efectos de los tratamientos térmicos en la concentración de vitamina C y color superficial en tres frutas tropicales. **Revista Lasallista de Investigación**, v. 13, n.1, p.85-93, 2016.

CARULLO, A.; CORBELLINI, S.; PARVIS, M.; VALLAN, A. A wireless sensor network for cold-chain monitoring. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v.58, n.5, p.1405-1411, 2009. Doi: 10.1109/TIM.2008.2009186

CENCI, S. A. Boas Práticas de Pós-colheita de Frutas e Hortaliças na Agricultura Familiar. In: Felon do Nascimento Neto. (Org.). **Recomendações Básicas para a Aplicação das Boas Práticas Agropecuárias e de Fabricação na Agricultura Familiar**. 1a ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, p. 67-80, 2006.

CHARLES, M.; COROLLARO, M. L.; MANFRINI, L.; ENDRIZZI, I.; APREA, E.; ZANELLA, A.; GRAPPADELLI, L. C.; GASPERI, F. Application of a sensory– instrumental tool to study apple texture characteristics shaped by altitude and time of harvest. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.98, n.3, p.1095-1104, 2017. Doi: 10.1002/jsfa.8560

CHAVES NETO, J. R.; SILVA, S. M. Caracterização física e físico-química de frutos de *Spondias dulcis* Parkinson de diferentes microrregiões do Estado da Paraíba. **Colloquium Agrariae**, v.15, n.2, p.18-28, 2019. Doi: 10.5747/ca.2019.v15.n2.a281

CHEN, K.; ROCA, M. Cooking effects on chlorophyll profile of the main edible seaweeds. **Food Chemistry**, v.266, p.368-374, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.06.040>

CHEN, L.; DOBRA, A. Histograms as statistical estimators for aggregate queries. **Information Systems**, v.38, p.213-230, 2013. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.is.2012.08.003>

CHITARRA, M. I. F.; CHITARRA, A. B. Pós-colheita de frutos e hortaliças: fisiologia e manuseio. 2ª ed. UFLA, Lavras, Brasil. 783 p. 2005.

CHO, HYE JEONG; KIM, GI HOON; CHOI, CHEOL. Differential gene expression and epigenetic analyses between striped and blushed skinned sports of 'Fuji'apple. **Scientia Horticulturae**, v. 261, p. 108944, 2020. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.108944>

COMPARINI, C. C. **Variabilidade e diversidade de isolados de *cryptosporiopsis* spp., associados à podridão “olho-deboi” em maçãs na região sul do Brasil**. 53f. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias). Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages - SC, 2009.

CORNEJO, I.; CORNEJO, G.; RAMÍREZ, C.; ALMONACID, S.; SIMPSON, R. Inverse method for the simultaneous estimation of the thermophysical properties of foods at freezing temperatures. **Journal of Food Engineering**, v.191, p.37-47, 2016. Doi: [10.1016/j.jfoodeng.2016.07.003](https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.07.003)

COSTA, H. C. B.; SILVA, D. O.; VIEIRA, L. G. M. Physical properties of açai-berry pulp and kinetics study of its anthocyanin thermal degradation. **Journal of Food Engineering**, v.239, p.104-113, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.07.007>

CRANK, J. **The Mathematics of Diffusion**. Clarendon Press, 1992.

CUCCURULLO, G.; GIORDANO, L.; METALLO, A.; CINQUANTA, L.; Drying rate control in microwave assisted processing of sliced apples. **Biosystems Engineering**, v.170, p.24-30, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.03.010>

DAR, J. A.; WANI, A. A.; AHMED, M.; NAZIR, R.; ZARGAR, S. M. JAVAID, K. Peel colour in apple (*Malus domestica* Borkh.): An economic quality parameter in fruit Market. **Scientia Horticulturae**, v.244, p.50-60, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.09.029>

DEFRAEYE, T.; LAMBRECHT, R.; DELELE, M. A.; TSIGE, A. A.; OPARA, U. L.; CRONJE, P.; VERBOVEN, P.; NICOLAI, B. Forced-convective cooling of citrus fruit: Cooling conditions and energy consumption in relation to package design. **Journal of Food Engineering**, v.121, p.118-127, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.08.021>

DERMESONLOUOGLU, E. K.; ANGELIKAKI, F.; GIANNAKOUROU, M. C.; KATSAROS, G. J.; TAOUKIS, P. S. Minimally Processed Fresh-Cut Peach and Apricot Snacks of Extended Shelf-Life by Combined Osmotic and High Pressure Processing. **Food and**

Bioprocess Technology, v.12, n.3, p.371-386, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11947-018-2215-1>.

DIAS, T. C.; MOTA, W. F.; OTONI, B. S.; MIZOBUTSI, G. P.; SANTOS, M. G. P. Post-harvest conservation of formosa papaya with pvc film and refrigeration. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.33, n.2, p.666-670, 2011. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452011000200040>.

DIBANDA, R. F.; AKDOWA, E. P.; RANI, P. A.; TONGWA, Q. M.; MOSES, F. C. M. M. Effect of microwave blanching on antioxidant activity, phenolic compounds and browning behaviour of some fruit peelings. **Food Chemistry**, v.302, p.1-25, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125308>

DINCER, I. Transient heat transfer analysis in air cooling of individual spherical products, **Journal of Food Engineering**, v. 26, n.4, p.453-467, 1995. Doi: [https://doi.org/10.1016/0260-8774\(94\)00067-J](https://doi.org/10.1016/0260-8774(94)00067-J)

DOMÍNGUEZ, H. V.; RÍOS, J. J.; ROJAS, B. G.; ROCA, M. Chlorophyll catabolism in olive fruits (var. Arbequina and Hojiblanca) during maturation. **Food Chemistry**, v.212, p.604-611, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.06.020>

ELANSARI, A. M.; MOSTAFA, Y. S. Vertical forced air pre-cooling of orange fruits on bin: Effect of fruit size, air direction, and air velocity. **Journal of the Saudi Society of Agricultural**, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2018.06.006>

EMBRAPA. **Perdas e desperdícios de alimentos**. 2018. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-perdas-e-desperdicio-de-alimentos/publicacoes>>. Acesso em: 28 de Setembro de 2018.

ERDOGDU, F. A review on simultaneous determination of thermal diffusivity and heat transfer coefficient. **Journal of Food Engineering**, v.86, n.3, p.453-459, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2007.10.019>

ERDOGDU, F.; LINKE, M.; PRAEGER, U.; GEYER, M.; SCHLUTER, O. Experimental determination of thermal conductivity and thermal diffusivity of whole green (unripe) and yellow (ripe) *Cavendish* bananas under cooling conditions. **Journal of Food Engineering**, v. 128, p. 46-52, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.12.010>

FALCÃO, H. A. S.; FONSECA, A. O.; OLIVEIRA FILHO, J. G.; PIRES, M. C.; PEIXOTO, J. R. Armazenamento de variedades de bananas em condições de atmosfera modificada com permanganato de potássio. **Revista de Agricultura Neotropical**, v.4, n.4, p.1-7, 2017.

FALCÃO, H. A. S.; FONSECA, A. O.; OLIVEIRA FILHO, J. G.; PIRES, M. C.; PEIXOTO, J. R. Armazenamento de variedades de bananas em condições de atmosfera modificada com permanganato de potássio. **Revista de Agricultura Neotropical**, v.4, n.4, p.1-7, 2017.

FEITOSA, R. M.; SILVA, R. C.; MELO, J. C. S.; LINS, A. D. F.; PÊ, P. R.; OLIVEIRA, S. N. Cinética de congelamento e difusividade térmica efetiva do feijão fava. **Revista Agropecuária Técnica**, v.38, n.3, p.147-152, 2017. Doi: <https://doi.org/10.25066/agrotec.v38i3.29978>

FELICIANO, R.; ANTUNES C.; RAMOS, A.; SERRA, A.; FIGUEIRA, M.; DUARTE, C.; CARVALHO, A.; BRONZE, M. Characterization of traditional and exotic apple varieties from Portugal. Part 1 – Nutritional, phytochemical and sensory evaluation. **Journal of Functional Foods**, v.2, n.1, p.35-45, 2010. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2009.12.004>

FELLOWS, P. J. **Tecnologia do Processamento de Alimentos - Princípios e práticas**. Artmed. 2006.

FENNEMA, O.R.; DAMODARAN, S.; PARKIN, K.L. **Química de Alimentos de Fennema**. 4ª Edição. Porto Alegre. Artmed, 2010.

FERNANDES, C. C.; MAZZOLA, B. G.; OLIVEIRA JÚNIOR, M. M. Food waste and climate change. **Organizações e Sustentabilidade**, v.4, n.2, p.116-141, 2016.

FRANCIS, F. J. **Analysis of anthocyanins in foods**. In: Markakis P, Anthocyanins as Food Colors. New York, Academic Press, p. 181-207, 1982.

FRANCO, P. M. L. **Características físico-químicas, propriedades funcionais e perfil de compostos fenólicos de 17 variedades de maçãs portuguesas**. 299f. 2014. Tese (Doutorado em Qualidade Alimentar) – Universidade Nova de Lisboa, 2014.

FREITAS, D. C. L.; ANAMI, J. M. A.; FERNANDES, R. C.; MOSQUERA, D. J. C.; SOARDI, K.; SOUZA, M. P. Relação da textura e atributos de qualidade em maçã ‘Gala’. **Revista Congrega**, v.15, n.15, p.1452-1460, 2018.

GABRIEL, A.; RESENDE, J. T. V.; ZEIST, A. R.; RESENDE, L. V.; RESENDE, N. C. V.; ZEIST, R. A. Phenotypic stability of strawberry cultivars based on physicochemical traits of fruit. **Horticultura Brasileira**, v.37, n.1, p.075-081, 2019. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-053620190112>

GALO, G. T.; LIMA, A. C. S.; MACHADO, K. M.; VIEIRA, L. B.; MARTINS, C. V.; FERREIRA, N. L.; LUCARINI, A. C. Study of extraction of quercetin from purple onion (*Allium cepa* L.) and its use as a natural food preservative. **The Journal of Engineering and Exact Sciences**, v.4, n.1, 2018. Doi: 10.18540/jcecvl4iss1pp0153-0162

GALO, J. Q. B.; SOUZA, M. L.; KUSDRA, J. F.; MATTIUZ, F. M. Postharvest storage of papaya ‘sunrise solo’ with the use of chitosan. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.36, n.2, p.305-312, 2014. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/0100-2945-194/13>.

GANAI, S. A.; AHSAN, H.; MIR, M. A.; RATHER, A. H.; WANI, S. M. Effect of maturity stages and postharvest 5 treatments on physical properties of apple during storage. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v.17, n.3, p.310-316, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.07.001>

GARCIA, J. A. O.; GONZÁLEZ, Y. N.; JAIMES, R. G.; BARRAZA, M. H. P. Temperaturas de refrigeración para el envío de mango ‘Kent’ y ‘Keitt’ hacia mercados distantes. **Revista Iberoamericana de Tecnología Postcosecha**, v.20, n.1, p. 27-35, 2019.

GARRIDO, J. I.; LOZANO, J. E.; GENOVESE, D. B. Effect of formulation variables on rheology, texture, colour, and acceptability of apple jelly: Modelling and optimization J.I. **Food Science and Technology**, v.62, n.1, p.325-332, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.07.010>

GHNIMI, S.; AL-SHIBLI, M.; AL-YAMMAHI, H. S.; AL-DHAHERI, A.; AL-JABERI, F.; JOBE, B.; ELDIN, A. K. Reducing sugars, organic acids, size, color, and texture of 21 Emirati date fruit varieties (Phoenix dactylifera, L). **Journal NFs**, v.12, p.1-10, 2018. Doi:10.1016/j.nfs.2018.04.002

GIAROLA, T. M. O.; PEREIRA, C. G.; RESENDE, J. V. Thermal conductivity of mango pulp (Mangifera indica L.) cultivar “ubari” in freezing temperatures. **International Journal of Food Properties**, v.19, n.2, p.385–394, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1025908>

GIONGO, L.; AJELLI, M.; PONCETTA, P.; GARCÍA, M. R.; SAMBO, P. Raspberry texture mechanical profiling during fruit ripening and storage. **Postharvest Biology and Technology**, v.149, p. 177-186, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.11.021>

GOMES, F. M. P.; COELHO, N. A.; PEDROSO, L. J. Uma solução analítico-numérica para a difusividade do calor em um cilindro com e sem geração de calor. **Revista Interdisciplinar em Pesquisa e Engenharia**, v.2, n.12, p.142-180, 2016.

GONDIM, P. J. S.; SILVA, S. M.; PEREIRA, W. E.; DANTAS, A. L.; CHAVES NETO, J. R.; SANTOS, L. F. Qualidade de frutos de acessos de umbu-cajazeira (Spondias sp.). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.11, p.1217-1221, 2013. <https://doi.org/10.1590/S141543662013001100013>

GOULART, C.; ANDRADE, S. B.; BENDER, A.; SCHIAVON, A. V.; LIMA, C. S. M.; FARIAS, P. S. M.; MALGARIM, M. B. Refrigerated storage of peaches of the cultivar Maciel harvested at different maturation stages. **Revista Congrega**, 2017.

GUADARRAMA, S. V.; PEREZ, D. C.; CRUZ, I. L. L.; SCHLAM, F. H. Thermal convection coefficient in cooling process of lime fruit: Study through the Galerkin finite element method. **Journal of Food Process Engineering**, v.41, n.2, e12653, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1111/jfpe.12653>

GUEIROS, M. A. F.; XAVIER, L. C. A.; MEDEIROS, E. V.; CHINELATE, G. C. B.; BERGER, L. R. R. Physical - chemistry quality of tomato submitted to the different types of storage. **Revista Brasileira de Agrotecnologia**, v.9, n.1, p. 01-06, 2019.

GUINÉ, R. P. F.; GONÇALVES, J. C.; CALADO, A. R. P.; CORREIA, P. M. R. Evaluation of thermo-physical properties and drying kinetics of carrots in a convective hot air drying system. **Agricultural Engineering International**, v.18, n.3, p.245-257, 2016.

GUPTA, C.; PRAKASH, D. Safety of Fresh Fruits and Vegetables. **Food Safety and Human Health**, p. 249-283, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816333-7.00010-2>

HAN, J. W.; MELIS, R. B.; YANG, X. T.; GARCIA, L. R.; QUIAN, J. P.; ZHAO, C. J. CFD simulation of airflow and heat transfer during forced-air precooling of apples. **Journal of Food Process Engineering**, v.40, n.2, e12390, 2016. Doi:<https://doi.org/10.1111/jfpe.12390>

HOJO, R. H.; JOSÉ, A. R. S.; HOJO, E. T. D.; ALVES, J. F. T.; REBOUÇAS, T. N. H.; DIAS, N. O. Qualidade de manga ‘Tommy Atkins’ pós-colheita com uso de cloreto de cálcio na pré-colheita. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.31, n.1, p.62-70, 2009. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452009000100010>.

HORUZ, E.; BOZKURT, H.; KARATAS, H.; MASKAN, M. Simultaneous application of microwave energy and hot air to whole drying process of apple slices: drying kinetics, modeling, temperature profile and energy aspect. **Heat and Mass Transfer**, v.54, n.2, p.425-436, 2018. Doi: [10.1007/s00231-017-2152-y](https://doi.org/10.1007/s00231-017-2152-y)

IGLESIAS, I.; ECHEVERRÍA, G.; LOPEZ, M. L. Fruit color development, anthocyanin content, standard quality, volatile compound emissions and consumer acceptability of several “Fuji” apple strains. **Scientia Horticultura**, v.137, p.138-147, 2012. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2012.01.029>

INCROPERA, F. P.; BERGMAN, C. J. N.; DEWITT, D. P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Editora LTC, Rio de Janeiro – RJ, 6ª ed., 643p. 2008.

JACOMINO, A. P.; ARRUDA, M. C. de.; BRON, I. U.; KLUGE, R. A. **Transformações bioquímicas em produtos hortícolas após a colheita**. In: KOBLITZ, M. G. B. (Coord.). *Bioquímica de alimentos – teoria e aplicações práticas*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2008. cap. 6, p. 153-189.

JHA, P. K.; XANTHAKIS, E.; CHEVALLIER, S.; JURY, V.; BAIL, A. L. Assessment of freeze damage in fruits and vegetables. **Food Research International**, v.121, p.479-496, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.12.002>

JHA, S. N.; RAI, D. R.; SHRAMA, R. Physico-chemical quality parameters and overall quality index of apple during storage. **Journal of Food Science and Technology**, v.49, n.5, p.594-600, 2012. Doi: [10.1007/s13197-011-0415-z](https://doi.org/10.1007/s13197-011-0415-z)

KALINOWSKA, M.; BIELAWSKA, A.; LEWANDOWSKA-SIWKIEWICZ, H.; PRIEBE, W.; LEWANDOWSKI, W. Apples: Content of phenolic compounds vs. variety, part of apple and cultivation model, extraction of phenolic compounds, biological properties. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.84, p.169-188, 2014. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2014.09.006>

KHANIZADEH, S.; TSAO, R.; REKIKI, D.; YANG, R.; CHARLES, M. T.; RUPASINGHE, H. P. V. Polyphenol composition and total antioxidant capacity of selected apple genotypes for processing. **Journal of Food Composition and Analysis**, v.21, n.5, p. 396-401, 2008. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2008.03.004>

KIM, D. S.; LEE, D. U.; CHOI, J. H.; KIM, S.; LIM, J. H. Prediction of carotenoid content in tomato fruit using fluorescence screening method. **Postharvest Biology and Technology**, v.156, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.05.018>

KIRIGIA, D.; WINKELMANN, T.; KASILI, R.; MIBUS, H. Nutritional composition in African nightshade (*Solanum scabrum*) influenced by harvesting methods, age and storage conditions. **Postharvest Biology and Technology**, v.153, p.142-151, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.03.019>

KITS, B. B. **Anuário brasileiro de maçã 2017** – Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, p.56, 2017.

KITS, B. B. **Anuário brasileiro de maçã 2018** – Santa Cruz do Sul: Editora Gazeta Santa Cruz, p.56, 2018.

KOKALJ, D.; ZLATIC, E.; CIGIC, B.; KOBAV, M. B.; VIDRIH, R. Postharvest flavonol and anthocyanin accumulation in three apple cultivars in response to blue-light-emitting diode light. **Scientia Horticulturae**, v.257, e108711, 2019. Doi:10.1016/j.scienta.2019.108711

KUME, HITOSHI. **Métodos Estatísticos para Melhoria da Qualidade**. 11. ed. São Paulo: Gente, p.245, 1993.

LEONARDI, J. G.; AZEVEDO, B. M. Métodos de conservação de alimentos. **Revista Saúde em Foco**, n.10, p. 51-61, 2018.

LEVENBERG, K. A method for the solution of certain problems in least squares. **Quarterly of Applied Mathematics**, v.2, n.2, p.164-168, 1944.

LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. In L. Packer, & R. Douce (Eds.), **Methods in Enzymology**, v. 148, p. 350-382, 1987. Doi: [https://doi.org/10.1016/0076-6879\(87\)48036-1](https://doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1)

LIMA, M. E. A.; THIERS, T. R.; QUINTÃO, A. O.; FERREIRA, F. S.; CUNHA, L. R.; CUNHA, S. F. V.; GANDRA, K. M. B.; VIEIRA, S. M.; MONTEIRO, R. S.; PEREIRA, P. A. P. Elaboração de sorvetes funcionais adicionados de fruta exótica. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v.35, n.1, p.1-11, 2017. Doi: <http://dx.doi.org/10.5380/cep.v35i1.55940>

LIN, L.; KEDZIERSKI, M. A. Specific heat of aluminum-oxide nanolubricants. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.126, p.1168-1176, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.06.077>

LIU, K. Effects of sample size, dry ashing temperature and duration on determination of ash content in algae and other biomass. **Algal Research**, v.40, p.101486, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2019.101486>

LUIKOV, A. V. **Analytical Heat Diffusion Theory**. Academic Press, 1968.

MACEDO, C. K. B. **Qualidade de maçãs “gala” e “fuji” em função da nutrição e das condições climáticas no sul do Brasil**. 99f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages - SC. 2014.

MAGRIN, F. P.; ARGENTA, L. C.; AMARANTE, C. V. T.; MIQUELOTO, A.; HAWERROTH, M. C.; MACEDO, C. K. B.; DENARDI, F.; KVITSCHAL, M. V. Índices de

maturação para o ponto ideal de colheita de maçãs ‘SCS425 Luiza’. **Agropecuária Catarinense**, v.30, n.3, p.55-60, 2017.

MAHBUBUL, I. M. Thermophysical Properties of Nanofluids. Preparation, Characterization, Properties and Application of Nanofluid. **Micro and Nano Technologies** p.113-196, 2019.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. Rio de Janeiro: LTC Editora S.A., 2004.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**. LTC: Rio de Janeiro, p. 453, 2013.

MANNOZZI, C.; TYLEWICZ, U.; CHINNICI, F.; SIROLI, L.; ROCCULI, P.; DALLA ROSA, M.; ROMANI, S. Effects of chitosan based coatings enriched with procyanidin by-product on quality of fresh blueberries during storage. **Food chemistry**, v.251, p.18-24, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.01.015>

MANSOURI, P.; ASADY, B.; GUPTA, N. The Bisection–Artificial Bee Colony algorithm to solve Fixed point problems. **Applied Soft Computing**, v.26, p.143-148, 2015. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.09.001>

MARQUARDT, D. W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. **Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics**, v. 11, n. 2, p. 431–441, 1963. Doi: <https://doi.org/10.1137/0111030>

MATOS, J. D. P.; FIGUÊIREDO, R. M. F.; SILVA, L. P. F. R.; MORAES, M. S.; SILVA, S. N.; COSTA, Z. R. T.; QUEIROZ, A. J. M.; RODRIGUES, L. M. S.; VIEIRA, A. F. Physico-chemical Characterization of Blends Based on Milk and Catole Coconut Pulp. **International Journal of Plant & Soil Science**, v.28, n.4, p. 1-7. 2019.

MEDEIROS, J. F.; AROUCHA, E. M. M.; DUTRA, I.; CHAVES, S. W. P.; SOUZA, M. S. Efeito da lâmina de irrigação na conservação pós-colheita de melão Pele de Sapo. **Horticultura Brasileira**, v.30, p.514-519, 2012. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-05362012000300026>

MENDONÇA, V. Z.; DAIUTO, E. R.; FURLANETO, K. A.; RAMOS, J. A.; FUJITA, E.; VIEITES, R. L.; TECCHIO, M. A.; CARVALHO, L. R. Physiochemical and biochemical aspects during the refrigerated storage of the persimmon in passive modified atmosphere. **Nativa: Pesquisas Agrárias e Ambientais**, v.3, n.1, p.16-21, 2015.

MENESES, V. P.; SILVA, J. R. A.; NETO, J. F.; ROLIM, H. O.; ARAÚJO, A. L. M.; LIMA, P. S. E. By-products of tropical fruits dehydrated by convective. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.13, n.4, p.472-482, 2018. doi: <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v13i4.5810>.

MERCADO, J. A.; MATAS, A. J.; POSÉ, S. Fruit and Vegetable Texture: Role of Their Cell Walls. **Encyclopedia of Food Chemistry**, p.1-7, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.21679-X>

MODESTO JÚNIOR, E. N.; SOARES, S. S.; GOMES, P. W. P.; RIBEIRA, C. F. A.; SILVA, R. M. V. Study of storage of fruit pulp of ginja *Eugênia uniflora* L. and their influences on

levels of ascorbic acid and anthocyanins. **Scinetia Plena**, v.12, n.6, p.1-8, 2016. Doi: 10.14808/sci.plena.2016.069932

MONTEIRO, D. C. B.; SOUSA, W. C.; PIRES, C. R. F.; AZEVEDO, L. A.; BORGES, J. S. Physical and chemical characteristics of fruit and of jelly murici (*Brysonima crassifolia*). **Revista Enciclopédia Biosfera**, v.11, n.21, p.3356-3366, 2015.

MORAIS, D. C. M.; ABREU, D. J. M.; MENDES, D. C. S.; ALENCAR, U. R.; AMORIM, K. A. DAMIANI, C. Analysis of total phenolic compounds and antioxidant activity of apple peel and pulp and their respective flours. **Revista Desafios**, v. 5, 2019. Doi: <http://dx.doi.org/10.20873/uft.2359365220196Especialp5>

MOREIRA, I. S.; SILVA, W. P.; CASTRO, D. S.; SILVA, L. M. M.; GOMES, J. P.; SILVA, C. M. D. P. S. Production of kiwi snack slice with different thickness: Drying kinetics, sensory and physicochemical analysis. **Australian Journal of Crop Science**, v.12, n.5, p.778-787, 2018.

MORZELLE, M. C.; BACHIEGA, P.; SOUZA, E. C.; BOAS, E. V. B. R.; LAMOUNIER, M. L. Chemical and physical characterization of fruits from cerrado: curriola, gabirola and murici. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.37, n.1, p. 96-103, 2015. <http://dx.doi.org/10.1590/0100-2945-036/14>

MOTTA, J. D.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; SOUSA, K. S. M. Índice de cor e sua correlação com parâmetros físicos e físico-químicos de goiaba, manga e mamão. **Comunicata Scientiae**, v.6, n.1, p.74-82, 2015. Doi: <https://doi.org/10.14295/cs.v6i1.698>

MOURA, S. C. S. R.; VISSOTO, F. Z.; RUFFI, C. R. G.; ALVES JÚNIOR, P. Physical and rheological properties of fruit products. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.19, e2015086, 2016a. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1981-6723.8615>.

MOURA, G. S.; ESTRADA, K. R. F. S.; CLEMENTE, E.; FRANZENER, G. Postharvest conservation of yellow passion fruit from lemon grass (*Cymbopogon citratus*) derivatives. **Revista Ambiência**, v.12, n.2, p. 667-682, 2016b. Doi:10.5935/ambiencia.2016.02.11

MUHARFIZA; RIZA, D. F. A.; SAITO, Y.; ITAKURA, K.; KOHNO, Y.; SUZUKI, T.; KURAMOTO, M.; KONDO, N. Monitoring of Fluorescence Characteristics of Satsuma Mandarin (*Citrus unshiu* Marc.) during the Maturation Period. **Horticulturae Science**, v.3, n.4, p.51, 2017. Doi: <https://doi.org/10.3390/horticulturae3040051>

MUKAMA, M.; AMBAW, A.; BERRY, T. M.; OPARA, U. L. Analysing the dynamics of quality loss during precooling and ambient storage of pomegranate fruit. **Journal of Food Engineering**, v.245, p.166-173, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.10.020>

NASCIMENTO, R. S. M.; CARDOSO, J. A.; OLIVEIRA, L. D. DE; OLIVEIRA, J. DA S.; COCOZZA, F. DEL M.; CORTES, J. M. Caracterização físico-química de muricis (*Byrsonima verbascifolia* Rich. ex A. Juss.) produzidos na região Oeste da Bahia. **Magistra**, v.23, p.236-242, 2011.

NATH, A.; BAGCHI, B.; MISRA, L. K.; DEKA, B. C. Changes in post-harvest phytochemical qualities of broccoli florets during ambient and refrigerated storage. **Food Chemistry**, v.127, n.4, p.1510-1514, 2011. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.02.007>

NUNES, J. S.; LINS, A. D. F.; GOMES, J. P.; SILVA, W. P.; SILVA, F. B. Influence of drying temperature on the physical-chemical properties of pineapple residues. **Revista Agropecuária Técnica**, v.1, n.1, p.41-46, 2017a. Doi: <dx.doi.org/10.25066/agrotec.v38i1.29991>

NUNES, A. C. D.; FIGUEIREDO NETO, A.; NASCIMENTO, I. K. S.; OLIVEIRA, F. J. V.; MESQUITA, R. V. C. Stored papaya 'formosa' coated with cassava starch base. **Revista de Ciências Agrárias**, v.40, n.1, p.254-263, 2017b. Doi: <http://dx.doi.org/10.19084/RCA16048>

OCTAVIA, L.; CHOO, W. S. Folate, ascorbic acid, anthocyanin and colour changes in strawberry (*Fragaria x annanasa*) during refrigerated storage. **LWT-Food Science and Technology**, v.86, p.652-659, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2017.08.049>

OLIVEIRA, J. R. **Comparação dos processos de pré-resfriamento e armazenagem para a manutenção da qualidade da maçã fuji**. 285f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC. 2017.

OLIVERIA, M. N.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; QUEIROZ, A. J. M.; DIÓRGENES, A. M. G.; SOUSA, A. B. G.; VASCONCELOS, U. A. A. Physical-chemical characterization of freeze-dried mango 'Rosa' pulps. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 12, n.5, p. 902-906, 2017.

PATANKAR, S. V.: **Numerical heat transfer and fluid flow**. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1980.

PATHARE, P. B.; OPARA, U. L.; AL-SAID, F. A. Colour Measurement and Analysis in Fresh and Processed Foods: A Review. **Food Bioprocess Technology**, v.6, n.1, p.36-60, 2013. Doi: <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9>

PATRAS, A. Stability and colour evaluation of red cabbage waste hydroethanolic extractin presence of different food additives or ingredients. **Food Chemistry**, v.275, p.539-548. 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.09.100>

PEREIRA, C. G.; RAMASWAMY, H. S.; GIAROLA, T. M. O.; RESENDE, J. V. Infrared thermography as a complementary tool for the evaluation of heat transfer in the freezing of fruit juice model solutions. **International Journal of Thermal Sciences**, v.120, p.386-399, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2017.06.025>

PESSÔA, P. M.; LIMA, A. G. B.; SWARNAKAR, R.; GOMES, J. P.; LIMA, W. M. P. B. Cooling of Fruit with Arbitrary Shape: Simulation Using Galerkin-Based Integral Method. **Diffusion Foundations**, v.10, p.1-15, 2016. Doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DF.10.1>

PIMENTEL JUNIOR, L. A.; DOMINGUES NETO, F. J.; SILVA, M. J. R.; TECCHIO, M. A. Production, quality and maturity grape 'syrah' in condition subtropical of Brasil. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v.13, n.1, p.72-79, 2019.

PIRES, T. C. S. P.; DIAS, M. I.; BARROS, L.; ALVES, M. J.; OLIVEIRAS, M. B. P. P.; BUELGA, C. S.; FERREIRA, I. C. F. R. Antioxidant and antimicrobial properties of dried Portuguese apple variety (*Malus domestica* Borkh. cv Bravo de Esmolfe). **Food Chemistry**, v.240, p.701-706, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.08.010>

QUEIROZ, E. R.; ABREU, C. M. P.; OLIVEIRA, K. S. Chemical constituents of the in natura and dried fractions of litchi: nutritional potential of by-products. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.34, n. 4, p. 1174-1179, 2012. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452012000400026>

QUEIROZ, R. A. **Modelagem e simulação do resfriamento do leite de frutas não climatéricas com ar forçado. Estudo de caso: laranja Valença**. 123f. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2016.

REBOUÇAS, T. N. H.; VALVERDE, R. M. V.; TEIXEIRA, H. L. Bromatologia da pimenta malagueta *in natura* e processada em conserva. **Horticultura Brasileira**, v.31, p.163-165, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362013000100026>

RESENDE, J. V.; SILVEIRA JR., V. Medidas da condutividade térmica efetiva em modelos de polpas de frutas no estado congelado. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.22, n.2, p. 177-183, 2002. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-20612002000200013>.

RIEDEL, L. Measurement of thermal diffusivity on foodstuffs rich in water. **Kaltetechnik-Klimatisierung**, Karlsruhe, v.21, n.11, p.315-6, 1969.

RINALDI, M. M.; COSTA, A. M.; FALEIRO, F. G.; JUNQUEIRA, N. T. V. Post-harvest conservation of *Passiflora setacea* DC. fruits submitted to different sanitizers and storage temperatures. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.20, e2016046, 2017. <http://dx.doi.org/10.1590/1981-6723.4616>

ROBARDS, K.; PRENZLER, P. D.; TUCKER, G.; SWATSITANG, P.; GLOVER, W. Phenolics compounds and their role in oxidative processes in fruits. **Food Chemistry**, v.66, n.4, p.401-136, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(99\)00093-X](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(99)00093-X)

ROCHA, L. A. B.; SILVA, J. C.; ANINGER, L.; CASTRO, J. FIGUEIREDO NETO, A. Simulação computacional do resfriamento da manga tomy atkins. **Nucleus**, v.13, n.2, 2016. Doi: <http://dx.doi.org/10.3738/1982.2278.1615>

RUIZ-GARCIA, L.; LUNADEI, L. The role of RFID in agriculture: applications, limitations and challenges. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.79, n.1, p.42-50, 2011. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.08.010>

SALEEM, M.; SAEED, M. T. Potential application of waste fruit peels (orange, yellow lemon and banana) as wide range natural antimicrobial agente. **Journal of King Saud University-Science**, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2019.02.013>

SANHUEZA, R. M. V. Podridões de maçãs frigorificadas. In: Girardi CL (Ed.). Frutas do Brasil, Maçã: pós-colheita. Brasília DF. Embrapa Informação Tecnológica, p.35-44, 2004.

SANTOS, B. A.; TEIXEIRA, F.; AMARAL, L. A.; RANDOLPHO, G. A.; SCHWARZ, K.; SANTOS, E. F.; RESENDE, J. T. V.; NOVELLO, D. Chemical and nutritional characterization of fruit pulp stored under freezing. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, v.17, n.1, p.1-13, 2019.

SANTOS, D. C.; LEITE, D. D. F.; LISBÔA, J. F.; FERREIRA, J. P. L.; SANTOS, F. S.; LIMA, T. L. B.; FIGUEIREDO, R. M. F.; COSTA, T. N. Modelling and thermodynamic properties of the drying of acuri slices. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.22, e2018031, 2019b. Doi: <https://doi.org/10.1590/1981-6723.03118>

SANTOS, J. R.; BOÊNO, J. A. Muffins isentos de glúten e lactose desenvolvidos com resíduo de polpa de graviola (*Annona muricata* L.). **Revista De Agricultura Neotropical**, v. 3, n. 3, p. 42-51, 2016.

SANTOS, N. C.; SANTOS, E. R. M.; BARROS, S. L.; ALMEIDA, R. D.; ALMEIDA, R. L. J.; SILVA, V. M. A.; RIBEIRO, V. H. A.; SANTOS, I. A.; PEREIRA, T. S.; NASCIMENTO, A. P. S. Technological use of kiwi (cv. Hayward) shell for elaboration of cookie-type biscuits. **International Journal of Development Reseach**, v.9, n.7, p. 28852-28857, 2019c.

SANTOS, N. C.; BARROS, S. L.; MONTEIRO, S. S.; SILVA, S. N.; RIBEIRO, V. H. A.; SILVA, V. M. A.; GOMES, J. P.; SANTIAGO, A. M.; LUIZ, M. R.; VIEIRA, D. M.; ARAÚJO, R. D. A.; VILAR, S. B. O.; BARROS, S. L. Kinetics of Drying and Physical-Chemical Quality of Peach cv. Hubimel. **Journal of Agricultural Science**, v.11, n.16, p. 223-232, 2019a. Doi: <https://doi.org/10.5539/jas.v11n16p223>.

SARMENTO, D. H. A.; SOUZA, P. A.; SARMENTO, J. D. A.; FREITAS, R. V. S.; SALGADO FILHO, M. Storage of banana 'prata catarina' under room temperature coated with cassava starch and PVC. **Revista Caatinga**, v. 28, n.2, p. 235-241, 2015.

SAVI, P. R. S.; SANTOS, L.; GONÇALVES, A. M.; BIESEK, S.; LIMA, C. P. Analysis of total flavonoids present in some of the most consumed conventional and organic fruits and vegetables in southern Brazil. **Food, Nutrition & Health**, v.12, n.1, p.257-287, 2017. Doi: 10.12957/demetra.2017.22391

SEBRAE. **O cultivo e o mercado da maçã**. 2018. Disponível em: <<http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/o-cultivo-e-o-mercado-da-maca,ea7a9e665b182410VgnVCM100000b272010aRCRD>>. Acesso em: 31 de agosto de 2018.

SHAMILI, M. The estimation of mango fruit total soluble solids using image processing technique. **Scientia Horticulturae**, v.249, p.383-389, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.02.013>

SIDDIQUI, M. W. Postharvest quality of fruits and vegetables: An overview, Preharvest modulation of postharvest fruit and vegetable quality. **Academic Press**, p.1-40, 2018.

SILVA, B. E. D.; OLIVERIA, T. M.; PINTO, E. G.; BARBOSA, T. A.; SOARES, D. S. B. Effect of different coatings on enzymatic darkness in apple. **Revista Agrarian**, v.10, n.38, p.55-362, 2017. Doi: <https://doi.org/10.30612/agrarian.v10i38.7050>

SILVA, E. C. O.; SILVA, W. P.; GOMES, J. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; ALEXANDRE, H. V.; FARIAS, V. S. O.; FIGUÊIREDO, R. M. F. Drying of Albedo and Whole Peel of Yellow Passion Fruit. **Journal of Agricultural Science**, v.11, n.6, 501-509, 2019. Doi: <https://doi.org/10.5539/jas.v11n6p501>

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal Agricultural Research**, v.11, p.3733-3740, 2016. Doi: <https://doi.org/10.5897/AJAR.2016.11522>

SILVA, J. L. **Compostos bioativos e capacidade antioxidante em frutos de juazeiro armazenados sob temperatura controlada**. 75p. 2017. Dissertação (Mestrado em Sistemas agroindustriais) – Universidade Federal de Campina Grande, Pombal – PB, 2017.

SILVA, L. T. S. **Propriedades termofísicas e comportamento reológico do leite de soro de búfala**. 67f. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência de Alimentos) – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, Itapetinga – BA, 2014.

SILVA, S. N.; GOMES, J. P.; SANTOS, N. C.; MATOS, J. D. P.; MORAES, M. S.; SILVA, R. M.; SILVA, P. B.; LUIZ, M. R.; QUEIROZ, A. J. M.; SILVA, W. P.; SILVA, V. M. A. Physicochemical and colorimetric composition of mandacaru fruit pulp at different maturation stages. **Sylwan**, v.164, n.4, p. 282-291, 2019.

SILVA, S. N.; MATOS, J. D. P.; SILVA, P. B.; COSTA, Z. R. T.; GOMES, J. P.; SILVA, L. P. F. R.; VIEIRA, A. F.; MELO, B. A.; PRIMO, D. M. B.; ALEXANDRE, H. V. Prediction of Mathematical Models of the Drying Kinetics and Physicochemical Quality of the Chili Pepper. **Journal of Agricultural Science**, v.10, n.12, p.377-384, 2018. Doi: <https://doi.org/10.5539/jas.v10n12p377>

SILVA, W. P.; CARMO, J. E. F.; SILVA, C. M. D. P. S.; ARAGÃO, R. F. Determination of Convective Heat Transfer Coefficient During Cooling of an Individual Strawberry Fruit Using Different Methods. **International Review of Chemical Engineering**, v.3, n.2, p.233-240, 2011.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S. **LAB Fit Curve Fitting Software** (Nonlinear Regression and Treatment of Data Program) V 7.2.50 (1999-2016), online, available from world wide web: <www.labfit.net>, date of access: 12-02-2019.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S. **LS Optimizer**, Version 6.2 (2018), online, available from world wide web: <<http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/LS.htm>>, date of access: 14-02-2019.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S. **Tratamento de dados experimentais**. 2ª ed. rev. e ampli. Editora Universitária, 199p, 1998.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; GAMA, F. J. A. An improved technique for determining transport parameters in cooling process. **Journal of Food Engineering**, v.111, n.2, p.394-402, 2012. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2012.02.003>

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; GOMES, J. P.; SANTOS, N. C.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIREDO, R. M. F. Calculation of the Thermal Properties (and Their Uncertainties) of

Strawberry During Its Cooling Under Natural Convection. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 5, p. 114-120, 2019a. <https://doi.org/10.5539/jas.v11n5p114>

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; SILVA, D. D. P. S.; SILVA, C. D. P. S.; LIMA, A. G. B. Determination of approximate functions for the numerical solution of an ordinary differential equation (In Portuguese: Determinação de funções aproximadas para a solução numérica de uma equação diferencial ordinária), **Revista de la Facultad de Ingeniería UCV**, v.21, n.2, p.29-37, 2006.

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; SOUTO, L. M.; GOMES, J. P.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIREDO, R. M. F. Thermal properties determination of a cylindrical product during its cooling: two-dimensional numerical model and uncertainty. **International Journal of Food Properties**, v.22, n.1, p.343-354, 2019b. Doi: <https://doi.org/10.1080/10942912.2019.1578791>

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; SOUTO, L. M.; MOREIRA, I. S.; SILVA, E. C. O. Mathematical model for determining thermal properties of whole bananas with peel during the cooling process. **Journal of Food Engineering**, v.227, p.11-17, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.02.003>

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S.; FARIAS, V. S. O.; SILVA, D. P. S. Calculation of the convective heat transfer coefficient and cooling kinetics of an individual fig fruit. **Heat and Mass Transfer**, n.46, n.3, p.371-380, 2010. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00231-010-0577-7>

SOARDI, K.; STEFFENS, C. A.; HEIZEN, A. S.; NUNES, F. R.; GUTTLER, G.; BRACKMANN, A.; AMARANTE, C. V. Storage of 'laetitia' plums in controlled atmosphere associated to 1-mcp, induction of mass loss and ethylene absorption. **Revista da 14ª Jornada de Pós-Graduação e Pesquisa**, v.14, n.14, 2017.

SOARES, A. G. **Desperdício de alimentos no Brasil: um desafio político e social a ser vencido**. Embrapa Agroindústria de Alimentos, 2014.

SOARES, D. S. C.; SANTOS, J. T. S.; CAMPOS, A. F. P.; COSTA, F. S. C.; NUNES, T. P.; JÚNIOR, A. M. O. Avaliação do tempo de congelamento da mangaba (*Hancornia Speciosa* Gomes) em ultrafreezer através dos modelos matemáticos de Planck e Pham. **Scientia plena**, v.8, n.4, p.1-6, 2012.

SOUSA, F. C.; SILVA, L. M. M.; MOREIRA, I. S.; CASTRO, D. S.; PEREIRA, D. S. T.; ALVES, A. M. S. Comparative Study of Fruit Bioactivity of Spondias. **International Journal of Advanced Engineering Research and Science**, v.6, p.184-187, 2019. Doi: <https://dx.doi.org/10.22161/ijaers.6.1.25>

SOUSA, S. F.; SILVA, F. B.; ARAÚJO, A. C.; GOMES, J. P. Determinação das propriedades físicas e físico-químicas de pêssegos cultivar Rubimel. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v.12, n.2, p.2627-2644, 2018. Doi: 10.3895/rbta.v12n2.7166

SOUZA, A. R. J.; LINO, A. M.; SANTOS, D. F. Aplicação dos métodos da bissecção e falsa posição para análise de desempenho de algoritmo em python. **Ciências exatas e Tecnológicas**, v.5, n.1, p.149-156, 2018.

SOUZA, M. L.; MORGADO, C. M. A.; MARQUES, K. M. M.; MATTIUZ, C. F. M.; MATTIUZ, B. H. Post-harvest of 'tommy atkins' mangoes covered with chitosan. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.33, n. Especial, p.337-343, 2011. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-29452011000500042>

SOUZA, M. T. A.; SANCHES, A. G.; MOREIRA, E. G. S.; CORDEIRO, C. A. M. Eficiência do hidrosfriamento na conservação e qualidade pós-colheita de coentro (*Coriandrum sativum* L.). **Revista Trópica: Ciências Agrárias e Biológicas**, v.10, n.1, p.32-40, 2017.

SOUZA, P. A.; AROUCHA, E. M. M.; SOUZA, A. E. D.; COSTA, A. R. F. C.; FERREIRA, G. S.; BEZERRA NETO, F. Uso de revestimentos com fécula de mandioca ou filme de PVC na conservação pós-colheita de berinjela. **Horticultura Brasileira**, v. 27, n. 2, p. 235-239, 2009. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-05362009000200020>

SPAGNOL, W. A.; SILVEIRA JR, V.; PEREIRA, E.; GUIMARÃES FILHO, N. Monitoring the cold chain: new technologies and recent advances. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.21, e2016069, 2018. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1981-6723.6916>

STEFFENS, C. A.; BRACKMANN, A.; PINTO, J. A. V.; EISERMANN, A. C. Taxa respiratória de frutas de clima temperado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.42, n.3, p.313-321, 2007.

SUN, Q.; SUN, F.; XIA, X.; XU, H.; KONG, B. The comparison of ultrasound-assisted immersion freezing, air freezing and immersion freezing on the muscle quality and physicochemical properties of common carp (*Cyprinus carpio*) during freezing storage. **Ultrasonics Sonochemistry**, v.51, p.281-291, 2019a. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2018.10.006>

SUN, X.; YE, Z.; LI, J.; WEN, K.; TIAN, H. Forced convection heat transfer from a circular cylinder with a flexible fin. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.128, p.319-334, 2019b. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.08.123>

SUN, Y.; SINGH, Z.; TOKALA, V. Y.; HEATHER, B. Harvest maturity stage and cold storage period influence lemon fruit quality. **Scientia Horticulturae**, v.249, p.322-328, 2019c. Doi:10.1016/j.scienta.2019.01.056

Tabela brasileira de composição de alimentos - TACO. 4. ed. rev. e ampl. Campinas: UNICAMP/NEPA, 2011. 161 p. Disponível em: <http://www.unicamp.br/nepa/taco/tabela.php?ativo=tabela>. Acesso em: 12/08/2018.

TEIXEIRA, B. J.; APARCANA ATATURIMA, I. M.; VILLARREAL INCA, L. S.; EVA, C. P.; MARIA ROSARIO, H. M., PAOLA ESTEFANIA, E.; ACOSTA ALFARO, K. M. D. C. Avaliação do teor de polifenóis totais e da capacidade antioxidante dos extratos etanólicos dos frutos de aguaymanto (*Physalis peruviana* L.) de diferentes locais do Peru. **Jornal da Sociedade Química do Peru**, v.82. n.3, p.272-279, 2016.

TERUEL, B.; CORTEZ, L.; NEVES FILHO, L. Estudo comparativo do resfriamento de laranja valência com ar forçado e com água. **Ciências e Tecnologia dos Alimentos**, v.23, n.2, p.174-178, 2003. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-20612003000200012>.

TERUEL, J. M. B. Tecnologia de resfriamento de frutas e hortaliças. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 14, n. 2, p.199-220, 2008.

TOLEDO, A.; BURLINGAME, B. Biodiversity and nutrition: a common path toward global food security and sustainable development. **Journal of Food Composition and Analysis**, v.19, p.477-483, 2006. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2006.05.001>

USDA. United States Department of Agriculture. Agriculture Research Service. USDA National Nutrient Database for Standard Reference. **Composition of foods raw, processed, prepared**. Release 21. Beltsville, Maryland, 2008. 49 p.

VASCO, C.; RUALES, J.; KAMAL-ELDIN, A. Total phenolic compounds and antioxidant capacities of major fruits from Ecuador. **Food Chemistry**, v.111, n.4, p.816-823, 2008. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2008.04.054>

VASCONCELOS, M. A. S.; MELO FILHO, A. B. **Conservação de Alimentos**. Programa Escola Técnica Aberta do Brasil (ETEC-Brasi) – Recife: EDUFRPE, 130f. 2010.

VEBERIC, R.; STAMPAR, F.; SCHMITZER, V.; CUNJA, V.; ZUPAN, A.; KORON, D.; MIKULIC-PETKOVSEK, M. Changes in the contents of anthocyanins and other compounds in blackberry fruits due to freezing and long-term frozen storage. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.6, n.29, p.6926-6935, 2014. Doi:10.1021/jf405143w

WANG, Y.; LIU, W.; JIANG, H.; MAO, Z.; WANG, N.; JIANG, S.; XU, H.; YANG, G.; ZHANG, Z.; CHEN, X. The R2R3-MYB transcription factor MdMYB24-like is involved in methyl jasmonate-induced anthocyanin biosynthesis in apple. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.139, p.273-282, 2019. Doi:10.1016/j.plaphy.2019.03.031

WATERHOUSE, A. Folin-ciocalteau micro method for total phenol in wine. **American Journal of Enology and Viticulture**, p. 3-5, 2006.

WIBOWO, S.; VERVOORT, L.; TOMIC, J.; SANTIAGO, J. S.; LEMMENS, L.; PANAZZO, A.; GRAUWET, T.; HENDRICKX, M.; LOEY, A. V. Colour and carotenoid changes of pasteurised orange juice during storage. **Food Chemistry**, v.171, p.330-340, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.09.007>

WU, W.; HALLER, P.; CRONJE, P.; DEFRAEYER, T. Full-scale experiments in forced-air precoolers for citrus fruit: Impact of packaging design and fruit size on cooling rate and heterogeneity. **Biosystems Engineering**, v.169, p.115-125, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2018.02.003>

XIE, J.; YAO, S.; MING, J.; DENG, L.; ZENG, K. Variations in chlorophyll and carotenoid contents and expression of genes involved in pigment metabolism response to oleocellosis in citrus fruits. **Food Chemistry**, v.272, p.49-57, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.08.020>

ZABALAGA, R. F.; FUENTE, C. I. A.; TADINI, C. C. Experimental determination of thermophysical properties of unripe banana slices (*Musa cavendishii*) during convective drying. **Journal of Food Engineering**, v.187, p.62-69, 2016. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.04.020>

ZHANG, Y.; HU, W.; PENG, X.; SUN, B.; WANG, X.; TANG, H. Characterization of anthocyanin and proanthocyanidin biosynthesis in two strawberry genotypes during fruit development in response to different light qualities. **Journal of Photochemistry and Photobiology B. Biology**, v.186, p.225–231, 2018. Doi:10.1016/j.jphotobiol.2018.07.024

ZHAO, H.; WANG, B.; CUI, K.; CAO, J.; JIANG, W. Improving postharvest quality and antioxidant capacity of sweet cherry fruit by storage at near-freezing temperature. **Scientia Horticulturae**, v.246, p. 68-78, 2019. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.10.054>

ZILIO , C.; RIGHETTI, G.; PERNIGOTTO, G.; LONGO, G. A. Analysis Of The Freezing Time Of Chicken Breast Finite Cylinders. **International Journal of Refrigeration**, v.95, p.38-50, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.08.013>

APÊNDICES A

(Valores de temperatura e tempo durante a cinética de resfriamento das maçãs)

Tabela A1 – Dados da cinética de refrigeração do experimento 1.

Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)
0.000000	24.60000	7488.000	13.70000
288.0000	24.60000	7776.000	13.40000
576.0000	24.40000	8064.000	13.20000
864.0000	24.20000	8352.000	12.90000
1152.000	23.80000	8640.000	12.70000
1440.000	23.40000	8928.000	12.40000
1728.000	22.70000	9216.000	12.10000
2016.000	22.30000	9504.000	12.00000
2304.000	21.90000	9792.000	11.60000
2592.000	21.10000	10080.00	11.40000
2880.000	20.80000	10368.00	11.20000
3168.000	20.10000	10656.00	10.90000
3456.000	19.50000	10944.00	10.60000
3744.000	18.90000	11232.00	10.20000
4032.000	18.50000	11520.00	10.10000
4320.000	17.80000	11808.00	10.00000
4608.000	17.40000	12096.00	9.700000
4896.000	17.30000	12384.00	9.500000
5184.000	16.80000	12672.00	9.400000
5472.000	16.30000	12960.00	9.200000
5760.000	16.10000	13248.00	9.000000
6048.000	15.50000	13536.00	8.700000
6336.000	15.20000	13824.00	8.600000
6624.000	14.80000	14112.00	8.400000
7200.000	14.20000	-	-

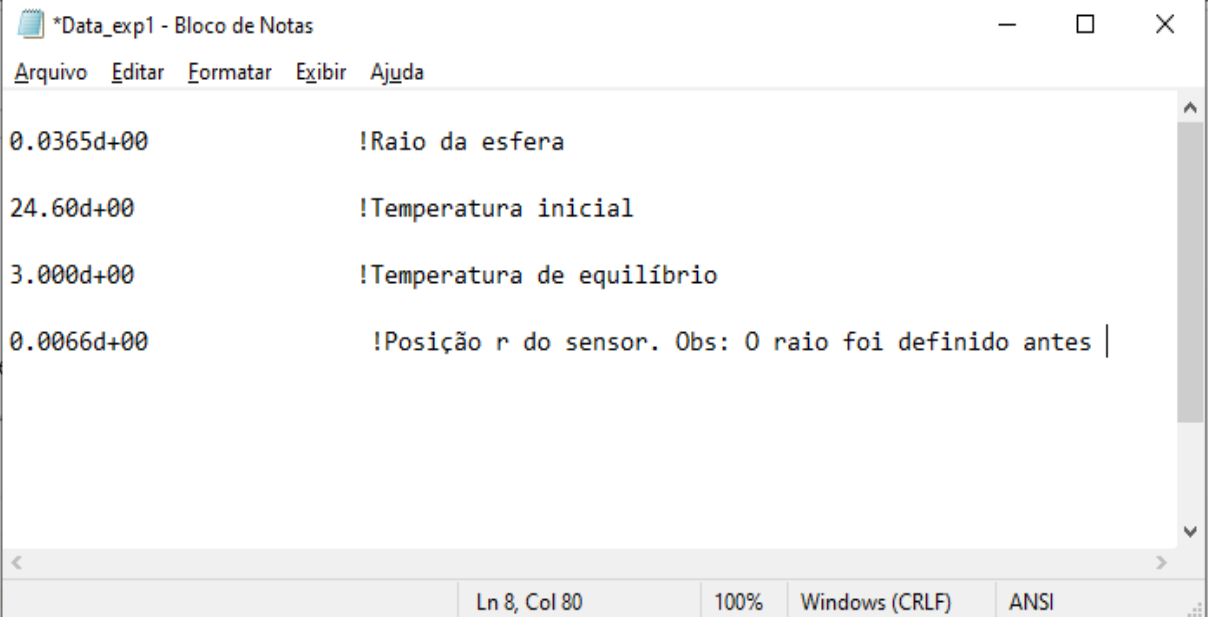
Tabela A2 – Dados da cinética de refrigeração do experimento 2.

Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (°C)
1.000000	26.30000	7489.000	13.10000
289.0000	26.30000	7777.000	13.00000
577.0000	26.10000	8065.000	12.50000
865.0000	25.80000	8353.000	12.10000
1153.000	25.20000	8641.000	11.70000
1441.000	24.80000	8929.000	11.50000
1729.000	23.90000	9217.000	11.30000
2017.000	23.20000	9505.000	10.80000
2305.000	22.50000	9793.000	10.50000
2593.000	22.10000	10081.00	10.20000
2881.000	21.20000	10369.00	10.20000
3169.000	20.60000	10657.00	9.800000
3457.000	19.90000	10945.00	9.500000
3745.000	19.50000	11233.00	9.200000
4033.000	18.90000	11521.00	9.300000
4321.000	18.20000	11809.00	9.000000
4609.000	17.60000	12097.00	8.700000
4897.000	17.10000	12385.00	8.500000
5185.000	16.90000	12673.00	8.400000
5473.000	16.30000	12961.00	8.200000
5761.000	15.70000	13249.00	7.800000
6049.000	15.20000	13537.00	7.500000
6337.000	14.90000	13825.00	7.200000
6625.000	14.60000	-	-
6913.000	14.00000	-	-
7201.000	13.60000	-	-

APÊNDICES B

(Arquivos de textos com os dados iniciais dos experimentos)

Figura B1 – Arquivos de texto com os dados iniciais do experimento 1.

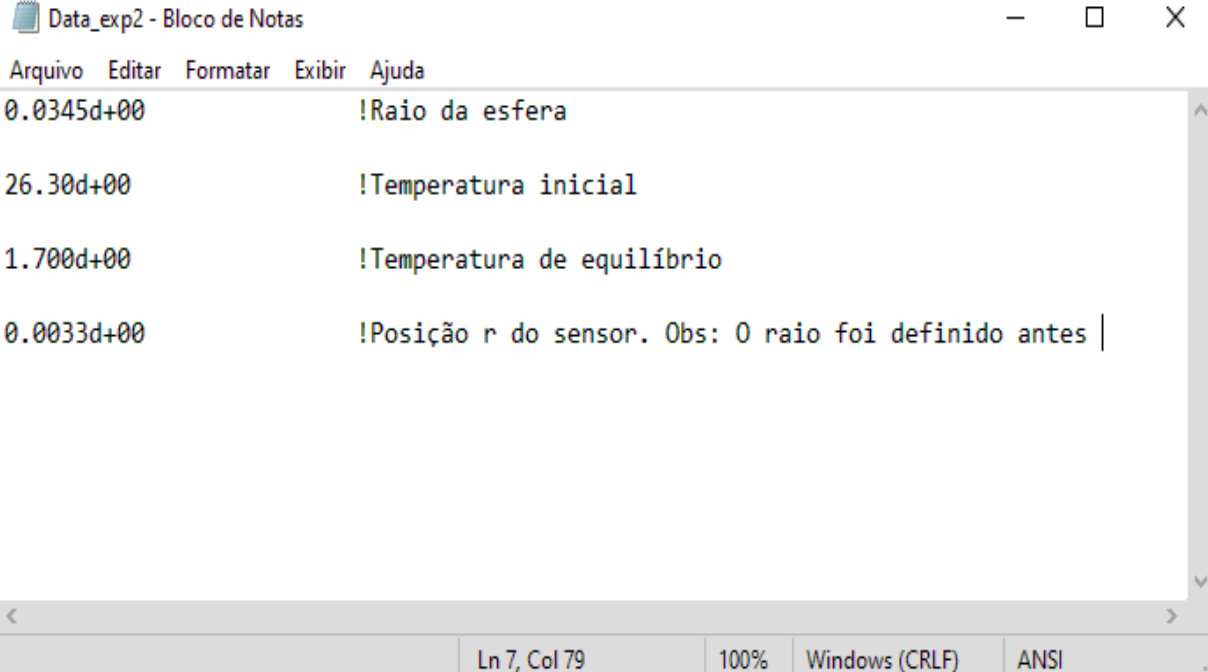


The screenshot shows a Notepad window with the following content:

```
*Data_exp1 - Bloco de Notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
0.0365d+00      !Raio da esfera
24.60d+00      !Temperatura inicial
3.000d+00      !Temperatura de equilíbrio
0.0066d+00      !Posição r do sensor. Obs: 0 raio foi definido antes |
```

At the bottom of the window, the status bar indicates: Ln 8, Col 80, 100%, Windows (CRLF), ANSI.

Figura B2 – Arquivos de texto com os dados iniciais do experimento 2.



The screenshot shows a Notepad window with the following content:

```
Data_exp2 - Bloco de Notas
Arquivo  Editar  Formatar  Exibir  Ajuda
0.0345d+00      !Raio da esfera
26.30d+00      !Temperatura inicial
1.700d+00      !Temperatura de equilíbrio
0.0033d+00      !Posição r do sensor. Obs: 0 raio foi definido antes |
```

At the bottom of the window, the status bar indicates: Ln 7, Col 79, 100%, Windows (CRLF), ANSI.