



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS**



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA AGRÍCOLA  
ÁREA: PROCESSAMENTO E ARMAZENAMENTO  
DE PRODUTOS AGRÍCOLAS**

**TESE DE DOUTORADO**

**DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA E DESCRIÇÃO DA  
TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE O PROCESSO DE PASTEURIZAÇÃO  
DA POLPA DO COCO VERDE**

**Autor: Matheus Serrano de Medeiros**

**Orientadores: Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva**

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Josivanda Palmeira Gomes**

**Campina Grande - PB**

**Março - 2020**

MATHEUS SERRANO DE MEDEIROS

**DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE TÉRMICA E DESCRIÇÃO DA  
TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE O PROCESSO DE PASTEURIZAÇÃO  
DA POLPA DO COCO VERDE**

Tese de Doutorado a ser apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Campina Grande - PB, como parte das exigências para o doutorado em Engenharia Agrícola

Campina Grande - PB

Março – 2020

M488d Medeiros, Matheus Serrano de.  
Determinação da difusividade térmica e descrição da transferência de calor durante o processo de pasteurização da polpa do coco verde / Matheus Serrano de Medeiros. – Campina Grande, 2021.  
128 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2021.  
"Orientação: Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva, Profa. Dra. Josivanda Palmeira Gomes".  
Referências.

1. Coco Verde – Cultura. 2. Albúmen Carnoso. 3. Resíduo Agroindustrial. 4. Pasteurização da Polpa – Coco Verde 5. Solução Numérica. I. Silva, Wilton Pereira da. II. Gomes, Josivanda Palmeira. III. Título.

CDU 634.616 (043)



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



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA TESE

**MATHEUS SERRANO DE MEDEIROS**

**APROVADO(A): 03 de março de 2020**

**BANCA EXAMINADORA**

**Dr. Wilton Pereira da Silva**  
Orientador - UAF/CCT/UFCG

**Dra. Josivanda Palmeira Gomes**  
Orientadora - UAEE/CTRN/UFCG

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

**Dr. Aluizio Freire da Silva Junior**  
Examinador - UAFM/CES/UFCG

**Dra. Patrícia Maria de Araújo Gomes**  
Examinadora - URPB

**Dr. Alexandre José de Melo Queiroz**  
Examinador - UAEE/CTRN/UFCG

**Dr. Flávio Luiz Honorato da Silva**  
Examinador - DEQ/CT/UFPB

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE TABELAS .....	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS/SÍMBOLOS/UNIDADES.....	xv
RESUMO.....	xviii
ABSTRACT.....	xix
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1. Objetivo geral.....	2
1.2. Objetivos específicos.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. Aspectos gerais .....	4
2.2. O coqueiro .....	4
2.3. Coco verde .....	6
2.4. Polpa de fruta.....	7
2.4.1. Polpa do coco verde.....	8
2.5. Resíduo agroindustrial.....	12
2.6. Técnicas de conservação de alimentos pelo uso de calor.....	13
2.6.1. Pasteurização.....	13
2.6.2. Branqueamento.....	14
2.6.3. Esterilização.....	15
2.7. Propriedades termofísicas .....	15
2.7.1. Densidade .....	16
2.7.2. Calor específico.....	17
2.7.3. Condutividade térmica .....	17
2.7.4. Difusividade térmica .....	17
2.8. Equação de balanço (conservação de energia).....	17
2.9. Equação geral de transporte e equação de difusão.....	18
2.10. Equação de difusão tridimensional em coordenadas retangulares .....	20
2.11. Condições de contorno.....	22

2.12.	Soluções da equação de difusão.....	22
2.12.1.	Métodos numéricos.....	24
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	27
3.1.	Local de realização da pesquisa.....	27
3.2.	Matéria prima.....	27
3.2.1.	Preparação da polpa.....	27
3.3.	Características físico-químicas.....	33
3.3.1.	Determinação de pH.....	33
3.3.2.	Determinação de sólidos solúveis totais.....	33
3.3.3.	Determinação de acidez total titulável.....	34
3.3.4.	Determinação de cinzas.....	34
3.3.5.	Minerais.....	34
3.3.6.	Determinação de ratio.....	34
3.3.7.	Determinação de lipídios.....	35
3.3.8.	Determinação de teor de umidade.....	35
3.3.9.	Determinação de atividade de água ( $a_w$ ).....	35
3.3.10.	Análise microbiológica.....	35
3.3.11.	Determinação de fibra alimentar.....	35
3.3.12.	Proteínas.....	36
3.3.13.	Açúcares totais.....	36
3.3.14.	Açúcares redutores.....	36
3.3.15.	Açúcares não redutores.....	36
3.4.	Fabrico do recipiente.....	36
3.5.	A pasteurização.....	38
3.6.	A aquisição dos dados de temperatura.....	40
3.7.	Métodos numéricos.....	40
3.7.1.	Discretização da equação de difusão tridimensional.....	41
3.7.2.	Discretização dos volumes de controle internos.....	44
3.7.3.	Discretização para os volumes de controle á leste.....	47
3.7.4.	Coeficiente de transporte $\Gamma^\Phi$ .....	49

3.8. Otimização: Determinação de parâmetros.....	51
3.9. O software: Parallelepiped First Kind.....	52
3.9.1. A interface gráfica .....	53
3.9.2. O menu “Parallelepiped” .....	54
3.9.3. O menu “General” .....	66
3.9.4. O menu “Information” .....	68
3.9.5. O menu “Exit” .....	70
3.9.6. A barra de ferramentas .....	70
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	72
4.1. Penetração de calor na polpa do coco verde – resultados preliminares .....	75
4.1.1. Superfície interna do paralelepípedo – resultados preliminares .....	76
4.1.2. Centro da geometria do paralelepípedo – resultado preliminar.....	77
4.1.3. Combinação das temperaturas – resultados preliminares .....	77
4.2. Resultados preliminares do processo de otimização.....	78
5. ARTIGO A SER SUBMETIDO .....	80
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	118

Aos meus pais, família e aos  
amigos...

Dedico esta obra

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus pela conclusão desta tese e a oportunidade concedida a mim de ter sempre ao meu redor pessoas que me apoiaram e me impulsionaram para frente. A caminhada durante a vida acadêmica foi constituída por momentos de grandes aprendizados, desde a sedimentação do conteúdo científico até o amadurecimento pessoal.

Os esforços realizados para a construção deste trabalho não foi obra de um homem só. Sendo necessário portanto, um preito de gratidão aqueles que colaboraram nesta pesquisa. Primeiramente aos meus orientadores, Professor Doutor Wilton Pereira da Silva e Professora Doutora Josivanda Palmeira Gomes, a estes agradeço todo os ensinamentos, dedicação e paciência. Ao professor Dyego Costa, grande amigo e pesquisador, obrigado pela contribuição nas análises físico-químicas e nas sugestões. Aos professores que constituíram a banca de defesa pelas correções e sugestões, Profa. Dra. Cleide, Prof. Dr. Aluizio e Prof. Dr. Alexandre.

A todos os professores da PGEA pelos ensinamentos adquiridos, aos técnicos de laboratório, obrigado pelo suporte e auxílio na execução dos experimentos. Aos secretários em especial a Dona Cida, obrigado por toda gentileza e paciência com todos que ali passaram.

Aos colegas que com a amizade durante esse período ajudaram a suavizar as dificuldades ali encontradas, em especial aos colegas do Laboratório de Transferência de Calor e Massa da Unidade Acadêmica de Física, em especial a Profa. Dra. Leidjane, pelas contribuições a este trabalho

Finalizo os agradecimentos em dedicação a minha família, aos meus pais Fabíola e Inácio, os quais dedico o título de doutor, em retribuição a dedicação a nossa educação, a minha esposa Patricia e filha Maria Luiza, agradeço a compreensão das dificuldades passadas, a ajuda nas análises e por ter feito esse período ser mais leve e dando ânimo para concluí-lo.

Gratidão ao povo brasileiro que financia a pesquisa nas instituições públicas e a todos que fazem pesquisa no Brasil, sendo um orgulho para toda a nação, que com tão pouco conseguimos realizar grandes feitos.

“Ninguém caminha sem aprender  
a caminhar, sem aprender a fazer  
o caminho caminhando,  
refazendo e retocando o sonho  
pelo qual se pôs a caminhar.”.  
(Paulo Freire)

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Corte longitudinal do coco verde, com as suas partes constituintes. ....	7
Figura 2.2 Descarte da casca e polpa do coco verde em um comércio local de Campina Grande. ....	13
Figura 2.3 Paralelepípedo e um volume de controle interno. ....	21
Figura 2.4 Métodos para solução de problemas da equação de difusão. ....	24
Figura 3.1 Fluxograma do beneficiamento da polpa do coco verde. ....	29
Figura 3.2 Identificação dos frutos para processamento da polpa do coco verde. ....	30
Figura 3.3 (a) Furador de coco verde, (b) Facão de cana, (c) bandeja em inox, (d) Polpa do coco verde. ....	30
Figura 3.4 Mixer 500W Mondial. ....	31
Figura 3.5 Polpa do coco verde processada. ....	31
Figura 3.6 Polpa do coco verde acondicionada no freezer. ....	31
Figura 3.7 Envaze da polpa do coco verde no recipiente metálico em forma de paralelepípedo. ....	32
Figura 3.8 Processo de vedação e imersão do recipiente no banho maria. ....	33
Figura 3.9 Dimensões aproximadas do recipiente utilizado para o processo de pasteurização da polpa do coco verde. ....	37
Figura 3.10 Esquema do recipiente que foi utilizado para acomodar a polpa do coco verde no processo de pasteurização e o posicionamento dos termopares. ....	38
Figura 3.11 Banho Maria marca Kacil modelo BM-02. ....	39
Figura 3.12 Domínio tridimensional discreto com vinte e sete tipos diferentes de volume de controle. ....	42
Figura 3.13 (a) Volume de controle interno e (b) orientação da malha tridimensional (Adaptado de Silva, 2009). ....	42
Figura 3.14 Coeficientes de transporte: (a) $\Gamma P\Phi$ e $\Gamma E\Phi$ nos pontos nodais P e E, respectivamente, e (b) $\Gamma e\Phi$ na interface do volume de controle. ....	50
Figura 3.15 Ícone do <i>software</i> "Parallepiped First Kind". ....	53
Figura 3.16 Interface gráfica da tela inicial do <i>software</i> . ....	54
Figura 3.17 Itens do menu "Parallelepiped". ....	54
Figura 3.18 Caixa de diálogo com instruções para o arquivo de dados. ....	55
Figura 3.19 Bloco de notas com as opções para entrada de dados. ....	55

Figura 3.20 Janela de diálogo para salvar o arquivo. ....	59
Figura 3.21 Nome do arquivo carregado. ....	59
Figura 3.22 Tipo de problema a ser simulado. ....	60
Figura 3.23 Aspecto da tela após uma simulação dos dados carregados. ....	61
Figura 3.24 Funções para a difusividade, valores iniciais para os parâmetros e números de passos de tempo. ....	62
Figura 3.25 Caixa de diálogo com instrução sobre o arquivo "Exp.txt". ....	62
Figura 3.26 Diretório "Experimental" onde o conjunto de dados "exp.txt" deve ser colocado. ....	63
Figura 3.27 Arquivo de dados "exp.txt" em três colunas: tempo, temperatura e peso estatístico.....	64
Figura 3.28 Escolha se o conjunto de dados é referente ao valor médio do domínio ou ao valor em um ponto definido pelo nó escolhido quando a definição do problema foi feita. ....	64
Figura 3.29 Diretório "Results" com os dados referentes ao problema simulado.....	65
Figura 3.30 Menu "General". ....	66
Figura 3.31 Caixa de diálogo para gráfico 2D. ....	67
Figura 3.32 Caixa de diálogo para gráfico 3D. ....	67
Figura 3.33 Calculadora do Windows.....	68
Figura 3.34 Calculadora do <i>Software</i> . ....	68
Figura 3.35 Menu "Information". ....	69
Figura 3.36 Caixa de diálogo com informações do autor do <i>software</i> . ....	69
Figura 3.37 Menu "Exit". ....	70
Figura 3.38 Barra de ferramentas do "Parallelepiped First Kind". ....	70
Figura 3.39 (a) "New Dataset", (b) "Open a Dataset", (c) "Simulate/Optimize", (d) "Results". ....	71
Figura 4.1 Gráfico da temperatura na superfície interna do paralelepípedo obtida dos dados experimentais do aquecimento da polpa do coco verde para os experimentos: (a) CV1 e (b) CV2. ....	76
Figura 4.2 . Gráfico da temperatura no centro do paralelepípedo obtido através dos dados experimentais do aquecimento da polpa do coco verde para os experimentos: (a) CV1; (b) CV2. ....	77

Figura 4.3 Gráfico das temperaturas na superfície e no centro do paralelepípedo obtido através dos dados experimentais do aquecimento da polpa do coco verde para os experimentos: (a) CV1; (b) CV2. .... 78

Figura 4.4 Curva de penetração de calor a partir da simulação numérica (—) e os pontos obtidos experimentalmente (●●●) para a temperatura no centro geométrico da polpa do coco verde. .... 79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Principais produtores de coco no mundo, área plantada e produtividade no ano de 2014 (FAOSTAT, 2014).....	5
Tabela 2.2 Composição centesimal da polpa do coco verde e do coco maduro, em porção de 100 g. ....	9
Tabela 3.1 Cotas para os tipos de volumes de controles .....	45
Tabela 4.1 Parâmetros físico-químicos da polpa do coco verde <i>in natura</i> .....	72
Tabela 4.2 Parâmetros físico-químicos da polpa do coco verde <i>in natura</i> e pasteurizada.....	74
Tabela 4.3 Parâmetros microbiológicos da polpa do coco verde <i>in natura</i> e pasteurizada.....	75
Tabela 4.4 Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente da polpa do coco verde, do qui-quadrado e do coeficiente de determinação obtidos neste trabalho.....	78

## LISTA DE ABREVIATURAS/SÍMBOLOS/UNIDADES

### Letras gregas

$\alpha$ – Difusividade térmica	[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$\Phi$ – Variável dependente no fenômeno de transporte	[-]
$\Phi_i$ – Variável dependente de transporte do i-ésimo volume de controle	[-]
$\Phi_i^{sim}$ – Valor simulado de $\Phi$ correspondente ao i-ésimo ponto experimental	[-]
$\phi^{sim}$ – Valor simulado de $\phi$	[-]
$\Phi_P, \Phi_E, \Phi_W, \Phi_N, \Phi_S$ - Variáveis dependentes em equação discretizada	[-]
$\Phi_e, \Phi_w, \Phi_n, \Phi_s$ Variáveis de transporte nos contornos leste, oeste, norte e sul	[-]
$\lambda$ – Coeficiente de transporte do termo transiente	[-]
$\Gamma^\Phi$ – Coeficiente de transporte do termo transiente	[-]
$\Gamma_e^\Phi$ – Coeficiente de transporte na interface entre “P” e “E”	[-]
$\Gamma_w^\Phi$ – Coeficiente de transporte na interface entre “P” e “W”	[-]
$\Gamma_n^\Phi$ – Coeficiente de transporte na interface entre “P” e “N”	[-]
$\Gamma_s^\Phi$ – Coeficiente de transporte na interface entre “P” e “S”	[-]
$\Gamma_E^\Phi$ – Coeficiente de transporte no ponto nodal E	[-]
$\Gamma_P^\Phi$ – Coeficiente de transporte no ponto nodal P	[-]
$\Gamma_W^\Phi$ – Coeficiente de transporte no ponto nodal W	[-]
$\Gamma_N^\Phi$ – Coeficiente de transporte no ponto nodal N	[-]
$\Gamma_S^\Phi$ – Coeficiente de transporte no ponto nodal S	[-]
$\rho$ – Densidade (massa específica)	[Kg.m <sup>-3</sup> ]

$\frac{1}{\sigma_i^2}$ - Peso estatístico do i-ésimo ponto experimental	[-]
$\chi^2$ – Qui-quadrado	[-]
$\nabla$ – Gradiente	[-]
$\nabla$ .- Divergente	[-]
$\Delta$ – Variação	[-]

### Sobrescritos

- 0 – Tempo anterior
- e – Face leste do volume de controle
- P – Nó do volume de controle em estudo

### Subscritos

- e, w, n e s – Fronteiras leste, oeste, norte e sul de um volume de controle
- E, W, N e S – Ponto nodal: leste, oeste, norte e sul de um volume de controle
- i - Inicial

### Letras latinas

$A_p, A_w, A_e, A_n, A_s$ – Coeficientes da equação de difusão discretizada	[-]
$c_p$ – Calor específico a pressão constante	[Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
E, W, N, S, P – Pontos nodais	[-]
f – fator de partição	[-]
k – Condutividade térmica	[Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$N_p$ - Número de pontos experimentais	[-]

$n_{cp}$ - Número de dados calculados de cada parâmetro	[-]
$R^2$ - Coeficiente de determinação	[-]
T - Temperatura	[°C]

## RESUMO

O Brasil é um país reconhecido por ter como base econômica o setor primário, ou seja, atividades que extraem ou modificam matérias-primas, e dentre elas está a agricultura. O cultivo do coco é amplamente distribuído pelo Brasil, mais precisamente pela costa litorânea do país. Parte da produção é destinada ao consumo da água de coco, produção de copra (polpa seca do coco) e seus derivados. No entanto, a indústria de água de coco, após a extração de sua matéria-prima, descarta juntamente com a casca a polpa do fruto imaturo, a qual possui alto teor de umidade, rica em fibras e minerais. Este trabalho propõe uma solução para um dos rejeitos da agroindústria do coco verde, que é a polpa do coco verde, através da pasteurização deste material, possibilitando a comercialização com garantia de segurança alimentar. A difusividade térmica foi determinada através do experimento de aquecimento e técnicas de otimização, possibilitando o estudo da transferência de calor na polpa do coco verde durante o processo de pasteurização. A pasteurização é um processo de conservação de alimento que utiliza calor para a inativação de microrganismos patógenos, possibilitando o prolongamento da vida de prateleira de produtos. Assim, um maior mercado consumidor pode ser alcançado por possibilitar o seu transporte aos centros consumidores mais distantes, dentre outras vantagens. Será apresentada uma solução numérica para a equação de difusão com condição de contorno de primeiro tipo variável. Foi desenvolvida uma modelagem matemática para a solução de um problema direto de difusão de calor, em um interior de um recipiente em forma de paralelepípedo contendo a polpa de coco verde. Um *software* com tal modelagem foi utilizado não só para determinar a difusividade térmica do produto a partir de dados experimentais da cinética de aquecimento, como também para simular cinéticas para recipientes com outras dimensões. Os resultados obtidos para a difusividade térmica possibilitaram simular o aquecimento da polpa de coco verde sem a necessidade de novos experimentos.

**Palavras-chave:** albúmen carnosos, resíduo agroindustrial, solução numérica

## ABSTRACT

Brazil is a country recognized for having as its economic base the primary sector, that is, activities that extract or modify raw materials, and among them is agriculture. Coconut cultivation is widely distributed throughout Brazil, more precisely along the coast of the country. Part of the production is destined to the consumption of coconut water, production of copra (dry coconut pulp) and its derivatives. However, the coconut water industry, after extracting its raw material, discards together with the bark the flesh of the immature fruit, which is high in moisture, rich in fibers and minerals. This work proposes a solution for one of the rejects of the agroindustry of the green coconut, which is the green coconut pulp, through the pasteurization of this material, allowing the commercialization with guarantee of food safety. The thermal diffusivity will be determined, allowing the study of heat transfer in the green coconut pulp during the pasteurization process. Pasteurization is a food preservation process that uses heat to inactivate pathogenic microorganisms, making it possible to prolong the shelf life of products. Thus, a larger consumer market can be achieved by enabling it to be transported to the most distant consumer centers, among other advantages. A numerical solution will be presented for the diffusion equation with boundary condition of the first variable type. A mathematical modeling will be developed for the solution of a direct heat diffusion problem in an interior of a parallelepiped container containing the green coconut pulp. A *software* with such modeling will be used not only to determine the thermal diffusivity of the product from experimental kinetic heating data, but also to simulate kinetics for containers with other dimensions.

**Keywords:** meaty albumen, agroindustrial residue, numerical solution

## 1. INTRODUÇÃO

O coqueiro pertence à família *Arecaceae* (família das palmeiras) e é amplamente distribuído ao redor do mundo, especialmente ao longo de 12 milhões de hectares em países tropicais (FAO, 2017). Seu fruto é extremamente consumido para a alimentação humana, bem como é utilizado na fabricação de produtos industrializados, a exemplo do leite de coco, coco ralado, óleo de coco, água de coco, e na indústria de alimentos como matéria-prima de bolacha, iogurte, doce e sorvete (MARTINS e JESUS JUNIOR, 2011). Em muitos países, o coqueiro é conhecido como “árvore da vida”, devido às múltiplas possibilidades de aproveitamento de suas partes, além de possuir grande importância na economia de vários países asiáticos (BONTEMPO, 2008; VAN DAM, 2002). A cultura do coqueiro data da Pré-história; o cultivo do coco no Sri Lanka e na Índia é milenar (MATHAI, 2005).

Em 2014, os principais produtores mundiais de coco foram Indonésia, Filipinas, Índia, Brasil e Sri Lanka. Estes, com uma produção de 18, 15, 11, 3 e 2 milhões de toneladas, respectivamente (FAOSTAT, 2014). Do comércio *in natura*, assim como da industrialização da fruta, resultam subprodutos caracterizados como sendo a casca do coco e seus componentes. A falta de conhecimento sobre as propriedades dos subprodutos do coco pode ser um dos fatores que contribuem para o errôneo descarte desse material (ROSA et al., 2001), que pode ser amplamente aproveitado e utilizado como insumo industrial.

O beneficiamento da polpa do coco verde pode ser realizado a fim de se obter uma matéria-prima que pode ser consumida *in natura*, ou ainda utilizada na indústria de alimentos na produção de algumas sobremesas, dentre elas o sorbet, que é um gelado comestível a base de água e frutas, o qual não possui gordura ou lácteos em sua composição (SANTANA et al., 2011); como também na formulação de maionese, como substituto do ovo (DUARTE, 2014) e ser consumido como uma fonte de fibras (SOARES et al., 2015).

Medeiros et al. (2016) constataram que a polpa do coco verde possui elevada atividade de água e pH acima de 4,5 nos três estádios de maturação que mais são consumidos seus frutos *in natura* (6, 7, 8 meses após a abertura da floração). Tais alimentos, que apresentam elevada atividade de água e pH acima de 4,5, podem sofrer com maior intensidade a sua deterioração por microrganismos, sendo

recomendado, no momento do manuseio, uma excelente higienização dos utensílios e do ambiente de processamento, além da aplicação de técnicas de conservação de alimentos.

Diante deste fato, existem várias técnicas para a conservação dos alimentos, dentre elas a pasteurização é uma das mais utilizadas na indústria de alimentos, principalmente na indústria de polpa. A pasteurização tem como principal objetivo a destruição de células vegetativas de microrganismos patogênicos, deteriorantes e a inativação enzimática da polpa, possibilitando o seu transporte a longas distâncias. (MARTINS, 2008).

O conhecimento das propriedades termofísicas dos alimentos são importantes para a agroindústria, de posse delas podem ser projetados e calculados as máquinas e os custos relacionados ao processo destes produtos. As principais propriedades termofísicas são densidade, calor específico, condutividade e difusividade térmica. Tendo como objetivo principal a conservação dos alimentos, as técnicas de transferência de calor são aplicadas aos alimentos e estudadas para melhor compreender sua aplicação sem que haja danos físicos e nutricionais ao produto.

A análise da contaminação microbiológica dos alimentos é um dos parâmetros fundamentais para determinação da vida útil de um produto alimentício, também para que os mesmos não ofereçam riscos à saúde da população consumidora.

A presente pesquisa visa contribuir para a redução do problema de descarte da polpa do coco verde, diante de uma farta oferta de matéria-prima. Assim, é justificável a determinação da difusividade térmica e a descrição da transferência de calor durante o processo de pasteurização dessa polpa a fim de fornecer um alimento para o enriquecimento da dieta da população desfavorecida economicamente de uma forma segura e com mais nutrientes em sua alimentação.

### **1.1. Objetivo geral**

Realizar um estudo teórico-experimental para descrever o processo de pasteurização da polpa de coco verde.

## 1.2. Objetivos específicos

- Realizar experimentos de aquecimento da polpa de coco verde acondicionadas em recipientes metálicos na forma de paralelepípedo, com termopar inserido no centro e na extremidade do recipiente;
- Utilizar uma solução numérica tridimensional da equação de difusão com condição de contorno do primeiro tipo (ou de Dirichlet) para polpa de coco verde acondicionadas no recipiente na forma de paralelepípedo;
- Usar o método dos volumes finitos (MVF) com uma formulação totalmente implícita para obter uma solução numérica tridimensional da equação de difusão de calor;
- Utilizar o estúdio de programação COMPAQ VISUAL FORTRAN<sup>®</sup>, para criar o programa com a solução numérica;
- Implementar um algoritmo de otimização no *software* para determinar uma expressão para a difusividade térmica durante a etapa de aquecimento;
- Simular a transferência de calor usando os parâmetros determinados, provendo a distribuição de temperatura em tempos previamente especificados;
- Realizar análises físico-químicas e microbiológicas das amostras *in natura* e após o resfriamento rápido;
- Realizar análises microbiológicas no produto *in natura* e pasteurizado;
- Estimar, através de uma simples simulação, o tempo seguro de aquecimento do produto para recipientes com outras dimensões.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Aspectos gerais

O coco verde é um fruto largamente cultivado em todo o território nacional, no entanto é na região litorânea o maior setor de produção e consumo deste alimento, que possui características nutricionais interessantes para o ser humano, como por exemplo a reposição natural de eletrólitos no corpo humano, dentre eles o Sódio ( $\text{Na}^+$ ), Potássio ( $\text{K}^+$ ), Cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), Magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), Cloreto ( $\text{Cl}^-$ ). Além disto, o produto tem poder de reidratação, fonte de fibras, minerais e proteína.

### 2.2. O coqueiro

O coqueiro é cultivado em aproximadamente mais de 96 países tropicais e representa uma importante fonte de renda. A Indonésia, Filipinas e Índia são os principais produtores e representam cerca de 75% da produção mundial (FAOSTAT, 2014)

O coco verde pertence à espécie *Cocos nucifera* Linn., Subfamília *Cocosidae*, pertencente à família *Palmae*. A espécie compreende algumas variedades, entre as quais as mais importantes são *Typica* (Var. Gigante) e *Nana* (Var. Anã). O coqueiro Anão, introduzido no Brasil em 1925, é pequeno e cada árvore produz de 120 a 150 frutos por ano (LAVOYER et al., 2013).

Todas as partes da árvore do coqueiro podem ser utilizadas, mas os principais produtos são obtidos do fruto, como por exemplo a produção de copra (albúmen sólido desidratado a 6% de umidade) e óleo, ácido láurico, leite de coco, fibra, farinha, água de coco (do fruto imaturo), sabões, detergentes e cosméticos. O Brasil é o 4º maior produtor e colheu cerca de 2 bilhões de frutas em 2010 (IBGE, 2010).

Na Tabela 2.1 são apresentados dados relacionados à produção da cultura do coco ao redor do mundo. Em área plantada o Brasil fica em quinto lugar dentre os maiores produtores, dando ao mesmo o título de país com maior produtividade, sendo 11,65 toneladas por hectare, enquanto a Indonésia produz 6,04 toneladas por hectare,

uma vantagem competitiva de 48,15% de produtividade acima do maior produtor de coco do mundo.

**Tabela 2.1** Principais produtores de coco no mundo, área plantada e produtividade no ano de 2014 (FAOSTAT, 2014).

<b>País</b>	<b>Produção (t)</b>	<b>Área Plantada (ha)</b>	<b>Produtividade (t/ha)</b>
<b>Indonésia</b>	18300000	3025000	6,04
<b>Filipinas</b>	14696298	3502011	4,19
<b>Índia</b>	11078873	2140000	5,17
<b>Brasil</b>	2919110	250554	11,65
<b>Sri Lanka</b>	2395266	394836	6,06

O cultivo de coco no Brasil não tem como principal destino a produção de óleo. A polpa madura do coco é a principal matéria-prima para a produção de coco ralado e leite de coco. O consumo de albúmen líquido (ou água de coco) do coco verde é tão importante para esse país, que resultou na implantação de culturas destinadas principalmente a esta aplicação, o que não acontece em outros países produtores.

A crescente demanda por alimentos naturais e saudáveis é um fator que aumentou o consumo desta bebida, atingindo cerca de 350 milhões de litros por ano de forma fresca e industrializada. Além de muito apreciado pelo seu sabor e frescura, é considerado um excelente isotônico natural, por isso também é consumido por suas qualidades nutricionais. Pelo fato de o consumo de água de coco verde ser muito benéfico à saúde.

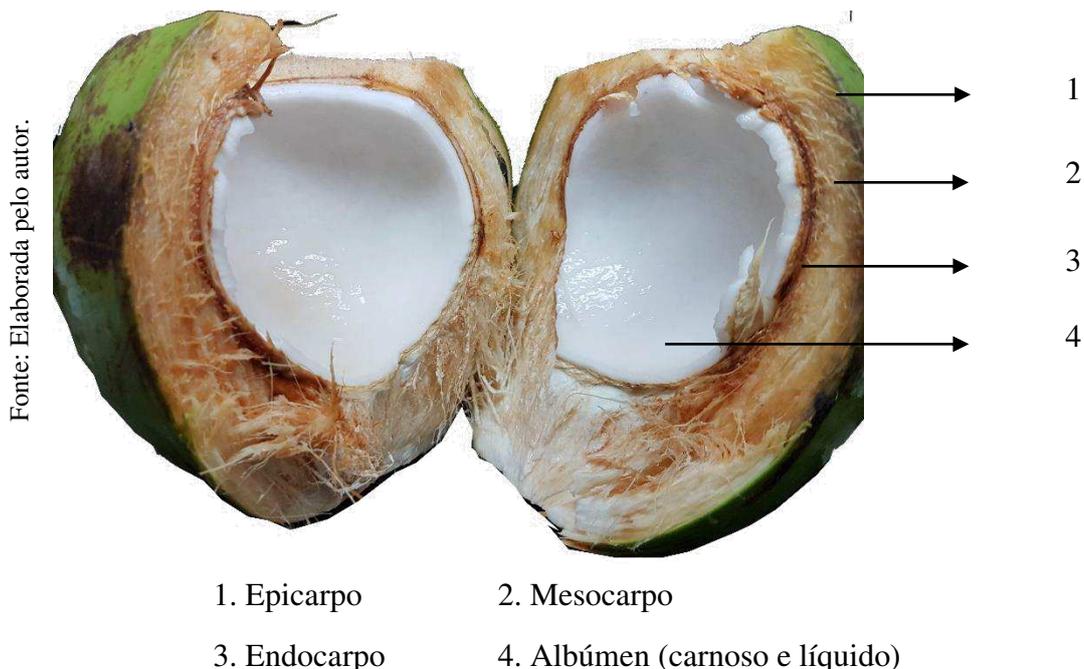
No entanto, a demanda crescente por este produto gera uma grande quantidade de resíduos em locais como praias do litoral brasileiro onde o consumo desta bebida é comum. A casca de coco corresponde a cerca de 85% da fruta e tornou-se um problema devido ao grande volume de resíduos gerados e à sua lenta degradação (SANTANA et al., 2011).

### 2.3. Coco verde

A produção de coco verde tem como principal finalidade a extração da água de coco. Este mercado tem crescido nos últimos anos com o aumento do consumo da água de coco e o crescimento das indústrias de envasamento, que vêm disponibilizando o produto vigorosamente no varejo, principalmente nos supermercados, restaurantes e lanchonetes. Em geral, os produtores vendem diretamente o produto *in natura* para os intermediários, os atacadistas, os varejistas e até mesmo ao consumidor final. Quando o fruto é industrializado, os produtores deslocam a produção para as indústrias locais ou intermediários das indústrias (LAVOYER et al., 2013).

Na Figura 2.1 pode-se identificar as partes constituintes do pericarpo (parte constituída pelos tecidos que envolvem a semente das angiospermas) do fruto do coqueiro em fase de maturação em torno de 6 a 8 meses após a sua inflorescência. As partes que constituem o coco verde, podem ser identificadas pela numeração na Figura 2.1, as quais estão na sequência:

1. O epicarpo, camada mais externa do pericarpo, com característica lisa;
2. O mesocarpo é a camada intermediária do pericarpo dos frutos, é espesso e fibroso;
3. O endocarpo, camada mais interna do pericarpo dos frutos, é uma camada rígida e encontra-se em contato com a semente do fruto;
4. O albúmen, contém as substâncias nutritivas que vão suprir as necessidades da planta até o desenvolvimento de suas raízes, esta é uma camada carnosa, branca, muito oleosa, formando uma cavidade no qual se encontra o albúmen líquido (PASSOS, 2006).



**Figura 2.1** Corte longitudinal do coco verde, com as suas partes constituintes.

## 2.4. Polpa de fruta

As polpas de frutas têm como características gerais, alta atividade de água (maior que 0,95), potencial de oxidação elevado e pH baixo, sendo a acidez um fator de inibição da microbiota deteriorante (PEREIRA et al, 2006), deve-se levar em consideração este fato e submeter a polpa de fruta a algum tratamento de conservação de alimento.

De acordo com a instrução normativa nº 01 de 7 de janeiro de 2000, instituída pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), define polpa de fruta como o produto não fermentado, não concentrado, não diluído, obtido de frutos polposos, através de processo tecnológico adequado com um teor mínimo de sólidos totais, proveniente da parte comestível do fruto (BRASIL, 2000).

A polpa de fruta poderá ser de constituição simples, quando originada de uma única fruta. Caso a constituição desta polpa seja formada por duas ou mais frutas, esta será designada como polpa mista, neste caso o percentual de cada polpa terá que ser declarado no rótulo. Quanto ao quesito de segurança alimentar, este produto não deverá conter terra, sujidade, parasitas, fragmentos de insetos e pedaços das

partes não comestíveis da fruta e da planta, como também terá que respeitar os limites máximos microbiológicos fixados, em que a soma de bolores e leveduras máximo terá que ser de  $5 \times 10^3/g$  para polpa “in-natura”, esta sendo congelada ou não e  $2 \times 10^3/g$  para polpa conservada quimicamente e/ou que sofreu tratamento térmico (pasteurização). Para análise microbiológica o padrão aceitável será de ausência de *Salmonella* em 25 g e tolerância de até 1 NMP.g<sup>-1</sup> de coliformes (BRASIL, 2000).

Pereira et al. (2006) analisaram cinco polpas de frutas de três diferentes marcas comercializadas no município de Viçosa em Minas Gerais. As polpas de fruta eram congeladas, de três marcas comerciais (A, B e C), das seguintes frutas: açaí, caju, goiaba, graviola e morango. As polpas de caju, goiaba e graviola da marca A, de açaí e morango da marca B e por fim de açaí, goiaba e graviola da marca C foram consideradas inadequadas por apresentarem quantidades de fungos filamentosos e leveduras acima do que é considerado tolerável na legislação.

Santos et al. (2008) analisaram noventa e oito amostras de polpa de frutas congeladas de oito sabores diferentes comercializadas no município de Palmas no estado do Tocantins, constatou-se que oitenta e oito amostras (89,8% das amostras de polpa) apresentaram contaminação por bolores e leveduras, sendo que as contagens variaram de menor que 10 até  $6,2 \times 10^4$  UFC.g<sup>-1</sup>. No entanto, vinte e nove amostras (29,6% das amostras de polpa) não se enquadraram nos padrões estabelecidos pela Instrução Normativa 01 de 07/01/00, que exige um máximo de  $5 \times 10^3$  UFC.g<sup>-1</sup>. Foram identificadas cinco amostras com presença de coliformes totais com resultado positivo, no entanto os valores foram inferiores aos que padrões estabelecidos pelo regulamento técnico da resolução da diretoria colegiada (RDC) nº 12, de 02/01/2001 ANVISA que preconiza valor máximo de  $10^2$  NMP.g<sup>-1</sup> (BRASIL, 2001).

#### **2.4.1. Polpa do coco verde**

Embora o endosperma sólido (albúmen carnosos) ou a polpa de coco verde seja comestível, geralmente apenas a água é extraída das frutas frescas. As polpas de coco maduro e verde possuem características diferentes. A polpa madura é utilizada tanto para cozinhar quanto para processamento industrial, mas a polpa verde, bem

como a casca, são consideradas resíduos. Santana et al. (2011) realizaram estudos para investigar a polpa do coco verde no uso como um ingrediente alimentar. No sorvete de chocolate, por exemplo, foi eficiente substituir gordura, leite, emulsionante e estabilizador. Sem odor e sabor característico do coco maduro, o produto tinha 93% de aprovação sensorial por parte dos palestrantes, que julgavam sua textura e propriedades organolépticas muito parecidas com o sorvete comercializado.

Na composição centesimal da polpa do coco verde *in natura* analisada por Soares et al. (2015), foi constatado que a polpa do coco verde pode ser considerada com um alto teor de fibra por possuir um teor mínimo de 6 g fibras/100 g (sólidos) (ANVISA,1998) tendo na sua composição 10,50%. Observou-se outros constituintes como cinzas (0,76%), lipídeos (10,10%), proteína (0,090%) e umidade (75,50%).

De acordo com dados de Taco (2011) a composição centesimal da polpa do coco maduro, também chamada de copra, apresenta umidade de 43%, proteína de 3,7%, lipídeos totais de 42%, carboidratos de 10,4%, fibras dietéticas totais de 5,4% e cinzas de 1%.

Na Tabela 2.2 pode-se comparar os teores de umidade, proteína, lipídeos, fibras e cinzas na polpa de coco verde e madura. Os dados obtidos por Soares et al.(2015) para a polpa do coco verde e TACO (2011) para a polpa do coco maduro, observa-se um decréscimo na umidade de 43,04% e de 48,57% em fibras totais, enquanto os teores de proteínas, lipídeos e cinzas houve um acréscimo na ordem de 4.011, 315,84 e 31,57%, respectivamente.

**Tabela 2.2** Composição centesimal da polpa do coco verde e do coco maduro, em porção de 100 g.

<b>Componentes</b>	<b>Coco verde (Soares et al., 2015)</b>	<b>Coco maduro (Taco, 2011)</b>
<b>Umidade b.u. (%)</b>	75,50	43,00
<b>Proteínas (g)</b>	0,090	3,70
<b>Lipídeos totais (g)</b>	10,10	42,000
<b>Fibras totais (g)</b>	10,50	5,40
<b>Cinzas (g)</b>	0,76	1,00

De acordo com a Anvisa (2003), a recomendação de ingestão diária de fibras é de 25 g em uma dieta de 2.000 kcal, e determina duas formas de rotulagem quanto ao seu teor, são “fonte de fibras” quando o teor é de 3 g de fibras por 100 g de produto e “alto teor de fibras” quando o valor mínimo é de 6 g de fibras por cada 100 g de produto.

Medeiros et al. (2017) analisaram a composição centesimal da polpa do coco verde em diferentes estádios de maturação desta fruta. Os frutos foram coletados no sexto, sétimo e oitavo mês após a inflorescência do coqueiro. Constatou-se a presença de macro e micronutrientes importantes na dieta alimentar humana.

Os teores de macrominerais da polpa do coco verde foram detectados em diferentes estádios de maturação, como mostra as legenda E1 significa que a polpa foi retirada de frutos com seis meses, E2 sete meses e E3 oito meses após a abertura da inflorescência. O teor de potássio, fósforo e enxofre aumentaram com o amadurecimento do coco verde, e apresentaram diferenças significativas entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5%. O potássio variou de 315,276 mg/100 g com seis meses, 506,263 mg/100g com sete meses e 618,874 mg/100 g com oito meses, sendo o mineral com maior quantidade nesta análise.

Santana (2012), trabalhando com coco verde na aplicação para gelado, afirma que o potássio foi o mineral predominante em suas análises, apresentando outros teores de minerais como cálcio, fósforo, ferro e zinco.

Gondim et al. (2005) trabalharam com resíduos de algumas frutas, e a polpa do coco verde com 8 meses após a abertura da inflorescência foi superior nos teores de potássio, zinco e cobre quando comparados aos resíduos das frutas de abacate, abacaxi, banana, mamão, maracujá, melão e tangerina. A diferença entre as médias dos teores de cloro e cálcio não foram significativos entre si pelo teste Tukey, no entanto é possível encontrar um baixo teor de cálcio de 29,740 mg/100 g aos 8 meses.

Os teores de fósforo aumentaram do sexto para o sétimo mês de 19,534 mg/100 g para 47,213 mg/100 g, no entanto não houve diferença significativa entre o sétimo e o oitavo mês, o qual obteve o teor máximo de 52,218 mg/100 g. O último macromineral em menor quantidade aferido foi o enxofre, o qual semelhantemente ao fósforo houve um incremento no seu teor do sexto mês para o sétimo, 2,726 mg/100 g, 9,9976 mg/100 g, respectivamente, sendo essa diferença estatisticamente significativa ao nível de 5% do teste Tukey, no entanto não houve diferença estatística

entre as médias do sétimo com o oitavo mês, que se obteve um teor de 3,511 mg/100 g.

Ainda com referência ao estudo realizado por Gondim et al. (2009), na composição mineral dos microminerais da polpa do coco verde em diferentes estádios de maturação, foram encontrados nas amostras em maior quantidade os teores de ferro, manganês, zinco, cobre, bromo e rubídio, nesta sequência. Os teores de manganês e zinco apresentaram uma diferença significativa entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5%, já o ferro e o cobre apresentaram uma diferença significativa entre si pelo teste de Tukey ao nível de 1%, e por último o bromo e o rubídio não apresentaram diferença significativa entre as médias.

Os valores de ferro variaram de acordo com a maturação do fruto, atingindo o teor máximo com oito meses, os teores variaram de 1,062 (E1), 2,345 (E2) e 4,410 (E3). Oliveira et al. (2010), analisando a polpa do coco verde, aferiram em suas amostras 2,58 mg/100 g de ferro, estando de acordo com os dados presentes neste trabalho. O teor de manganês do sexto e do sétimo mês não apresentaram diferença significativa, no entanto houve um incremento significativo no oitavo mês, quando este teor de mineral chegou a 3,614 mg/100 g.

O teor de zinco aumentou com o passar do tempo de maturação, no entanto não houve diferença significativa entre o sétimo e o oitavo mês, sendo os teores de 0,341, 1,398 e 1,428 mg/100 g, respectivamente E1, E2 e E3. Houve uma elevação na concentração do cobre, variando de 0,209 mg/100g, para 0,689 mg/100g por finalmente 1,083 mg/100g de polpa de coco verde com oito meses após a polinização.

Santoso et al. (1996) analisaram os teores de minerais na água de coco verde com 6 meses de maturação, e constataram a presença de alguns microminerais como o manganês, cobre e o zinco em baixa quantidade, nos seguintes teores: 0,12, 0,01 e 0,07 mg/100 g, respectivamente. Estes teores inferiores aos encontrados na polpa de coco verde demonstram a importância do armazenamento de minerais que migram do endosperma líquido para o endosperma carnoso durante o período de maturação do fruto do coco.

Verificou-se a presença do bromo e do rubídio nas amostras da polpa do coco verde e nos três estádios de maturação, porém a sua diferença não foi estatisticamente significativa durante o processo de maturação do fruto, os teores de

bromo variaram de 0,410 a 0,672 mg/100 g e para o rubídio a variação foi de 0,377 a 0,546 mg/100 g de polpa do coco verde.

## **2.5. Resíduo agroindustrial**

Os resíduos agroindustriais são gerados em grandes quantidades ao longo do ano e são os recursos renováveis mais abundantes na Terra. Eles são compostos principalmente por açúcares, proteínas, fibras, sais minerais, os quais são compostos de interesse industrial. Devido à grande disponibilidade e composição rica em compostos que podem ser utilizados em outros processos, existe um grande interesse sobre a reutilização destes resíduos, tanto do ponto de vista econômico como ambiental. O aspecto econômico baseia-se no fato de tais resíduos poderem ser utilizados como matérias-primas de baixo custo para a produção de outros compostos de valor agregado com a expectativa de reduzir os custos de produção. A preocupação ambiental ocorre, em razão da maioria dos resíduos agroindústrias possuírem compostos fenólicos e outros compostos de potencial tóxico, podendo causar deterioração do ambiente quando os resíduos são descarregados para a natureza (MUSSATTO et al., 2012).

Nos últimos anos, foram desenvolvidos muitos projetos e processos de pesquisa cujo objetivo é a reutilização de casca de coco na produção de tapetes e os tecidos para proteção do solo, como substrato, produção de papel e enzimas, alimentação suplementar, incorporação de fibras em materiais poliméricos para isolamento térmico e acústico, incorporação em materiais de construção para maior resistência, tratamento de efluentes contendo metais tóxicos (SENHORAS, 2005; SOUZA e JASMIN, 2004), produção de vasos para substituir o xaxim (*Dicksonia sellowiana*), que tem a extração e exploração comercial proibida por risco de extinção (BARROSO, 2005). No entanto existem poucos estudos realizados no beneficiamento da polpa do coco verde. Na Figura 2.2 pode-se observar o descarte do coco verde após o consumo do albúmen líquido.

Fonte: Elaborada pelo autor.



**Figura 2.2** Descarte da casca e polpa do coco verde em um comércio local de Campina Grande.

## **2.6. Técnicas de conservação de alimentos pelo uso de calor**

O processamento com emprego de calor é o método mais comum para aumentar a vida de prateleira dos produtos, possibilitando a inativação ou inibição do crescimento de microrganismos e enzimas (ELES-MARTÍNEZ e MARTÍN-BELLOSO, 2007).

### **2.6.1. Pasteurização**

O processo de pasteurização é um tratamento térmico controlado e realizado com temperaturas inferiores a 100 °C, em que o alimento é resfriado após um determinado tempo de aquecimento. A palavra pasteurização é empregada em homenagem a Louis Pasteur, cientista renomado que entre os anos de 1854 a 1864 contribuiu, de forma significativa, com seus experimentos para os métodos térmicos de conservação dos alimentos (GUTIERREZ, 2008).

Várias são as alternativas de processos utilizadas na elaboração e conservação da polpa, como pasteurização, conservação por aditivo químico e congelamento. A prática mais utilizada é o congelamento. Entretanto, esta prática pode envolver problemas relacionados à quebra da cadeia de frio durante a distribuição do produto, favorecendo o crescimento microbiano e comprometendo a qualidade da polpa (PEREIRA et al., 2006).

A pasteurização pode ser aplicada às polpas de frutas, nas unidades de processamentos das cooperativas ou associações de pequenos produtores, por ser um processo relativamente barato, quando levado em consideração a manutenção da qualidade que pode ser obtida, tanto com relação à estabilidade microbiana quanto à fixação de nutrientes (FELLOWS, 1994).

Trabalhos confirmam a falta de boas práticas de higiene, que podem ser apresentadas desde o momento da aquisição da fruta até o seu manuseio no processamento para a produção da polpa, como são citados pelos autores Pereira et al. (2006), Batista et al. (2013), Brasil et al. (2016) e Dantas et al. (2012).

### **2.6.2. Branqueamento**

O branqueamento é um tratamento térmico brando que utiliza temperaturas entre 70 e 100 °C, variando o tempo entre 1 a 5 min, em seguida é realizado o resfriamento para evitar que o produto permaneça por um longo período de tempo em temperatura elevada, resultando em um cozimento indesejado. Esse tratamento geralmente é aplicado em frutas e hortaliças, antes do congelamento ou desidratação, e tem como objetivo principal a inativação de enzimas naturais, todavia, é utilizado combinado com o processo de descascamento.

Na literatura, alguns autores consideram este processo como um pré-tratamento ao invés de um processo de conservação (VASCONCELOS e MELO FILHO, 2010). Silva et al. (2008) analisaram a influência do branqueamento como pré-tratamento na desidratação em camada fina do pimentão verde nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C, e constataram que o branqueamento em solução de bicarbonato de sódio é o que mais favorece a perda de umidade.

### **2.6.3. Esterilização**

Esterilização é o tratamento térmico que se refere à completa destruição microbiana de um alimento ou produto. Isso significa dizer que toda flora microbiana patogênica ou deterioradora, inclusive as formas esporuladas, assim como enzimas, serão destruídas e/ou inativadas e o produto se apresentará estéril. Dentre as características principais deste processo estão, a aplicação de temperaturas acima de 100 °C, destruição tanto das formas vegetativas quanto esporuladas de microrganismos e a necessidade de embalagens apropriadas, não permitindo a recontaminação dos alimentos (VASCONCELOS e MELO FILHO, 2010).

### **2.7. Propriedades termofísicas**

Os dados das propriedades termofísicas são importantes valores utilizados nos cálculos de projetos, manutenção e para futuras modificações/atualizações em equipamentos utilizados nas indústrias de alimentos, como bombas, misturadores, filtros e evaporadores. Portanto, um projeto industrial correto requer dados adequados dessas propriedades que facilitam a otimização dos parâmetros de qualidade do produto (ZURITZ et al., 2005).

O objetivo principal de estudar a condução de calor é determinar o campo das temperaturas em um meio resultante das condições impostas em sua fronteira, ou seja, deseja-se conhecer a distribuição de temperaturas, que representa como a temperatura varia com a posição no meio, também podendo ser representada também pela obtenção do perfil de temperatura dentro do meio, variando suas posições e o tempo (INCROPRERA et al., 2008).

Conhecendo o perfil de temperatura no meio, pode-se aplicar a lei de Fourier diretamente para se obter o fluxo de calor em qualquer ponto do meio ou na superfície. A partir do conhecimento do perfil de temperatura de um sólido, pode-se verificar a sua integridade estrutural por meio da determinação de tensões, expansões e deflexões térmicas. Outras aplicações imperantes a partir do conhecimento do perfil de temperaturas, tais como a otimização da espessura de um material isolante ou para

determinar a compatibilidade entre revestimentos especiais ou adesivos usados como material (INCOPRERA et al., 2008).

O procedimento para se obter o perfil de temperatura deve obedecer a lei de conservação de energia, independentemente de qual seja a aplicação, isto é, a lei pode ser aplicada a um volume finito, resultando em uma expressão que rege todo o comportamento do sistema, podendo ser aplicada também a um volume infinitesimal, resultando em uma equação diferencial, a qual pode ser resolvida para condições pontuais do sistema (ANDRADE, 2016).

Incoprera et al. (2008) elencaram em uma sequência clara na metodologia para determinar a distribuição de temperatura:

- Primeiramente, define-se um volume de controle, delimitando-se a superfície com uma linha tracejada;
- Define-se uma base de tempo;
- Especificam-se os processos relevantes de troca de energia e faz-se uma representação gráfica do mesmo em um diagrama;
- Por fim, escreve-se a equação de conservação de energia, bem como as expressões apropriadas para as taxas de transferência de calor que devem substituir os respectivos na equação de balanço energético.

Para melhor compreender como este processo funciona, faz-se necessário o conhecimento de algumas propriedades termofísicas, podem-se apontar densidade, calor específico, condutividade térmica e difusividade térmica. Esta última é uma propriedade de grande importância para processos de transferência de calor em estado não estacionário, pois estabelece a rapidez com que o calor se difunde no produto e a relação entre o tempo e a temperatura (NEVES, 1991).

### **2.7.1. Densidade**

A massa específica de uma substância é definida como a massa por unidade de volume e expressa em  $\text{kg m}^{-3}$  no sistema internacional de unidade (MUNSON et al., 1997).

$$\rho = \frac{m}{V}$$

(2.1)

em que:

$\rho$ : densidade ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ );

m: massa (kg);

V: volume ( $\text{m}^3$ ).

### **2.7.2. Calor específico**

O calor específico é definido como a quantidade de energia necessária para alterar em uma unidade de temperatura uma massa unitária de um material qualquer, sendo importante para se determinar a quantidade de energia a ser adicionada ou removida em processos de aquecimento e resfriamento (ARAÚJO et al., 2004).

### **2.7.3. Condutividade térmica**

A condutividade térmica é definida como a constante de proporcionalidade que relaciona a taxa de transferência de calor por um material com área de transferência de calor e a variação de temperatura com a distância no material (INCROPERA et al., 2008).

### **2.7.4. Difusividade térmica**

A difusividade térmica mede a capacidade de um material de conduzir calor em relação à sua capacidade de armazená-la (INCROPERA et al., 2008).

## **2.8. Equação de balanço (conservação de energia)**

A determinação de um perfil de temperatura em um objeto, tem como principal objetivo a compreensão da distribuição da temperatura neste meio como resultado das condições que são impostas ao seu entorno.

O método do balanço de energia em um volume de controle infinitesimal, consiste em um volume de controle que estará no interior do objeto de interesse. Pode-se considerar um volume de controle dadas em coordenadas cartesianas e

dimensões em  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  e aceitar as hipóteses que estão em um meio homogêneo e estacionário, portanto sem movimentação global no seu interior e sem transporte de energia por advecção. Isso implica que no interior desse volume de controle não terá variação de energia mecânica, na realização de trabalho mecânico.

O balanço de energia térmica no volume de controle será a taxa de armazenamento de energia térmica em nosso volume de controle em termo das taxas líquidas de entrada e saída de energia térmica e de geração e consumo de energia térmica neste mesmo volume de controle.

Pode-se dizer que a taxa líquida de entrada e saída de energia térmica deste volume de controle será dada unicamente pela energia de condução de calor, então pode-se usar uma expansão das séries de Taylor e Fourier para calcular as taxas em cada uma das faces deste volume de controle em comum com a lei de Fourier para um material isotrópico ( suas propriedades mecânicas são as mesmas em todas as direções) para concluir que é a taxa líquida total de entrada e saída de calor atrás das faces deste volume de controle. Assim, pode-se concluir em outro termo, a taxa de geração e consumo.

Esse termo é calculado pela taxa líquida volumétrica de geração de energia de consumo e, sendo um termo volumétrico, precisa ser multiplicado pelo volume para fornecer a taxa como exige o balanço de energia. Por fim, avalia-se a taxa de armazenamento de energia térmica no volume de controle, para isso, define-se a capacidade calorífica volumétrica que mede a habilidade de um material em armazenar energia térmica, podendo ser usada para fornecer a taxa de acúmulo de energia térmica no volume de controle.

Por fim, usando-se todos esses termos no balanço de energia, chega-se à equação da difusão de calor. Em um sistema de coordenadas cartesianas, a descrição da equação de difusão estará também em coordenadas cartesianas.

## **2.9. Equação geral de transporte e equação de difusão**

A forma mais geral da equação de transporte para um volume elementar é dada por (SLATTERY, 1999; BIRD et al., 2001; MALISKA, 2012):

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

(2.2)

em que:

$\Phi$ : variável dependente de interesse;

$\lambda$  e  $\Gamma^\Phi$ : coeficientes de transporte

$\vec{v}$ : é o vetor velocidade do meio;

S: termo fonte.

Na Equação 2.2, o primeiro termo é o transiente, o segundo é chamado advectivo. No segundo membro, o primeiro termo é chamado difusivo e o segundo termo fonte. O fenômeno da difusão é descrito a partir da equação geral de transporte para o caso em que a velocidade do meio é nula, e o termo fonte é igual a zero, daí tem-se:

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

(2.3)

Para que a Equação 2.3 seja utilizada como equação de transporte de calor por difusão, deve-se fazer algumas atribuições a suas variáveis. No primeiro membro da equação atribui-se a  $\lambda$  o valor correspondente ao produto da densidade pelo calor específico, a pressão constante da grandeza estudada. No segundo membro da equação o coeficiente  $\Gamma^\Phi$  será atribuído a variável condutividade térmica. Em ambos os termos a variável dependente  $\Phi$ , genérica, será considerada como a temperatura. Sendo assim,  $\lambda = \rho c_p$ ,  $\Gamma^\Phi = k$  e  $\Phi = T$ , podendo-se escrever a equação de condução de calor da seguinte maneira:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T)$$

(2.4)

em que:

T: temperatura

$\rho$ : densidade do meio

$c_p$ : calor específico à pressão constante

k: condutividade térmica do meio

Caso a densidade, o calor específico e a pressão constante, forem considerados constantes, pode-se considerar então que o operador derivada temporal atua somente na temperatura do sistema e a Equação 2.4 será reescrita da seguinte maneira:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot \left( \frac{k}{\rho c_p} \nabla T \right) \quad (2.5)$$

Levando-se em consideração que a densidade ( $\rho$ ), o calor específico e a pressão constante ( $c_p$ ) são constantes, a razão da condutividade térmica pelo produto da densidade e calor específico é chamado de difusividade térmica, e é dada pela Equação 2.6.

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2.6)$$

em que:

$\alpha$ : difusividade térmica

Logo, a Equação 2.5 poderá ser reescrita da seguinte maneira:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\alpha \nabla T) \quad (2.7)$$

## 2.10. Equação de difusão tridimensional em coordenadas retangulares

Considerando-se uma geometria retangular, o fluxo difusivo será considerado em três direções. Para coordenadas cartesianas, nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , a Equação 2.3 pode ser reescrita da seguinte maneira:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial z}\right) \quad (2.8)$$

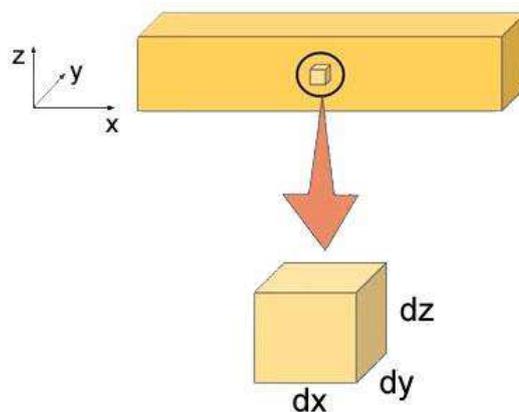
em que:

$\Phi = X = X(x, y, z, t)$  denota a temperatura no ponto  $(x, y, z, t)$  no instante  $t$ . Estabelece-se que  $\lambda = 1$  e que  $\Gamma^\Phi = D$  denota a difusividade efetiva de massa. No entanto, para fins de melhor generalidade dos cálculos, este projeto seguirá com a notação estabelecida na Equação 2.8 com  $\lambda = 1$ , que em coordenadas cartesianas, tem a forma:

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial z}\right) \quad (2.9)$$

A Figura 2.3 representa um paralelepípedo de comprimento, largura e altura, com um volume de controle inscrito em coordenadas cartesianas.

Fonte: Elaborada pelo autor.



**Figura 2.3** Paralelepípedo e um volume de controle interno.

## **2.11. Condições de contorno**

De acordo com Lopez Junior e Schulz (2012), as condições de contorno contribuem significativamente na solução numérica das equações diferenciais parciais. Considerando as três condições de contorno usuais para equações diferenciais, tem-se:

- Condição de Dirichlet: A condição de contorno prescrita ou de primeiro tipo é um valor específico da variável dependente que é fornecido no contorno;
- Neumann: A condição de fluxo prescrito ou de segundo tipo é um valor específico para a derivada da variável dependente em relação a posição (ou gradiente) que é fornecido no contorno;
- Cauchy: A condição de contorno convectiva ou de terceiro tipo é uma combinação linear dos dois primeiros tipos que é fornecida no contorno.

## **2.12. Soluções da equação de difusão**

Para a solução da equação de difusão é necessário conhecer previamente as condições físicas relacionadas ao fenômeno estudado, tais como condição de contorno e as condições iniciais em que o sistema se encontra. Outro fator a ser considerado é a geometria com que o objeto de estudo se apresenta, quando estes não possuem uma forma geométrica definida como paralelepípedo, cilindro ou esfera, pode-se realizar hipóteses simplificadora para aproximar a forma geométrica do objeto em estudo para uma forma geométrica simples.

Sendo assim, pesquisas importantes na área de engenharia agrícola e de alimentos são desenvolvidas. Mariani et al. (2009) estimaram a condutividade térmica do purê da cenoura utilizando-se um objeto com forma geométrica em coordenadas retangulares (paralelepípedo). Denys et al. (2003) analisaram o perfil transitório da temperatura e da velocidade durante os processos térmicos dos corpos da casca de

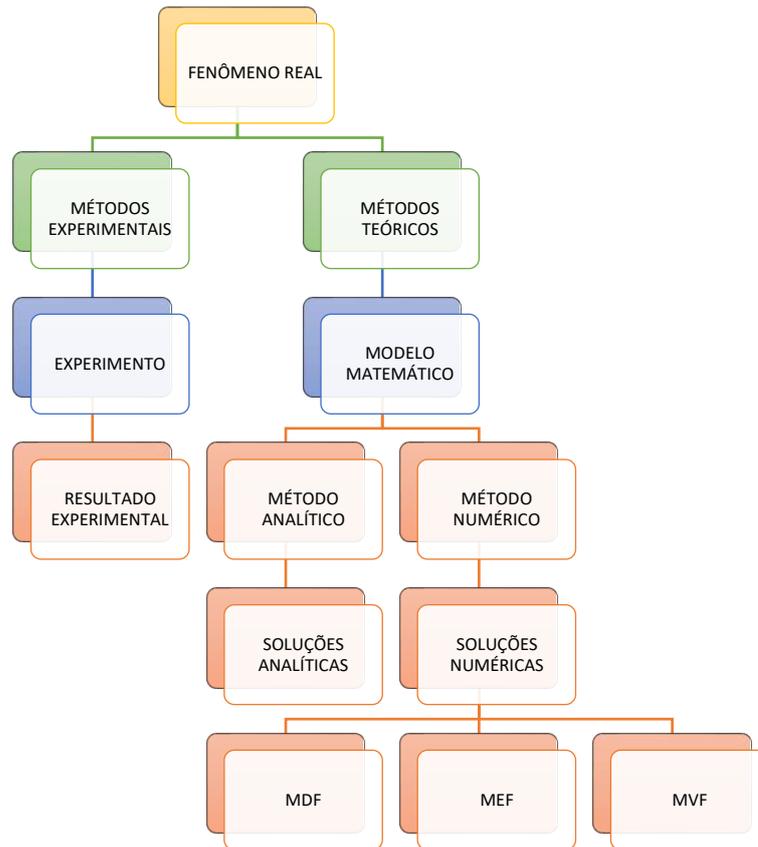
ovo preenchido com um líquido viscoso semelhante a clara do ovo, a geometria foi utilizada de uma forma de esfera.

De acordo com Marchi (2002), para conseguir uma solução de um problema de engenharia, primeiramente deve-se observá-lo em suas condições naturais (fenômeno real) e como este problema se comporta, em seguida, deve-se escolher uma metodologia para seguir em busca da solução. Na Figura 2.4. pode-se entender melhor a sequência para encontrar o método que melhor se aplica a determinado problema que abrange na área de engenharia. As metodologias utilizadas podem ser, a dos métodos experimentais ou métodos teóricos. O primeiro trata com o fenômeno real, no qual seu estudo é baseado em experimento realizado em laboratório e apresentam erros experimentais. Os métodos teóricos são equações que representam matematicamente o fenômeno real, dividindo-se em métodos analíticos e métodos numéricos.

O método analítico obtém as soluções analíticas as quais possuem como característica para a solução do problema a necessidade de algumas hipóteses simplificadoras, para que a equação se torne mais simples e possa ser resolvida, aplicam-se a problemas com geometrias e condição de contorno e iniciais simplificados, esta solução não se aplica à problemas para os quais não existem modelos matemáticos e podem apresentar erros de modelagem.

O método numérico obtém as soluções numéricas as quais possuem como característica solucionar problemas com o uso de computadores, tanto para variáveis locais quanto globais, estas soluções são discretas, ou seja, são adquiridas em pontos específicos do domínio de cálculo. Utiliza-se em problemas com equações de geometria e condições de contorno e iniciais mais generalizados do que aqueles resolvidos através de métodos analíticos, também não se aplicam à problemas os quais não existem modelos matemáticos e podem apresentar erros de modelagem numérica.

Os métodos numéricos mais tradicionais para resolver equações diferenciais são: método das diferenças finitas (MDF); método dos elementos finitos (MEF) e o método dos volumes finitos (MVF).



**Figura 2.4** Métodos para solução de problemas da equação de difusão.

### 2.12.1. Métodos numéricos

Os métodos numéricos para a resolução de equações diferenciais parciais apresentam-se de forma mais adequadas, quando comparadas ao método analítico, pois podem ser aplicados em problemas com maior nível de complexidade, não havendo a necessidade das restrições que são geralmente utilizadas nas soluções analíticas, além de possibilitar o uso de geometrias com maior nível de complexidade, a exemplo das geometrias de coordenadas generalizadas (AIRES, 2016)

De acordo com Maliska (2012) os principais métodos numéricos para resolver a equação diferencial parcial da equação de difusão são: métodos das diferenças finitas (MDF), o método dos elementos finitos (MEF) e o método dos volumes finitos (MVF).

#### 2.12.1.1. Método das diferenças finitas (MDF)

O método das diferenças finitas (MDF), tradicionalmente, foi constantemente empregado na área de mecânica de fluidos, tendo como principal característica do ponto de vista físico a não-linearização, por envolverem as equações de Navier-Stokes, sendo então evitado o uso deste método para geometrias com maior complexidade, e voltando-se para o desenvolvimento baseado em sistemas coordenados ortogonais, como o cartesiano, o cilíndrico e o esférico, principalmente (MALISKA, 2012).

#### 2.12.1.2. Método dos elementos finitos (MEF)

O método dos elementos finitos (MEF) é caracterizado no desenvolvimento fundamental na área de elasticidade, pois não possuem os termos advectivos e assemelham-se a problemas puramente difusivos de transferência de calor, de característica linear. Empregando malhas não-estruturais do tipo triangular, permitindo que problemas em geometria mais complexa possam ser resolvidos (MALISKA, 2012).

Do mesmo modo, consiste em um método numérico aproximado para análise de diversos fenômenos físicos que ocorrem em meios contínuos, e que são descritos através de equações diferenciais parciais, com determinadas condições de contorno, e possivelmente com condições iniciais. O MEF é deveras genérico, podendo-se aplicar na solução de inúmeros problemas da engenharia (SOUZA, 2003).

Para tal, tanto o MDF como o MEF não trabalham com volumes de controle e sim apenas com os pontos da malha, e como consequência, não são conservativos em nível discreto, sendo então necessário a utilização de outro método para poder resolver problemas de geometrias irregulares, como o método dos volumes finitos (MVF) (MALISKA, 2012).

### 2.12.1.3. Método do volume finito (MVF)

O método do volume finito consiste em dividir o domínio de estudo em um número finito de subdomínios de volumes de controle, tal que haja um volume de controle ao redor em cada ponto da malha. A discretização é feita integrando todos os termos da equação que governa o fenômeno no volume e no tempo para cada volume de controle do domínio. O resultado é a equação discretizada contendo os valores de grandeza de interesse para um grupo de pontos da malha. A solução resultante implica que a conservação das quantidades de interesse é satisfeita em qualquer volume de controle e, conseqüentemente do domínio em estudo (PATANKAR, 1980; MALISKA, 2012; CADÉ et al., 2005).

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Local de realização da pesquisa**

O trabalho foi realizado no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA) da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola (UAEA), juntamente com o Laboratório de Transferência de Calor e Massa (LTCM) da Unidade Acadêmica de Física (UAF), ambos pertencentes a Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), as análises microbiológicas e físico-químicas foram realizadas no Laboratório de Tecnologia de Alimentos do Departamento de Engenharia de Alimentos (DEA) do Centro de Tecnologia (CT) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

#### **3.2. Matéria-prima**

Os frutos de coco verde foram obtidos na Empresa Paraibana de Abastecimento e Serviços Agrícolas (EMPASA) de Campina Grande, Paraíba.

##### **3.2.1. Preparação da polpa**

Na Figura 3.1 encontra-se o fluxograma do processo para a produção da polpa do coco verde. Inicialmente os frutos foram transportados em caixas plásticas agrícolas e recepcionados no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA), em seguida, os frutos de coco verde foram retirados das caixas agrícolas e selecionados, descartando os frutos que estivessem danificados ou doentes, sendo selecionado apenas os frutos sadios e que possuíssem um padrão de tamanho e cor. Os mesmos foram identificados e numerados para serem aferidos a massa total, massa do albúmen líquido, massa do albúmen carnoso e densidade do albúmen líquido, observado na Figura 3.2.

Realizou-se a higienização dos frutos com uma solução de hipoclorito de sódio a 0,2 %. A extração da água de coco (albúmen líquido) foi realizada através de um

furador de coco (Figura 3.3 a) e, em seguida, foi realizada uma abertura no sentido longitudinal do fruto, utilizando-se um facão de cana (Figura 3.3 b), para ser retirada a parte do albúmen carnoso. A polpa foi extraída com o auxílio de uma colher de inox e acondicionada em bandejas de inox (Figura 3.3 c-d), para em seguida, ser processado em um mixer de 500 W de potência, da marca Mondial (Figura 3.4).

Após o processamento da polpa a mesma foi homogeneizada para formar uma amostra única, como pode-se observar na Figura 3.5. Posteriormente, a polpa foi acondicionada em embalagens plásticas transparentes e levadas à refrigeração em freezer (temperatura -18 °C), como pode-se observar na Figura 3.6.

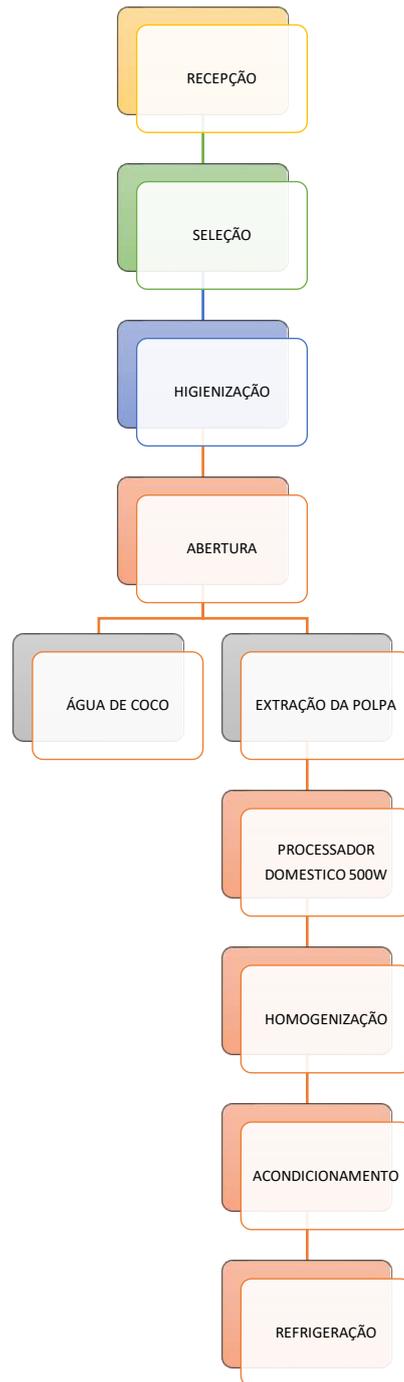
O processo de produção desta polpa seguiu a Instrução Normativa Nº 01, de 7 de janeiro de 2000 do Ministério da Agricultura e do Abastecimento, que define polpa de fruta como o produto não fermentado, não concentrado, não diluído, obtido de frutos polposos, através de processo tecnológico adequado, com um teor mínimo de sólidos totais, proveniente da parte comestível do fruto, o teor mínimo de sólidos totais será estabelecido para cada polpa de fruta específica (BRASIL, 2000). No entanto, esta normativa não estabelece parâmetros definidos para a polpa do coco verde.

Para o desenvolvimento da pasteurização, foi retirado do freezer a amostra da polpa do coco verde, em seguida, esta amostra foi acondicionada sobre a bancada do laboratório de transferência de calor e massa (LTCM) por 10 h sob temperatura controlada de 24 °C. Após este período a polpa foi disposta em um recipiente metálico com espessura de 0,7 mm, com massa de 220 g e geometria em forma de paralelepípedo, como mostra a Figura 3.7.

Na polpa de fruta deve-se observar os limites máximos microbiológicos abaixo fixados (BRASIL, 2000):

- Soma de bolores e leveduras: máximo  $5 \times 10^3$ . g<sup>-1</sup> para polpa *in-natura*, congelada ou não, e  $2 \times 10^3$  para polpa conservada quimicamente e/ou que sofreu tratamento térmico;
- Coliforme fecal: máximo 1. g<sup>-1</sup>;
- Salmonella: ausente em 25 g.

Os limites expostos podem ser alterados nas normas específicas de cada tipo de polpa de fruta, conforme as suas características peculiares.



**Figura 3.1** Fluxograma do beneficiamento da polpa do coco verde.

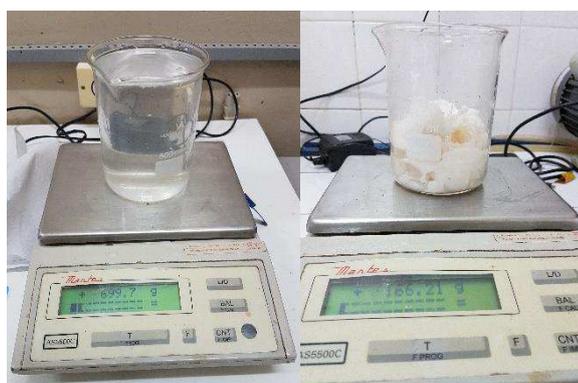


Figura 3.2 Identificação dos frutos para processamento da polpa do coco verde.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 3.3 (a) Furador de coco verde, (b) Facão de cana, (c) bandeja em inox, (d) Polpa do coco verde.



**Figura 3.4** Mixer 500W Mondial.



**Figura 3.5** Polpa do coco verde processada.



**Figura 3.6** Polpa do coco verde acondicionada no freezer.



**Figura 3.7** Envaze da polpa do coco verde no recipiente metálico em forma de paralelepípedo.

Para o processo de imersão do recipiente com a polpa do coco verde foi necessário que o recipiente fosse selado com silicone e adicionado os termopares tipo K, sendo vedado o espaço entre o termopar e o orifício com silicone através de uma pistola de cola quente, ao final, o recipiente foi imerso no banho maria para o início do processo de pasteurização, como pode-se observar na Figura 3.8.



**Figura 3.8** Processo de vedação e imersão do recipiente no banho maria.

### **3.3. Características físico-químicas**

O endosperma carnoso (polpa) foi analisado em triplicata seguindo as metodologias descritas.

#### **3.3.1. Determinação de pH**

O pH foi determinado utilizando-se um potenciômetro de bancada devidamente calibrado pela metodologia do IAL,2008.

#### **3.3.2. Determinação de sólidos solúveis totais**

O Brix foi determinado pelo método refratométrico proposto pela AOAC (2000). Uma alíquota da amostra diluída e triturada foi colocada sobre o prisma de um

refratômetro portátil com escala 0 a 32 °Brix, procedendo-se à leitura direta do índice refratométrico.

### **3.3.3. Determinação de acidez total titulável**

Pesou-se 5 g de amostra homogeneizada em frasco Erlenmeyer, diluição por adição de aproximadamente 50 mL de água e descanso no frasco tampado por 30 minutos. Adição de 4 gotas de fenolftaleína. Titulação com solução de hidróxido de sódio 0,1 N, sob agitação constante, até coloração rósea persistente por 30 segundos (IAL, 2008).

### **3.3.4. Determinação de cinzas**

Para a determinação cinzas, foi utilizado o método de incineração em Bico de Bunsen e em seguida aquecimento na mufla (IAL, 2008).

### **3.3.5. Minerais**

Realizou-se a calcinação do resíduo da polpa do coco verde em mufla a 550 °C por um período de 24 h. As cinzas obtidas foram submetidas a determinação do perfil de minerais em espectrômetro de fluorescência de raios-X por energia dispersiva, da marca SHIMADZU, modelo EDX-720, através da determinação da composição química semi-quantitativa de distribuição do tamanho das partículas por difração a laser.

### **3.3.6. Determinação de ratio**

Foi calculado pela razão entre o teor de sólidos solúveis totais e a acidez total.

### **3.3.7. Determinação de lipídios**

Na determinação de lipídeos foi utilizada a metodologia de Bligh e Dyer (1959).

### **3.3.8. Determinação de teor de umidade**

O teor de umidade foi determinado pelo método gravimétrico, utilizando-se uma estufa sob pressão reduzida a  $(105 \pm 3) ^\circ\text{C}$  até peso constante (IAL,2008).

### **3.3.9. Determinação de atividade de água ( $a_w$ )**

A determinação de atividade de água foi aferido por meio do analisador de atividade de água Aqualab 3TE (Decagon), com a amostra em temperatura ambiente ( $25 ^\circ\text{C}$ ).

### **3.3.10. Análise microbiológica**

As análises foram realizadas no Laboratório de Tecnologia de Alimentos UFPB/CT/DEA. Foram analisados a soma de bolores e leveduras, coliformes totais e salmonella. As análises foram realizadas em triplicata, os resultados foram expressos em NPM (número mais provável)/g e UFC (unidade formadora de colônia) / g e utilizando-se segundo metodologia convencional proposta pela Instrução Normativa nº 62/2003 do MAPA (BRASIL, 2003).

### **3.3.11. Determinação de fibra alimentar**

A determinação de fibra alimentar total pelo método enzimático-gravimétrico foi obtida através de análises como descrito pelo IAL (2008).

### **3.3.12. Proteínas**

As proteínas foram determinadas avaliando-se o nitrogênio total da amostra pelo método de *Kjedahl*, segundo descrito pelo IAL(2008), usando o fator de conversão 6,25 e expresso em (%) de proteína bruta.

### **3.3.13. Açúcares totais**

Os açúcares totais foram determinados seguindo os procedimentos descritos no livro de Métodos do IAL(2008).

### **3.3.14. Açúcares redutores**

Os açúcares redutores foram determinados seguindo os procedimentos descritos no IAL(2008).

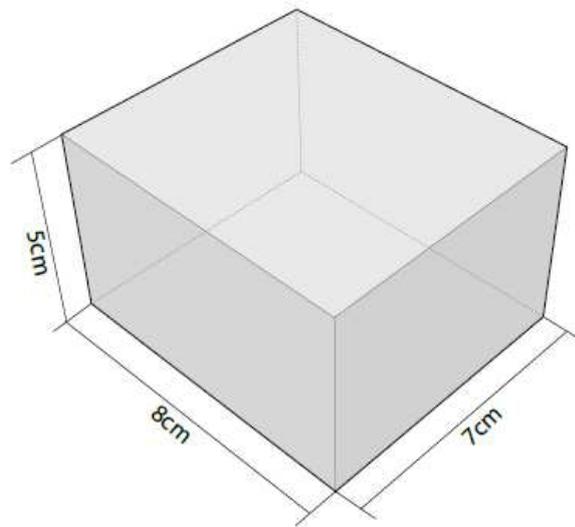
### **3.3.15. Açúcares não redutores**

Os açúcares não redutores foram determinados seguindo os procedimentos descritos no IAL (2008).

Estas análises foram realizadas antes e após o processo de pasteurização.

## **3.4. Fabrico do recipiente**

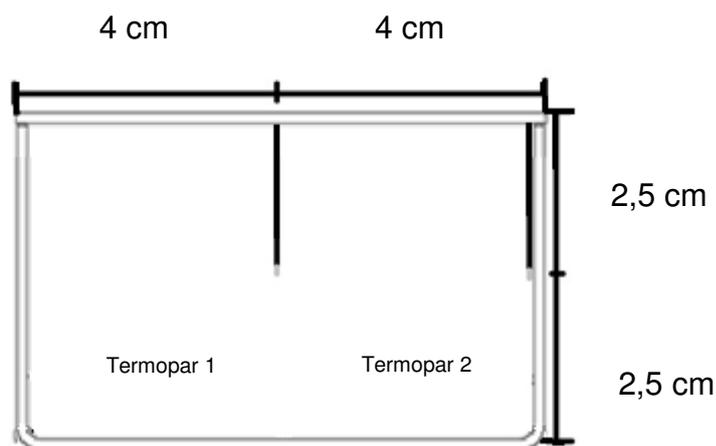
Foi confeccionado um recipiente em formato de paralelepípedo com dimensões aproximadas de 5 cm de altura, 7 cm de largura e 8 cm de comprimento em uma chapa de ferro com espessura de 0,7 mm, de acordo com a Figura 3.9.



**Figura 3.9** Dimensões aproximadas do recipiente utilizado para o processo de pasteurização da polpa do coco verde.

Neste recipiente foram dispostos dois orifícios para a inserção dos termopares (Tipo k), onde o primeiro está localizado no ponto central do recipiente enquanto o segundo localiza-se na superfície da lateral do recipiente.

As medidas das temperaturas foram aferidas com os termopares da marca Instrutherm, os quais foram dispostos na parede interna do recipiente e o outro termopar foi posicionado no centro do recipiente. A Figura 3.10 mostra a posição dos termopares tipo K, inseridos na altura média do recipiente, este foi completamente preenchido com a polpa do coco verde. Ao fim deste processo, o recipiente foi levado ao banho maria para dar-se início ao processo de pasteurização.



**Figura 3.10** Esquema do recipiente que foi utilizado para acomodar a polpa do coco verde no processo de pasteurização e o posicionamento dos termopares.

### 3.5. A pasteurização

O processo de pasteurização foi realizado como descrito por Costa (2015), no qual foi utilizado como fonte térmica, um aparelho de banho maria da marca Kacil modelo BM-02 bivolt, como pode-se observado na Figura 3.11, com capacidade de 8 l de água. Este equipamento opera na faixa de temperatura ambiente até 70 °C com resolução de 0,1 °C, possui controle eletrônico de temperatura (PDI) e resistência tubular blindada, reduzindo consideravelmente o tempo de aquecimento e garantindo uma melhor estabilização do banho na temperatura desejada.

A temperatura da pasteurização utilizada foi de 65 °C, para isto deve-se sempre utilizar o banho maria com a tampa do equipamento acoplada para manter a temperatura ajustada (65 °C) estável, deve-se atentar ao tempo de estabilização da temperatura da água, que para esta temperatura demora em torno de 1 h até atingir 65 °C.

Algumas medidas de precaução são necessárias para a utilização deste equipamento. Não se deve utilizar o equipamento sem água suficiente para encobrir o sensor de temperatura que se encontra acima da base de proteção da resistência. A ausência de água na cuba causará um dano permanente à resistência. Nunca utilize o equipamento sem a base de proteção da resistência, a falta da base de proteção prejudica o controle de temperatura, além de deixar a resistência desprotegida.



**Figura 3.11** Banho Maria marca Kacil modelo BM-02.

Primeiramente, foi monitorado a temperatura da água no interior do aparelho até atingir a temperatura de 65 °C, esta temperatura foi aferida pelo termostato do aparelho e mantida automaticamente pelo aparelho de banho maria. Em seguida, foi colocado o recipiente CV1, contendo polpa de coco verde no banho maria. O processo de pasteurização durou 60 m (3600 s). Em seguida, fez-se necessário o resfriamento rápido, a fim de evitar o cozimento da amostra, este processo foi realizado utilizando-se uma caixa térmica contendo uma mistura de água e gelo, a uma temperatura de aproximadamente 2 °C. O processo foi concluído quando a temperatura do centro da amostra atingiu a temperatura de 20 °C.

Esse procedimento para o tratamento térmico foi realizado duas vezes para a aquisição dos dados da polpa do coco verde, CV1, CV2 e CV3. Para controle das experiências, foram atribuídas duas letras seguidas de um número. As letras representaram a origem da polpa (CV – Coco Verde) e o número representou a ordem experimental (1 – primeira experiência; 2 – segunda experiência, 3 – terceira experiência). Em todas as experiências os dados coletados pelos termopares foram armazenados com um tempo de amostragem de 1 s. Em que ao final foi realizado a média aritmética, em cada intervalo de tempo equivalente, das três experiências realizadas com a polpa de coco verde.

### **3.6. A aquisição dos dados de temperatura**

O acompanhamento da distribuição do calor foi realizado através dos sensores de temperatura tipo K inseridos na amostra da polpa do coco verde e conectados a um termômetro digital da marca Instrutherm modelo TH-096

### **3.7. Métodos numéricos**

A metodologia a seguir foi estudada por Galvão (2017) e foi adaptada para esta tese. Na modelagem matemática adotada neste trabalho, foi considerado a geometria de um paralelepípedo para representar as amostras adotadas e a equação de difusão tridimensional em coordenadas cartesianas, que foi resolvida usando o método de volumes finitos (MVF), considerando os fluxos de massa nas direções dos eixos cartesianos  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Para resolver uma equação diferencial parcial (EDP), substitui-se o seu domínio contínuo por um domínio discreto e realiza-se a discretização da EDP, isto é, a equação diferencial parcial é substituída por equações algébricas equivalentes, uma para cada volume de controle. A solução numérica é uma boa opção quando há a necessidade de resolver a equação de difusão para situações mais complexas, por exemplo, com um meio não-homogêneo e não-isotrópico, volume e difusividade variáveis em questão para condições físicas mais próximas da realidade (GALVÃO, 2017).

Foi apresentada a solução para o problema de difusão transiente em um paralelepípedo utilizando o conceito de volumes finitos. Isto é, uma região contínua será aproximada por um domínio discreto e utilizar-se-á um conjunto de equações algébricas definidas sob um número finito de subdomínios. Cada subdomínio é chamado de volume de controle e seus pontos nodais são chamados de centroides do volume de controle (GALVÃO, 2017).

Normalmente, para a solução numérica de equações diferenciais, os métodos utilizados são:

- Método das Diferenças Finitas (MDF);
- Método dos Elementos Finitos (MEF);
- Método dos Volumes Finitos (MVF).

Uma definição simplificada para o MVF é um método de solução de equações diferenciais parciais na forma de equações algébricas. Derivado do Método dos Elementos Finitos (MEF), também faz uso de pequenos elementos, o quão menores possíveis, resultam em melhores aproximações dos resultados quando comparados aos valores obtidos por uma solução exata das equações de governo do fenômeno físico investigado (NEVES e BEZERRA, 2013).

O procedimento básico de aplicação do método dos volumes finitos pode ser descrito pelos seguintes passos:

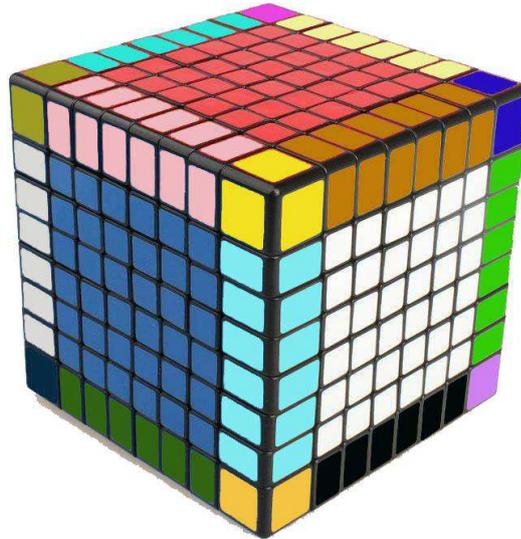
1. Identificar o domínio ou limites da região que acontece o fenômeno investigado;
2. Dividir ou discretizar o domínio avaliado em pequenas partes ou volumes localizando no centróide de cada volume a variável que será calculada;
3. Integrar a equação diferencial de governo em cada volume agora chamado de volume de controle;
4. Aplicação do método numérico na solução de um problema tridimensional (3-D) de transferência de calor.

No método dos volumes finitos (MVF), as equações governantes do fenômeno são discretizadas pela integração sob volumes elementares e no tempo, no qual se obtém um sistema de equações algébricas, resolvidas por técnicas específicas.

### **3.7.1. Discretização da equação de difusão tridimensional**

Inicialmente para aplicar o MVF foi realizado a discretização do domínio contínuo em subdomínios, chamados de volumes de controle (VC). Sendo assim, o domínio tridimensional discretizado é dividido em N volumes finitos. Havendo uma divisão de vinte e sete tipos distintos de volume de controle, os quais são caracterizados por sua localização na malha tridimensional, como pode ser observado na Figura 3.12.

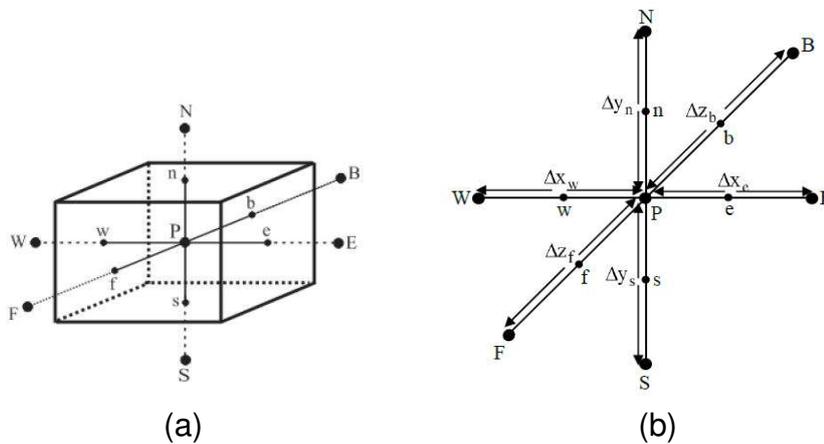
Fonte: Elaborada pelo autor.



**Figura 3.12** Domínio tridimensional discreto com vinte e sete tipos diferentes de volume de controle.

O volume de controle representado pelo seu ponto nodal P, será o volume de controle a ser analisado, existindo assim em sua vizinhança outros pontos nodais do tipo oeste (W), leste (E), norte (n), sul (S), frente (F) e atrás (B). A Figura 3.13 representa as orientações em relação ao ponto central P.

Na Figura 3.13, os pontos w, e, n, s, f e b, simbolizam a área de interação dos volumes de controle à esquerda, direita, norte, sul, frente e atrás de P, respectivamente. Em contrapartida,  $\Delta x_w$ ,  $\Delta x_e$ ,  $\Delta y_n$ ,  $\Delta y_s$ ,  $\Delta z_f$ ,  $\Delta z_b$  são as respectivas distâncias entre o ponto P e os pontos nodais E, W, N, S, F e B dos volumes de controle vizinhos.



**Figura 3.13 (a)** Volume de controle interno e **(b)** orientação da malha tridimensional (Adaptado de Silva, 2009).

A partir da Equação 2.8, integrando-a no tempo e no espaço, admitindo-se uma formulação totalmente implícita, obtém-se:

$$\begin{aligned}
\int_t^{t+\Delta t} \int_b^f \int_s^n \int_w^e \frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} dx dy dz dt = & \\
& \int_t^{t+\Delta t} \int_b^f \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x} \right) dx dy dz dt \\
& + \int_t^{t+\Delta t} \int_b^f \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial y} \right) dx dy dz dt \\
& + \int_t^{t+\Delta t} \int_b^f \int_s^n \int_w^e \frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial z} \right) dx dy dz dt
\end{aligned}
\tag{3.1}$$

Pode-se aproximar as derivadas da seguinte maneira:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\lambda\Phi) \cong \frac{\lambda\Phi - \lambda^0\Phi^0}{\Delta t}
\tag{3.2 a}$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x} \right) \cong \frac{\Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x} \Big|_e - \Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial x} \Big|_w}{\Delta x}
\tag{3.2 b}$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial y} \right) \cong \frac{\Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial y} \Big|_n - \Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial y} \Big|_s}{\Delta y}
\tag{3.2 c}$$

$$\frac{\partial}{\partial z} \left( \Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial z} \right) \cong \frac{\Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial z} \Big|_f - \Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial z} \Big|_b}{\Delta z}
\tag{3.2 d}$$

Observa-se na Equação 3.2 a, no segundo membro da equação o termo  $\lambda\Phi$ , indica que a grandeza está sendo avaliada na posição final do intervalo de tempo, enquanto  $\lambda^0\Phi^0$  significa que a avaliação foi realizada no início do intervalo de tempo.

Fazendo-se a substituição das Equações 3.2 a-d na Equação 3.1 e resolvendo-se as integrais, obtém-se:

$$\begin{aligned}
 (\lambda_P \Phi_P - \lambda_P^0 \Phi_P^0) \Delta x \Delta y \Delta z = & \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_e \Delta y \Delta z \Delta t - \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_w \Delta y \Delta z \Delta t + \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_n \Delta x \Delta z \Delta t - \\
 & \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_s \Delta x \Delta z \Delta t + \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_f \Delta x \Delta y \Delta t - \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_b \Delta x \Delta y \Delta t
 \end{aligned}
 \tag{3.3}$$

Dividindo-se a Equação 3.3 por  $\Delta t$ , obtém-se:

$$\begin{aligned}
 (\lambda_P \Phi_P - \lambda_P^0 \Phi_P^0) \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} = & \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_e \Delta y \Delta z - \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_w \Delta y \Delta z + \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_n \Delta x \Delta z - \\
 & - \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_s \Delta x \Delta z + \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_f \Delta x \Delta y - \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_b \Delta x \Delta y
 \end{aligned}
 \tag{3.4}$$

A discretização da equação de difusão até a etapa delimitada através da Equação (3.4), é idêntica para os 27 tipos distintos de volumes de controle. A partir desta equação em diante, será necessário realizar aproximações de derivadas existentes na referida equação, que são diferentes para cada um destes volumes de controle.

### 3.7.2. Discretização dos volumes de controle internos

Os volumes de controle internos, ponto central (P), não possuem contato com o meio externo. Estes possuem vizinhos a oeste (W), a leste (E), ao norte (N), ao sul (S), a frente (F), e atrás (B). No entanto existem 27 tipos de volume de controle, que são apresentados na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1** Cotas para os tipos de volumes de controles

Tipo	Cota	Tipo	Cota
Leste	E	Norte-frente	NF
Oeste	W	Norte-atrás	NB
Norte	N	Sul-frente	SF
Sul	S	Sul-atrás	SB
Frente	F	Leste-norte-frente	ENF
Atrás	B	Leste-norte-atrás	ENB
Leste-norte	EN	Leste-sul-frente	ESF
Leste-sul	ES	Leste-sul-atrás	ESB
Leste-frente	EF	Oeste-norte-frente	WNF
Leste-atrás	EB	Oeste-norte-atrás	WNB
Oeste-norte	WN	Oeste-sul-frente	WSF
Oeste-sul	WS	Oeste-sul-atrás	WSB
Oeste-frente	WF	Centro	P
Oeste-atrás	WB		

Para os volumes de controle internos, as seguintes aproximações para as derivadas da Equação 3.4 podem ser feitas:

$$\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_e \cong \Gamma_e^\Phi \frac{\Phi_E - \Phi_P}{\Delta x_e} \quad (3.5 \text{ a})$$

$$\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_w \cong \Gamma_w^\Phi \frac{\Phi_P - \Phi_W}{\Delta x_w} \quad (3.5 \text{ b})$$

$$\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_n \cong \Gamma_n^\Phi \frac{\Phi_N - \Phi_P}{\Delta y_n} \quad (3.5 \text{ c})$$

$$\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_s \cong \Gamma_s^\Phi \frac{\Phi_P - \Phi_S}{\Delta y_s} \quad (3.5 \text{ d})$$

$$\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_f \cong \Gamma_f^\Phi \frac{\Phi_F - \Phi_P}{\Delta z_f} \quad (3.5 \text{ e})$$

$$\Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_b \cong \Gamma_b^\Phi \frac{\Phi_P - \Phi_B}{\Delta z_b} \quad (3.5 f)$$

Substituindo-se as aproximações obtidas nas Equações 3.5 a-f na Equação 3.4, obtém-se:

$$\begin{aligned} & (\lambda_P \Phi_P - \lambda_P^0 \Phi_P^0) \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \\ &= \frac{\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} \Phi_E - \frac{\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} \Phi_P - \frac{\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} \Phi_P + \frac{\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} \Phi_W + \frac{\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} \Phi_N \\ & - \frac{\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} \Phi_P - \frac{\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} \Phi_P + \frac{\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} \Phi_S + \frac{\Gamma_f^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} \Phi_F - \frac{\Gamma_f^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} \Phi_P \\ & - \frac{\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} \Phi_P + \frac{\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} \Phi_B \end{aligned} \quad (3.6)$$

Reorganizando-se os termos da Equação 3.6 na forma algébrica simplificada, a mesma fica da seguinte maneira:

$$A_P \Phi_P = A_e \Phi_E + A_w \Phi_W + A_n \Phi_N + A_s \Phi_S + A_f \Phi_F + A_b \Phi_B + B \quad (3.7)$$

em que:

$$A_P = \lambda_P \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \frac{\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} + \frac{\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_w} + \frac{\Gamma_n^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_n} + \frac{\Gamma_s^\Phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s} + \frac{\Gamma_f^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_f} + \frac{\Gamma_b^\Phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b} \quad (3.8 a)$$

$$A_e = \frac{\Gamma_e^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} \quad (3.8 b)$$

$$A_w = \frac{\Gamma_w^\Phi \Delta y \Delta z}{\Delta x_w}$$

(3.8 c)

$$A_n = \frac{\Gamma_n^\phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_n}$$

(3.8 d)

$$A_s = \frac{\Gamma_s^\phi \Delta x \Delta z}{\Delta y_s}$$

(3.8 e)

$$A_f = \frac{\Gamma_f^\phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_f}$$

(3.8 f)

$$A_b = \frac{\Gamma_b^\phi \Delta x \Delta y}{\Delta z_b}$$

(3.8 g)

$$B = \lambda_p^0 \Phi_p^0 \frac{\Delta x \Delta y \Delta t}{\Delta t}$$

(3.8 h)

### 3.7.3. Discretização para os volumes de controle á leste

Utilizando uma formulação totalmente implícita para um modelo de difusão tridimensional em um volume de controle a leste, tem-se:

$$\begin{aligned}
 (\lambda_p \Phi_p - \lambda_p^0 \Phi_p^0) \Delta x \Delta y \Delta z = & \\
 & \Gamma_e^\phi \frac{\Phi_e - \Phi_p}{\Delta x_e / 2} \Delta y \Delta z \Delta t - \Gamma_w^\phi \frac{\Phi_p - \Phi_w}{\Delta x_w} \Delta y \Delta z \Delta t + \Gamma_n^\phi \frac{\Phi_n - \Phi_p}{\Delta y_n} \Delta x \Delta z \Delta t \\
 & - \Gamma_s^\phi \frac{\Phi_p - \Phi_s}{\Delta y_s} \Delta x \Delta z \Delta t + \Gamma_f^\phi \frac{\Phi_f - \Phi_p}{\Delta z_f} \Delta x \Delta y \Delta t - \Gamma_b^\phi \frac{\Phi_p - \Phi_b}{\Delta z_b} \Delta x \Delta y \Delta t
 \end{aligned}
 \tag{3.9}$$

Dividindo-se por  $\Delta t$  e reorganizando os termos:

$$\begin{aligned}
& (\lambda_p \Phi_p - \lambda_p^0 \Phi_p^0) \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \\
&= \Gamma_e^\Phi \frac{\Phi_e - \Phi_p}{\Delta x_e / 2} \Delta y \Delta z - \Gamma_w^\Phi \frac{\Phi_p - \Phi_w}{\Delta x_w} \Delta y \Delta z + \Gamma_n^\Phi \frac{\Phi_n - \Phi_p}{\Delta y_n} \Delta x \Delta z \\
&- \Gamma_s^\Phi \frac{\Phi_p - \Phi_s}{\Delta y_s} \Delta x \Delta z + \Gamma_f^\Phi \frac{\Phi_f - \Phi_p}{\Delta z_f} \Delta x \Delta y - \Gamma_b^\Phi \frac{\Phi_p - \Phi_b}{\Delta z_b} \Delta x \Delta y
\end{aligned} \tag{3.10}$$

Reorganizando-se os termos da Equação 3.10 na forma algébrica simplificada, a mesma fica da seguinte maneira:

$$A_p \Phi_p = A_w \Phi_w + A_s \Phi_s + A_n \Phi_n + A_b \Phi_b + A_f \Phi_f \tag{3.11}$$

em que:

$$\begin{aligned}
A_p &= \lambda_p \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \frac{2\Gamma_e^\Phi}{\Delta x_e} \Delta y \Delta z + \frac{\Gamma_w^\Phi}{\Delta x_w} \Delta y \Delta z + \frac{\Gamma_n^\Phi}{\Delta y_n} \Delta x \Delta z + \frac{\Gamma_s^\Phi}{\Delta y_s} \Delta x \Delta z + \frac{\Gamma_b^\Phi}{\Delta z_b} \Delta x \Delta y + \\
&+ \frac{\Gamma_f^\Phi}{\Delta z_f} \Delta x \Delta y
\end{aligned} \tag{3.12 a}$$

$$A_w = \frac{\Gamma_w^\Phi}{\Delta x_w} \Delta y \Delta z \tag{3.12 b}$$

$$A_s = \frac{\Gamma_s^\Phi}{\Delta y_s} \Delta x \Delta z \tag{3.12 c}$$

$$A_n = \frac{\Gamma_n^\Phi}{\Delta y_n} \Delta x \Delta z \tag{3.12 d}$$

$$A_b = \frac{\Gamma_b^\Phi}{\Delta z_b} \Delta x \Delta y \tag{3.12 d}$$

$$A_f = \frac{\Gamma_f^\Phi}{\Delta z_f} \Delta x \Delta y \quad (3.12 e)$$

$$B = \frac{\lambda_p^0 \Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} \Phi_p^0 + \frac{2\Gamma_e^\Phi}{\Delta x_e} \Delta y \Delta z \Phi_e \quad (3.12 f)$$

#### 3.7.4. Coeficiente de transporte $\Gamma^\Phi$

Na utilização do método dos volumes finitos, foi apresentado o esquema para encontrar a média harmônica para o cálculo do coeficiente de transporte  $\Gamma^\Phi$  nas faces dos volumes de controle.

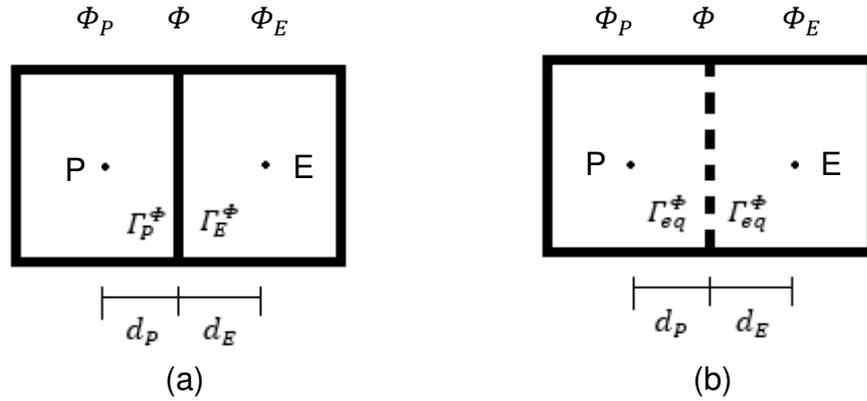
De acordo com Silva (2012) e Silva (2007), para os pontos nodais o parâmetro de processo  $\Gamma^\Phi$  pode ser calculado através de uma relação apropriada entre tal parâmetro e a variável dependente  $\Phi$ , sendo assim:

$$\Gamma^\Phi = f(\Phi, a, b) \quad (3.13)$$

em que:

a e b são parâmetros que ajustam a solução numérica aos dados experimentais determinados por otimização.

Caso o coeficiente de transporte,  $\Gamma^\Phi$ , for variável, a média harmônica deve ser utilizada para fazer uma estimativa de seu valor nas interfaces de cada volume de controle (PATANKAR, 1980; SILVA, 2007)



**Figura 3.14** Coeficientes de transporte: (a)  $\Gamma_P^\Phi$  e  $\Gamma_E^\Phi$  nos pontos nodais P e E, respectivamente, e (b)  $\Gamma_e^\Phi$  na interface do volume de controle.

O valor de  $\Gamma_e^\Phi$  é o valor do coeficiente de transporte em toda a interface da Figura 3.13b, que corresponde ao valor de  $\Gamma^\Phi$  na interface entre P e E; tal valor é dado por:

$$\Gamma_e^\Phi = \frac{\Gamma_P^\Phi \Gamma_E^\Phi}{f_d \Gamma_E^\Phi + (1 - f_d) \Gamma_P^\Phi} \quad (3.14)$$

em que:

$$f_d = \frac{d_P}{d_P + d_E} \quad (3.15)$$

em que:

$d_P$  e  $d_E$  são as distâncias da fronteira “e” para o ponto nodal “P” e “E”, respectivamente.

Considerando uma malha uniforme,  $d_P = d_E$ ,  $f_d$  assume o valor de 1/2. Substituindo o valor de  $f_d$  na Equação 3.14, a expressão para  $\Gamma_e^\Phi$  na interface, a partir de seu valor nos pontos nodais, simplifica-se:

$$\Gamma_e^\Phi = \frac{2\Gamma_P^\Phi \Gamma_E^\Phi}{\Gamma_E^\Phi + \Gamma_P^\Phi} \quad (3.16)$$

Sendo  $\Gamma^\Phi$  constante, pode-se utilizar a Equação 3.16. Neste caso,  $\Gamma_P^\Phi = \Gamma^\Phi$  e  $\Gamma_E^\Phi = \Gamma^\Phi$ , fazendo com que a equação expresse um resultado previsto em que,  $\Gamma_e^\Phi = \Gamma^\Phi$ . Silva (2009) relata que para volumes de controle de contornos, o valor de  $\Gamma^\Phi$  pode ser feito igual ao valor deste parâmetro no ponto nodal do respectivo volume de controle.

### 3.8. Otimização: Determinação de parâmetros

Para determinar o  $\alpha$  por otimização, a função objetivo foi definida pelo qui-quadrado referente ao ajuste da curva simulada aos dados experimentais da cinética do processo. A expressão para o qui-quadrado envolvendo o ajuste de uma curva simulada aos dados experimentais é dada por:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_p} (\Phi_i^{exp} - \Phi_i^{sim})^2 \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (3.17)$$

em que:

$\Phi_i^{exp}$  é a temperatura (ou teor de umidade) médio, medida para o ponto experimental "i";

$\Phi_i^{sim}$  é o correspondente valor simulado;

$N_p$  é o número de pontos experimentais;

$\frac{1}{\sigma_i^2}$  é o peso estatístico referente ao ponto i-ésimo ponto experimental.

Em geral, na ausência de informações, os pesos estatísticos são feitos iguais a 1 (mesmo peso estatístico para todos os pontos). Na Equação 3.17, o qui-quadrado depende de  $\phi_i^{sim}$ , que depende de D (ou  $\alpha$ ) a qual é dada pela Equação 3.13. Os parâmetros de processo podem ser determinados através da minimização da função objetivo, a qual é realizada em ciclos envolvendo os seguintes passos:

Passo 1) Informe os valores iniciais para os parâmetros “a” e “b” da função a ser usada na Equação 3.13. Resolva a equação de difusão e determine o qui-quadrado;

Passo 2) Informe o valor para a correção de “a”;

Passo 3) Corrija o parâmetro “a”, mantendo o parâmetro “b” com valor constante. Resolva a equação de difusão e calcule o qui-quadrado;

Passo 4) Compare o valor mais recente calculado para o qui-quadrado com o valor prévio. Se o valor mais recente for menor, retorne ao passo 2. Caso contrário, diminua a última correção do valor de “a” e vá para o passo 5;

Passo 5) Informe o valor para a correção de “b”;

Passo 6) Corrija o parâmetro “b”, mantendo o parâmetro “a” com valor constante. Resolva a equação de difusão e calcule o qui-quadrado;

Passo 7) Compare o valor mais recente calculado para o qui-quadrado com o valor prévio. Se o valor mais recente for menor, retorne ao passo 5. Caso contrário, diminua a última correção do valor de “b” e vá para o passo 8;

Passo 8) Comece um novo ciclo indo de volta para o passo 2, até que as convergências estipuladas para os parâmetros “a” e “b” sejam atingidas.

### **3.9. O software: *Parallelepiped First Kind***

Para descrever o processo de pasteurização da polpa do coco verde, acondicionada em um recipiente com geometria na forma de um paralelepípedo, foi utilizado um modelo numérico. Desta forma, a solução numérica da equação de difusão foi obtida através do método dos volumes finitos, com condição de contorno do primeiro tipo e com formulação totalmente implícita.

O programa utilizado inclui um algoritmo de otimização acoplado ao *software*, que tem como objetivo fornecer a solução numérica tridimensional. Este programa possui uma interface gráfica, a fim de facilitar a interação com o usuário. Após a instalação do *software* aparecerá o ícone do programa em forma de atalho.

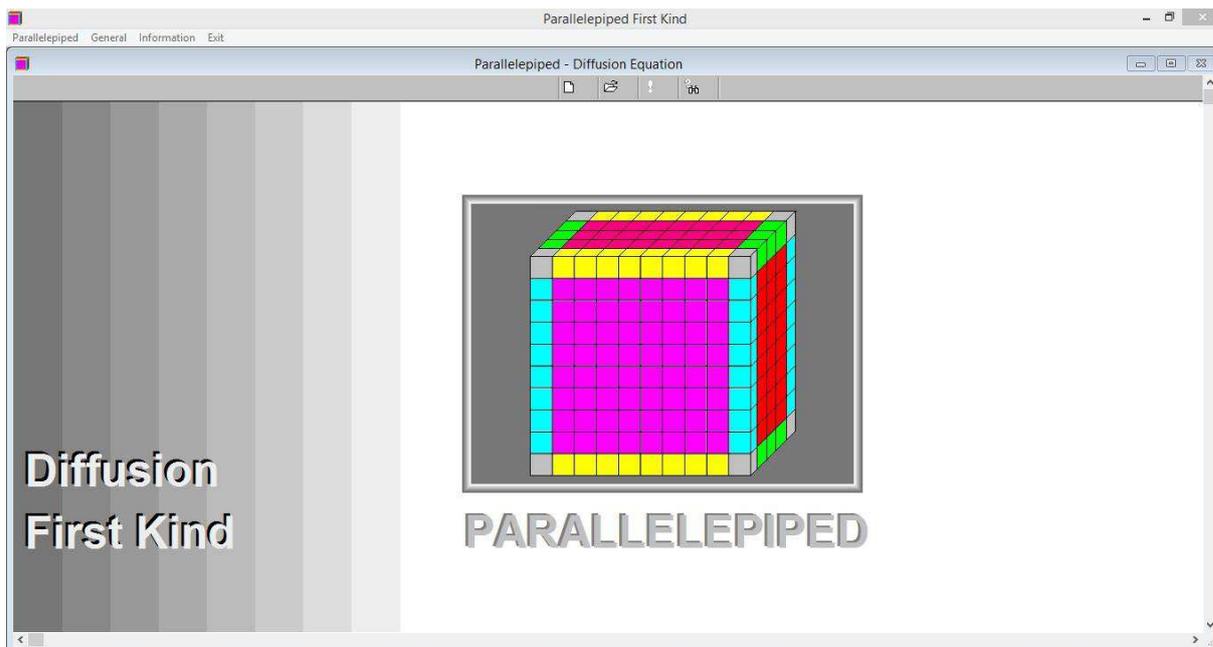
A Figura 3.15 ilustra o ícone do *software* "Parallepiped First Kind", o qual é representado por uma imagem de um paralelepípedo dividido em diferentes cores para representar os diferentes tipos de volume de controle. A principal função do ícone é associar o *software* a uma imagem única, facilitando a sua identificação na área de trabalho.



**Figura 3.15** Ícone do *software* "Parallepiped First Kind".

### **3.9.1. A interface gráfica**

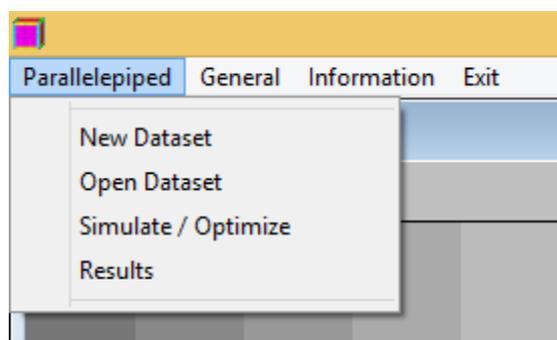
Na Figura 3.16 observa-se a tela inicial do *software* utilizado. A linguagem para comunicação utilizada neste programa é a de língua inglesa, por isto, nas Figuras referentes a apresentação do *software*, como também os diálogos serão apresentados neste idioma. A barra de menu é composta por quatro menus, denotados por "Parallelepiped", "General", "Information" e "Exit", que a seguir serão destacados.



**Figura 3.16** Interface gráfica da tela inicial do *software*.

### 3.9.2. O menu “Parallelepiped”

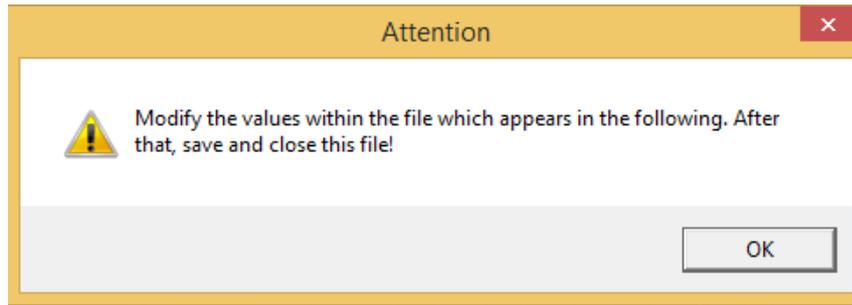
O menu “Parallelepiped” é apresentado através da Figura 3.17.



**Figura 3.17** Itens do menu "Parallelepiped".

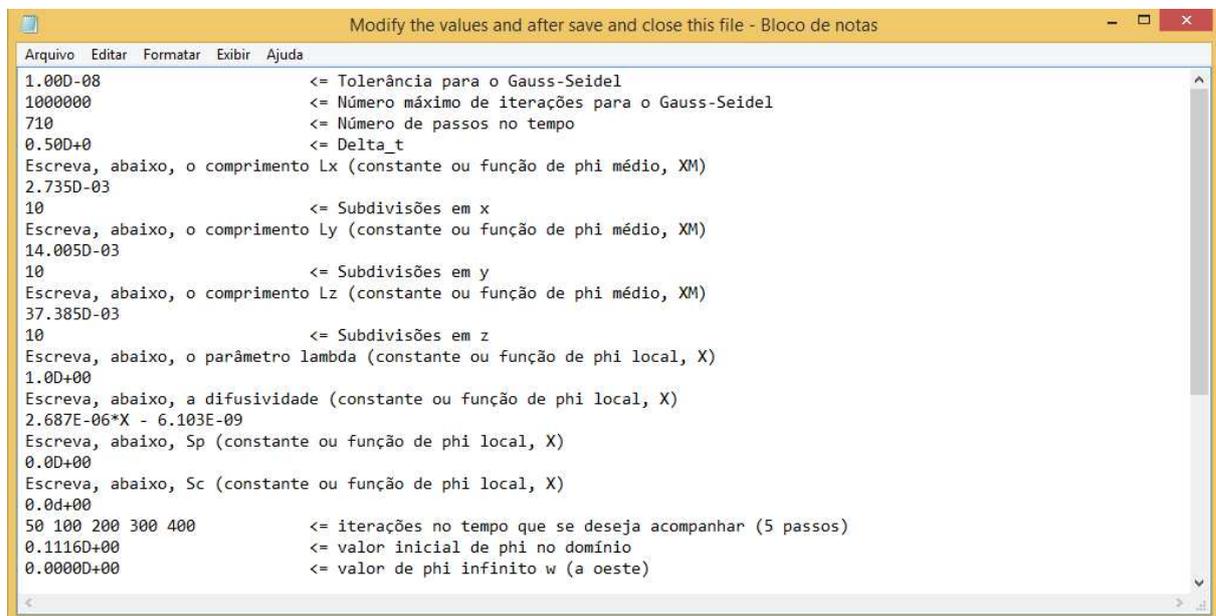
Os itens do menu “Parallelepiped” são:

“New Dataset”, quando selecionado, abre uma caixa de diálogo, que é aberta pedindo atenção, como mostra a Figura 3.18, para que seja modificados os valores contidos no arquivo que aparecerá em seguida. Depois disso, aparece uma instrução para salvar e fechar o arquivo modificado.



**Figura 3.18** Caixa de diálogo com instruções para o arquivo de dados.

Conforme mencionado, o arquivo em bloco de notas chamado de “Modify the values and after save and close this file” é aberto para que os valores possam ser modificados, como pode-se ver através da Figura 3.19.



**Figura 3.19** Bloco de notas com as opções para entrada de dados.

Este arquivo serve como parâmetro para que o software adquira dados nele fornecido para a resolução das equações e aquisição dos resultados. Através do fornecimento de vinte e nove dados iniciais, sendo eles:

1. “Tolerância para Gauss-Seidel”: As iterações acontecerão até que a solução esteja dentro da tolerância esperada;
2. “Número máximo de iterações para Gauss-Seidel”: Foi estipulado um valor máximo de iterações para a solução;
3. “Número de passos no tempo”: Foi atribuído um valor de passos;
4. “Delta  $t$ ”: É a razão entre o tempo total da pasteurização e o número de passos;
5. “Escreva, abaixo, o comprimento  $L_x$  (constante ou função de phi médio,  $X_M$ )”: Levando em consideração a geometria do paralelepípedo em que “ $x$ ” será o comprimento do nosso recipiente em milímetros;
6. “Subdivisões em  $x$ ”: Foram os volumes de controle considerados;
7. “Escreva, abaixo, o comprimento  $L_y$  (constante ou função de phi médio,  $X_M$ )”: Levando em consideração a geometria do paralelepípedo em que “ $y$ ” será a altura do nosso recipiente em milímetros;
8. “Subdivisões em  $y$ ”: Foram os volumes de controle considerados;
9. “Escreva, abaixo, o comprimento  $L_z$  (constante ou função de phi médio,  $X_M$ )”: Levando em consideração a geometria do paralelepípedo em que “ $z$ ” será a largura do nosso recipiente em milímetros;
10. “Subdivisões em  $z$ ”: Foram os volumes de controle considerados;
11. “Escreva, abaixo, o parâmetro  $\lambda$  (constante ou função de phi local,  $X$ )”: Devido a equação da difusividade usa-se o valor de um;
12. “Escreva, abaixo, a difusividade (constante ou função de phi local,  $X$ )”: Escolheu-se inicialmente um valor de difusividade já conhecido na literatura para começar a solução matemática, sendo este valor de  $1,40 \text{ E } -7$ ;
13. “Escreva, abaixo,  $S_p$  (constante ou função de phi local,  $X$ )”: Este item será nulo quando não for considerado o termo fonte na equação da difusividade;

14. “Escreva, abaixo,  $Sc$  ( constante ou função de  $\phi$  local,  $X$ )”: Este item será nulo quando não for considerado o termo fonte na equação da difusividade;
15. “Iterações no tempo que se deseja acompanhar (5 passos)”: Foram selecionados cinco passos os quais foram acompanhadas as informações, sendo estes 50, 100, 150, 250 e 350.
16. “Valor inicial de  $\phi$  no domínio”: Neste item foi adicionado a temperatura inicial em que o material estava no início da pasteurização;
17. “Valor de  $\phi$  infinito  $w$  (a oeste)”: Neste item foi adicionada a temperatura inicial levando em consideração o volume de controle;
18. “0: Parede Adiabática; 1: Parede Diatérmica”: Neste item leva-se em consideração quanto a posição oeste se a transferência de calor ocorre através de uma parede adiabática, quando existe um isolamento térmico ou por uma parede diatérmica, quando existe troca de calor. Neste caso nossa solução utilizou a opção 0: Parede Adiabática;
19. “Valor de  $\phi$  infinito  $e$  (a leste)”: Neste item foi adicionado a temperatura inicial considerando o volume de controle, a qual foi de  $64,85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
20. “0: Parede Adiabática; 1: Parede Diatérmica”: Neste item leva-se em consideração quanto a posição leste se a transferência de calor ocorre através de uma parede adiabática, quando existe um isolamento térmico ou por uma parede diatérmica, quando existe troca de calor. Neste caso nossa solução utilizou a opção 1: Parede Diatérmica;
21. “Valor de  $\phi$  infinito  $s$  (a sul)”: Neste item foi adicionado a temperatura inicial levando em considerando-se o volume de controle;
22. “0: Parede Adiabática; 1: Parede Diatérmica”: Neste item leva-se em consideração quanto a posição sul se a transferência de calor ocorre através de uma parede adiabática, quando existe um isolamento térmico ou por uma parede diatérmica, quando existe troca de calor. Neste caso nossa solução utilizou a opção 0: Parede Adiabática;
23. “Valor de  $\phi$  infinito  $e$  (ao norte)”: Neste item foi adicionada a temperatura inicial levando em consideração o volume de controle, a qual foi de  $64,85\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;

24. “0: Parede Adiabática; 1: Parede Diatérmica”: Neste item leva-se em consideração quanto a posição ao norte se a transferência de calor ocorre através de uma parede adiabática, quando existe um isolamento térmico ou por uma parede diatérmica, quando existe troca de calor. Neste caso nossa solução utilizou a opção 1: Parede Diatérmica;

25. “Valor de phi infinito s (atrás): Neste item foi adicionada a temperatura inicial levando em consideração o volume de controle;

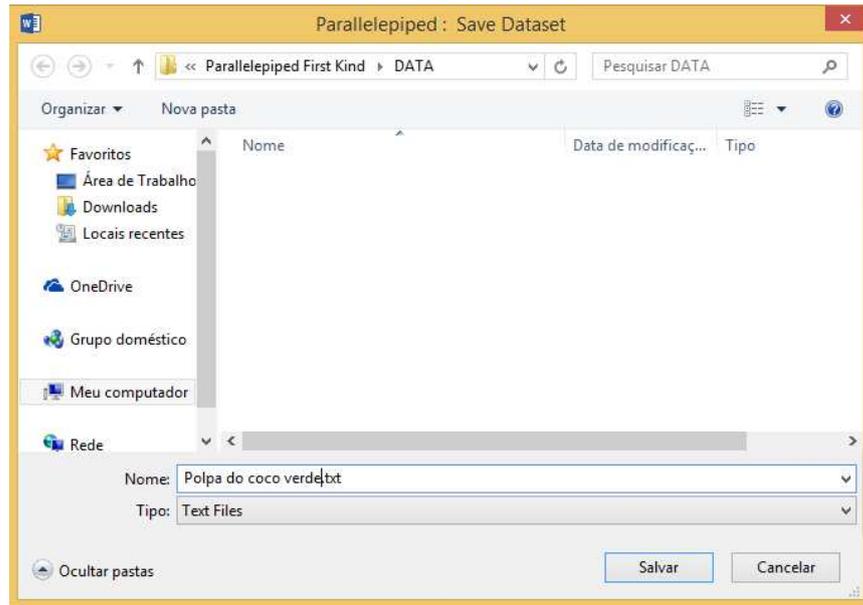
26. “0: Parede Adiabática; 1: Parede Diatérmica”: Neste item leva-se em consideração quanto a posição atrás se a transferência de calor ocorre através de uma parede adiabática, quando existe um isolamento térmico ou por uma parede diatérmica, quando existe troca de calor. Neste caso nossa solução utilizou a opção 0: Parede Adiabática;

27. “Valor de phi infinito e (frente): Neste item foi adicionada a temperatura inicial levando em consideração o volume de controle, a qual foi de 64,85 °C;

28. “0: Parede Adiabática; 1: Parede Diatérmica”: Neste item leva-se em consideração quanto a posição frente se a transferência de calor ocorre através de uma parede adiabática, quando existe um isolamento térmico ou por uma parede diatérmica, quando existe troca de calor. Neste caso nossa solução utilizou a opção 1: Parede Diatérmica;

29. “i, j e k do volume de controle escolhido para o transiente”: Este é o item em que declara-se o nó que foi escolhido para estudo, neste caso o 1 1 1, o primeiro volume de controle;

Ao inserir as modificações no bloco de notas, deve-se fechar o arquivo, salvando-o no final das alterações. Então será aberto uma caixa de diálogo para salvar o arquivo com as modificações com um nome específico, que posteriormente poderá ser aberto. A operação de salvamento poderá ser vista na Figura 3.20.



**Figura 3.20** Janela de diálogo para salvar o arquivo.

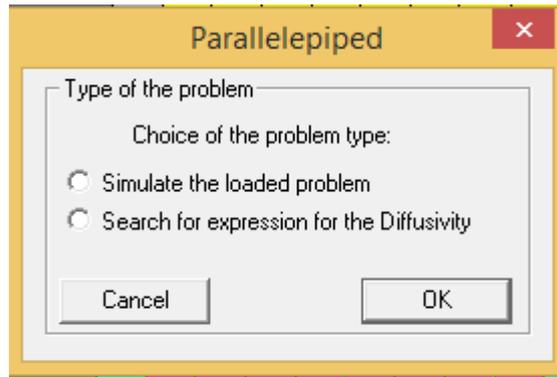
Após o projeto ser salvo, o nome do arquivo aparecerá abaixo da figura central e do nome “Parallelepiped”, como pode-se observar na Figura 3.21.



**Figura 3.21** Nome do arquivo carregado.

O segundo item de menu, de cima para baixo, é o “Open Dataset”, que tem como função abrir um projeto que já foi salvo anteriormente.

O terceiro item de menu, de cima para baixo, é o “Simulate / Optimize”. Ao ser selecionado abre-se uma caixa de diálogo denominada “Type of problem”, conforme pode ser visto na Figura 3.22.

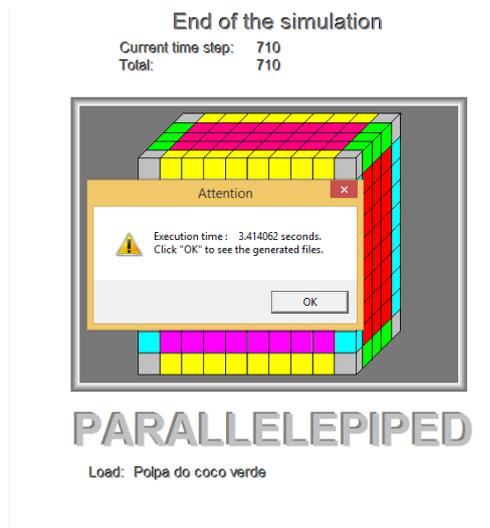


**Figura 3.22** Tipo de problema a ser simulado.

A caixa de diálogo “Type of the problem” possibilita a escolha de duas opções:

- 1) “Simulate the loaded problem”, esta opção fará a simulação do problema carregado;
- 2) “Search for expression for the Difusivity”, esta opção fará uma busca, através de otimização, por uma expressão para a difusividade. Neste segundo caso, referente ao processo de otimização, dados experimentais serão requeridos.

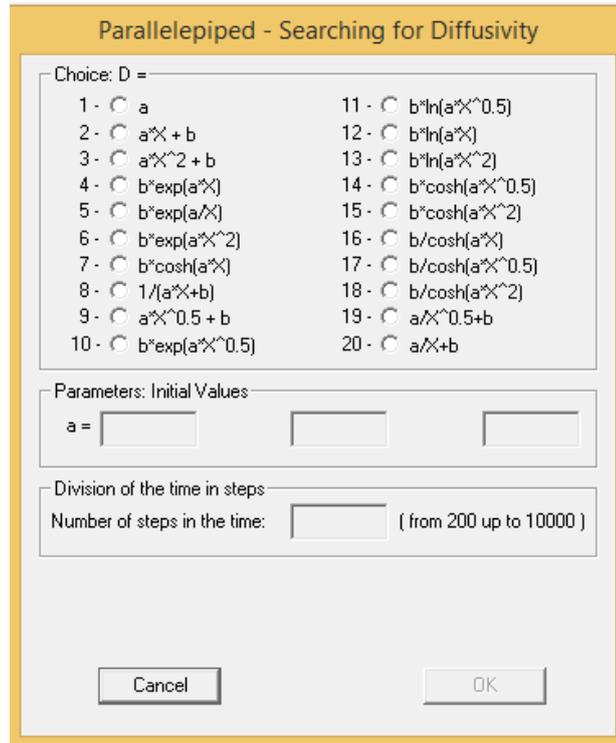
No caso de uma simples simulação, ao marcar a opção “Simulate the loaded problem” e clicar “OK” na caixa de diálogo da Figura 3.22, o processo é iniciado. Neste caso, os valores dos parâmetros informados para a difusividade e coeficiente de transferência convectivo devem ser os valores reais do processo estudado, e não apenas “compatíveis”. Ao final da simulação, o aspecto do *software* é mostrado através da Figura 3.23.



**Figura 3.23** Aspecto da tela após uma simulação dos dados carregados.

Ao confirmar “OK”, será exibido uma lista de arquivos com os resultados obtidos para a simulação, os quais estarão salvos na pasta “RESULTS”.

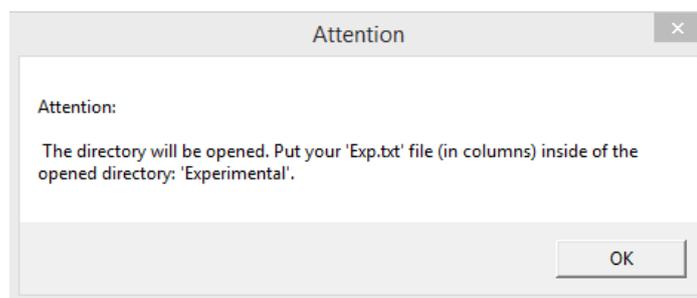
A opção “Search for expression for the Diffusivity”, também mostrada na Figura 3.24, tem como finalidade buscar por uma expressão para a difusividade. Neste caso, mais duas informações são requeridas. Primeiro, deve ser informada a expressão para a difusividade, a ser escolhida entre várias opções disponíveis de funções crescentes, decrescentes ou a função constante, conforme é mostrado na Figura 3.24. Segundo, devem ser informados os valores iniciais dos parâmetros de processo e o número de passos de tempo para a otimização.



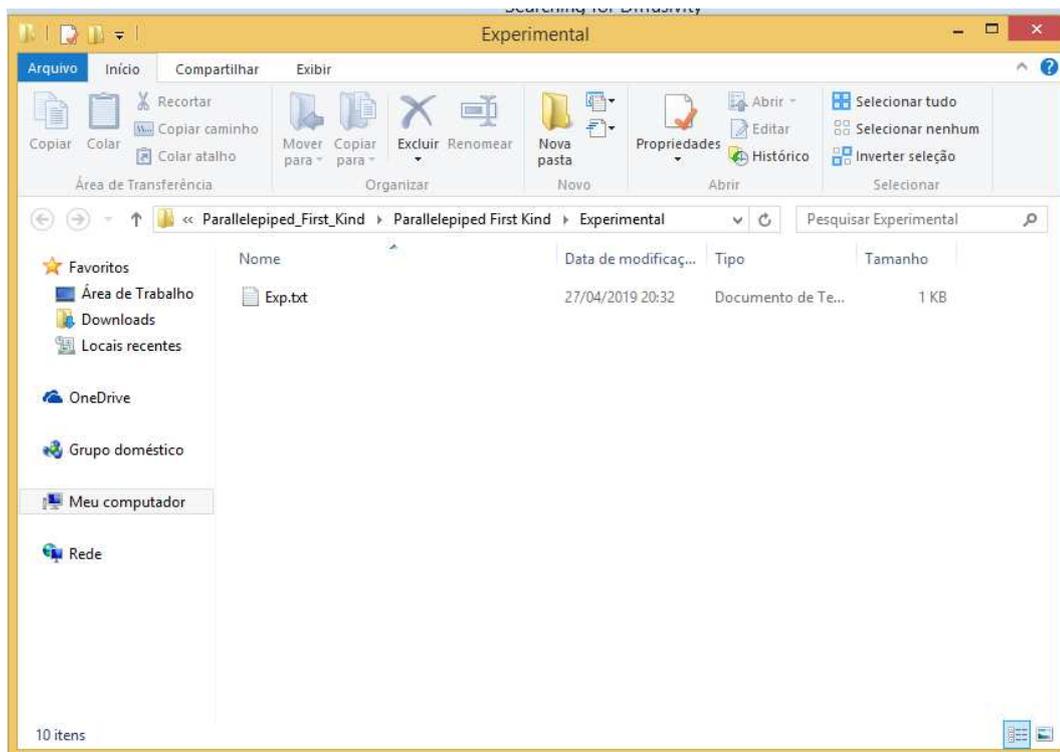
**Figura 3.24** Funções para a difusividade, valores iniciais para os parâmetros e números de passos de tempo.

Dentre as vinte expressões disponíveis, foram selecionadas cinco equações, sendo estas: função 1, função 4, função 6, função 10 e função 15.

Ao clicar “OK” na caixa de diálogo da Figura 3.24, uma caixa de diálogo pedindo atenção será aberta com uma instrução, como é observado na Figura 3.25. Ao clicar “OK”, o diretório “Experimental” será aberto para que os dados experimentais sejam informados num arquivo chamado “Exp.txt” (máximo de 97 pontos experimentais), como é mostrado na Figura 3.26.



**Figura 3.25** Caixa de diálogo com instrução sobre o arquivo "Exp.txt".



**Figura 3.26** Diretório "Experimental" onde o conjunto de dados "exp.txt" deve ser colocado.

A estrutura dos dados distribui-se em três colunas, na sequência:

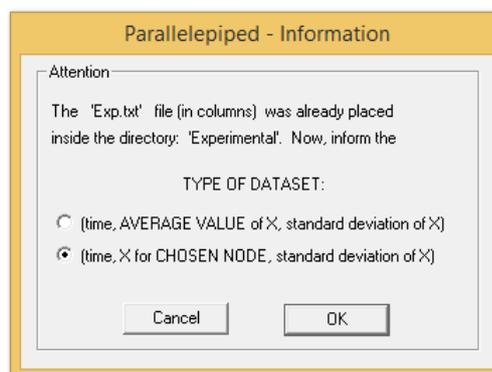
- 1) tempo;
- 2) temperatura;
- 3) correspondente peso estatístico.

Caso o peso estatístico não tenha sido determinado no experimento, basta atribuir o valor 1 em toda a terceira coluna, como mostrado na Figura 3.27.

Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda
0	100.00	1		
10	91.987	1		
30	87.442	1		
60	81.361	1		
90	76.762	1		
120	73.578	1		
150	73.262	1		
180	72.608	1		
210	71.101	1		
240	70.574	1		
1440	57.045	1		
1800	55.332	1		

**Figura 3.27** Arquivo de dados "exp.txt" em três colunas: tempo, temperatura e peso estatístico.

Uma vez informados os dados experimentais, o diretório "Experimental" deve ser fechado, e então aparece a caixa de diálogo mostrada na Figura 3.28.

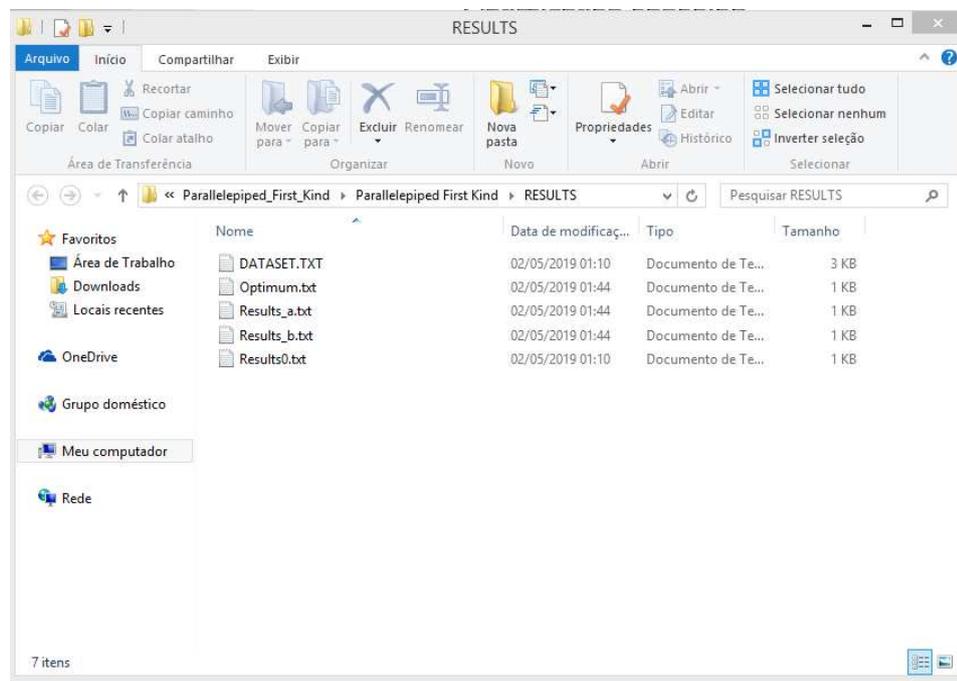


**Figura 3.28** Escolha se o conjunto de dados é referente ao valor médio do domínio ou ao valor em um ponto definido pelo nó escolhido quando a definição do problema foi feita.

Normalmente, para problemas de secagem, o teor de umidade médio é medido a primeira escolha é a adequada, de uma maneira geral. Para problemas envolvendo medidas de temperatura feitas por um termopar colocado em uma dada posição, a segunda escolha é a adequada, na maioria dos casos. Ao clicar OK, a otimização em busca dos melhores valores para os parâmetros é iniciada. Se os valores iniciais forem compatíveis com o problema definido.

Por fim será gerado um gráfico e os resultados típicos para a determinação de parâmetros usando dados experimentais.

O quarto e último item de menu, de cima para baixo, é o item “Results”. Ao selecioná-lo, será aberto o diretório contendo os dados gerados pela simulação, como pode-se observar na Figura 3.29.



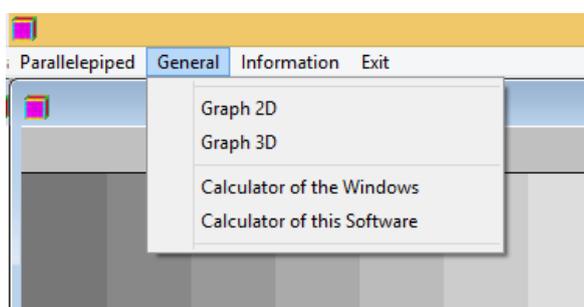
**Figura 3.29** Diretório "Results" com os dados referentes ao problema simulado.

- Optimum.txt: contém a expressão ótima para a difusividade, além dos indicadores estatísticos “coeficiente de determinação” e “qui-quadrado” que determinam a qualidade do ajuste realizado via otimização;

- Results\_a.txt: lista todos os valores do parâmetro “a” da expressão da difusividade determinados ao longo do processo de minimização do qui-quadrado e ainda os correspondentes valores de  $R^2$  e  $\chi^2$ ;
- Results\_b.txt: apresenta a lista com todos os valores do parâmetro “b” da expressão da difusividade determinados ao longo do processo de minimização do qui-quadrado, e também os correspondentes valores de  $R^2$  e  $\chi^2$  ;;

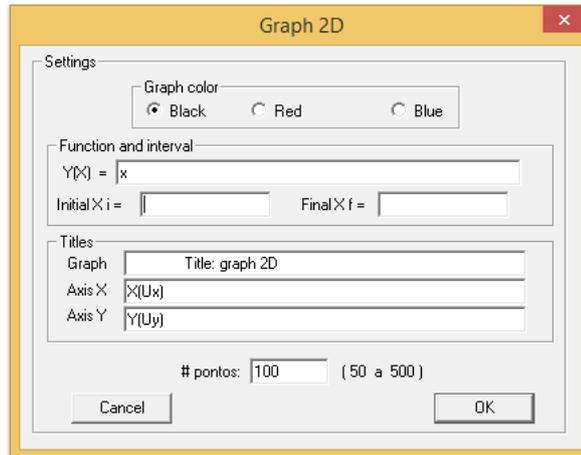
### 3.9.3. O menu “General”

O menu “General” é apresentado através da Figura 3.30.



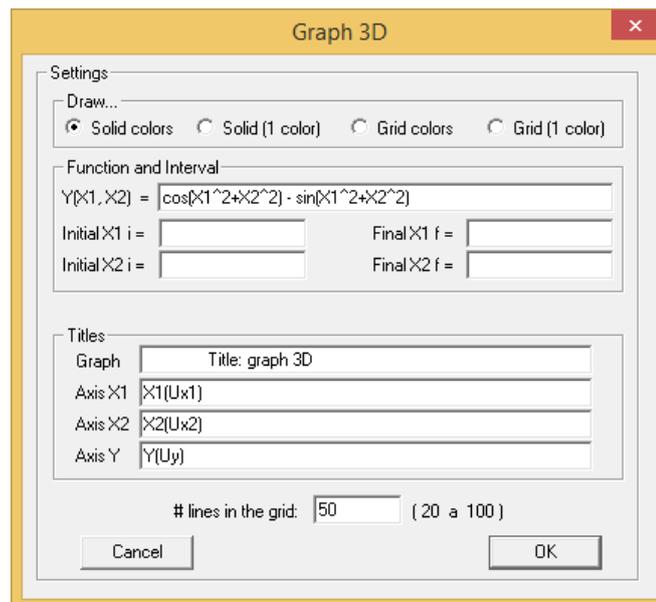
**Figura 3.30** Menu "General".

Ao selecionar o “Graph 2D”, será apresentado uma caixa de diálogo, como pode-se observar na Figura 3.31, para selecionar a cor do gráfico, a função e o intervalo. Ao clicar em “OK”, será gerado um gráfico em 2D.



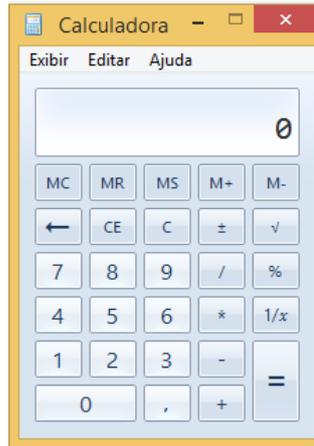
**Figura 3.31** Caixa de diálogo para gráfico 2D.

Ao selecionar o “Graph 3D”, será apresentado uma caixa de diálogo, como pode-se observar na Figura 3.32, para selecionar a cor do gráfico, a função e o intervalo. Ao clicar em “OK”, será gerado um gráfico em 3D.



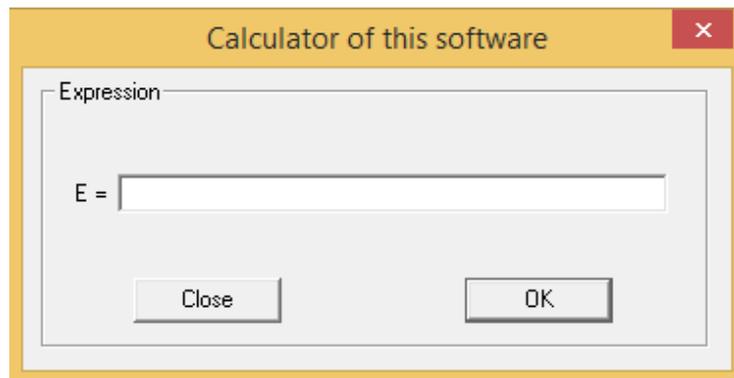
**Figura 3.32** Caixa de diálogo para gráfico 3D.

Ao selecionar o “Calculator of the Windows”, será executado a calculadora padrão do Microsoft Windows, como pode-se observar na Figura 3.33.



**Figura 3.33** Calculadora do Windows.

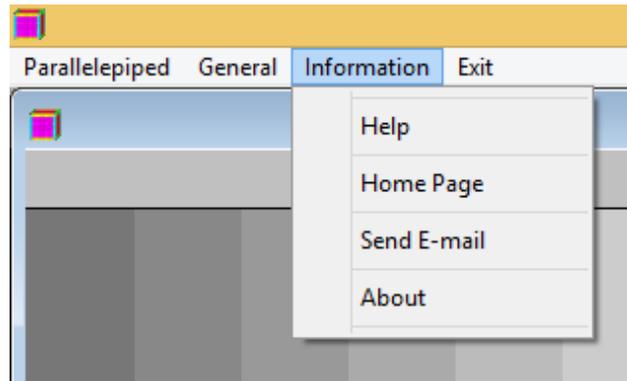
Ao seleccionar o “Calculator of this Software”, será executado a calculadora do próprio Parallelepiped, que determina a expressão que seja inserida na caixa de diálogo, como pode-se observar na Figura 3.34.



**Figura 3.34** Calculadora do *Software*.

#### **3.9.4. O menu “Information”**

O menu “Information” é apresentado através da Figura 3.35.



**Figura 3.35** Menu "Information".

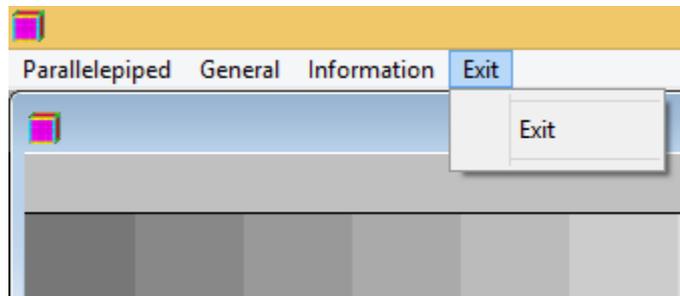
Este menu tem a função de fornecer informações ao usuário, o primeiro item de menu "Help", tem como função solucionar alguma dúvida do usuário sobre o *software*. O segundo item de menu, terá como função conduzir o usuário ao sítio eletrônico do *software*. O terceiro item de menu "Send e-mail", terá como função facilitar o recebimento de e-mail entre o usuário e o criador do *software*. Por fim o item de menu "About" abre uma caixa de diálogo com informações sobre o autor do *software*, como pode-se observar na Figura 3.36.



**Figura 3.36** Caixa de diálogo com informações do autor do *software*.

### 3.9.5. O menu “Exit”

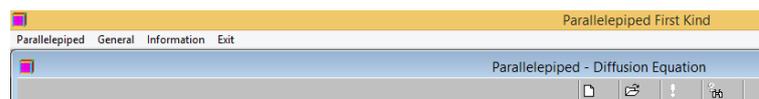
O item final da barra de menu é o “Exit”, este item tem como função finalizar o *software*, como pode-se observar na Figura 3.37.



**Figura 3.37** Menu "Exit".

### 3.9.6. A barra de ferramentas

A barra de ferramentas contém botões com a finalidade de selecionar comandos e recursos usados com maior frequência. A principal função é oferecer um meio mais rápido de selecionar os recursos opcionais de um programa (OMWENGA, 2006). Na Figura 3.33 pode-se ver a barra de ferramentas composta por quatro botões distintos. Estes botões são atalhos para “New Dataset”, “Open a Dataset”, “Simulate/Optimize” e “Results”, na Figura 3.38, pode-se visualizar os ícones de cada opção.



**Figura 3.38** Barra de ferramentas do "Parallelepiped First Kind".



(a) (b) (c) (d)

**Figura 3.39** (a) “New Dataset”, (b) “Open a Dataset”, (c) “Simulate/Optimize”, (d) “Results”.

Ao posicionar o cursor (seta do mouse) sobre um dos atalhos, o mesmo mudará de cor, indicando a sua opção ao lado esquerdo da janela. O selecionar o atalho “a” aparecerá “New Dataset” destacado ao lado esquerdo da janela, este atalho tem como função criar um novo arquivo. Quando for necessário abrir um arquivo já existente, seleciona-se o atalho “b”, neste atalho estará escrito “Open a Dataset”. Ao selecionar o atalho “c”, ao lado esquerdo da janela indicara “Simulate/Optimize”, esta opção tem como função executar a simulação/otimizador, e por fim o último atalho “d”, chamado de “Results”, tem como função apresentar os resultados da simulação dos dados.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram feitos vários testes preliminares e, no primeiro deles, apresentados na Tabela 4.1, encontram-se os resultados que foram analisados na polpa do coco *in natura* do coco verde, os parâmetros estudados foram pH, atividade de água, sólidos totais, teor de umidade, lipídeos, cinzas, acidez total titulável, sólidos solúveis e ratio.

**Tabela 4.1** Parâmetros físico-químicos da polpa do coco verde *in natura*.

<b>Parâmetro</b>	<b>In natura</b>
<b>Umidade (g.100<sup>-1</sup>)</b>	92,34 ± 0,06
<b>Atividade de água (a<sub>w</sub>)</b>	0,992 ± 0,002
<b>pH</b>	6,73 ± 0,02
<b>Sólidos totais (%)</b>	7,66 ± 0,06
<b>Lipídios (g.100<sup>-1</sup>)</b>	9,2549 ± 0,57
<b>Cinzas (%)</b>	0,76 ± 0,01
<b>Acidez total titulável (g ácido cítrico.100 g<sup>-1</sup>)</b>	0,0192 ± 0,0005
<b>Sólidos solúveis (°Brix)</b>	6,47 ± 0,06
<b>Ratio (SST/ATT)</b>	336,7 ± 0,59

1

Dados referentes a média da triplicata ± desvio padrão.

A polpa do coco verde apresentou elevado teor de umidade, contendo 92,34 %, mostrando ser altamente perecível. Soares et al. (2015) encontraram valor inferior (75,5%) analisando polpa de coco verde submetida ao congelamento lento e rápido, esses valores distintos, provavelmente, são devido ao grau de maturação dos frutos, conforme mencionado por Aroucha (2005), além da variedade e local de cultivo.

Teixeira (2018) utilizou a polpa do coco verde na produção de *smoothie* misto, e constatou um teor de umidade de 89,74 %. Santana et al. (2011) utilizaram a polpa do coco verde como uma alternativa a substituição do leite na produção de sorvete e constataram teor de umidade de 92,7 %. No entanto, pode-se haver uma diminuição

deste valor de acordo com o período de maturação do fruto, Igutti et al. (2011) constataran o teor de umidade de 83% em trabalho realizado com a polpa do coco verde para a utilização no preparo de sorvete.

A atividade de água ( $A_w$ ) é uma medida qualitativa dos alimentos que permite avaliar a disponibilidade de água livre que é suscetível à diversas reações, ao passo que o teor de umidade é uma medida quantitativa, medindo o percentual em peso, de toda água presente no alimento, tanto livre quanto isolada (SCOTT, 1957).

Pode-se notar a elevada atividade de água, com teor de 0,992, alimentos que apresentam alta atividade de água podem sofrer com maior intensidade a sua deterioração por reações, químicas, físicas e microrganismos, sendo recomendado no momento do manuseio, uma excelente higienização dos utensílios e do ambiente de processamento.

O pH da polpa do coco verde foi de 6,73, este valor corrobora com o valor encontrado por Teixeira et al. (2019) de 6,53.

Os parâmetros observados com alto teor de umidade e atividade de água, associado a um pH próximo a neutralidade, são condições susceptíveis para a proliferação de bactérias patogênicas (CERESER et al., 2008), fazendo-se necessário um processo para assegurar condições de consumo desta polpa por um período mais prolongado, como a utilização da pasteurização para garantir a segurança alimentar.

Medina (1980) constatou que a concentração de sólidos totais nos primeiros estádios de maturação é menor e aumenta gradativamente com a maturação, entretanto, havendo formação do endosperma sólido, este declina no final da maturação, sendo assim o teor encontrado de 7,66% de sólidos totais, pode deferir de outros trabalhos de acordo com o estágio de maturação que se encontra a polpa do coco verde, a exemplo do encontrado por Teixeira et al. (2019) de 10,06.

No presente trabalho, o teor de lipídeos encontrado foi de 9,2549%, enquanto o teor encontrado na polpa do coco maduro é de 42% (TACO,2011), sendo assim, conforme o estágio de maturação aumenta, a proporção deste parâmetro aumenta juntamente. Trabalhos com a polpa do coco verde encontraram teores variados entre 0,39% (SANTANA et al., 2011) e 2,4% (IGUTTI et al., 2011).

O teor de cinzas presente na polpa foi de 0,76%. De acordo com a literatura este teor pode variar de acordo com o estágio de maturação do coco, e com as condições edafoclimáticas da região. Teixeira (2018) constatou o teor de 0,85%, enquanto Igutti et al. (2011) observaram 0,7% e Santana et al. (2011) 0,75%.

A acidez total titulável foi de 0,0192 g ácido cítrico.100 g<sup>-1</sup>, um teor baixo, corroborando com o teor relatado por Teixeira (2018) de 0,06 g ácido cítrico.100 g<sup>-1</sup>.

Para Chitarra e Chitarra (2005), o teor de sólidos solúveis (SS) é uma medida indireta do teor de açúcares, pois outras substâncias também se encontram dissolvidas na seiva vacuolar (vitaminas, fenólicos, pectinas, ácidos orgânicos, etc.), porém destacam que os açúcares são os mais representativos, chegando a constituir até 85-90% dos SS, o teor de sólidos solúveis foi de 6,47 °Brix, estando de acordo com Teixeira et al. (2019) que analisaram a polpa do coco verde e constataram o teor de 7,5 °Brix.

O parâmetro analisado pelo ratio verifica o balanço de ácidos e açúcares, deste modo, quando os valores desta relação são altos, significa que o fruto está em bom grau de maturação, pois esse grau aumenta quando há decréscimo de acidez e alto teor de SST, decorrentes da maturação (CHITARRA & CHITARRA, 2005). Esta relação foi de 336,70 para a polpa do coco verde, em trabalho realizado por Teixeira et al., este teor foi de 125,00.

Em outro teste preliminar, os resultados obtidos nas Tabelas 4.2 (produto in natura e pasteurizado) podem ser observados.

**Tabela 4.2** Parâmetros físico-químicos da polpa do coco verde *in natura* e pasteurizada

<b>Parâmetro</b>	<b><i>In natura</i></b>	<b>Pasteurização</b>
<b>Umidade (g.100<sup>-1</sup>)</b>	86,870 ± 0,305 ns	86,801 ± 0,195 ns
<b>Atividade de água (a<sub>w</sub>)</b>	0,992 ± 0,002 ns	0,993 ± 0,003 ns
<b>Cinzas (%)</b>	0,682 ± 0,032 ns	0,739 ± 0,040 ns
<b>pH</b>	6,730 ± 0,020 ns	6,820 ± 0,030 ns
<b>Lipídios (g.100<sup>-1</sup>)</b>	5,430 ± 0,300 ns	5,200 ± 0,000 ns
<b>Proteínas (%)</b>	1,460 ± 0,100 ns	1,400 ± 0,100 ns
<b>Açúcares Redutores (%)</b>	0,740 ± 0,000 * a	0,800 ± 0,000 * b

<b>Açúcares Totais (%)</b>	2,190 ± 0,000 **b	2,400 ± 0,000 **a
<b>Açúcares não redutores (%)</b>	1,450 ± 0,000 **b	1,600 ± 0,000 **a
<b>Fibra alimentar (%)</b>	0,970 ± 0,100 *b	1,100 ± 0,000 *a
<b>Sólidos solúveis (°Brix)</b>	6,47 ± 0,06	6,49 ± 0,07
<b>Acidez total titulável (g ácido cítrico.100 g<sup>-1</sup>)</b>	0,0192 ± 0,0005	0,0194 ± 0,0003
<b>Ratio (SST/ATT)</b>	336,7 ± 0,59	342,78 ± 0,79

Médias ± desvio padrão com letras diferentes na mesma linha diferiram entre si pelo teste t-Student

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade;

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade;

ns não significativo

As análises microbiológicas para este teste preliminar são apresentadas através da Tabela 4.3.

**Tabela 4.3** Parâmetros microbiológicos da polpa do coco verde *in natura* e pasteurizada.

<b>Parâmetro</b>	<b><i>In natura</i></b>	<b>Pasteurização</b>
<b>Coliformes a 45 ° C (NMP/g)</b>	0,0 ± 0,0 ns	0,0 ± 0,0 ns
<b>Bolores e leveduras (UFC/g)</b>	17000 ± 1000 **a	200,0 ± 10 **b
<b>Salmonella sp em 25 g</b>	0,0 ± 0,0 ns	0,0 ± 0,0 ns

Médias ± desvio padrão com letras diferentes na mesma linha diferiram entre si pelo teste t-Student

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade;

\* significativo ao nível de 5% de probabilidade;

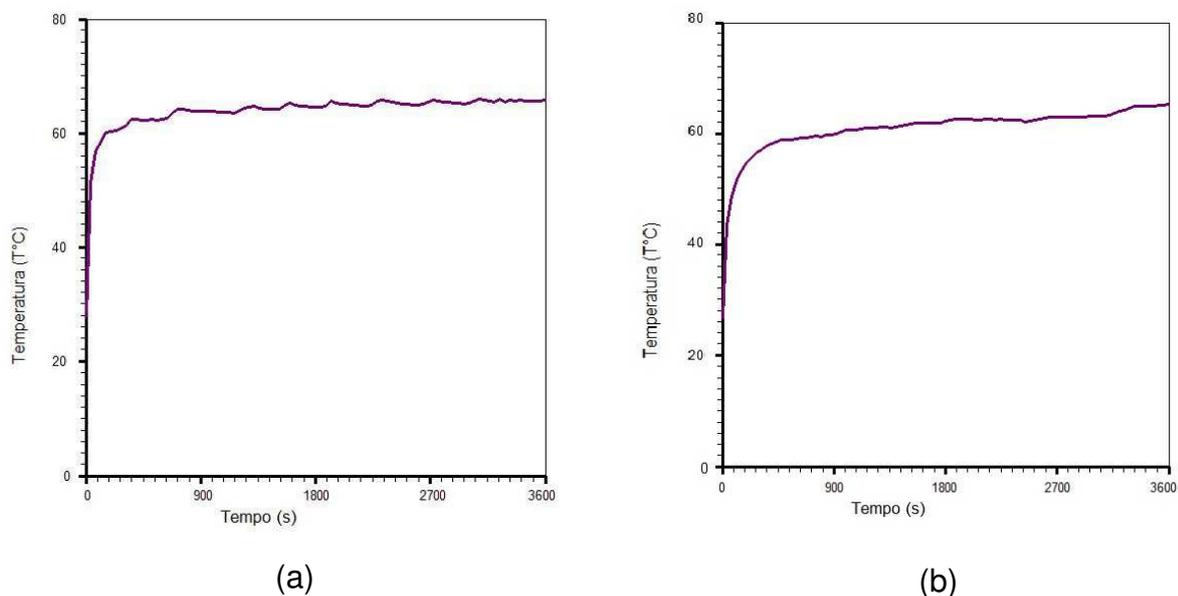
ns não significativo

#### **4.1. Penetração de calor na polpa do coco verde – resultados preliminares**

Durante o processo de pasteurização da polpa do coco verde foi verificado as temperaturas no interior do paralelepípedo em que a polpa estava contida através de um termopar na parte da superfície da interna da parede lateral e outro no ponto central geométrico do recipiente. Embora o processo de pasteurização tenha passado por um resfriamento rápido ao final, apenas o processo de aquecimento foi analisado. Foram realizados dois experimentos (CV1 e CV2).

#### 4.1.1. Superfície interna do paralelepípedo – resultados preliminares

Os dados preliminares sobre o aquecimento da superfície interna do paralelepípedo contendo a polpa do coco verde foram obtidos, inicialmente, através dos experimentos CV1 e CV2. Após a aquisição dos dados e conhecendo-se o conjunto de pontos que representa as temperaturas obtidas experimentalmente na superfície interna do paralelepípedo em inúmeros instantes de tempo, podendo-se através do LAB Fit Curve Fitting *software* (SILVA e SILVA, 2009) converter esse conjunto de dados em gráficos, como pode-se observar na Figura 4.1.

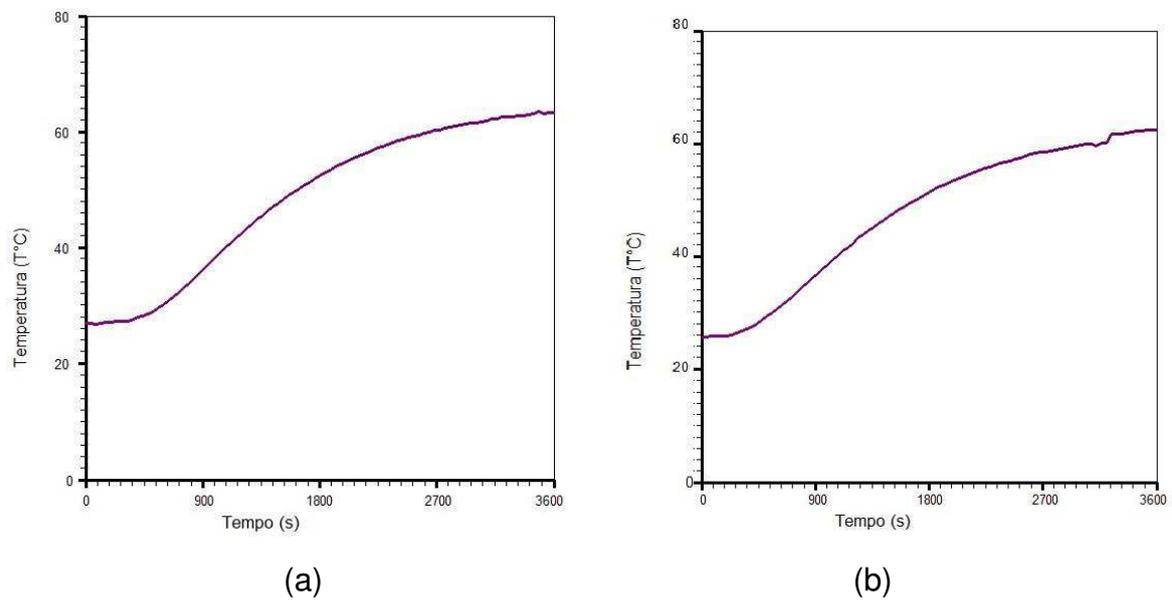


**Figura 4.1** Gráfico da temperatura na superfície interna do paralelepípedo obtida dos dados experimentais do aquecimento da polpa do coco verde para os experimentos: (a) CV1 e (b) CV2.

Nos gráficos da Figura 4.1 pode-se observar a rápida elevação da temperatura e em seguida, uma curva suave ao longo do tempo e a estabilização da temperatura em 65 °C.

#### 4.1.2. Centro da geometria do paralelepípedo – resultado preliminar

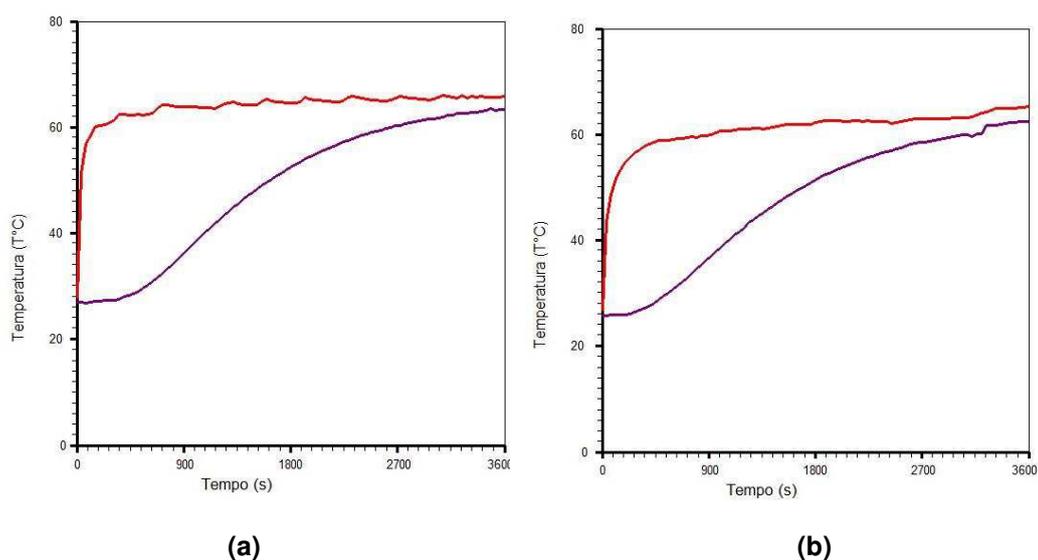
No centro do paralelepípedo, observa-se as evoluções de temperaturas mostradas na Figura 4.2.



**Figura 4.2 .** Gráfico da temperatura no centro do paralelepípedo obtido através dos dados experimentais do aquecimento da polpa do coco verde para os experimentos: (a) CV1; (b) CV2.

#### 4.1.3. Combinação das temperaturas – resultados preliminares

As superposições das Figuras 4.1(a) e 4.2(a) e também das Figuras 4.1(b) e 4.2(b) são apresentadas na Figura 4.3.



**Figura 4.3** Gráfico das temperaturas na superfície e no centro do paralelepípedo obtido através dos dados experimentais do aquecimento da polpa do coco verde para os experimentos: (a) CV1; (b) CV2.

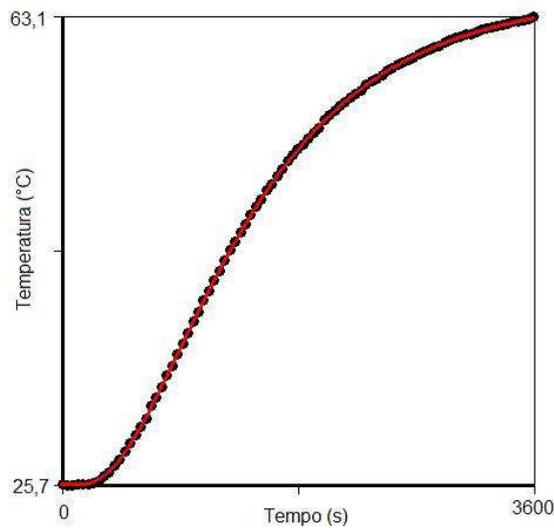
## 4.2. Resultados preliminares do processo de otimização

Os resultados preliminares obtidos para a difusividade térmica dada como uma função local da temperatura foram obtidos para a média dos dados CV1 e CV2, supondo várias funções matemáticas diferentes (ver lista completa na Figura 3.24), conforme a Tabela 4.3.

**Tabela 4.4** Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente da polpa do coco verde, do qui-quadrado e do coeficiente de determinação obtidos neste trabalho

Classificação	Função	a	b	$\chi^2$	$R^2$
15	b.cosh(a.T <sup>2</sup> )	9,665238E-05	1,333639E-07	0,317148	0,999981
6	b.exp(a.T <sup>2</sup> )	2,266279E-05	1,302342E-07	0,362636	0,999978
10	b.exp(a.T <sup>1/2</sup> )	2,903478E-02	1,126181E-07	0,459327	0,999972
4	b.exp(a.T)	1,655281E-03	1,271894E-07	0,574152	0,999975
1	a	1,380948E-07	-	3,278082	0,999930

Conforme se observa, o melhor resultado é aquele correspondente ao cosseno hiperbólico, que gera a simulação mostrada no gráfico da Figura 4.4



**Figura 4.4** Curva de penetração de calor a partir da simulação numérica (—) e os pontos obtidos experimentalmente (●●●) para a temperatura no centro geométrico da polpa do coco verde.

Verifica-se na Figura 4.4, que existe uma boa compatibilidade entre os pontos experimentais e a simulação do aquecimento do ponto central.

Verifica-se que todos os resultados anteriores são preliminares, sem muitos detalhes, e visam apenas a familiarização do aluno de doutorado com os principais elementos desta tese: experimentação, otimização e simulação. Os resultados definitivos desta tese são apresentados na forma de um artigo científico, em que um novo conjunto de dados experimentais foi obtido, e análises mais aprofundadas relativas à determinação da difusividade térmica de polpa de coco verde são apresentadas.

## 5. ARTIGO A SER SUBMETIDO

Como o artigo foi escrito e revisado na língua inglesa, será apresentado nesta língua, e com a formatação sugerida para a submissão pela maioria das revistas internacionais. Vale salientar que um novo experimento de aquecimento da polpa foi realizado para a produção do artigo com os resultados definitivos. Isso exigiu novas análises para a determinação da difusividade térmica local, garantindo a segurança alimentar e também que simulações do processo de aquecimento do produto armazenado em novos recipientes possam ser feitas sem que novos experimentos sejam realizados.

### **Improvement of methodology for determining local thermal diffusivity and heating time of green coconut pulp during its pasteurization**

**Running title:** *Determination of thermal diffusivity for fruit pulps*

Wilton Pereira da Silva<sup>\*</sup>, Matheus Serrano de Medeiros, Josivanda Palmeira Gomes,

Cleide Maria Diniz P. S. e Silva

Federal University of Campina Grande, Campus I, PB, Brazil

<sup>\*</sup>Corresponding author: wiltonps@uol.com.br <http://orcid.org/0000-0001-5841-6023>

#### **Abstract**

The objective of this article was to determine local thermal diffusivity of green coconut pulp stored in a parallelepiped-shaped metallic container during heating in a thermal treatment. A thermocouple was placed in the center of the container with the product, initially at 25.8 °C,

and then the set was dipped in a water bath at 64.85 °C. The temperature over time was recorded in a txt file, making it possible to determine the parameters of a function that represents the thermal diffusivity, using an optimization technique, which also required a three-dimensional numerical solution of the heat conduction equation. Among the functions tested to represent thermal diffusivity as a function of local temperature, the best result was obtained with the hyperbolic cosine, with chi-square and determination coefficient of 0.3188 and 0.99998, respectively. Thus, it was possible to establish the time required to safely interrupt a new heating process during another heat treatment, with a simple simulation, without the need for a new experiment.

**Keywords:** transient state, heating, variable thermal diffusivity, local temperature, food safety

### Nomenclature

$A, B$	coefficients of the discretized diffusion equation
$a, b$	parameters that define the local variable thermal diffusivity
$c_p$	specific heat ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )
$Error_i$	difference between experimental and simulated temperatures for point “ $i$ ”
$f$	function that represents the local variable thermal diffusivity
$h$	convective heat transfer coefficient ( $\text{m s}^{-1}$ )
$k$	thermal conductivity ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
$T$	temperature (K)

$T_p^0$	temperature in the control volume $P$ at beginning of a time interval (K)
$T_{\infty e}$	equilibrium temperature in the east boundary (K)
$T_i^{\text{exp}}$	measured temperature for the experimental point “ $i$ ” (K)
$T_i^{\text{sim}}$	simulated value of the temperature at the point “ $i$ ” (K)
$t$	time (s)
$x, y, z$	position in Cartesian coordinates (m)
$\alpha$	thermal diffusivity ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ )
$\rho$	density ( $\text{kg m}^{-3}$ )
$1/\sigma_i^2$	statistical weight referring to the point “ $i$ ”
$\chi^2$	chi-square (objective function)

## 1. Introduction

The green coconut belongs to the species *Cocos nucifera* Linn., Subfamily Cocosidae, which belongs to the Palmae family. The species comprises some varieties, among which the most important in Brazil are Tall (Var. Typica) and Dwarf (Var. Nana). The dwarf coconut tree, introduced in Brazil in 1925, is small and each tree produces 120 to 150 fruits per year (Lavoyer et al., 2013). All parts of the coconut tree can be used by the industry, but the main products are obtained from the fruit, such as copra (6% moisture dehydrated solid albumen), oil, lauric acid, coconut milk, fiber, flour, coconut water (immature fruit), soaps, detergents and cosmetics.

Brazil is the 4th largest producer and have harvested about 2 billion fruits per year (FAOSTAT, 2014). The 1st, 2nd and 3rd producers are Indonesia, Philippines and India, respectively.

In Brazil, the consumption of green coconut water (liquid albumen) is so important that it resulted in the planting of crops intended mainly for this purpose. On the other hand, the growing demand for natural and healthy foods is a factor that has increased the consumption of this drink, which reached, in the last years, about 350 million liters per year in both fresh and industrialized forms. Besides being much appreciated for its flavor and freshness, green coconut water is considered an excellent natural isotonic, so it is also consumed for its nutritional qualities. However, the growing demand for this product generates a large amount of waste in places such as beaches of the Brazilian coast where the consumption of this drink is common. Coconut shell accounts for about 85% of the fruit and has become a problem due to the large volume of waste generated and its slow degradation (Santana et al., 2011). To minimize the problem of disposal and increase the profit from selling the product, some Brazilian microentrepreneurs sell not only coconut water but also fleshy albumen. In general, fleshy albumen is transformed into pulp, whose life time is increased when this final product is pasteurized. Thus, to ensure the food safety, the thermophysical properties of green coconut pulp must be accurately determined, enabling not only the simulation of the heating process of the product but also the determination of the minimum time for stopping such process, in order to perform rapid cooling.

Among several methods to determine the thermophysical properties of a product (in particular the thermal diffusivity,  $\alpha$ , and the convective heat transfer coefficient,  $h$ ), one of them involves the measurement of temperature over time for a point chosen within the product during a transient process (heating or cooling). Then, the heat conduction equation is fitted to the experimental data set, making it possible to determine  $\alpha$  and/or  $h$  (Carbonera et al., 2003; Ukrainczyk, 2009; Betta et al., 2009; Silva et al., 2010; Silva et al., 2011; Silva et al., 2014;

Mohamed, 2015; Muramatsu et al., 2017; Da Silva et al., 2018; Silva et al., 2018). As this inverse method involves a differential equation, and not a simple function, additional difficulties exist in the determination of the such properties. If the temperature interval of heating or cooling is small,  $\alpha$  may be considered constant during the process, and the heat conduction equation can be solved through analytical methods. An example of this case is given by Silva et al. (2014), who developed an algorithm to determine  $\alpha$ , called OREP (Optimal Removal of Experimental Points). The experiment performed by Ukrainczyk (2009) and analyzed by Silva et al. (2014) is referring to the heating kinetics of Agar gel (gelatinous water 0.7%) placed within a cylindrical copper container. The container with the product, initially at 20.1 °C, was immersed into hot water at 24.9 °C, and the temperature of the central point of the product was measured over time for 1600 s. Silva et al. (2014) concluded that, for the experiment analyzed, the proposed algorithm produces good results. Obviously, the authors chose an experiment involving a temperature variation of only 4.8 °C and, therefore, the consideration of  $\alpha$  with a constant value does not introduce a significant systematic error in the result. Thus, the algorithm of Silva et al. (2014), using an analytical solution of the heat conduction equation, is considered useful in processes in which small temperature variations are involved, as in cases of cooling of agricultural products.

In the case of pasteurization (and other thermal treatments) with temperatures ranging from 15-25 to 60-80 °C, the thermophysical properties are expected to vary throughout the process. Nevertheless, several authors consider these properties with constant values (Carbonera et al. 2003; Betta et al., 2009; Mohamed, 2015; Muramatsu et al., 2017), and this fact can introduce systematic errors in the obtained results. This last-mentioned observation was made by Silva et al. (2011) studying heat transfer in tomato purees through a numerical solution of the heat conduction equation, which was developed assuming variable thermal properties. The authors observed that, in each instant, during a transient process, there is a

temperature distribution within the product and, because of that, the thermal diffusivity should be given as a function of the local temperature. As Silva et al. (2011) obtained good results with exponential functions to represent local thermal diffusivity, Da Silva et al. (2018), testing several exponential functions, observed that hyperbolic cosine is the best one to represent the thermal diffusivity of pulps. It is interesting to observe that, when thermal diffusivity is precisely known, the time required for heating of a product in a given heat treatment can be easily estimated by a simple simulation. However, regarding the thermal diffusivity of green coconut pulp, no studies were found in the literature on this subject, which makes it difficult to estimate the heating time of this product by simulation.

In this context, this article aimed to determine an expression for thermal diffusivity of green coconut pulp as a function of the local temperature of the product during its heating, using an inverse method. This determination makes it possible to accurately simulate the heating process in a given container, which allows establishing the time required to interrupt such process safely during a thermal treatment.

## **2. Material and methods**

### **2.1. Experiment: Heat treatment, physicochemical and microbiological analyses**

#### *2.1.1. Green coconut pulp preparation*

The green coconut fruits were purchased from a farm in the municipality of Campina Grande, Paraíba state, Brazil, and transported in plastic boxes to the Agricultural Product Storage and Processing Laboratory (Laboratório de Armazenamento e Processamento de

Produtos Agrícolas, LAPPA) at the Federal University of Campina Grande (Universidade Federal de Campina Grande, UFCG). Then, the fruits were inspected, discarding those that were damaged or with any other anomaly, and only the healthy fruits that had the same size and green color pattern were selected. Fruits were then sanitized with a 0.2% sodium hypochlorite solution. The extraction of coconut water (liquid albumen) was done through a household tool, used to pierce the coconut shell, and then a machete was used for longitudinal separation of the fruit into two parts. After that, the fleshy albumen was removed with a stainless steel spoon and then the product was placed on stainless steel trays for subsequent processing in a Mondial brand 500-W power mixer. The pulp was packed in clear plastic containers and transported to UFCG's Heat and Mass Transfer Laboratory (Laboratório de Transferência de Calor e Massa, LTCM) and placed in a Consul freezer at -18 °C. As additional information, this production process followed the Normative Instruction N. 01 of January 7, 2000, issued by the Brazilian Ministry of Agriculture and Supply. This Normative Instruction defines pulp as an unfermented, undiluted, not concentrated pasty product, extracted from fruits (Brasil, 2000).

### *2.1.2. Green coconut pulp heating*

Before heating, the green coconut pulp was removed from the freezer and placed in a parallelepiped-shaped metallic container, with the following internal dimensions, measured with a Digimess 100.170 caliper:  $8.01 \times 10^{-2}$ ;  $7.14 \times 10^{-2}$  and  $4.95 \times 10^{-2}$  m. The container wall thickness was about  $0.70 \times 10^{-3}$  m. The product remained for about 10 hours on the laboratory bench in a room with temperature maintained close to 26.0 °C by an air conditioner. The temperatures in the center and at the inner wall of the container with the product were monitored by two K-type thermocouples connected to an Instrutherm two-channel TH-095 digital thermometer to ensure the thermal equilibrium of the system. This thermometer can

automatically capture data of temperatures over time through its connection to a Core i5 notebook via USB-0/RS-232, using software made available by the manufacturer for the Windows platform. The positions of the above-mentioned thermocouples were chosen for an obvious reason; the container's inner wall temperature is the first to reach thermal equilibrium with the external medium. On the other hand, the central point of the product within the container (the coldest point during heating) is the last one to reach this thermal equilibrium.

After the thermal equilibrium of the product in the container (whose lid was previously sealed with silicone glue), the heating process was performed by water bath, using a Kacil model BM-02C device, with capacity of 9 L of water. This device operates in the range from ambient temperature to 70 °C, with a resolution of 0.1 °C, and it has electronic temperature control (Proportional, Integral and Derivative - PID Controller) as well as shielded tubular resistance, which considerably reduces water heating time, enabling better stabilization of the bath at the desired temperature. In addition to these features, model BM-02C is equipped with magnetic water circulation mechanism, ensuring uniform water temperature.

The heating temperature of the product was set at 65 °C. Thus, after the water temperature reached this value, the container with the product at room temperature was immersed in this hot water, starting the automatic acquisition of time and temperature data every second during the heating process. It is interesting to note that the volume of green coconut pulp is 0.283 L, while the volume of hot water is 9.000 L, roughly 1:32, so it is reasonable to assume hot water as an infinite source of heat.

### *2.1.3. Physicochemical and microbiological analyses*

The following physicochemical analyses were performed in triplicate on both fresh and pasteurized green coconut pulp: determination of ashes by the standard method of calcining the

residue of green coconut pulp in a muffle furnace at 550 °C for a period of 24 hours; lipid determination by the methodology of Bligh and Dyer (1959); determination of moisture content on wet basis by gravimetric method according to the methodology of Adolfo Lutz Institute (IAL, 2008); fibers (IAL, 2008); and proteins (IAL, 2008). Carbohydrates were estimated by the imposition of 100% for the sum of the six components (ASHRAE, 2006). It is interesting to note that, in addition to the characterization of the product, these analyses on both fresh and pasteurized product allow evaluating the effect of heat treatment on some components.

Regarding microbiological analyses performed on both fresh and pasteurized green coconut pulp, the sum of molds and yeasts, total coliforms and salmonella were analyzed. The analyses were performed in triplicate in a manual colony counter (Phoenix – model CP608) using the method described by Vanderzant and Splittstoesser (1992), and the results were expressed in CFU (Colony Forming Unit)/g and Most Probable Number/g.

Microbiological and physicochemical analyses were performed at the Food Technology Laboratory (Laboratório de Tecnologia de Alimentos, LTA) of the Federal University of Paraíba (Universidade Federal da Paraíba, UFPB).

## **2.2. Three-dimensional heat conduction equation in Cartesian coordinates**

### *2.2.1. Heat conduction equation*

Although heat transfer involves convection, radiation and conduction, Da Silva et al. (2018) explain that, for solid and pasty products, with no heat source and no phase change, many times solely a conduction model can be used to describe the process. In this case, the thermal properties involved are considered as “apparent”, although in this work the original

names of the properties were maintained, with no addition of the term “apparent”. In this study, whose experimental part was described above, only the heat conduction equation was used to describe the heating process:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T), \quad (1a)$$

where  $\rho$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) is the density of the product,  $c_p$  ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) is the specific heat,  $T$  (K) is the temperature,  $t$  (s) is the time and  $k$  ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) is the thermal conductivity.

Da Silva et al. (2018) argue that, according to empirical equations available in the literature (for instance, in Fricke and Becker, 2001), the product ( $\rho c_p$ ) varies less than 1% during the heating of fruit pulp from the ambient temperature to 65 °C. Thus, it is reasonable to assume this term with constant value over time, which makes it possible to write Equation (1a) as follows:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\alpha \nabla T), \quad (1b)$$

in which  $\alpha = k/(\rho c_p)$  ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) is the thermal diffusivity.

### 2.2.2. Heat conduction equation in Cartesian coordinates and numerical solution

As the container with green coconut pulp is parallelepiped shaped, three-dimensional Cartesian coordinates were used to write Equation (1b). Thus, this equation was written in the following way:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \alpha \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \alpha \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \alpha \frac{\partial T}{\partial z} \right). \quad (2)$$

in which  $x$ ,  $y$  and  $z$  (m) define position in Cartesian coordinates.

Silva et al. (2013) solved this equation numerically for boundary condition of the third kind, using the Finite Volume Method, with a fully implicit formulation. This solution involves 27 types of control volumes, classified according to the contact of their surfaces with the external medium. Also, the total time of the process was divided by the authors into small time intervals,  $\Delta t$ . As an example, for an internal volume, i.e., with no contact with external medium, the following discretized equation was obtained by integrating Equation (2) in space and time:

$$A_p T_P = A_w T_W + A_e T_E + A_s T_S + A_n T_N + A_b T_B + A_f T_F + B, \quad (3)$$

in which the subscripts “ $p$ ”, “ $w$ ”, “ $e$ ”, “ $s$ ”, “ $n$ ”, “ $b$ ”, and “ $f$ ” represent, respectively, the nodal points  $P$ , west, east, south, north, back and front. For an internal control volume, the coefficients  $A_p$ ,  $A_w$ ,  $A_e$ ,  $A_s$ ,  $A_n$ ,  $A_b$ ,  $A_f$  and  $B$  are given by:

$$A_p = \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \frac{\alpha_e}{\Delta x_e} \Delta y \Delta z + \frac{\alpha_w}{\Delta x_w} \Delta y \Delta z + \frac{\alpha_n}{\Delta y_n} \Delta x \Delta z + \frac{\alpha_s}{\Delta y_s} \Delta x \Delta z + \frac{\alpha_b}{\Delta z_b} \Delta y \Delta x + \frac{\alpha_f}{\Delta z_f} \Delta y \Delta x \quad (4a-h)$$

$$A_w = \frac{\alpha_w}{\Delta x_w} \Delta y \Delta z \quad A_e = \frac{\alpha_e}{\Delta x_e} \Delta y \Delta z \quad A_s = \frac{\alpha_s}{\Delta y_s} \Delta x \Delta z \quad A_n = \frac{\alpha_n}{\Delta y_n} \Delta x \Delta z$$

$$A_b = \frac{\alpha_b}{\Delta z_b} \Delta y \Delta x \quad A_f = \frac{\alpha_f}{\Delta z_f} \Delta y \Delta x \quad B = \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} T_P^0.$$

In Equation (4h),  $T_P^0$  is the temperature in the control volume  $P$  at beginning of a time interval,  $\Delta t$ , while  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  and  $\Delta z$  are the edges of the small parallelepiped representing the control volume.

For an east control volume (with only east surface in contact with external medium), the integration of Equation (2) in space and time also results in an algebraic equation given by Equation (3). In addition, the coefficients  $A_w$ ,  $A_s$ ,  $A_n$ ,  $A_b$  and  $A_f$  are given by the same expressions provided in Equation (4). However, there are the following modifications:

$$A_e = 0$$

$$A_p = \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} + \frac{\alpha_w}{\Delta x_w} \Delta y \Delta z + \frac{\alpha_n}{\Delta y_n} \Delta x \Delta z + \frac{\alpha_s}{\Delta y_s} \Delta x \Delta z + \frac{\alpha_b}{\Delta z_b} \Delta y \Delta x + \frac{\alpha_f}{\Delta z_f} \Delta y \Delta x + \frac{2\alpha_e \Delta y \Delta z}{\Delta x_e} \quad (5a-c)$$

$$B = \frac{\Delta x \Delta y \Delta z}{\Delta t} T_p^0 + \frac{2\alpha_e T_{\infty e}}{\Delta x_e} \Delta y \Delta z ,$$

in which  $T_{\infty e}$  is the equilibrium temperature in the east boundary of the domain.

Equations (5b,c) are different from the expressions provided by Silva et al. (2013), because the experiment of the present work indicated that the boundary condition of the first kind with constant equilibrium temperature was appropriate to describe the heat conduction process, since the green coconut pulp was stored in a metallic container.

For each type of remaining control volume, similar equations were obtained, and the system of equations in each time step was solved by Gauss-Seidel method, with convergence criterion of  $10^{-8}$ . This procedure enables the temperature to be calculated at the end of each time step, for all control volumes. On the other hand, according to Silva et al. (2011), if the thermal diffusivity  $\alpha$  is constant, with no significant volume change during the transient process, the coefficients  $A$  are calculated only once. However, the coefficient  $B$  is calculated in each time step because its value depends on  $T_p^0$ , which is the value of  $T$  in the control volume  $P$  at the

initial instant of each time step. If the property  $\alpha$  is variable as a function of temperature, or if the volume change during the transient process is significant, the coefficients  $A$  are also calculated in each time step, due to the nonlinearities caused by the variation of volume and/or  $\alpha$ . Thus, for an adequate time refinement, the errors due to these nonlinearities can be disregarded.

### 2.3. Variable thermal diffusivity

In this work, the thermal diffusivity  $\alpha$  in a nodal point can be variable, given by an expression of the type

$$\alpha(T) = f(T, a, b), \quad (6)$$

in which  $f$  is a mathematical function, “ $a$ ” and “ $b$ ” are parameters that fit the numerical solution to the experimental data set, and such parameters can be determined by optimization. At the interfaces of the control volumes, for example “ $e$ ”, assuming a uniform grid, the following expression should be used to determine  $\alpha_e$  (Patankar, 1980):

$$\alpha_e = \frac{2\alpha_P\alpha_E}{\alpha_P + \alpha_E}, \quad (7)$$

where  $\alpha_P$  and  $\alpha_E$  are values calculated for nodal points  $P$  and  $E$  using the function established in Equation (6), and  $\alpha_e$  is the value of the thermal diffusivity at the interface of these control volumes. In other words, in Equation (7), the subscripts  $P$  and  $E$  refer to the nodal points of these two control volumes and the subscript  $e$  is the interface between them. More detail on the discretization of the diffusion equation in a parallelepiped, such as type of control volumes, first-order approximation for derivatives, descriptive schematics, etc., can be obtained, for instance, in Silva et al. (2013).

## 2.4. Optimization algorithm – inverse method

The parameters “ $a$ ” and “ $b$ ” from Equation (6) were calculated for each function  $f$  through the optimization algorithm as suggested by Silva (2007), which uses successive attempts. The experimental data set obtained in this research was used in the search for optimum values of the parameters “ $a$ ” and “ $b$ ”, which minimize the following objective function:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_p} (T_i^{\text{exp}} - T_i^{\text{sim}})^2 \frac{1}{\sigma_i^2}, \quad (8)$$

where  $T_i^{\text{exp}}$  is the measured temperature for the experimental point “ $i$ ”,  $T_i^{\text{sim}}$  is the corresponding simulated value (calculated as shown in Section 2.2),  $N_p$  is the number of experimental points,  $1/\sigma_i^2$  is the statistical weight referring to the point “ $i$ ”. If the statistical weights are not measured in the experiments, they should be made equal to 1 for all experimental points (same statistical weight). In Equation (8), the chi-square depends on  $T_i^{\text{sim}}$ , which depends on thermal diffusivity  $\alpha(T, a, b)$ . Thus, the algorithm searches values for “ $a$ ” and “ $b$ ”, which make Equation (8) have the lowest value possible.

The relative tolerance for convergence of the parameters “ $a$ ” and “ $b$ ”, in the optimization processes, was established at  $10^{-4}$ . As an additional information, software development (optimizations, simulations, graphical information) was performed on a Samsung notebook with Intel Core i5 processor using FORTRAN language available in Compaq Visual Fortran Professional Studio V. 6.6.0, with the programming option called QuickWin Application.

## 3. Results and discussion

### 3.1. Results

#### 3.1.1. Characterization of the fresh green coconut pulp

In order to correctly interpret the results obtained, it is important to know the physicochemical analysis of the fresh product, which is presented in Table 1.

It is interesting to observe that the centesimal chemical composition presented in Table 1 and the formulas provided in ASHRAE (2006) can be used to estimate thermal diffusivity at a given temperature. As an example, at 25.8 °C, the formulas for thermal diffusivity provided by ASHRAE (2006) in Chapter 9 for the components (proteins, lipids, carbohydrates, fibers, ashes and water) and the centesimal chemical composition obtained herein for fresh coconut pulp indicated the approximate value of  $1.385 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . On the other hand, the value predicted by the Riedel correlation ( $\alpha = 8.8 \times 10^{-8} + 6.0 \times 10^{-8} X_{wb}$ ; Riedel, 1969) was  $1.390 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , for the moisture content on wet basis of the pulp studied ( $X_{wb} = 0.85$ ).

#### 3.1.2. Models for the thermal diffusivity

Two thermocouples connected to the thermometer have enabled the temperatures to be recorded at the center of the parallelepiped-shaped container and at its internal wall every second during the whole heating process. The result of the experiment can be observed through Figure 1.

In Figure 1, it is possible to observe small oscillations of temperature at the internal wall of the container, as a result of the action of the controller, which maintains water temperature close to 65 °C over time (the five last measured values have resulted in an average of 64.85 °C). Also, it is possible to observe that the temperature of this wall (initially at 25.8 °C) assumes,

almost instantaneously, its equilibrium value. This observation makes it possible to describe the heating of the green coconut pulp through the diffusion equation, with the boundary condition of the first kind, with an approximately constant temperature of 64.85 °C.

Although the experiment was performed until the thermal equilibrium of the product (lasting about 6000 s), only the first 3600 seconds of the transient process were used to determine the thermal diffusivity by optimization. As the temperature was recorded every second, only the values obtained every 40 s were used in the optimization processes, reducing the number of experimental points from 3600 to 90. A grid with 48000 control volumes (40x40x30) and also a refinement of 1000 time steps were used to solve the heat conduction equation in each numerical analysis.

Initially, a constant value for the thermal diffusivity was determined by optimization, and the result is presented in Table 2 (constant function, number 1).

A first observation of the statistical indicators for function 1 suggests that the obtained results can be considered good ( $\chi^2 = 3.4781$  and  $R^2 = 0.999929$ ). Thus, a simulation of the transient process with the thermal diffusivity of  $\alpha = 1.382 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ , as well as the experimental data set, are shown in Figure 2.

As it can be observed, Figure 2 presents two distinct regions. The first one, for lower times (called region A), has an interesting feature: the simulated values for temperature at center (red line) are higher than the corresponding experimental values. For region B, with higher times, the opposite occurs. To reinforce the observation of this phenomenon, the error of each simulated temperature “*i*” in the center of the container filled with green coconut pulp was defined as:

$$Error_i = T_i^{\text{exp}} - T_i^{\text{sim}}, \quad (9)$$

in which  $T_i^{\text{exp}}$  and  $T_i^{\text{sim}}$  are the experimental and simulated temperatures at the same time, respectively. Thus, the error distribution for the data set can be given by Figure 3.

In Figure 3, three aspects deserve comments. The first aspect is related to the average error. Its value, represented by the continuous red line, is close to 0.02 °C (and the standard deviation is 0.20 °C), although, theoretically, it is easy to show that this average error must be close to zero. The probable cause for a relatively high average error is related to an inappropriate model for thermal diffusivity at temperatures ranging from 26 to 65 °C. The second aspect observed in Figure 3 refers to the interval that contains the errors: between -0.365 and 0.338 °C, also relatively high. The third aspect, more relevant, is the error distribution itself: completely biased. Figure 3 (and also Figure 2) indicates that at the lowest temperatures (region A), the thermal diffusivity must have values lower than the constant value of  $1.382 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . Also, at the highest temperatures (region B), the thermal diffusivity must have values higher than  $1.382 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . For that, increasing exponential expressions as function of  $T^{1/2}$ ,  $T$  and  $T^2$  (functions 2-4 in Table 2, respectively) were used to represent the local thermal diffusivity. In these expressions,  $T$  is the local temperature of the transient process. Comparing the statistical indicators for functions 2, 3 and 4, it is observed that the dependence with  $T^2$  (function 4) generated the best results among the functions from 2 to 4. For that, function 5, given by  $b \cosh(aT^2)$ , which is a combination of two exponentials, was also used to represent the local value of the thermal diffusivity. Among all five expressions, the hyperbolic cosine, given by the function number 5, had the best statistical indicators, as it can be seen in Table 2. For comparison purposes only, the chi-square value for the simulation using the hyperbolic cosine is about 11 times smaller than the chi-square for the simulation using the constant value obtained for thermal diffusivity (function 1).

A graph using function 5 to represent local thermal diffusivity is presented in Figure 4, with the simulated curve for the heating over time in the center of the container with green coconut pulp, as well as the experimental points obtained.

As can be seen in Figure 4, the simulation of the heating in the center of the container with the product, performed with the local thermal diffusivity given by function number 5, describes the transient process well. In addition, the error distribution as well as the histogram frequency versus error for this simulation can be observed in Figure 5.

In Figure 5(a), it can be observed that the average error is about  $-0.003\text{ }^{\circ}\text{C}$  (and the standard deviation is  $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), indicating that, in absolute value, this average error is about six times smaller than that from Figure 3. Also, the range containing all errors presented in Figure 5(a) varies from  $-0.126$  to  $0.123\text{ }^{\circ}\text{C}$ , which is much smaller than the interval shown in Figure 3. Finally, when the error distribution presented in Figure 3 is compared with that in Figure 5(a), this latter distribution can be considered random. In addition, the histogram presented in Figure 5(b) suggests an error distribution very close to a Gaussian distribution. Thus, the expression given by function 5 in Table 2 can really be used to represent the local value of the thermal diffusivity during heating of green coconut pulp.

The behavior of the thermal diffusivity (expressed by hyperbolic cosine, function 5) as a function of the local temperature, as well as a comparison of its average value with the constant value obtained for this property (function 1), is shown through Figure 6.

Figure 6 shows that the constant value obtained by optimization (function 1, Table 2) is slightly higher than the average value obtained for function 5 ( $1.365 \times 10^{-7}\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ ), whose lowest value, at  $25.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , is  $1.335 \times 10^{-7}$  and highest value, at  $64.85\text{ }^{\circ}\text{C}$ , is  $1.446 \times 10^{-7}\text{ m}^2\text{ s}^{-1}$ .

## 3.2. Discussion

### 3.2.1. Heating of the green coconut pulp

As can be seen for the thermal diffusivity, there is some compatibility among the average value of function 5,  $1.365 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ; the constant value obtained by optimization (function 1),  $1.382 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ; the value obtained through centesimal chemical composition,  $1.385 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ ; and the value predicted by the Riedel correlation,  $1.390 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ . However, as observed through Figures 2 and 3, with their regions A and B, a thermal diffusivity given by a single value for the whole temperature interval is not satisfactory to describe the heating process of the product from 25.8 to 64.85 °C. This result was also found by Silva et al. (2011), describing the heating kinetics of tomato puree stored in a cylindrical container from 5.2 to 77.5 °C, when these researchers also assumed constant thermal diffusivity for the product. Also, a similar result for constant thermal diffusivity was obtained by Da Silva et al. (2018), when studying the heating process of papaya pulp (from 22.4 to 65.4 °C) stored in a container with arbitrary geometry during pasteurization of this product.

As Silva et al. (2011) have observed, it is common to find in the literature the diffusion term written in the form  $\alpha \nabla^2 T$  (Baïri et al., 2007; Huang, 2007; Betta et al., 2009; Ukrainczyk, 2009; Mohamed, 2015; Muramatsu et al., 2017; Tanaka et al., 2018), and then this term is discretized. Although this diffusion term makes it possible to use  $\alpha$  with a constant value or as function of the average temperature over time (Oke et al., 2007; Kurozawa et al., 2008; Ansari et al., 2009) during a transient state, it is obvious that there is a temperature distribution within the product at each instant. For that,  $\alpha$  should be considered as a function of the local temperature for each time step. Thus, a better expression for the diffusion term is  $\nabla \cdot (\alpha \nabla T)$ , as was done in this article through Equation (1b).

Korese et al. (2017) observed that the major advantage of computer simulations and numerical procedures is their ability to assess the effect of various physical parameters on cooling and heating profiles of fruits and vegetables. These researchers also observed that a drawback of the available modelling tools is that they need a high level of mathematical sophistication for solutions and applications. The authors may be correct because, in fact, it is difficult to find articles in the literature considering thermal diffusivity as function of the local temperature. However, in order to correct the systematic error due to the consideration of a constant value for  $\alpha$  (which generates biased error distribution), it was necessary to use these tools, including a numerical solution of the three-dimensional heat conduction equation, which was developed assuming variable thermal properties; and an optimization technique to determine the parameters that define these properties, via inverse method.

It is well known that thermal diffusivity of products in thermal equilibrium increases with increasing equilibrium temperature (Fricke and Becker, 2001; ASHRAE, 2006). Thus, various authors, such as Kurozawa et al. (2008), have determined the thermal diffusivity for products in thermal equilibrium at different temperatures. However, few studies in the literature indicate that, during heating of pulps and purees, i.e., during a transient state, increasing expressions, given as a function of local temperature, well represent thermal diffusivity (Silva et al., 2011; Da Silva et al., 2018). This fact can also be observed in this study through functions from 2 to 5, given in Table 2. As an example, the results obtained in this study for the functions  $bexp(aT^{1/2})$ ,  $bexp(aT)$  and  $bexp(aT^2)$  are similar to those obtained by Silva et al. (2011), studying heating of tomato puree. However, these last-mentioned researchers did not test hyperbolic cosine to represent the thermal diffusivity of the product. On the other hand, regarding the best result obtained herein, it is interesting to observe that the same expression given as function of the local temperature found in the present article for thermal diffusivity,  $\alpha(T) = bcosh(aT^2)$ , was also obtained by Da Silva et al. (2018) studying heating of papaya pulp. These results suggest

that this function can be useful to represent thermal diffusivity of other pulps and purees during heating processes.

In most studies on heating of a product in a drying process, a considerable shrinkage occurs. Thus, in order to describe the heating phenomenon through a diffusion model, the grid referring to numerical solution of the diffusion equation must be corrected over time (Lima et al., 2002; Da Silva et al., 2017). However, for the type of heating studied in this article, with no loss of mass, there is no study in the literature consulted that had measured the volume variation, which is considered negligible. Therefore, in this study, this dimensional variation was not considered either.

### *3.2.2. Pasteurization of the product stored in a new container*

This paper aimed to determine the thermal diffusivity of green coconut pulp accurately, enabling the estimation of the time required for the temperature of the central point of the product stored in a parallelepiped-shaped container to reach a previously established value, without the need for further experiments. It is important to mention that, for a parallelepiped-shaped container, it is very important to know when the previously established temperature in the central point is reached, because it ensures inactivation of pathogens as well as enzyme denaturation at all points of the product. As an example, for green coconut pulp stored in a  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$  new container, a simulation of the heating from 25 to 65 °C (in water bath), using a  $40 \times 40 \times 40$  grid for the domain, with time steps of 5 s, makes it possible to obtain the graph of Figure 7(a). On the other hand, Figure 7(b) shows the temperature distribution (°C) in 1/4 of the central plane xy of the product at  $t = 250 \text{ s}$ .

Figure 7(a) highlights the times of 1800, 2600 and 3600 s for which the temperatures in the center of the product are 60.8, 64.0 and 64.8 °C, respectively. Thus, with this information,

a researcher can decide the instant for removing the container from the hot water. In the present study, the product was removed at  $t = 2600$  s, in order to be immersed in a mixture of liquid water and ice for rapid cooling, which completes the thermal treatment. This procedure is expected to ensure food safety, as will be seen in the following. On the other hand, an observation from Figure 7(b) indicates that at  $t = 250$  s, the central region of the product is still at  $25.0$  °C, while the outermost part has already reached  $65$  °C. Thus, it would be difficult to physically imagine that regions of the product with such different temperatures could have the same thermal diffusivity, which justifies the idea that thermal diffusivity has local values as a function of temperature (Silva et al., 2011; Da Silva et al., 2018).

The physicochemical analysis of the thermally treated product is presented in Table 3. A comparison between Table 3 and Table 1 indicates that the thermal treatment did not significantly alter the chemical composition of the green coconut pulp. On the other hand, the results of the microbiological analysis indicated that there was no colony formation for total coliforms and salmonella (at  $45$  °C) for both fresh and pasteurized product. However, the counting for molds and yeasts resulted in  $17000$  CFU/g for the fresh product and only  $200$  CFU/g for the pasteurized green coconut pulp, indicating the efficiency of heat treatment.

#### **4. Conclusion**

In this article, five expressions were analyzed to represent thermal diffusivity of green coconut pulp: one expression with constant value and four increasing expressions, given as function of local temperature. The worst result to describe the heating process was obtained with constant thermal diffusivity, which showed a completely biased error distribution and inferior statistical indicators compared to the other four results. Three exponential expressions have shown good results to simulate heating of the product, but hyperbolic cosine used to

represent thermal diffusivity as function of the local temperature had superior statistical indicators and an error distribution that may be considered random, with absolute frequency versus error close to that of a Gaussian distribution. On the other hand, as it was observed, this study enabled a researcher to decide, through a simple simulation, the instant for removing the container with pulp from the hot water, in order to be immersed in a mixture of liquid water and ice for rapid cooling, which completes the thermal treatment, without the need for a new experiment. For the thermal treatment performed in a  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$  new container, the counting of molds and yeasts resulted in 17000 CFU/g for the fresh product and only 200 CFU/g for the pasteurized green coconut pulp, indicating the efficiency of heat treatment.

### **Acknowledgment**

The first author would like to thank CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) for supporting this study and for his research grant (Process Number 302480/2015-3).

### **Conflict of interest statement**

On behalf of all authors, the corresponding author states that there is no conflict of interest.

### **References**

Ansari, F.A., Abbas, K.A. & Jamilah, B. 2009. An optimized method for thermal diffusivity measurement of peeled off fruits and vegetables. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, 7(1), 5–8.

- ASHRAE, 2006. Refrigeration Handbook: Chapter 9 – Thermal properties of foods. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers; Atlanta, GA.
- Baïri, A., Laraqi, N., García de María, J.M., 2007. Determination of thermal diffusivity of foods using 1D Fourier cylindrical solution. *Journal of Food Engineering*, 78 (2), 669-675.
- Betta, G., Rinaldi, M., Barbanti, D., Massini, R., 2009. A quick method for thermal diffusivity estimation: application to several foods. *Journal of Food Engineering*, 91 (1), 34-41.
- Bligh, E.G., Dyer, W.J. 1959. A rapid method of total lipid extraction and purification. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 37(8), 911-917.
- Brasil. Ministério da Agricultura e do Abastecimento. Instrução Normativa nº 01/00, de 07/01/00. Regulamento técnico geral para fixação dos padrões de identidade e qualidade para polpa de fruta. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 10 jan. 2000, Seção I, p.54-58.
- Carbonera, L., Carciofi, B.M., Huber, E., Laurindo, J.B. 2003. Experimental determination of thermal diffusivity in commercial tomato paste. *Brazilian Journal of Food Technology*, 6(2), 285-290.
- Da Silva, W.P., Rodrigues, A.F., Silva, C.M.D.P.S., Gomes, J.P. 2017. Numerical approach to describe continuous and intermittent drying including the tempering period: Kinetics and spatial distribution of moisture. *Drying Technology*, 35(3), 272–280.
- Da Silva, W.P., Ataíde, J.S.P., Oliveira, M.E.G., Silva, C.M.D.P.S., Nunes, J.S. 2018. Heat transfer during pasteurization of fruit pulps stored in containers with arbitrary geometries obtained through revolution of flat areas. *Journal of Food Engineering*, 217(1), 58-67.

- FAOSTAT – Food and Agriculture Organization of The United Nations Statistics Division. 2014. Accessed on: November 03, 2017.
- Fricke, B.A., Becker, B.R. 2001. Evaluation of thermophysical property models for foods. *HVAC&R Research*, 7 (4), 311-330.
- Huang, L. 2007. Computer simulation of heat transfer during in-package pasteurization of beef frankfurters by hot water immersion. *Journal of Food Engineering*, 80(3), 839–849.
- IAL – Instituto Adolfo Lutz. 2008. Normas analíticas, métodos químicos e físicos para análises de alimentos. 4ª ed., 1ª ed. Digital, São Paulo.
- Korese, J.K., Sturm, B., Romána, F., Hensel, O. 2017. Simulation of transient heat transfer during cooling and heating of whole sweet potato (*Ipomoea batatas* (L). Lam.) roots under forced-air conditions. *Applied Thermal Engineering*, 111(1), 1171-117.
- Kurozawa, L.E., Park, K.J., Hubinger, M.D., Murr, F.E.X., Azoubel, P.M. 2008. Thermal conductivity and thermal diffusivity of papaya (*Carica papaya* L.) and cashew apple (*Anacardium occidentale* L.). *Brazilian Journal Food Technology*, 11(1), 78–85.
- Lavoyer, F.C.G., Gabas, A.L., Oliveira, W.P., Telis-Romero, J. 2013. Study of adsorption isotherms of green coconut pulp. *Food Science and Technology*, 33(1), 68-74.
- Lima, A.G.B., Queiroz, M.R., Nebra, A.S. 2002. Simultaneous moisture transport and shrinkage during drying of solids with ellipsoidal configuration. *Chemical Engineering Journal*, 86(1-2), 85–93.
- Mohamed, I.O., 2015. Determination of cold spot location for conduction-heated canned foods using an inverse approach. *International Journal of Food Processing and Technology*. 2 (1), 10-17.

- Muramatsu, Y., Greiby, I., Mishra, D.K., Dolan, K.D., 2017. Rapid inverse method to measure thermal diffusivity of low-moisture foods. *Journal of Food Science*. 82 (2), 420-428.
- Oke, M.O., Awonorin, S.O., Sanni, L.O., Akanbi, C.T., Abioye, A.O. 2007. Determination of some selected engineering properties of sweet potato cuts as function of the temperature. *Journal of Food Technology*, 5(1), 66–70.
- Patankar, S.V. 1980. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, Hemisphere Publishing Corporation, New York.
- Riedel, L. 1969. Measurement of thermal diffusivity on foodstuffs rich in water. *Kaltetechnik-Klimatisierung*, 21(11), 315-321.
- Santana, I.A., Ribeiro, E.P., Iguti, A.M. 2011. Evaluation of green coconut (*Cocos nucifera* L.) pulp for use as milk, fat and emulsifier replacer in ice cream, *Procedia Food Science* in 11<sup>th</sup> International Congress on Engineering and Food (ICEF11), 1447-1453.
- Silva, W.P. 2007. Transporte difusivo em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos. Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil.
- Silva, W.P., Silva, C.M.D.P.S., Farias, V.S.O., Silva, D.D.P.S. 2010. Calculation of the convective heat transfer coefficient and cooling kinetics of an individual fig fruit. *Heat Mass Transfer*, 46(3), 371–380.
- Silva, W.P., Silva, C.M.D.P.S., Lins, M.A.A. 2011. Determination of expressions for the thermal diffusivity of canned foodstuffs by the inverse method and numerical simulations of heat penetration. *International Journal of Food Science and Technology*, 46(4), 811–818.

- Silva, W.P., Silva, L.D., Farias, V.S.O., Silva, C.M.D.P.S. 2013. Water migration in clay slabs during drying: A three-dimensional numerical approach. *Ceramics International*, 39(4), 4017–4030.
- Silva, W.P., Silva, C.M.D.P.S., Lins, M.A.A., Costa, W.S., 2014. Optimal removal of experimental points to determine apparent thermal diffusivity of canned products. *International Journal of Food Engineering*, 10(2), 223-231.
- Silva, W.P., Silva, C.M.D.P.S., Souto, L.M., Moreira, I.S., Silva, E.C.O. 2018. Mathematical model for determining thermal properties of whole bananas with peel during the cooling process. *Journal of Food Engineering*, 227(1), 11-17.
- Tanaka, F., Imamura, K., Tanaka, F., Uchino, T. 2018. Determination of thermal diffusivity of persimmon flesh tissue using three-dimensional structure model based on X-ray computed tomography. *Journal of Food Engineering*, 221(1), 151-157.
- Ukrainczyk, N. 2009. Thermal diffusivity estimation using numerical inverse solution for 1D heat conduction. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(25-26), 5675–5681.
- Vanderzant, C., Splittstoesser, D.F. 1992. *Compendium of methods for the microbiological examination of foods*, 3th. Ed. American Public Health Association, Washington.

### Figure caption

Figure 1. Temperatures at the center of the parallelepiped-shaped container with green coconut pulp and at its internal wall.

Figure 2. Experimental data set and simulated curve for the transient process in the center of the container using the constant value (function number 1) for the thermal diffusivity, highlighting regions A and B.

Figure 3. Error distribution obtained with the simulation performed using the constant value for the thermal diffusivity obtained in this study (Table 2). The continuous red line represents the average value of the errors.

Figure 4. Experimental data set and simulated curve for the transient process in the center of the container using hyperbolic cosine (function number 5) to represent the thermal diffusivity as a function of the local temperature.

Figure 5. (a) Error distribution obtained for the simulation using the hyperbolic cosine (function 5) to represent local thermal diffusivity. The continuous red line represents the average value of the errors; (b) Histogram: frequency versus error.

Figure 6. Thermal diffusivity as function of the local temperature (function 5), its average value, and constant thermal diffusivity (function 1).

Figure 7. (a) Heating kinetics simulated in the center of the container ( $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ ) with green coconut pulp; (b) Temperature distribution ( $^{\circ}\text{C}$ ) in  $1/4$  of the central plane  $xy$  of the product at  $t = 250 \text{ s}$ .

**Figure 1**

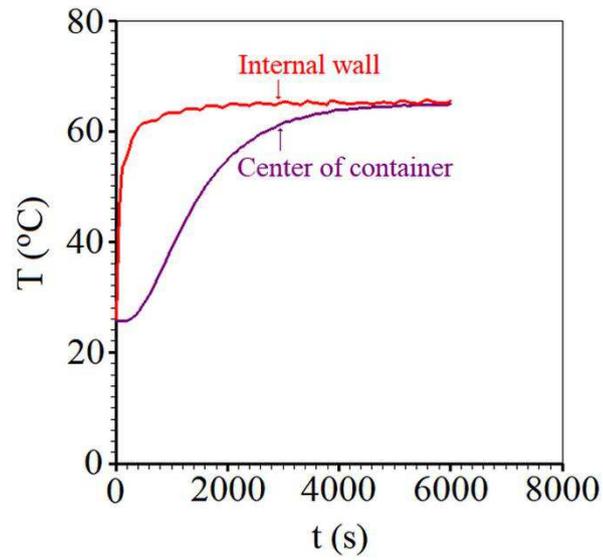


Figure 1. Temperatures at the center of the parallelepiped-shaped container with green coconut pulp and at its internal wall.

**Figure 2**

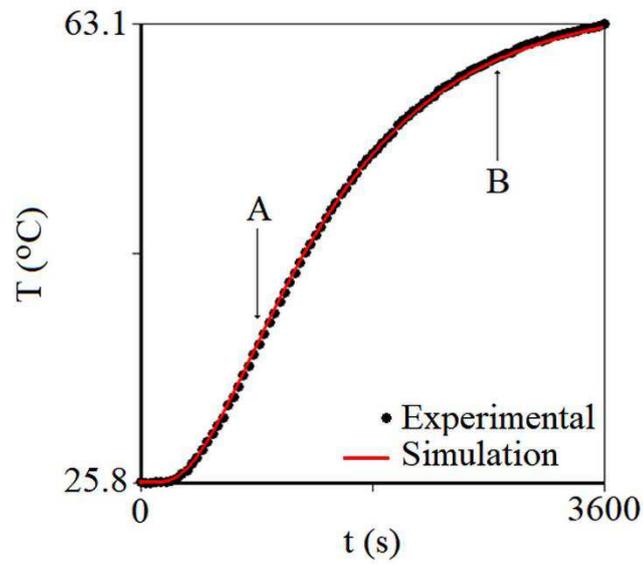


Figure 2. Experimental data set and simulated curve for the transient process in the center of the container using the constant value (function number 1) for the thermal diffusivity, highlighting regions A and B.

Figure 3

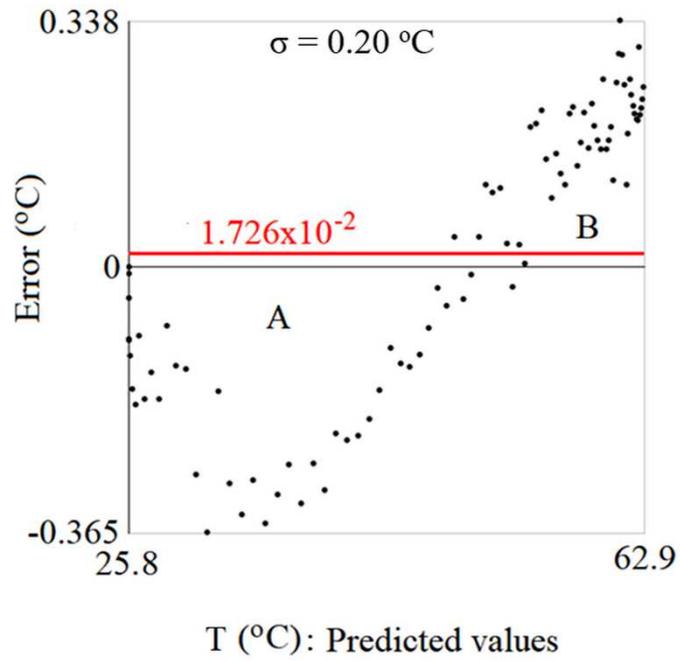


Figure 3. Error distribution obtained with the simulation performed using the constant value for the thermal diffusivity obtained in this study (Table 2). The continuous red line represents the average value of the errors.

**Figure 4**

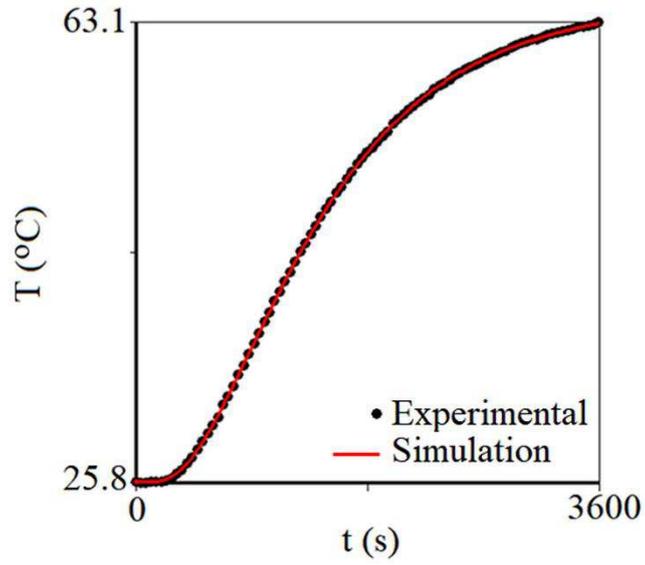
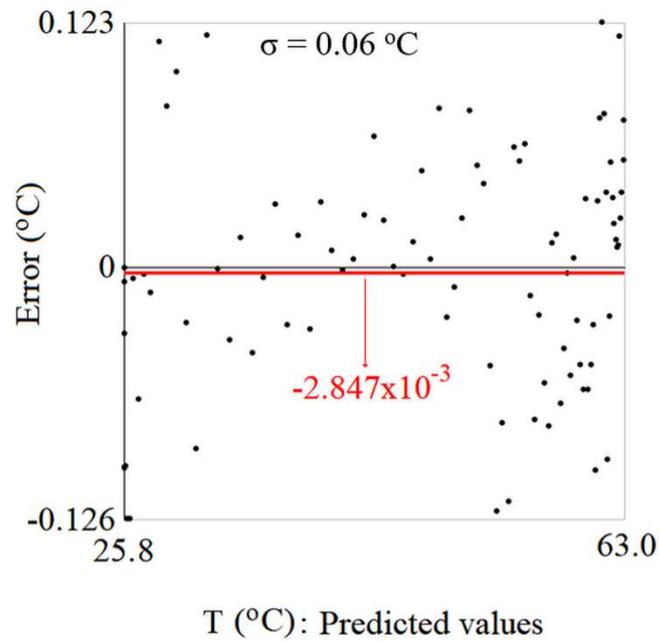
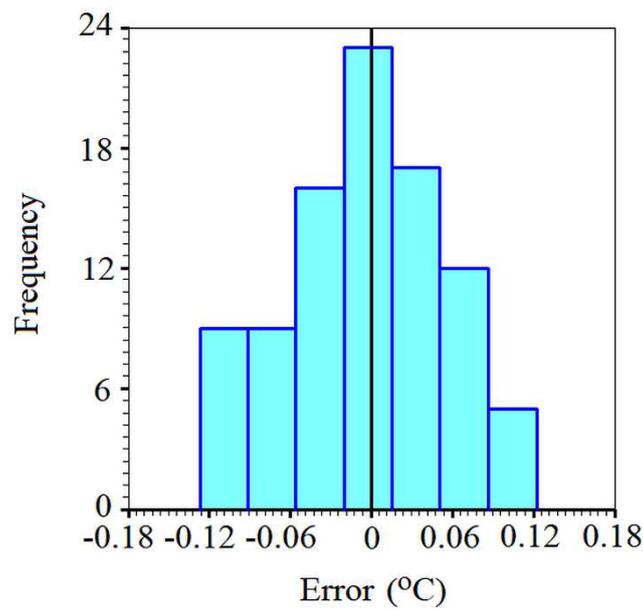


Figure 4. Experimental data set and simulated curve for the transient process in the center of the container using hyperbolic cosine (function number 5) to represent the thermal diffusivity as a function of the local temperature.

Figure 5



(a)



(b)

Figure 5. (a) Error distribution obtained for the simulation using the hyperbolic cosine (function 5) to represent local thermal diffusivity. The continuous red line represents the average value of the errors; (b) Histogram: frequency versus error.

**Figure 6**

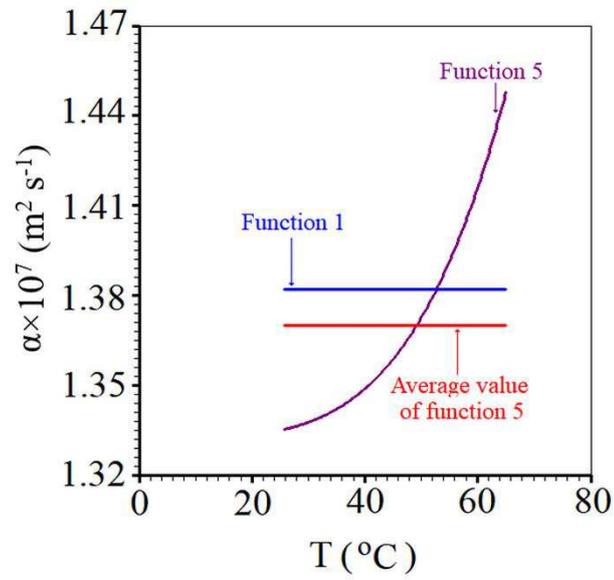


Figure 6. Thermal diffusivity as function of the local temperature (function 5), its average value, and constant thermal diffusivity (function 1).

Figure 7

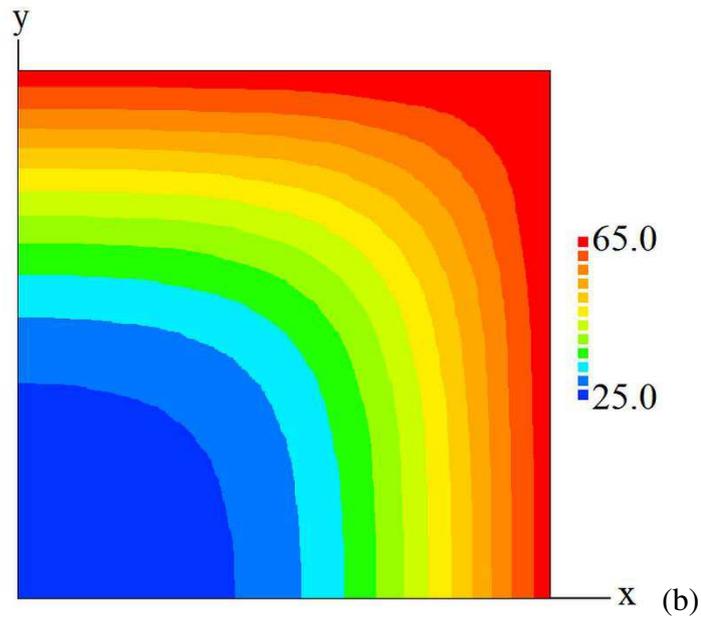
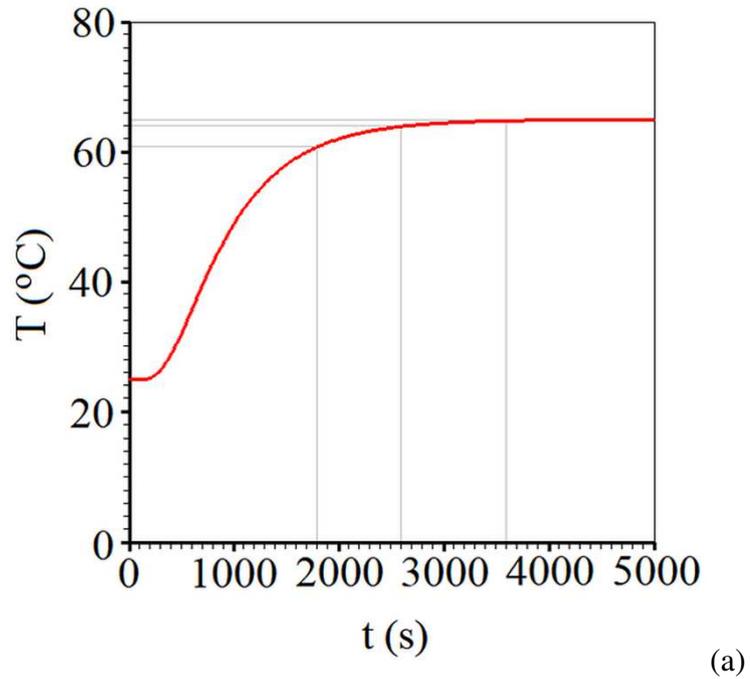


Figure 7. (a) Heating kinetics simulation in the center of the metallic container ( $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$ ) with green coconut pulp; (b) Temperature distribution ( $^{\circ}\text{C}$ ) in 1/4 of the central plane  $xy$  of the product at  $t = 250$  s.

**Table 1**

Table 1. Physicochemical parameters of fresh green coconut pulp.

Parameter	Average value
Moisture content (wet basis, g/100g)	85.0
Ashes (g/100g)	0.682
Lipids (g/100g)	5.43
Proteins (g/100g)	1.46
Fibers (g/100g)	0.970
Carbohydrates (g/100 g)	6.458

**Table 2**

Table 2. Optimizations: parameters obtained for several functions used to represent the thermal diffusivity of green coconut pulp as a function of the local temperature.

Function number	Thermal diffusivity	$a$	$b$ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$	$R^2$	$\chi^2$
1	$b$	-	$1.382 \times 10^{-7}$	0.999929	3.4781
2	$b \exp(a T^{1/2})$	$2.901 \times 10^{-2}$	$1.126 \times 10^{-7}$	0.999972	0.4592
3	$b \exp(a T)$	$2.150 \times 10^{-3}$	$1.241 \times 10^{-7}$	0.999974	0.4198
4	$b \exp(a T^2)$	$2.266 \times 10^{-5}$	$1.302 \times 10^{-7}$	0.999978	0.3626
5	$b \cosh(a T^2)$	$9.781 \times 10^{-5}$	$1.332 \times 10^{-7}$	0.999980	0.3188

**Table 3**

Table 3. Physicochemical parameters of pasteurized green coconut pulp.

Parameter	Average value
Moisture content (wet basis, g/100g)	85.1
Ashes (g/100g)	0.739
Lipids (g/100g)	5.20
Proteins (g/100g)	1.41
Fibers (g/100g)	1.10
Carbohydrates (g/100 g)	6.451

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AIRES, K. L. C. A. F. Estudo da desidratação osmótica e secagem convectiva de maçã cortada em forma de paralelepípedo usando uma solução numérica tridimensional da equação de difusão. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

ANVISA. AGENCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. Aprova o Regulamento Técnico referente à Informação Nutricional Complementar (declarações relacionadas ao conteúdo de nutrientes), constantes do anexo desta Portaria. Portaria nº 27, de 13 de janeiro de 1998. Disponível em:<[http://portal.anvisa.gov.br/documents/33916/394219/PORTARIA\\_27\\_1998.pdf/72db7422-ee47-4527-9071-859f1f7a5f29](http://portal.anvisa.gov.br/documents/33916/394219/PORTARIA_27_1998.pdf/72db7422-ee47-4527-9071-859f1f7a5f29) > Acessado em: 08 jul. 2019.

ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Aprova o Regulamento Técnico sobre Rotulagem Nutricional de Alimentos Embalados. Resolução RDC nº 360, de 23 de dezembro de 2003. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2003.

ANDRADE, A. Í. S. L. Estudos analíticos e em Pspice de transferência de calor em corpos cilíndricos. 2016. 228 p. Tese – Universidade Federal da Paraíba.

ARAÚJO, J. L.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIREDO, R. M. F. Propriedades termofísicas da polpa do cupuaçú com diferentes teores de sólidos. Ciência Agrotecnologia. Lavras, v.28, n.1, p. 126-134, 2004;

AROUCHA, E. M. M. Composição lipídica do albúmen do coco anão verde e anão vermelho em diferentes estádios de maturação. Caatinga, v. 18, n. 3, p. 143-147, 2005.

AOAC - Association of Official Analytical Chemists. Official Methods of Analysis of AOAC International. 17th. v. II., 2000.

BATISTA, A.G.; OLIVEIRA, B.D.; OLIVEIRA, M.A.; GUEDES, T.J.; SILVA, D.F.; PINTO, N.A.V.D. Parâmetros de qualidade de polpas de frutas congeladas: uma abordagem para produção do agronegócio familiar no Alto Vale do Jequitinhonha. Tecnologia e Ciência Agropecuária, João Pessoa, v.7, n.4, p.49-54, 2013.

BARROSO, T. Fortaleza ganha primeira unidade de beneficiamento de casca de coco verde do Nordeste. 2005. Disponível em: < <http://www.embrapa.br> >. Acesso: nov,2017.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. Transport phenomena. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2001.

BLIGH, E. G.; DYER, W. J. A rapid method of total lipid. Extraction and purification. Canadian Journal of Biochemistry and Physiology, Ottawa, v. 37, n. 8, p. 911-917, 1959.

BONTEMPO, M. O poder medicinal do coco e do óleo de coco extra-virgem. São Paulo: Alaúde Editorial, 2008.

BRASIL. Ministério Da Agricultura do Abastecimento. Instrução Normativa nº 01/00, de 07/01/00. Regulamento técnico geral para fixação dos padrões de identidade e qualidade para polpa de fruta. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 10 jan. 2000, Seção I, p.54-58.

BRASIL, A. S.; SIGARINI, K. S.; PARDINHO, F. C.; FARIA, R. A. P. G.; SIQUEIRA, N. F. M. P. Evaluation of physicochemical quality of frozen fruit pulp marketed in the city of Cuiabá-MT. *Revista Brasileira de Fruticultura*, n. 38(1), p. 167-175, 2016.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução normativa Nº 01, de 7 de janeiro de 2000. Aprova o Regulamento Técnico Geral para fixação dos Padrões de Identidade e Qualidade para Polpa de Fruta (e Suco de Fruta). Brasília, DF, 2000.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária (DISPOA). Instrução Normativa nº 62, de 26 de agosto de 2003. Oficializa os Métodos Analíticos Oficiais para Análises Microbiológicas para Controle de Produtos de Origem Animal e Água. *Diário Oficial da União*, Brasília, 26 de agosto de 2003. Seção 1.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 12, de 02/01/2001. Regulamento Técnico sobre padrões microbiológicos para alimentos. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 10 jan. 2001, Seção I, p. 45-53.

CADÉ, M.A.; NASCIMENTO, J.J.S.; LIMA, A.G.B. Secagem de tijolos cerâmicos vazados: uma aproximação por volumes finitos, *Revista Matéria*, v. 10, n. 3, pp. 443-453, 2005.

CERESER, N. D.; COSTA, F. M. R.; JUNIOR, O. D. R.; SILVA, D. A. R.; SPEROTTO, V. R. Botulismo de origem alimentar. *Ciência Rural*, v.38, p.280-287, 2008.

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

COSTA, W. S. Descrição da transferência de calor em produtos alimentares submetidos a processos com condição de contorno variável. 2015. 296 p. Tese – Universidade Federal de Campina Grande.

DANTAS, R. L.; ROCHA, A. P. T.; ARAÚJO, A. S.; RODRIGUES, M. S. A.; MARANHÃO, T. K. L. Qualidade microbiológica de polpa de frutas comercializadas na cidade de Campina Grande/PB. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.14, n.2, p.125-130, 2012.

DENYS, S.; PIETERS, J. G.; DEWETTINCK, K. Computational fluid dynamics analysis of combined conductive and convective heat transfer in model eggs. Journal of Food Engineering, 63(3), p.281– 290. 2003.

DUARTE, G. P. Capacidade emulsificante da polpa do coco verde e substituição do ovo em maionese. Congresso Nacional de Iniciação Científica, 14. 2014.

ELES-MARTÍNEZ, P.; MARTÍN-BELLOSO, O. Effects of high intensity pulsed electric field processing conditions on vitamin C and antioxidant capacity of orange juice and gazpacho, a cold vegetable soup. Food Chemistry., v.102, n.1, p.201-209, 2007.

FAO 2017. World Production. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

FAOSTAT. Food and Agriculture Organization of The United Nations Statistics Division. 2014. Disponível em: Acesso em: 03 nov. 2017.

FELLOWS, P. Tecnología del procesado de los alimentos: principios y prácticas. Zaragoza: Acribia, 1994, 549p.

GALVÃO, I. B. Estudo teórico experimental de secagens contínua e intermitente de pedaços de maçã cortadas na forma de paralelepípedo. 2017. 170 p. Tese – Universidade Federal de Campina Grande.

GONDIM, A. M.; MOURA, V. M. F.; DANTAS, S.A.; MEDEIROS, R. L. S.; SANTOS, K. M. Composição Centesimal e de minerais em cascas de frutas. *Ciência Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 25, n. 4, p. 825-827, 2005.

GUTIERREZ, C. C. G. C. (2008). Distribuição do tempo de residência em processo de pasteurização com trocador de calor a placas, 97p. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Escola de São Paulo, Departamento de Engenharia Química.

IAL - INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas analíticas, métodos químicos e físicos para análises de alimentos. 4ª ed., 1ª ed. Digital, São Paulo: IAL, 2008. 1020 p.

IBGE/CEPAGRO, 2010. Disponível em: <  
[http://www.ibge.gov.br/servidor\\_arquivos\\_est](http://www.ibge.gov.br/servidor_arquivos_est) >. Acesso: nov,2017.

IGUTTI, A. M. PEREIRA, A. C. I.; FABIANO, L.; SILVA, R. A. F.; RIBEIRO, E. P. Substitution of ingredients by green coconut (*Cocos nucifera* L.) pulp in ice cream formulation. *Procedia Food Science*, v. 1, p. 1610-1617, 2011.

INCROPERA, F.P., BERGMAN, T.L., DEWITT, D.P. Fundamentos de transferência de calor e de massa, 6ª ed., Editora LTC, Rio de Janeiro-RJ, 643p. 2008.

LAVOYER, F. C. G.; GABAS, A. L.; OLIVEIRA, W. P.; TELIS-ROMERO, J. Study of adsorption isotherms of green coconut pulp. *Food Science and Technology*, v. 33, n. 1, p. 68-74. 2013.

LOPEZ JUNIOR, G. B.; SCHULZ H. E. Análise de condições de contorno para a quantificação da transferência de massa unidimensional em regime turbulento, XXXIV Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional, p. 391-397. 2012.

MALISKA, C. R. Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional. Rio de Janeiro: LTC Editora S. A., 2012.

MARCHI, C. H. Capítulo 1: Introdução. Curitiba: UFPR, 2002. Disponível em [http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM797/Prof\\_Marchi/apostila/](http://servidor.demec.ufpr.br/disciplinas/TM797/Prof_Marchi/apostila/)

MARIANI, V.C.; AMARANTE, A.C.C.; COELHO, L.S. Estimation of apparent thermal conductivity of carrot pureé during freezing using inverse problem. International Journal of Food Science and Technology, v.44, p.1292–1303, 2009.

MARTINS, V. B. Perfil sensorial de suco tropical de cupuaçu (*Theobroma grandiflorum Schum*) com valor calórico reduzido. 2008. 141 p. Tese (Doutorado em Alimentos e Nutrição) – Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

MARTINS, C. R.; JESUS JUNIOR, L. A. Evolução da produção de coco no Brasil e o comércio internacional: panorama 2010. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2011. 28 p. Documentos 164.

MATHAI, P. M. Coir. In: FRANCK, R. R. Bast and other plant fibers. The Textile Institute. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2005. p. 275-313.

MEDEIROS, M. S. ; MEDEIROS, P. V. S. ; SANTOS, D. C. ; LEITE, D. D. F. ; SILVA, W. P. ; SAPUCAY, M. J. L. C. . Caracterização física e química da polpa do coco verde

anão em diferentes estádios de maturação. In: II Encontro Nacional da Agroindústria, Bananeiras-PB. Desafios da Agroindústria no Brasil. Campina Grande-PB: IBEA, 2016. v. CD-ROM. p. 486-489. 2016.

MEDEIROS, M. S.; LEITE, D. D. F.; SANTOS, D. C.; MEDEIROS, P. V. S.; QUEIROZ, A. J. M. Composição mineral do resíduo de beterraba in natura e liofilizado. *Higiene Alimentar*, v. 31, p. 1484-1488, 2017.

MEDINA, J. C. Processamento: Cultura - Variedades; Produtos, Características e Utilização - Bebidas Destiladas - Água de coco - Da Cultura ao Processamento e Comercialização - Série Frutas Tropicais no5, ITAL: São Paulo, p. 248-252, 1980.

MUSSATTO, S. I.; BALLESTEROS, L. F.; SÍLVIA, M.; TEIXEIRA, J. A. Use of agro-industrial wastes in solid-state fermentation processes. In Yeow, S.K., Xinxin, G., *Industrial Waste*, Rijeka, Croatia, p. 121-140, 2012.

MUNSON, B. R., YOUNG, D. F., OKIISHI, T. H. Fundamentos da Mecânica dos Fluidos – tradução da 2ª edição americana, V.1., Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo Brasil, 418p., 1997;

NEVES, E. E.; BEZERRA, Y. S. D. F. Métodos dos volumes finitos: uma abordagem prática e aplicação em problemas de difusão térmica com MatLab. *Carpe Diem: Revista Cultural e Científica da UNIFACEX*, Natal, v.11, n. 11, 2013. p. 28-45.

NEVES, L. C. F. Resfriamento congelamento e estocagem de alimentos. Instituto Brasileiro do Frio, 1991. 175 p.

OLIVEIRA, E. A.; JUNQUEIRA, S. F.; SOARES, F. O.; AZEVEDO, L. C.; MASCARENHAS, R. J. Caracterização físico-química do albúmen sólido do coco (*cocos nucifera*), variedade híbrida. IF - Sertão Pernambucano, 2010.

OMWENGA, E. I. Competências Básicas em TIC 2. 2006. Disponível em: <<https://oer.avu.org/bitstream/handle/123456789/200/Texto%20baseado%20em%20ferramentas%20de%20produtividade.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 06 mar. 2019.

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

PASSOS, E. E. M. Árvore do conhecimento coco. 2006. Disponível em: <<http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/coco/arvore/CONT000gix1kou302wx5ok05vadr1lvrngh5.html>>. Acesso em: 06 mar. 2019.

PEREIRA, J.M.A.T.; OLIVEIRA, K.A.M.; SOARES, N.F.F.; GONÇALVES, M.P.J.C.; PINTO, C.L.O.; FONTES, E.A.F. Avaliação da qualidade físico-química, microbiológica e microscópica de polpas de frutas congeladas comercializadas na cidade de Viçosa-MG, Alimentos e Nutrição, v.17, n.4, p.437-442, 2006.

ROSA, M. F.; SANTOS, J. S. S.; MONTENEGRO, A. A. T.; ABREU, F. A. P.; ARAÚJO, F. B. S., NORÕES, E. R. Caracterização do pó da casca de coco verde usado como substrato agrícola. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 6p. (Comunicado Técnico, 5). 2001.

SANTANA, I. A.; RIBEIRO, E. P.; IGUTI, A. M. Evaluation of green coconut (*Cocos nucifera* L.) pulp for use as milk, fat and emulsifier replacer in ice cream, Procedia Food Science in 11th International Congress on Engineering and Food (ICEF11), pp. 1447-1453, 2011.

SANTANA, I. A. (2012) Avaliação química e funcional de polpa de coco verde e aplicação em gelado comestível. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia. São Caetano do Sul.

SANTOS, C.A.A.; COELHO, A. F. S.; CARREIRO, S. C. Avaliação microbiológica de polpas de frutas congeladas. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, v. 4, p.913-915, 2008.

SANTOSO, U.; KUBO, K.; OTA, T.; TADOKORO, T.; MAEKAWA, A. Nutrient composition of kopyor coconuts (*Cocos nucifera* L.). *Food Chem.* 57, 299–304, 1996.

SCOTT, W. J. Water relation of food spoilage microorganisms. *Advanced Food Research*, Valencia, v. 7, p 83-127, 1957.

SENHORAS, E. M. 2005. Oportunidades da Cadeia Agroindustrial do Coco Verde – Do coco nada se perde, tudo se desfruta. *Revista Urutágua*, UEM, 2005. <http://www.urutagua.uem.br>. Acesso: nov,2017.

SILVA, W. P. Transporte difusivo em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas. 263 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, PB, Brasil, 2007.

SILVA, A. S.; ALMEIDA, F.A.C.; SILVA, F.H.; DANTAS, H.J.; LIMA, E.E. Desidratação e efeito de pré-tratamentos no extrato seco do pimentão verde. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, v. 10, n. 1, p. 27-34, 2008.

SILVA, W. P. Curso I (Volumes Finitos I e II, Power Point). Apresentações em PowerPoint (2009), online. Disponível em:

<http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/TCMFC.htm>. Acesso 29 de abril de 2019.

SLATTERY, J. C. Advanced transport phenomena. Cambridge University Press, 1999.

SOARES, G.L.; DAIUTO, É.R.; MENDONÇA, V.Z.; VIETES, R.L. Caracterização físico-química de polpa de coco verde submetida ao congelamento lento e rápido. *Nativa* v. 3, p. 185-190, 2015.

SOUZA, N. A. DE; JASMIN, J. Crescimento de Singônio com Diferentes Tutores e Substratos à Base de Mesocarpo do Coco. *Horticultura Brasileira*, v. 22, n.1, p. 39-44. 2004.

SOUZA, R.M. O método dos elementos finitos aplicado ao problema de condução de calor. núcleo de instrumentação e computação aplicada à engenharia. 2003. Universidade Federal do Pará.

TACO. Tabela Brasileira de Composição de Alimentos. 4 ed. Revisada e ampliada. Campinas, SP: UNICAMP, 2011. Disponível em: < [http://www.cfn.org.br/wp-content/uploads/2017/03/taco\\_4\\_edicao\\_ampliada\\_e\\_revisada.pdf](http://www.cfn.org.br/wp-content/uploads/2017/03/taco_4_edicao_ampliada_e_revisada.pdf). Acesso em: 18 de abril de 2019.

TEIXEIRA, N.S. Aproveitamento do Albúmen Sólido do Coco Verde para Obtenção de *Smoothie* de Frutas Tropicais. Dissertação de Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro Instituto de Tecnologia. 2018.

TEIXEIRA, N. S.; TORREZAN, R.; FREITAS-SÁ, D.D.G.C.; PONTES, S.M.; RIBEIRO, L. O.; CABRAL, L. M. C.; MATTA, V. M. Development of a fruit smoothie with solid albumen of green coconut. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 49, n. 1, e20180110, 2019.

VAN DAM, J. E. G. Improvement of drying, softening, bleaching and dyeing coir fibre/yarn and printing coir floor coverings. Wageningen: FAO CFC, 2002. 61 p. Artigo Técnico 6.

VASCONCELOS, M.A.S.; MELO FILHO, A.B. Conservação de Alimentos. UFRN. 2010. Disponível em: <[http://proedu.rnp.br/bitstream/handle/123456789/316/Cons\\_Alimentos.pdf?sequence=2](http://proedu.rnp.br/bitstream/handle/123456789/316/Cons_Alimentos.pdf?sequence=2)>. Acesso em: 06 mar. 2019.

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