



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE EDUCAÇÃO E SAÚDE  
UNIDADE ACADÊMICA DE FÍSICA E MATEMÁTICA  
Curso de Graduação em Licenciatura em Física

João Carlos Rocha de Araújo

**TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE O PROCESSAMENTO  
TÉRMICO EM POLPA DE FRUTA ARMAZENADA EM RECIPIENTES  
DE FORMA CILÍNDRICA**

Cuité-PB

2016

João Carlos Rocha de Araújo

**TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE O PROCESSAMENTO  
TÉRMICO EM POLPA DE FRUTA ARMAZENADA EM RECIPIENTES  
DE FORMA CILÍNDRICA**

TCC apresentado ao curso Graduação em Licenciatura em Física do Centro de Educação e Saúde da Universidade Federal de Campina Grande em cumprimento às exigências do Componente Curricular Trabalho Acadêmico Orientado, para obtenção do grau de Licenciado em Física.

Orientador: Jair Stefanini Pereira de Ataíde  
Orientadora: Vera Solange de Oliveira Farias

Cuité-PB

2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA NA FONTE  
Responsabilidade Msc. Jesiel Ferreira Gomes – CRB 15 – 256

A663t Araújo, João Carlos Rocha de.

Transferência de calor durante o processamento térmico em polpa de fruta armazenada em recipientes de forma cilíndrica. / João Carlos Rocha de Araújo. – Cuité: CES, 2016.

77 fl.

Monografia (Curso de Licenciatura em Física) – Centro de Educação e Saúde / UFCG, 2016.

Orientador: Jair Stefanini Pereira de Ataíde.

Coorientadora: Vera Solange de Oliveira Farias.

1. Difusividade térmica. 2. Equação de difusão. 3. Recipiente cilíndrico. 4. Polpa de manga. I. Título.

Biblioteca do CES

CDU 536.6/.7

João Carlos Rocha de Araújo

**TRANSFERÊNCIA DE CALOR DURANTE O PROCESSAMENTO  
TÉRMICO EM POLPA DE FRUTA ARMAZENADA EM RECIPIENTES  
DE FORMA CILÍNDRICA**

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso submetida à banca examinadora como parte dos requisitos necessários a obtenção do grau de Graduação em Licenciatura em Física.

A citação de qualquer trecho deste trabalho é permitida, desde que seja feita de conformidade com as normas de ética científica.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) aprovado em \_\_\_\_ / \_\_\_\_ / \_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. Jair Stefanini Pereira de Ataíde  
(UFCG /CES/ UAFM - Orientador)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr. Vera Solange de Oliveira Farias  
(UFCG /CES/ UAFM - Orientadora)

---

Prof. Dr. Wilton Pereira da Silva  
(UFCG /CCT/ UAF- Membro)

---

Prof. Dr. Waldemir Soares da Costa  
(UFCG /CCT/ UAF- Membro)

*“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.*

Marthin Luther King.

*Com todo amor e carinho dedico esse trabalho às pessoas mais importantes da minha vida: minha mãe Vitória, meu avô João e minha avó Rita, que me deram suporte e forças para realizá-lo.*

# Agradecimentos

Agradeço a todos que contribuíram para conclusão desse trabalho, em especial:

Primeiramente a Deus, por ter me guiado ao longo desse trabalho e me dar forças para concluí-lo com êxito.

A todos da minha família, principalmente aos meus pais dos quais cito minha mãe Vitória, meu avô João e minha vó Rita. Como sempre digo: “Não teria chegado até aqui se não fosse por vocês”.

A meus irmãos Jorge, Fábio, Kenned e Cláudio meu irmão mais velho, o qual me presenteou com meu primeiro computador que uso até hoje.

A meus tios César, Francisca e Adriana por sempre terem me incentivado a continuar estudando.

A meu pai Manoel Ferreira que apesar da distância entre nós, também me ajudou ao longo dessa trajetória.

A Sabrina Souza pelo constante apoio que me deu durante a reta final do curso.

A meus orientadores Jair Stefanini e Vera Solange a quem quero expressar toda minha admiração e gratidão pela qualidade das informações transmitidas durante a realização deste trabalho, pela amizade, pela confiança, pelo estímulo, pelo compromisso e pela disponibilidade que nunca faltaram comigo.

Aos membros da Banca Examinadora por disponibilizarem tempo na apreciação deste trabalho e pelas sugestões que, seguramente, contribuirão para a versão final deste.

A meu ex - coordenador e professor Fábio Ferreira por todos os ensinamentos, conselhos, afeto e companheirismo.

A todos os professores do CES, em especial ao professor Luiz Terrazos, professor da disciplina do tcc e orientador de outros projetos o qual fiz parte.

A Waldemir pelo empréstimo dos equipamentos para realização dos experimentos.

Aos meus amigos da Residência Universitária, Adriano Oliveira, Acácio Silveira, Aluisio Buriti (Lulu), Francinildo Macedo, Gilson (Sucuri), Erick Bernard, Joelson Santos, Joeudes Queiroz, Josevandro Barros, João Crispim, Kauan Gerald, Robson Medeiros, Maciel Araújo, Manoel Messias, Pedro Evanilson, Tiago Bastos (o Índio), Mikael Albuquerque, Marquinhos (risadinha), Israel Lazaro, Victor Medeiros, Willian Santos (Vulgo Negão): criamos uma amizade que vai ser além da faculdade e vamos ter sempre momentos bons.

Aos meus amigos de minha querida cidade de Santa Cruz-RN em especial a Beto Potiguar, Kris Ewerton (Missanga), Warley Ferreira (Tesouro), Leandro Oliveira, Alexandre Araújo, Flaviery Madson, Alusca Costa, Wyleanne Ferreira e Willian Wendler. Vocês são muito especiais para mim.

Aos amigos de curso Alex Gustavo, Alex. S. Santos (Ligeirinho), Clésio Mota (o Tigrão), Érika Suely, Edson Oliveira, Jair Andrade, Jeancarlo Meira, João Carlos Piniheiro, Johnyefeson Oliveira, Marconi Junior, Marcus Lima, Pablo Lima, Rayza Godim, Robson Venâncio, Tarcísio Torres, Tiago Araújo e Zé Roberto.

À Escola Estadual Orlando Venâncio dos Santos, por ter me dado a oportunidade de estagiar e sempre me receber de portas abertas no projeto PIBID.

A todos os amigos do PIBID em especial a meu supervisor Jabes e ao coordenador João Batista.

Enfim agradeço a todos que contribuíram de maneira direta ou indireta para que esse meu sonho fosse realizado. Obrigado !



## Resumo

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento da transferência de calor em polpa de manga acondicionada em recipientes cilíndricos. O estudo apresenta a solução para a equação de difusão com condição de contorno de primeiro tipo constante. Para isto a equação de difusão unidimensional foi discretizada usando o método de volumes finitos, com uma formulação totalmente implícita, considerando os casos de um cilindro infinito. O sistema físico experimental consistiu de quatro recipientes cilíndricos de alumínio de dimensões diferentes, que foram preenchidos com polpa de manga para a qual se estimou a difusividade térmica. O software utilizado para as otimizações foi “*Infinite Cylinder*” desenvolvido por Silva (2010). Os resultados obtidos para as difusividades térmica quando comparados aos valores da literatura, mostraram-se coerentes, principalmente quando se utilizou o cilindro com o diâmetro maior. Mostraram, também, que através de simulações é possível precisar o tempo adequado de tratamento térmico, tornando desnecessária a realização de experimentos a cada vez que um novo recipiente cilíndrico for utilizado para armazenar o produto.

**Palavras-chave:** Difusividade térmica, equação de difusão, recipiente cilíndrico, polpa de manga, otimização.

## Abstract

This work aims to study the heat transfer behavior of mango pulp packed in cylindrical containers. The study presents the solution for the diffusion equation with constant first kind boundary condition. This one-dimensional diffusion equation was discretized using the finite volume method with a fully implicit formulation, considering the case of an infinite cylinder. The experimental treasury system consisted of four cylindrical containers of different dimensions aluminum, which were filled with mango pulp for which the thermal diffusivity is estimated. The software used for the optimization was “*Infinite Cylinder*” developed by Silva (2010). The results obtained for the thermal diffusivity when compared to literature values, proved to be consistent, especially when using the cylinder with the larger diameter. They also showed that using simulations is possible to determine the timing of heat treatment, obviating the realization of experiments each time a new cylindrical container is used to store the product.

**Keywords:** Thermal diffusivity, diffusion equation, cylindrical container, mango pulp, optimization.

---

# Sumário

<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Figuras</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo Geral . . . . .	2
1.2 Objetivos específicos . . . . .	3
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1 Aspectos gerais . . . . .	5
2.2 Conservação de Alimentos . . . . .	5
2.2.1 Conservação pelo frio . . . . .	6
2.2.2 Conservação por fermentação . . . . .	7
2.2.3 Conservação pelo controle de umidade . . . . .	7
2.2.4 Conservação pelo calor . . . . .	8
2.3 Transferência de energia térmica . . . . .	10
2.3.1 Condução . . . . .	11
2.3.2 Convecção . . . . .	11
2.3.3 Radiação . . . . .	11
2.4 A equação do calor e sua dedução . . . . .	11
2.5 O problema geral de transporte e a equação de difusão . . . . .	14
2.6 Soluções para a equação de difusão . . . . .	16
2.6.1 Soluções analíticas . . . . .	17
2.6.2 Soluções numéricas . . . . .	19
2.7 Fruto pesquisado . . . . .	22
2.7.1 Manga . . . . .	23

<b>3</b>	<b> Materiais e Métodos</b>	<b>25</b>
<b>PARTE A -</b>	<b> MODELAGEM MATEMÁTICA</b>	<b>25</b>
3.1	Equação de difusão em coordenadas cilíndricas . . . . .	25
3.2	Solução numérica para a condição de contorno de primeiro tipo . . . . .	27
3.2.1	Volumes internos . . . . .	29
3.2.2	Volume de controle 1 . . . . .	30
3.2.3	Volume de controle N . . . . .	31
3.3	Métodos de resolução de sistemas lineares . . . . .	32
3.4	Parâmetro $\Gamma^\Phi$ . . . . .	33
3.5	Algoritmo de otimização usando solução numérica . . . . .	33
<b>PARTE B -</b>	<b> METODOLOGIA EXPERIMENTAL</b>	<b>36</b>
3.6	Matéria prima . . . . .	36
3.7	Preparo das Amostras . . . . .	36
3.8	Confecção dos recipientes . . . . .	37
3.9	Procedimentos experimentais . . . . .	38
3.10	O pasteurizador . . . . .	40
3.11	Tratamento térmico . . . . .	41
<b>4</b>	<b> Resultados e Discussões</b>	<b>44</b>
4.1	Considerações preliminares . . . . .	44
4.2	Penetração do calor na polpa de manga . . . . .	44
4.3	Resultado experimentais . . . . .	47
4.4	A penetração do calor . . . . .	47
4.5	Resultados das otimizações . . . . .	48
4.5.1	Experiência com recipiente C1: diâmetro (38.30 mm); comprimento (200 mm). . . . .	48
4.5.2	Experiência com recipiente C2: diâmetro (31.30 mm); comprimento (160 mm). . . . .	50
4.5.3	Experiência com o recipiente C3: diâmetro (31.30 mm); comprimento (80 mm). . . . .	52
4.5.4	Experiência com o recipiente C4: diâmetro (25.50 mm); comprimento (65 mm). . . . .	54

4.6	Discussão sobre os resultados das otimizações . . . . .	55
4.7	Simulação com os dados experimentais . . . . .	58
4.7.1	Simulação com os dados da experiência C1 . . . . .	58
4.7.2	Simulação com os dados da experiência C2 . . . . .	58
4.7.3	Simulação com os dados da experiência C3 . . . . .	59
4.7.4	Simulação com os dados da experiência C4 . . . . .	60
4.8	Discussão sobre os resultados das simulações . . . . .	60
<b>5</b>	<b>Conclusões e Sugestões</b>	<b>61</b>
5.1	Considerações preliminares . . . . .	61
5.2	Conclusões . . . . .	61
5.3	Sugestões para futuros trabalhos de pesquisa . . . . .	63
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>64</b>
	<b>Apêndice</b>	<b>70</b>

## Lista de Tabelas

4.1	Tamanho dos recipientes C1, C2, C3 e C4 . . . . .	44
4.2	Arquivo com dados informados para otimização da experiência C1 . . . . .	48
4.3	Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente na experiência C1, do qui-quadrado e do coeficiente de determinação. . . . .	49
4.4	Arquivo com dados informados para otimização da experiência C2 . . . . .	50
4.5	Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente na experiência C2, do qui-quadrado e do coeficiente de determinação. . . . .	50
4.6	Arquivo com dados informados para otimização da experiência C3 . . . . .	52
4.7	Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente na experiência C3, do qui-quadrado e do coeficiente de determinação. . . . .	52
4.8	Arquivo com dados informados para otimização da experiência C4 . . . . .	54
4.9	Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente na experiência C4, do qui-quadrado e do coeficiente de determinação. . . . .	54
1	Temperaturas experimentais com o sensor no centro do recipiente para o cilindro 1. . . . .	70
2	Temperaturas experimentais com o sensor no centro do recipiente para o cilindro 2. . . . .	71
3	Temperaturas experimentais com o sensor no centro do recipiente para o cilindro 3. . . . .	73
4	Temperaturas experimentais com o sensor no centro do recipiente para o cilindro 4. . . . .	75

---

## Lista de Figuras

2.1	Volume de controle de forma arbitrária . . . . .	12
2.2	Fluxo de calor em um volume elementar em coordenadas cartesianas . . . . .	12
2.3	Manga - matéria-prima utilizada no experimento. . . . .	24
3.1	Exemplo de um cilindro infinito. . . . .	26
3.2	(a) Malha unidimensional; (b) Fatia simétrica. . . . .	27
3.3	Elemento da malha unidimensional. . . . .	28
3.4	Tipos de Volumes de controle para o caso unidimensional. . . . .	28
3.5	Volume de controle interno. . . . .	29
3.6	Primeiro volume de controle. . . . .	30
3.7	Volume de controle no contorno da malha unidimensional. . . . .	31
3.8	Mostra as vinte expressões de difusividade disponíveis no software. . . . .	35
3.9	Tela principal do software “Infinite Cylinder”. . . . .	36
3.10	(a) Multiprocessador utilizado na obtenção da polpa; (b) Polpa acondicio- nada em recipiente plástico de 200 ml com tampa. . . . .	37
3.11	Recipientes que foram utilizados para acomodar a polpa no processo de aquecimento. . . . .	38
3.12	Paquímetro universal PANTEC. . . . .	38
3.13	(a) Polpa inserida no recipiente; (b) Recipiente pronto para o tratamento térmico. . . . .	39
3.14	Termômetro digital. . . . .	39
3.15	Esquema montado para captar os dados do termômetro e do cronômetro. . . . .	40
3.16	Pasteurizador e processador Etiel PP - 30 L. . . . .	41
3.17	A polpa de manga em processo de aquecimento. . . . .	42
3.18	Termômetro de espeto. . . . .	43

4.1	Gráficos da temperatura no centro geométrico do recipiente obtida dos dados do aquecimento para os experimentos: (a) C1; (b) C2; (c) C3 e (d) C4. . . . .	45
4.2	Comparação entre as curvas de aquecimento no centro geométrico dos recipientes C1, C2, C3 e C4. . . . .	46
4.3	Comparação entre as curvas de aquecimento no centro geométrico dos recipientes com diâmetros iguais C2 e C3. . . . .	47
4.4	Gráfico representando a penetração de calor a partir da simulação numérica e os pontos obtidos experimentalmente no centro do recipiente C1. . . . .	49
4.5	Gráfico representando a penetração de calor a partir da simulação numérica e os pontos obtidos experimentalmente no centro do recipiente C2. . . . .	51
4.6	Gráfico representando a penetração de calor a partir da simulação numérica e os pontos obtidos experimentalmente no centro do recipiente C3. . . . .	53
4.7	Gráfico representando a penetração de calor a partir da simulação numérica e os pontos obtidos experimentalmente no centro do recipiente C4. . . . .	55
4.8	distribuição das temperaturas no interior da polpa de manga nos instantes: (a) 5 min; (b) 10 min; (c) 15 min; (d) 25 min; (e) 30 min. . . . .	58
4.9	distribuição das temperaturas no interior da polpa de manga nos instantes: (a) 5 min; (b) 10 min; (c) 15 min; (d) 25 min; (e) 30 min. . . . .	59
4.10	distribuição das temperaturas no interior da polpa de manga nos instantes: (a) 5 min; (b) 10 min; (c) 15 min; (d) 25 min; (e) 30 min. . . . .	59
4.11	distribuição das temperaturas no interior da polpa de manga nos instantes: (a) 5 min; (b) 10 min; (c) 15 min; (d) 25 min; (e) 30 min. . . . .	60



# Capítulo 1

## Introdução

A produção e comercialização de produtos alimentícios explorados da agricultura, sempre foi alvo da economia mundial e contribuinte para o PIB (Produto Interno Bruto) do País. Assim como os alimentos originários da atividade zootécnica, a produção de vegetais requer técnicas agronômicas visando o melhor rendimento e qualidade do produto. Neste processo, para que os alimentos mantenham sua qualidade, são necessárias técnicas de conservação e transformação (OETTERER, 2006), através das quais se possa conhecer melhor suas propriedades físicas e manter a qualidade final dos produtos. Essas técnicas de conservação têm por objetivo principal a destruição dos micro-organismos, impedindo toda e qualquer ação demandada por esses agentes, por enzimas ou por causas deteriorantes (GAVA, 2009). Dentre os métodos de conservação utilizados na indústria será enfatizado o método de conservação pelo calor que é alvo deste trabalho.

A transferência de calor é um dos métodos mais antigos utilizados para a conservação de alimentos. Esse fenômeno de transferência é definido como a transmissão de energia devido a uma diferença de temperatura em um meio e, ainda, entre meios diferentes. A transferência de calor na superfície de um produto pode ocorrer de três maneiras: por condução, convecção e radiação, sendo que neste trabalho será considerada a transferência de calor por condução. O controle da temperatura é bastante importante nesse processo. No caso da conservação pelo calor, o binômio tempo- temperatura é comumente utilizado como processo de conservação, e a determinação de cada um deles depende do efeito que o calor seja capaz de exercer sobre o alimento, e quais os outros métodos de conservação que serão utilizados conjuntamente. Nesse método dar-se-á ênfase a técnica de pasteurização que tem por objetivo eliminar ou reduzir ao máximo os níveis

de micro-organismos em um alimento e desnaturar a maior parte das enzimas presentes as quais provocam alterações, muitas das vezes indesejáveis (RAMPELOTTO, 2012). Ainda em relação aos métodos de conservação pelo uso do calor pode-se destacar algumas técnicas, como: Branqueamento, Tindalização e Esterilização.

Existem também algumas propriedades termo-físicas que são de interesse nas indústrias de alimentos: a densidade, a condutividade térmica, a difusividade térmica e o calor específico. A condutividade térmica descreve o transporte de energia na forma de calor através de um corpo, como resultado do gradiente de temperatura. Outra propriedade física importante que também está relacionada com o transporte de energia é a difusividade térmica. Dincer e Genceli (1995) argumentam que o significado físico da difusividade térmica está associado à difusão de calor dentro do produto durante as mudanças da temperatura com o tempo. Um elevado valor da difusividade térmica significa uma rápida transferência do calor dentro do produto e pouco tempo para o calor sair do corpo. Em vários trabalhos, usam-se valores constantes dessas propriedades térmicas (CARCIOFI et al., 2002; PLAZL et al., 2006; BETTA et al., 2009), o que torna as análises imprecisas. Contudo, através da consideração de que as propriedades térmicas dos alimentos variam com a temperatura média à medida que o produto é aquecido e/ou resfriado, aumenta-se consideravelmente a precisão das técnicas de análise de transferência de calor em alimentos (ATAÍDE, 2014).

A necessidade de estudos como esse, faz deste trabalho uma importante linha de pesquisas no que se diz respeito a uma melhor qualidade de produtos alimentícios nas indústrias brasileiras, tendo em vista a importância de estudar suas propriedades termo-físicas e tentar reduzir o máximo de micro-organismos presentes no interior de embalagens ou recipientes industriais.

## 1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo geral um estudo teórico-experimental para viabilizar a aplicação da solução numéricas unidimensional da equação de difusão para descrever o processo de penetração e/ou remoção de calor em polpa de fruta, pressupondo condição de contorno constante de primeiro tipo. Tal solução foi aplicada na descrição da penetração de calor na polpa da manga, envolvendo a determinação de parâmetros termo-

físicos relativos a tal produto. Para tal, devem ser explicitados critérios, mecanismos e procedimentos adotados visando ao cumprimento dos objetivos delineados.

## 1.2 Objetivos específicos

Especificamente, este trabalho busca atingir os seguintes objetivos:

- Apresentar uma modelagem matemática unidimensional da transferência de calor em sólidos cilíndricos;
- Realizar experimentos sobre a cinética de aquecimento da polpa de manga acondicionada em recipientes cilíndricos, sujeitas ao processo de tratamento térmico.
- Aplicar ferramentas numéricas em coordenadas cilíndricas, para resolver o problema de difusão transiente de calor usando-se o método dos volumes finitos, com uma formulação totalmente implícita supondo condição de contorno constante de primeiro tipo, baseando-se na lei de Fourier;
- Estimar, a partir de dados experimentais de cinética de aquecimento, a difusividade térmica aparente dos produtos estudados;
- Estudar e testar várias funções para a difusividade térmica e obter a melhor que descreva o fenômeno no produto estudado;
- Simular a distribuição de temperatura no interior do produto estudado, bem como a sua respectiva cinética de aquecimento, utilizando-se de modelos matemáticos a serem desenvolvidos;
- Comparar os resultados das simulações numéricas com os resultados experimentais, e determinar a difusividade térmica de calor para as várias condições experimentais estudadas.

Este trabalho envolve os seguintes capítulos: Capítulo 1, Introdução; Capítulo 2, Revisão Bibliográfica; Capítulo 3, Materiais e Métodos; Capítulo 4, Resultados e Discussões e Capítulo 5, Conclusões e Sugestões.

## Capítulo 2

# Revisão Bibliográfica

### 2.1 Aspectos gerais

No mundo globalizado que se vive hoje, estima-se que mais da metade dos alimentos que o homem consome são processados de alguma forma. Um dos principais objetivos da Tecnologia de Alimentos é buscar a plena garantia de apresentar ao consumidor, produtos nutritivos, com características sensoriais melhoradas e de grande tempo de vida útil, garantindo o abastecimento de alimentos nutritivos e saudáveis para o homem. A grande maioria dos produtos procedentes dos reinos vegetal e animal são altamente perecíveis e, por isso, sua vida útil é extremamente curta. Porém, o homem necessita alimentar-se diariamente, e vários dos alimentos que consome são produzidos sazonalmente e/ou em pontos muito distantes dos locais de consumo (WOJSLAW, 2013).

Os alimentos são fundamentais para a saúde, mas quando estão contaminados podem causar uma série de doenças. Por isso, é fundamental adotar hábitos de higiene tanto para guardar os alimentos, como para prepará-los. As intoxicações alimentares são causadas por micro-organismos que crescem e se multiplicam rapidamente na presença de umidade, calor e alimentos. Para isso, a indústria da produção de alimentos utiliza técnicas de conservação que são de extrema importância nesse sentido (ORDÓÑEZ, 2005).

### 2.2 Conservação de Alimentos

A conservação de alimentos surgiu com a civilização humana. Historicamente, o homem da pré - história, com a descoberta do fogo, criou o processo de defumação,

usado até hoje na preservação de alguns alimentos. Depois ele aprendeu a usar o sal na conservação das carnes, condimentos para melhorar a palatabilidade, como também realizar fermentações de produto de origem animal e vegetal. Nessa época, os utensílios e armas eram primitivos, a caça era difícil, e todo o mantimento era consumido cru. Foi nesse contexto então que surgiu a necessidade de armazenar os alimentos, o que primeiramente foi feito por nossos ancestrais nas partes mais escuras e frias das cavernas (VASCONCELOS e MELO FILHO, 2010).

Hoje sabe-se que eles realmente estavam certos em estocá-los nessa região. Isso porque a baixa temperatura retarda as reações químicas e as atividades enzimáticas, prolongando a conservação dos alimentos. Com o passar do tempo, modificou-se esse processo e atualmente utiliza-se a refrigeração e o congelamento como forma de preservação (WOJSLAW, 2013).

Dentre os principais métodos de conservação dos alimentos pode-se citar alguns como; a conservação pelo uso do frio, por fermentação, pelo controle de umidade e pelo calor. Os mesmos têm o objetivo de preservar os alimentos pelo maior período de tempo possível, sob condições sanitárias e organolépticas satisfatórias. Esses processos de conservação baseiam-se na eliminação parcial ou total dos agentes capazes de alterar os alimentos (ORDÓÑEZ, 2005; FELLOWS, 2006).

A seguir cada um desses processos serão abordados de forma conjunta, agrupando cada uma de suas técnicas conforme a metodologia empregada.

### 2.2.1 Conservação pelo frio

O frio é reconhecido desde longa data como excelente método de preservação de alimentos. Temperaturas mais baixas são utilizadas para retardar as reações e a atividade enzimática, bem como inibir o crescimento e a atividade dos micro-organismos nos alimentos, e quanto mais baixa for a temperatura, menores serão essas consequências. Entretanto, três pontos devem ser levados em consideração:

- 1- O alimento deve ser sadio, pois o FRIO não restitui a qualidade perdida;
- 2- A aplicação do FRIO deve ser feita o mais cedo possível para interromper os processos enzimáticos, oxidativos, metabólicos e microbianos, e evitar qualquer alteração do alimento;
- 3- Durante todo o processo, desde o preparo até o consumo, a cadeia de FRIO

não pode ser interrompida.

A preservação pela diminuição da temperatura do alimento possui benefícios importantes na manutenção das características sensoriais e do valor nutricional para a produção de alimentos de alta qualidade. Conforme a temperatura desejada, pode-se lançar mão de dois processos de conservação pelo uso do frio: a Refrigeração e o Congelamento. Lembrando que a refrigeração geralmente é empregada para conservação de alimentos a curto prazo e o congelamento a longo prazo (WOJSLAW, 2013).

### 2.2.2 Conservação por fermentação

A fermentação é um conjunto de trocas ou decomposição química produzida pela atividade de micro-organismos vivos em um substrato orgânico. Ocorre a produção de ácidos, álcool, vitaminas, antibióticos, dióxido de carbono, dependendo dos micro-organismos que as produzem e dos substratos. São exemplos de alimentos fermentados: queijos, bebidas lácteas, vinho, cerveja, molhos a base de soja, salame, piperoni, chucrute, pickles, azeitonas. Os micro-organismos são capazes de modificar a textura, sabor e aroma do alimento, bem como as suas propriedades nutricionais. Para se produzir um alimento fermentado deve-se levar em conta o tipo de micro-organismos, o substrato (alimento), pH e temperatura. Quanto ao material a fermentar, tem-se: albumina, celulose, açúcares, pectina, dentre outras. Muitas vezes os produtos fermentados têm palatabilidade, succulência, valor nutritivo e vida de prateleira superiores à matéria-prima que lhe deram origem (SILVA, 2000; FELLOWS, 2006; WOJSLAW, 2013).

### 2.2.3 Conservação pelo controle de umidade

Dentre os métodos de conservação pelo controle de umidade destaca-se a secagem. Em síntese, secagem é a remoção, total ou parcial, natural ou artificial, de um fluido (líquido ou vapor) de qualquer material, envolvendo exclusivamente a transferência de calor e de massa. A água é um dos componentes dos alimentos que os micro-organismos mais necessitam para o seu desenvolvimento. Para reduzir as atividades das enzimas responsáveis por determinadas alterações nos alimentos, faz-se necessário reduzir as condições de desenvolvimento microbiano. Para isso, eleva-se a pressão osmótica do alimento através da redução da água livre (SILVA, 2000). Alimentos submetidos ao processo de secagem são muitos, como por exemplo: frutas secas, hortaliças, chás, nozes, café, leite, charque,

pescados, frutos do mar, massas alimentícias, farinhas, ovos, condimentos, e vários outros. Os processos de secagem podem ser classificados em dois grupos: secagem natural ou ao sol, e secagem artificial, conhecida também como desidratação (WOJSLAW, 2013).

### **2.2.4 Conservação pelo calor**

Os alimentos diferem entre si, portanto as exigências para seu processamento também o são. O binômio tempo - temperatura é comumente utilizado como processo de conservação, e a determinação de cada um deles depende do efeito que o calor seja capaz de exercer sobre o alimento, e quais os outros métodos de conservação que serão utilizados conjuntamente. O objetivo do tratamento térmico é destruir todos os micro-organismos prejudiciais a saúde e prevenir o crescimento dos sobreviventes. Ainda nesse tipo de conservação destaca-se quatro técnicas: Branqueamento, Tindalização, Esterilização e a Pasteurização.

#### **Branqueamento**

É o processo térmico de curto tempo de aplicação, com características de pré tratamento, que visa, principalmente, inativar enzimas de frutas e hortaliças que serão congeladas. Portanto, é um pré-tratamento muito utilizado antes do congelamento ou secagem (WOJSLAW, 2013). Outros objetivos:

- 1- a retirada do ar e gases dos tecido vegetais,
- 2- a diminuição da carga bacteriana,
- 3- o amolecimento da casca,
- 4- a fixação da cor de certos vegetais.

#### **Tindalização**

O método de tindalização é assim conhecido por sua vinculação ao físico inglês John Tindall. É um processo pouco usado por ser demorado e de custos elevados. Nesse processo, o aquecimento é feito de maneira descontínua. Dependendo de cada produto e do rigor térmico desejado, as temperaturas utilizadas variam de 60 a 90 °C, durante alguns minutos. As células bacterianas que se encontram na forma vegetativa são destruídas, porém, os esporos sobrevivem. Depois do resfriamento, os esporos entram em processo de



germinação e depois de 24 h a operação é repetida (3 a 12 vezes até a obtenção da esterilização completa). A vantagem desse processo é que podem ser mantidos praticamente todos os nutrientes e as qualidades organolépticas do produto em proporções maiores do que quando se utiliza outros tratamentos térmicos (SILVA, 2000; GAVA, 2009).

### **Esterilização**

É o processo que visa à destruição completa de micro-organismos patogênicos e deteriorantes presentes no produto. Emprega processos energéticos que influenciarão na qualidade do alimento. No caso dos produtos apertizados (enlatados) nunca será obtida uma esterilidade absoluta, por isso são empregados os termos “comercialmente estéril” ou “estéril”. Consiste na esterilização da embalagem e do produto conjuntamente, através de tratamento térmico em recipientes hermeticamente fechados. Por isso a vida de prateleira é bastante aumentada, ao limite das prováveis reações que possam ocorrer devido a fatores diversos que não sejam relacionados ao crescimento de micro-organismos deteriorantes. Porém, após aberto, o alimento deverá ser consumido imediatamente ou, dependendo do produto, em até alguns dias se mantido sob refrigeração. Os mais comuns são: conservas vegetais (grãos, legumes, frutas e seus derivados, dentre outros.), pescados, carnes, sopas, entre outros (WOJSLAW, 2013).

A aplicação do calor em níveis adequados à obtenção da esterilidade comercial dos alimentos apertizados provoca alterações organolépticas e nutritivas, como por exemplo: alterações de textura, sabor, aroma, viscosidade, perdas de enzimas e algumas vitaminas (OETTERER et al, 2006).

### **Pasteurização**

A pasteurização é o método de inativação de micro-organismos, mundialmente utilizado no processamento de alimentos *in natura*. A temperatura máxima é 100 °C, em pressão atmosférica normal, proveniente de vapor, radiações ionizantes, água aquecida, microondas, etc (POLLONIO, 1993). A pasteurização é utilizada quando para alguns alimentos, os processos térmicos em temperaturas elevadas podem interferir em suas características sensoriais (sucos, leites, entre outros). Em outros casos, os agentes microbianos possuem baixa termorresistência (exemplo: leveduras das frutas); ou quando os agentes competitivos possam ser destruídos para que o alimento seja, posteriormente, submetido a

um processo de fermentação (por exemplo, na elaboração de queijos). Usualmente o processo de pasteurização é complementado com outro método, como por exemplo: adição de altas concentrações de açúcar (no caso do leite condensado), refrigeração (leite), ou com a criação de anaerobiose (fechamento dos recipientes a vácuo), entre outros (WOJSLAW, 2013). Porém, qualquer que seja o método posterior, a pasteurização confere curto espaço de tempo para a manifestação da perecibilidade dos alimentos, como por exemplo até 60 dias no caso dos sucos e até 16 dias no caso do leite (GAVA, 2009). Quanto ao tipos de pasteurização dependem do método e do produto a ser tratado, podendo ser:

1- Pasteurização lenta - LTLT (Low Temperature Long Time) que emprega a temperatura relativamente baixa, em relação à pasteurização rápida, por um prazo de tempo maior, aproximadamente de 63 °C por 30 min, no caso do leite.

2- Pasteurização Rápida - HTST (High Temperature Short Time) que emprega a temperatura relativamente alta num curto espaço de tempo, cerca de 72 a 75 °C por 15 a 20 segundos.

Na indústria de laticínios pode ocorrer ainda outros processos complementares: a Termização, onde o leite é aquecido por 15 segundos entre 63 e 65 °C e a Ultrapasteurização que aumenta o tempo de vida útil em 30 a 40 dias, reduzindo as principais fontes de recontaminação, já que utiliza-se temperaturas entre 125 e 130 °C por 2 a 4 segundos e em seguida, resfriando-se abaixo de 7 °C (POLLONIO, 1993).

Na literatura são encontrados várias trabalhos que estudam de alguma forma o processo de pasteurização: JARAMILLO-FLORES e HERNANDEZ-SANCHEZ, 2000; RAMPELOTO, 2012; LINS, 2013; ATAÍDE, 2014 e COSTA, 2015.

## 2.3 Transferência de energia térmica

O calor é a energia térmica transferida de um corpo para outro ou de uma parte para outra de um mesmo corpo, devido exclusivamente a uma diferença de temperatura. Nos estudos de transferência de calor, é usual considerar três modos distintos: Por condução, convecção e por radiação.

### 2.3.1 Condução

Processo de propagação de calor no qual a energia térmica passa de partícula para partícula, considerando o meio estacionário. Nesse processo as partículas não se deslocam, mas permanecem vibrando em torno da sua posição de equilíbrio. O transporte de calor se dá pela transferência de energia da parte de alta temperatura para de baixa temperatura pelo impacto direto das moléculas, ou pelo movimento dos elétrons livres

### 2.3.2 Convecção

Esse processo de transmissão de calor ocorre apenas em fluidos, ou seja, o calor é transferido de uma região para outra tendo como agente o próprio fluido. Nesse Processo de propagação de calor a energia térmica muda de local acompanhando o deslocamento do próprio material aquecido. Neste caso o meio está em movimento e surgem as chamadas correntes de convecção.

### 2.3.3 Radiação

Processo de propagação de calor no qual a energia térmica apresenta-se na forma de ondas eletromagnéticas. É o único mecanismo que pode ocorrer no vácuo. A transferência de calor por radiação geralmente envolve a faixa do espectro conhecida por infravermelho. Qualquer objeto libera energia radiante, entretanto, as qualidades físicas de um objeto é que determinam a capacidade do mesmo absorver ou refletir radiação.

## 2.4 A equação do calor e sua dedução

A Equação da condução de calor é uma equação diferencial cuja solução fornece a distribuição de temperatura em um meio estacionário. Ela é originada aplicando a conservação de energia num volume de controle infinitesimal considerando que o único mecanismo de transferência de calor é a condução. Para deduzí-la considera-se um volume de controle de forma arbitrária.

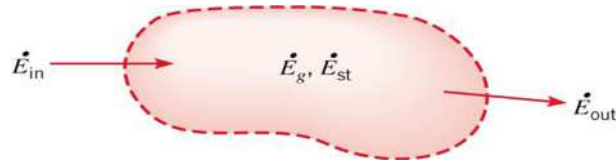


Figura 2.1: Volume de controle de forma arbitrária

$\dot{E}_{in}; \dot{E}_{out}$  = Transferência de energia térmica por unidade de tempo através da superfície de controle devido à transferência de calor.

$\dot{E}_{gen}$  = Geração de energia por unidade de tempo devido à conversão de outra forma de energia (elétrica, nuclear, ou química). O processo de conversão de energia ocorre dentro do sistema.

$\dot{E}_{st}$  = Taxa de variação de energia armazenada no volume de controle ou sistema.

A equação da condução de calor no sistema de coordenadas cartesianas será escrita considerando o fluxo de calor em um pequeno volume de controle elementar, sob estudo:

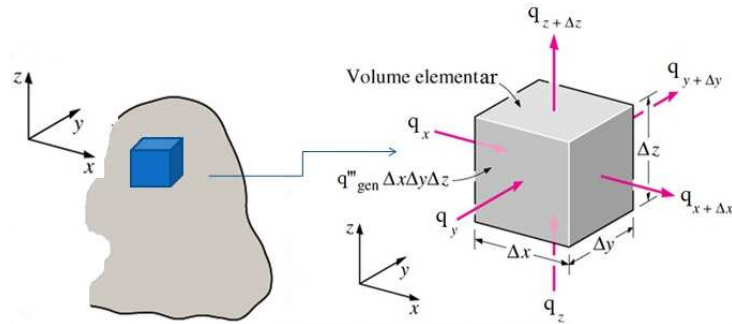


Figura 2.2: Fluxo de calor em um volume elementar em coordenadas cartesianas

A quantidade de calor  $q_{i+\Delta i}$  é uma função desconhecida de  $i$ . Expandindo em série de Taylor, onde só os 2 primeiros termos são considerados:

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{\partial q_x}{\partial x} dx; \quad q_{y+dy} = q_y + \frac{\partial q_y}{\partial y} dy; \quad q_{z+dz} = q_z + \frac{\partial q_z}{\partial z} dz \quad (2.1)$$

Aplicando a conservação da energia no volume de controle diferencial:

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_{gen} = \dot{E}_{st} \quad (2.2)$$

Ou seja;

$$(q_x - q_{x+\Delta x}) + (q_y - q_{y+\Delta y}) + (q_z - q_{z+\Delta z}) + \dot{E}_{gen} = \dot{E}_{st} \quad (2.3)$$

Substituindo (2.1) em (2.3), temos :

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + \dot{E}_{gen} = \dot{E}_{st} \quad (2.4)$$

Definindo algumas variáveis:

$$\dot{E}_{gen} = S^\Phi dV = S^\Phi dx dy dz \quad (2.5)$$

onde  $S^\Phi$  é definido como o termo fonte, que fornece a geração de energia por unidade de volume.

$\dot{E}_{st}$  é a variação total da energia, logo, da equação fundamental de calorimetria, temos:

$$\dot{E}_{st} = \frac{\partial(mc_p T)}{\partial t} \quad (2.6)$$

Daí,

$$\dot{E}_{st} = \frac{\partial(mc_p T)}{\partial t} = \frac{\partial(\rho dV c_p T)}{\partial t} = \frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} dx dy dz \quad (2.7)$$

Assim, a equação de conservação de energia pode ser escrita:

$$-\frac{\partial q_x}{\partial x} dx - \frac{\partial q_y}{\partial y} dy - \frac{\partial q_z}{\partial z} dz + S^\Phi dx dy dz = \frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} dx dy dz \quad (2.8)$$

A lei de Fourier diz que o fluxo de calor por unidade de área é proporcional ao gradiente de temperatura:

$$q'' = -k \nabla T \quad (2.9)$$

em que  $k(Wm^{-1}K^{-1})$  é a condutividade térmica e  $q''$  é o fluxo de calor por unidade área.

Daí temos:

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} dydz; \quad q_y = -k \frac{\partial T}{\partial y} dx dz; \quad q_z = -k \frac{\partial T}{\partial z} dx dy \quad (2.10)$$

substituindo  $q_x$ ,  $q_y$  e  $q_z$  na equação de conservação da energia (2.7):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S^\Phi = \frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} \quad (2.11)$$

Identificando o “grad T” e o operador “nabla”

$$\nabla T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \quad ; \quad \nabla = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k} \quad (2.12)$$

Numa Forma mais compacta, pode-se escrever:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + S^\Phi \quad (2.13)$$

em que T é a temperatura;  $\rho$  é a densidade do meio;  $c_p$  é o calor específico à pressão constante e k é a condutividade térmica do meio.

## 2.5 O problema geral de transporte e a equação de difusão

A expressão geral da equação de transporte, na forma infinitesimal para um volume elementar, pode ser escrita do seguinte modo ( BIRD et al., SILVA, 2009):

$$\frac{\partial(\lambda \Phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\lambda \vec{v} \Phi) = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + S^\Phi \quad (2.14)$$

onde;  $\Phi$  é a variável dependente de interesse;  $\Gamma$  e  $\lambda$  são coeficientes de transporte;  $\vec{v}$  é o vetor velocidade do meio e  $S^\Phi$  é o termo fonte.

Na Equação (2.14), o primeiro termo representa a variação temporal da grandeza sob estudo em um volume infinitesimal, sendo conhecido como termo transiente. Por outro lado, o segundo termo, denominado termo advectivo, indica o quanto a grandeza varia na unidade de tempo devido ao seu movimento junto com o meio. Ambos se movem com a velocidade  $\vec{v}$ . O terceiro termo representa a variação da grandeza na unidade de tempo por difusão (termo difusivo), enquanto o último termo, denominado de termo fonte, dá a geração (ou sorvedouro) da grandeza em um volume infinitesimal (FARIAS, 2011).

Se o termo advectivo da Equação (2.14) for zero, já que neste caso o meio encontra-se em repouso, obtém-se a equação de difusão que descreve o transporte de uma grandeza em um meio estacionário.

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + S^\Phi \quad (2.15)$$

Fazendo na Equação (2.15)  $\lambda = \rho c_p$ ,  $\Gamma^\Phi = k$  e  $\Phi = T$  tem-se a equação de condução de calor (2.13) que já foi deduzida no item anterior.

A variável dependente da equação (2.13) é a grandeza intensiva temperatura, enquanto a energia interna é a grandeza extensiva transportada no volume de controle. O termo entre parênteses no segundo membro dessa equação possibilita definir a taxa de transferência de calor por unidade de área (fluxo de calor por unidade de área), Lei de Fourier que já foi definida anteriormente na equação (2.9):

Nos casos em que a densidade  $\rho$  e o calor específico à pressão constante  $c_p$  forem constantes, a Equação (2.13) pode tornar-se (ATAÍDE, 2014):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\alpha \nabla T) + S^\Phi \quad (2.16)$$

Dessa forma;

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2.17)$$

em que  $\alpha$  é definida como difusividade térmica.

Por outro lado, se na Equação (2.15) forem feitos  $\lambda = 1$ ,  $\Phi = M$ ,  $\Gamma^\Phi = D_{ef}$  e  $\vec{v} = 0$ , tem-se a equação de difusão de massa:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{ef} \nabla M) + S^\Phi \quad (2.18)$$

onde  $M$  é o teor de umidade (em base seca) em um volume infinitesimal, no instante  $t$ , e  $D_{ef}$  é a difusividade efetiva de massa.

Para este caso, a grandeza transportada é a água e o termo entre parênteses no segundo membro é o negativo da taxa de difusão de água por unidade de área, isto é, o fluxo de água por unidade de área em relação a um determinado referencial (SILVA, 2009; FARIAS, 2011; ATAÍDE, 2014):

$$\vec{J} = -D_{ef} \nabla M. \quad (2.19)$$

A Equação (2.19) é conhecida como primeira lei de Fick.

## 2.6 Soluções para a equação de difusão

A solução da equação de difusão necessita basicamente das informações sobre as condições iniciais e da escolha das condições de contorno mais adequadas. As condições de contorno podem ser de primeiro tipo, segundo tipo ou terceiro tipo.

Na condição de contorno de primeiro tipo, também chamadas de condição de contorno de equilíbrio, condição de contorno prescrita, ou ainda, condição de contorno de Dirichlet, a distribuição de temperatura na superfície de contorno pode ser conhecida em função do tempo, isto é,  $T = T_s(t)$ , em que,  $T$  é a temperatura na superfície de contorno para um dado valor de tempo. Na condição de contorno de segundo tipo é possível conhecer o valor do fluxo na superfície de contorno. Já na condição de contorno de terceiro tipo, também chamada condição de contorno convectiva ou ainda de condição de contorno de Cauchy, expressa a igualdade entre o fluxo difusivo de calor no interior do corpo e o fluxo convectivo, nas vizinhanças da superfície do corpo.

De forma fundamental, a análise de qualquer situação física dispõe de três maneiras para resolver o problema relacionado à situação estudada: soluções analíticas, soluções numéricas e experimentação em laboratório. O método teórico (analítico ou



numérico) requer um modelo matemático para descrever o fenômeno físico que resulta num conjunto de equações diferenciais, cuja complexidade está diretamente relacionada com a geometria do corpo, com as condições de contorno e inicial e com o próprio problema físico. A experimentação de laboratório apesar de aproximar à configuração real do problema, muitas das vezes torna-se dispendiosa, perigosa ou até mesmo impossível de implementar, além de ter um auto custo de utilização (FARIAS, 2011; ATAÍDE, 2014).

### 2.6.1 Soluções analíticas

A utilização de soluções analíticas proporciona a possibilidade de se conhecer a variável de interesse em qualquer instante de tempo e em qualquer ponto do domínio. Apesar das limitações das soluções analíticas, o método analítico é uma ferramenta bastante utilizada e, naturalmente, não deve ser descartado, sendo uma de suas importantes aplicações, a validação das soluções numéricas. Uma desvantagem desse tipo de solução é que a mesma só trabalha com parâmetros constantes e desconsidera a variação volumétrica.

Quando o corpo em estudo pode ser aproximado para uma parede infinita, retângulo ou paralelepípedo é necessário usar apenas a equação de difusão num sistema de coordenadas cartesianas. Nos casos em que a difusão ocorre em corpos com a forma cilíndrica ou esférica, deve-se usar sistemas de coordenadas onde as fronteiras da região coincidam com as superfícies coordenadas, nestes casos, coordenadas cilíndricas e esféricas, respectivamente. A análise vale para as situações uni, bi ou tridimensionais. A equação de difusão transiente unidimensional nos sistemas de coordenadas cartesianas, cilíndricas e esféricas pode ser compactada em uma única equação (SILVA, 2007; FARIAS, 2011):

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^n \Gamma^\Phi \frac{\partial\Phi}{\partial r} \right) \quad (2.20)$$

se,

- $n = 0$  implica coordenadas cartesianas;
- $n = 1$  implica coordenadas cilíndricas;
- $n = 2$  implica coordenadas esféricas;
- $\lambda$  e  $\Gamma^\Phi$  são os parâmetros de transporte.

Pode-se destacar alguns métodos de soluções analíticas para resolver a equação de difusão, são eles: Separação de variáveis, Método de Galerkin (funções de base) e Transformada Integral (transformada de Laplace).

Na literatura existem alguns trabalhos que utilizam esse tipo de solução, os estudos de penetração de calor em polpas de graviola, foram realizados por Jaramillo-Flores e Hernandez-Sanchez (2000) em latas pequenas, que foram consideradas como cilindros finitos. O pH, teor de umidade e da quantidade de sólidos solúveis ( $^{\circ}$ Brix) foram determinados nas polpas. Os experimentos foram realizados em três faixas de temperatura diferentes, incluindo as de congelamento. A princípio a polpa é congelada a  $-19^{\circ}\text{C}$ , posteriormente a polpa foi colocada em banho térmico a  $29^{\circ}\text{C}$  até que a mesma atingisse  $24^{\circ}\text{C}$ . No segundo experimento, à temperatura ambiente, a polpa foi colocada em um banho térmico a  $89^{\circ}\text{C}$  até que atingisse  $87^{\circ}\text{C}$ . Os resultados mostraram que a difusividade térmica tiveram valores dezesseis vezes mais baixa em temperaturas menores que  $0^{\circ}\text{C}$ . Para temperaturas acima de  $0^{\circ}\text{C}$ , os resultados se encontram de acordo com os publicados por outros autores para outros vegetais. Ao que se refere à difusividade térmica para as polpas de frutas maduras e imaturas, não se verificou diferença significativa.

Saykova et al. (2009) realizaram um estudo analítico para prever o coeficiente de difusão efetivo para sólidos na forma de paralelepípedos e placas retangulares a partir de curvas experimentais obtidas na secagem de materiais biológicos. Para isso, os autores basearam-se na lei de Fick tridimensional em coordenadas cartesianas, empregando condições de contorno de Dirichlet, para obterem o modelo matemático no qual estenderam as soluções analíticas unidimensionais para sistemas bi e tridimensionais pelo princípio da superposição. Os autores perceberam que quando o corpo em estudo pode ser aproximado para uma parede infinita, retângulo ou paralelepípedo é necessário usar apenas a equação de difusão num sistema de coordenadas cartesianas. Nos casos em que a difusão ocorre em corpos com a forma cilíndrica ou esférica, deve-se usar sistemas de coordenadas cilíndricas e esféricas, respectivamente, pois as fronteiras da região coincidam com as superfícies coordenadas. A análise vale para as situações uni, bi ou tridimensionais.

Lins (2013) realizou um estudo analítico e numérico das propriedades termo-físicas durante o processo de transferência de calor em produtos pastosos de forma cilíndrica. Para isso, o autor solucionou a equação de difusão com condição de contorno do primeiro tipo, cujo objetivo foi estudar o fenômeno da difusão transiente de calor em alimentos

pastosos (agar gel, purê de tomate e creme custard) contidos em recipientes cilíndricos. Dessa forma, o autor desenvolveu ferramentas analíticas para a descrição da difusão de calor na qual foram validadas através de dados obtidos por simulação numérica tanto para o cilindro infinito quanto para o finito.

Segundo a pesquisa, o método numérico se mostrou mais eficiente do que o analítico, na descrição do processo de difusão de calor nos produtos estudados. O autor atribui esse resultado a versatilidade que o método numérico possui de permitir a obtenção da solução da equação de difusão considerando a difusividade térmica aparente variável com a temperatura local. Também foi verificado que os resultados obtidos para a difusividade térmica aparente de agar gel, purê de tomate e creme custard corroboraram com os resultados encontrados na literatura.

### 2.6.2 Soluções numéricas

O grande desenvolvimento tecnológico atual permite utilizar computadores cada vez mais velozes e com maior capacidade de armazenamento. Dessa forma, mesmo reconhecendo a importância das soluções analíticas para problemas de difusão, tornou-se mais frequente pelos pesquisadores a utilização de técnicas numéricas na solução de problemas complexos nas mais diversas áreas de interesse (FARIAS, 2011; SILVA, 2012).

As soluções numéricas resolvem uma ou mais equações diferenciais, substituindo as derivadas por expressões algébricas que envolvam a função incógnita. A solução obtida corresponde a um número discreto de pontos e a grandeza é calculada no ponto. Uma das vantagens desse tipo de solução é o fato de que ela trata o modelo do objeto de estudo para as condições físicas reais (SILVA, 2007; SILVA 2009; FARIAS, 2011).

Pode-se destacar alguns métodos de soluções numéricas para resolver a equação de difusão, são eles: Método das diferenças finitas (MDF), Método dos elementos finitos (MEF) e Método dos volumes finitos (MVF).

A solução por diferença finita (MDF) consiste na substituição do operador diferencial pelo seu correspondente numérico (SILVA, 2009). Por outro lado o método dos elementos finitos (MEF) é baseado em dois conceitos principais, são eles:

- a) Solução baseada numa “Integral ” da equação;
- b) Aproximação da solução por uma função definida num subdomínio resultante da discretização do domínio.

Já o método dos volumes finitos (MVF) consiste em dividir o domínio físico sob estudo em um número finito de subdomínios de volumes elementares denominados de volume de controle ou volumes finitos. Nesse método a discretização é feita integrando todos os termos da equação que governa o fenômeno, sobre cada volume de controle, no espaço e no tempo (SILVA, 2007; SILVA, 2009; FARIAS, 2011).

Em geral, é possível estabelecer três formulações, ao se usar o método numérico para resolver a equação de difusão, de acordo com o tempo que é definido para representar a grandeza de interesse, ao se expressar as derivadas espaciais, são elas: formulação explícita, formulação implícita e a formulação totalmente implícita. Na formulação explícita, a variável de interesse para expressar as derivadas espaciais é avaliada no instante inicial ( $t$ ) do intervalo de tempo ( $\Delta t$ ) e, portanto, seu valor já é conhecido. Na formulação implícita, a variável de interesse que define as derivadas espaciais é uma média ponderada dos seus valores no início e no fim do intervalo de tempo. Por outro lado, na formulação totalmente implícita, a variável de interesse em todos os volumes de controle deve ser avaliada no final do intervalo de tempo, no instante ( $t + \Delta t$ ), e seus valores são, portanto, desconhecidos (SILVA, 2009).

Na literatura existem vários trabalhos que utilizam soluções numéricas. Farias (2011) apresentou a solução numérica da equação de difusão tridimensional em regime transiente, para um domínio arbitrário. Para atingir os objetivos, a equação de difusão foi discretizada usando coordenadas generalizadas via método dos volumes finitos com uma formulação totalmente implícita. A solução proposta foi validada usando soluções analíticas e numéricas da equação de difusão para várias geometrias, permitindo validar soluções para malhas ortogonais e não-ortogonais. Os resultados apresentados e analisados foram compatíveis com os resultados esperados para todos os testes realizados. Isto significa que a solução numérica proposta pode ser aplicada ao estudo de qualquer processo difusivo em sólidos com quaisquer formas, desde que a condição de contorno do primeiro tipo seja usada. Concluiu-se também que o modelo de difusão com o uso da condição de contorno do primeiro tipo descreve a cinética de secagem de telhas cerâmicas de uma forma satisfatória pois, os parâmetros estatísticos podem ser considerados razoáveis.

Silva (2012) por exemplo, propôs técnicas analíticas e numéricas para descrever o fenômeno da difusão transiente de uma grandeza em sólidos com a forma de paralelepípedo, incluindo paredes finitas e infinitas. Para a solução numérica proposta,

a equação de difusão tridimensional foi discretizada por meio do método dos volumes finitos, com uma formulação totalmente implícita, usando coordenadas cartesianas. O software desenvolvido, gerou resultados coerentes e consistentes em todos os testes efetuados, e foi validado para meios envolvendo parâmetros termo-físicos tanto constantes quanto variáveis. De acordo com os resultados obtidos, as técnicas propostas são eficientes para descrever secagens de sólidos na forma de paralelepípedo usando a teoria da difusão líquida.

Ataíde (2014) discretizou e resolveu numericamente a equação de difusão escritas em coordenadas generalizadas, usando o método dos volumes finitos no estudo de transferência de calor durante a pasteurização de polpas de frutas cuja forma obtida foi por revolução de áreas planas. Neste estudo, o fenômeno da difusão transiente de calor foi estudado em gêneros alimentícios pastosos contidos em recipientes com forma geométrica arbitrária. O autor considerou a difusividade térmica aparente variável com a temperatura local. Com os resultados obtidos pode-se concluir que a solução numérica da equação de difusão bidimensional em coordenadas generalizadas apresentou resultados consistentes e coerentes, em todos os testes realizados com dados disponíveis na literatura. Concluiu-se também que as análises físico-químicas e microbiológicas dos produtos foram eficientes na redução dos micro-organismos totais, sem proporcionar tanta alteração nutricional, particularmente no valor proteico das polpas.

Silva Junior (2015) desenvolveu ferramentas numéricas e computacionais para descrever processos difusivos em sólidos com formas cilíndricas. Para isto a equação de difusão, considerando os casos de um cilindro infinito e de um cilindro finito, foi discretizada via método dos volumes finitos com uma formulação totalmente implícita, admitindo uma condição de contorno do terceiro tipo. A partir dos dados obtidos em experimentos de desidratação osmótica de banana (cortada em pedaços de 10 mm) realizados em combinações de 40 e 70 °C de temperatura e 40 e 60 °Brix de concentração, foram realizadas otimizações a fim de obter expressões para descrição das difusividades efetivas de água e sacarose e valores para o coeficiente de transferência convectiva de massa. Os resultados obtidos para as difusividades de água e sacarose estão de acordo com a literatura. Foram realizadas otimizações a partir dos dados da secagem complementar das amostras osmoticamente desidratadas, e os resultados obtidos para a difusividade de água foram compatíveis com os encontrados na literatura. Foi concluído pelas otimizações que as

altas concentrações da desidratação osmótica influenciaram a condição de contorno da secagem complementar.

Costa (2015) estudou o comportamento da transferência de calor em polpa de jaca acondicionada em recipiente cilíndrico. O estudo apresentou a solução para a equação de difusão com condição de contorno de primeiro tipo variável. Foi desenvolvida uma modelagem físico-matemática para solução de um problema direto de difusão de calor bidimensional, no interior de um recipiente cilíndrico contendo polpa de jaca. Dois softwares em Fortran foram desenvolvidos visando, primeiro, à solução do problema de estimativa da difusividade térmica utilizando-se, como função objetivo, o qui-quadrado e o outro para a solução do problema direto. Conjuntamente, foi usado um aparato experimental para a análise inversa (problema inverso). No que concerne ao problema direto, um modelo de condução de calor bidimensional, com simetria radial e axial, foi usado para obter a resposta transiente das temperaturas medidas no centro e no contorno do cilindro. Quando comparados aos valores da literatura, os resultados obtidos se mostraram coerentes, ou seja, o software desenvolvido neste trabalho foi considerado válido, sendo que este pode ser utilizado para outras simulações. Foi mostrado também, que a solução proposta representa satisfatoriamente o processo de tratamento térmico de polpa de jaca acondicionada em embalagens cilíndricas proporcionando segurança alimentar com um menor custo de energia.

## 2.7 Fruto pesquisado

O consumo de frutas, legumes e verduras tem sido estimulado, em vários países, em virtude de seus benefícios no combate às deficiências de vitaminas e sais minerais e na prevenção de doenças cardiovasculares, câncer, diabetes e obesidade (TOLEDO et al., 2012). Segundo ABREU et al., 2008 estudos apontam que uma alimentação inadequada com reduzidas quantidades de frutas e hortaliças na dieta, é responsável anualmente por cerca de 2,7 milhões de mortes relacionadas às doenças não transmissíveis. Para aumentar a vida útil dos frutos e seu aproveitamento nutricional, são utilizados diversos procedimentos após a colheita. O processamento é um dos procedimentos no qual permite que as frutas possam ser consumidas durante o período de entressafra, diminuindo as perdas durante a safra e ainda permitindo uma nova opção ao consumidor. A polpa congelada,

por apresentar características de praticidade, vem ganhando grande popularidade, não só no consumo residencial, mas também em restaurantes, hotéis, lanchonetes, hospitais, entre outros, onde é utilizada, principalmente, na elaboração de sucos (ATAÍDE, 2014).

### 2.7.1 Manga

A manga (*Mangifera indica L.*) pertence à família *Anacardiaceae* e é uma fruta muito apreciada no Brasil por apresentar grande quantidade de polpa adocicada e com pouca acidez, além de outras características sensoriais agradáveis, tais como sabor e aroma, sendo comercializada quase exclusivamente na forma *in natura*. Quando industrializada, pode ser transformada em suco integral e polpa congelada. A polpa constitui a matéria-prima para elaboração de outros produtos tais como: doces, geleias, sucos e néctares, além de poder ser adicionada a sorvetes, misturas de sucos, licores e outros produtos (CORREIA e ARAUJO, 2010; CAVALCANTI et al., 2011; DAMIANI et al., 2011).

O centro de origem da manga é a Índia, onde já é cultivada há 4.000 anos, integrando a culinária local sob as mais diversas formas. A manga, que é um fruto largamente produzido e consumido nos países de clima tropical, tem conquistado cada vez mais espaço comercial entre os países desenvolvidos. O primeiro país do ocidente a conhecer a manga foi Portugal, na época da expansão do império naval português até o Sudeste Asiático. Os portugueses disseminaram a cultura, inicialmente na África, depois no Brasil que foi, assim, o primeiro país da América a cultivar esta fruta (CARVALHO; MENDONÇA; REIS, 1997).

Dentre as frutas mais produzidas no Brasil, a manga destaca-se devido às excelentes condições para seu desenvolvimento e produção (FELIPE et al., 2006; ANDRADE, 2012). O Nordeste é a região brasileira que possui maior destaque na produção desta fruta, sendo as áreas irrigadas da região semiárida uma grande produtora de manga do tipo exportação, principalmente devido às condições climáticas favoráveis (AZEVEDO et al., 2008; SILVA e COELHO, 2010). De acordo com o IBGE (2013), o estado do Pernambuco é o terceiro maior produtor de manga do Nordeste, atingindo, em 2012, um volume de produção de 226.921 toneladas. Desse total, 173.800 toneladas foram produzidas em Petrolina/PE.



Figura 2.3: Manga - matéria-prima utilizada no experimento.

Durante a revisão bibliográfica verificou-se que é comum encontrar na literatura autores que consideram a difusividade térmica aparente constante. Mas existem trabalhos que consideram a difusividade térmica aparente variável em função da temperatura local. O mesmo será considerado neste trabalho e o procedimento ocorrerá através de simulações e experiências que possam sugerir uma diminuição no tempo de processo com segurança, garantindo que os agentes patogênicos sejam inativados ou eliminados. Dessa forma, deixam se estabelecidos os fundamentos para a definição da modelagem matemática referente às ferramentas numéricas a serem desenvolvidas. No Capítulo 3, apresenta-se a referida modelagem.



## Capítulo 3

# Materiais e Métodos

Neste capítulo, descrevem-se os modelos matemáticos necessários para o desenvolvimento das ferramentas que foram disponibilizadas na otimização e na simulação da transferência de calor, particularmente no processamento térmico da polpa de manga em estado pastoso, armazenada em recipientes cilíndricos. Este capítulo foi dividido em duas partes principais: modelagem matemática e metodologia experimental. Dessa forma, define-se a escolha do sistema de coordenadas usado para descrever o fenômeno da condução de calor: coordenadas cilíndricas.

### PARTE A - MODELAGEM MATEMÁTICA

#### 3.1 Equação de difusão em coordenadas cilíndricas

Um material cilíndrico de raio  $R$  e comprimento  $L$  pode ser considerado como um cilindro infinito se  $R \ll L$  como na Figura 3.1. Considera-se esse modelo no processo de transferência de calor, a figura geométrica de forma cilíndrica que troca calor com sua vizinhança em apenas uma dimensão. Por conseguinte, a troca de calor entre o cilindro infinito e o meio que o circunda se dá apenas na direção radial. As trocas de calor que se dão na direção axial, através das bases circulares do cilindro, são desprezíveis. Aplica-se esse modelo quando  $L \geq 10R$  (UKRAINCZYK, 2009).

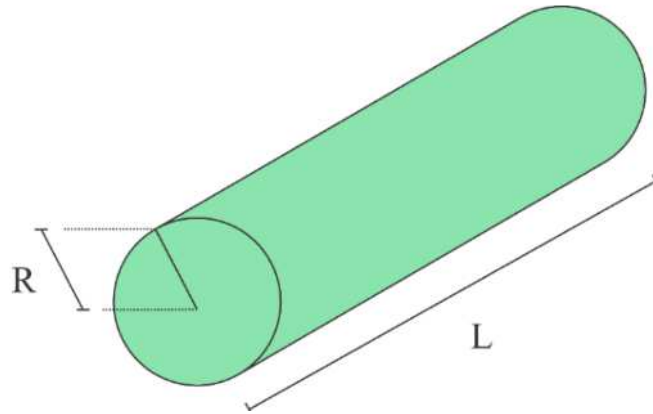


Figura 3.1: Exemplo de um cilindro infinito.

(Fonte: SILVA JUNIOR, 2015)

De uma forma geral, a equação de difusão de uma propriedade pode ser escrita do seguinte modo (SILVA, 2010):

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \nabla \cdot (\Gamma^\Phi \nabla \Phi) + S^\Phi \quad (3.1)$$

em que  $\Phi$  é a variável de interesse no processo difusivo,  $\lambda$  e  $\Gamma^\Phi$  são os parâmetros de processo e  $S^\Phi$  é um termo fonte. Essa equação já foi mostrado no item (2.15) do capítulo anterior.

Para uma geometria cilíndrica, em que o comprimento é muito maior que o raio,  $L \geq 10R$  (cilindro infinito), a equação de difusão unidimensional aplicada ao transporte de uma propriedade é escrita como:

$$\frac{\partial(\lambda\Phi)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \Gamma^\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + S^\Phi \quad (3.2)$$

em que  $r$  define a posição de um ponto em relação ao eixo central do cilindro.

Fazendo  $\lambda = \rho c_p$ ,  $\Gamma^\Phi = k$ ,  $\Phi = T$  e  $S^\Phi = 0$ , a Equação (3.2) pode ser reescrita para descrever o fenômeno de transporte de calor na direção radial em um meio estacionário, considerado como um cilindro infinito, do seguinte modo:

$$\frac{\partial(\rho c_p T)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (3.3)$$

## 3.2 Solução numérica para a condição de contorno de primeiro tipo

O modelo matemático usado na solução numérica da equação de difusão para descrever a condução de calor no interior de gêneros alimentícios em forma cilíndrica, tem com base as seguintes hipóteses:

- Os parâmetros de processo podem variar durante a difusão;
- Cilindro infinito:  $R \ll L$ , onde  $R$  é o raio e  $L$  é o comprimento do cilindro;
- O produto é considerado homogêneo e isotrópico;
- A distribuição espacial da temperatura no interior do sólido tem que ter simetria radial e deve de ser inicialmente uniforme;
- Durante o processo não há mudança de fase do produto;
- Ausência de fluxos convectivos dentro da amostra. A condução é o único processo de transferência de calor no sistema em estudo;
- A condição de contorno é do primeiro tipo;
- A geração de calor é desprezível durante o processo.

A equação de difusão para o modelo foi resolvida através do método numérico dos volumes finitos (SILVA, 2009), com uma formulação totalmente implícita.

Devido à hipótese da simetria radial, foi considerado apenas um setor circular, no qual foi criada uma malha uniforme unidimensional como mostra a Figura 3.2.

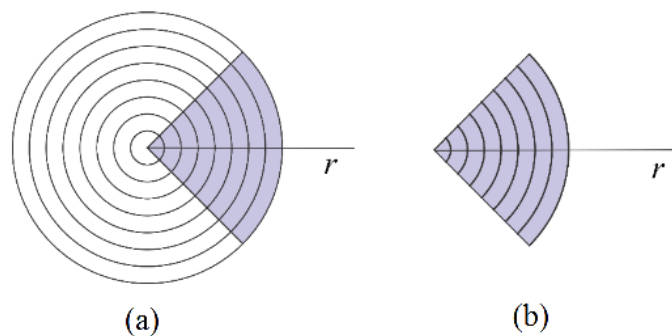


Figura 3.2: (a) Malha unidimensional; (b) Fatia simétrica.

(Fonte: SILVA JUNIOR, 2015)

Na Figura 3.3 é apresentado um elemento da malha uniforme, onde é destacado o ponto nodal P, a espessura  $\Delta r$  do elemento, o raio ( $r_p$ ) até o ponto nodal P, o raio ( $r_w$ ) até a interface oeste e o raio ( $r_e$ ) até a interface leste.

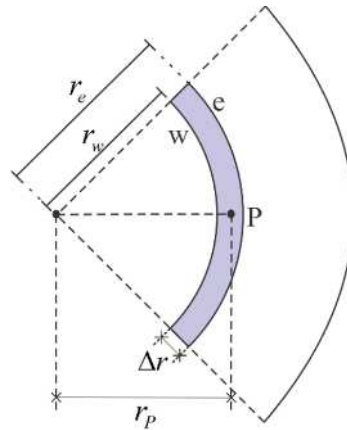


Figura 3.3: Elemento da malha unidimensional.

(Fonte: SILVA JUNIOR, 2015)

Na malha construída existem três tipos de volumes de controle: os volumes de controle internos, os quais possuem volumes de controle vizinhos a oeste e a leste; o volume de controle externo a leste, o qual possui volume de controle vizinho a oeste e está em contato com o meio externo a leste (E); e finalmente o primeiro volume de controle que possui vizinho a leste e fluxo zero a oeste (W). Estes tipos de volumes de controle podem ser vistos na Figura 3.4.

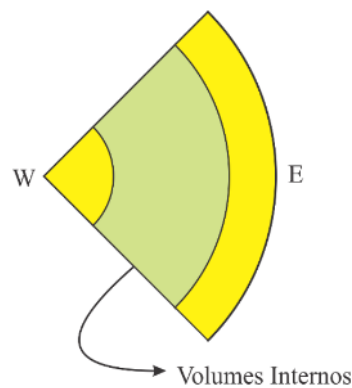


Figura 3.4: Tipos de Volumes de controle para o caso unidimensional.

(Fonte: SILVA JUNIOR, 2015)

Usando o método dos volumes finitos com uma formulação totalmente implícita para integrar a Equação (3.2) no espaço ( $2\pi r_p \Delta r L$ ) e no tempo  $\Delta t$ , sem o termo fonte, obtém-se o seguinte resultado para o volume de controle P (SILVA 2010; SILVA JUNIOR, 2015):

$$\frac{\lambda_P \Phi_P - \lambda_P^0 \Phi_P^0}{\Delta t} r_P \Delta r = \left( r_e \Gamma_e \frac{\partial \Phi}{\partial r} \Big|_e - r_w \Gamma_w \frac{\partial \Phi}{\partial r} \Big|_w \right) \quad (3.4)$$

onde o sobrescrito 0 significa “tempo anterior” e sua ausência significa “tempo atual”.

### 3.2.1 Volumes internos

Estes volumes de controle não tem contato com meio externo e possuem dois volumes de controle vizinhos, um a oeste e outro a leste (Figura 3.5)

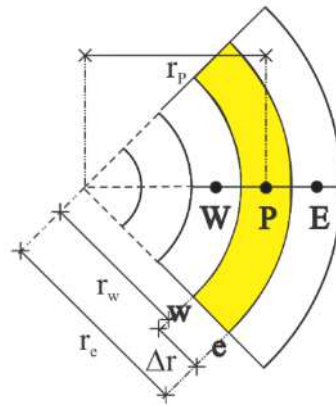


Figura 3.5: Volume de controle interno.

(Fonte: SILVA JUNIOR, 2015)

Para estes volumes de controle a derivada parcial pode ser aproximada do seguinte modo:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial r} \Big|_e \cong \frac{\Phi_E - \Phi_P}{\Delta r} \quad (3.5)$$

e

$$\frac{\partial \Phi}{\partial r} \Big|_w \cong \frac{\Phi_P - \Phi_W}{\Delta r} \quad (3.6)$$

A partir da Equação (3.4), a equação discretizada para um volume interno pode ser escrita do seguinte modo:

$$A_w \Phi_W + A_p \Phi_P + A_e \Phi_E = B \quad (3.7)$$

onde

$$A_w = -\frac{r_w}{\Delta r} \Gamma_w^\Phi; \quad (3.8)$$

$$A_p = \frac{\lambda_P r_P \Delta r}{\Delta t} + \frac{r_e}{\Delta r} \Gamma_e^\Phi + \frac{r_w}{\Delta r} \Gamma_w^\Phi; \quad (3.9)$$

$$A_e = -\frac{r_e}{\Delta r} \Gamma_e^\Phi; \quad (3.10)$$

$$B = \frac{\lambda_P^0 r_P \Delta r}{\Delta t} \Phi_P^0 \quad (3.11)$$

### 3.2.2 Volume de controle 1

Para o primeiro volume de controle, a fronteira a oeste é o ponto denotado por  $w$ , o qual encontra-se no eixo central (Figura 3.6).

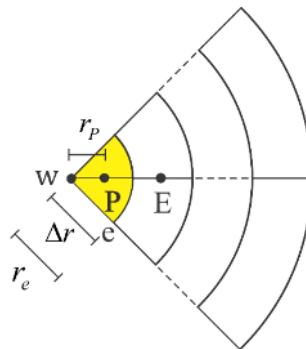


Figura 3.6: Primeiro volume de controle.

(Fonte: SILVA JUNIOR, 2015)

Devido à condição de simetria, o terceiro termo da Equação (3.4) é zero. Então a equação torna-se:

$$A_p \Phi_P + A_e \Phi_E = B \quad (3.12)$$

onde

$$A_p = \frac{\lambda_P r_P \Delta r}{\Delta t} + \frac{r_e}{\Delta r} \Gamma_e^\Phi; \quad (3.13)$$

$$A_e = -\frac{r_e}{\Delta r} \Gamma_e^\Phi; \quad (3.14)$$

$$B = \frac{\lambda_P^0 r_P \Delta r}{\Delta t} \Phi_P^0 \quad (3.15)$$

### 3.2.3 Volume de controle N

O último volume de controle da malha unidimensional possui um volume de controle vizinho a oeste, e está em contato com o meio a leste como mostra a Figura 3.7.

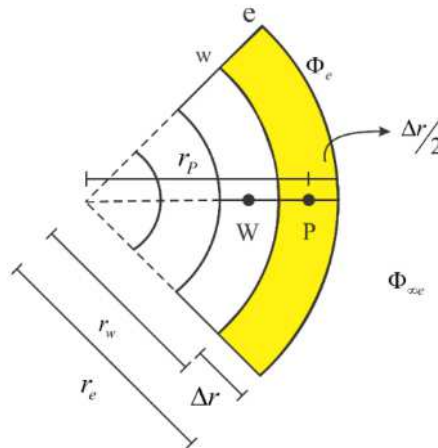


Figura 3.7: Volume de controle no contorno da malha unidimensional.

(Fonte: SILVA JUNIOR, 2015)

Para o volume de controle N a Equação (3.5) é dada do seguinte modo:

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right|_e \simeq \frac{\Phi_b - \Phi_P}{\frac{\Delta r}{2}} \quad (3.16)$$

onde  $\Phi_b$  é o valor de  $\Phi$  sobre a superfície (boundary). Assim, a Equação (3.4) torna-se:

$$A_w \Phi_W + A_p \Phi_P = B \quad (3.17)$$

com

$$A_w = -\frac{r_w}{\Delta r} \Gamma_w^\Phi; \quad (3.18)$$

$$A_p = \frac{\lambda_P r_P \Delta r}{\Delta t} + \frac{2r_e}{\Delta r} \Gamma_e^\Phi + \frac{r_w}{\Delta r} \Gamma_w^\Phi \quad (3.19)$$

e

$$B = \frac{\lambda_P^0 r_P \Delta r}{\Delta t} \Phi_P^0 + \frac{2r_e}{\Delta r} \Gamma_e^\Phi \Phi_b \quad (3.20)$$

A solução numérica proposta pode ser usada para estudar a condução de calor em um sólido cilíndrico se for imposto:  $\Phi = T$  (temperatura),  $\Gamma^\Phi = k$  (condutividade) e  $\lambda = \rho c_p$  ( $\rho$  é a densidade e  $c_p$  é o calor específico).

### 3.3 Métodos de resolução de sistemas lineares

A discretização da equação resulta em um sistema de equações lineares, onde cada incógnita é o valor da variável de interesse no ponto nodal. Deste modo faz-se necessário a aplicação de um método para resolução deste sistema linear em cada ponto. Assim, para cada passo de tempo, tem-se um sistema de equações que pode ser resolvido, por exemplo, usando o método de Gauss-Seidel, com tolerância de  $10^{-8}$  ou TDMA. (SILVA, 2010; SILVA JUNIOR, 2015).

O algoritmo de Gauss-Seidel define um método iterativo que necessita de valores iniciais para as incógnitas a serem determinadas. TDMA é uma sigla em inglês que significa “Tridiagonal Matrix Algorithm”. Tal algoritmo, é usado para a solução de sistemas especiais de equações lineares, que recaem em uma matriz tri-diagonal, é também conhecido como algoritmo de Thomas (SILVA, 2009; SILVA 2010; SILVA JUNIOR 2015).



### 3.4 Parâmetro $\Gamma^\Phi$

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  $\Phi$ :

$$\Gamma^\Phi = f(\Phi, a, b) \quad (3.21)$$

onde “a” e “b” são parâmetros que ajustam a solução numérica aos dados experimentais, sendo determinados por otimização.

Para as interfaces dos volumes de controle, por exemplo “e”, a seguinte expressão tem que ser usada para determinar  $\Gamma^\Phi$  (SILVA, 2009; SILVA, 2010; LINS, 2013).

$$\Gamma_e^\Phi = \frac{2\Gamma_E^\Phi \Gamma_P^\Phi}{\Gamma_E^\Phi + \Gamma_P^\Phi} \quad (3.22)$$

### 3.5 Algoritmo de otimização usando solução numérica

Dentre os métodos usados para determinar parâmetros que descrevem um processo, o método inverso merece uma atenção particular, por ser usado virtualmente em várias as áreas da ciência e engenharia (SILVA e SILVA, 2012). O método inverso é um método iterativo em que são atribuídos valores aos parâmetros de interesse, seguido da solução da equação que descreve o sistema, sendo que os resultados obtidos são comparados com os dados experimentais relativos ao sistema (SILVA, 2007; MARIANI et al., 2008; MARIANI et al., 2009). A partir da comparação, novos valores para os parâmetros são estabelecidos, e o processo continua até que os resultados simulados possam ser considerados suficientemente próximos dos resultados experimentais. Esta comparação envolve a minimização de uma função, denominada de função objetivo. Visando à determinação de tais parâmetros, o software “Infinite Cylinder” utilizado neste trabalho tem o propósito de minimizar a função objetivo qui-quadrado relativo ao processo de ajuste de uma curva simulada aos dados experimentais que é definida como:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_p} (T_i^{exp} - T_i^{sim})^2 \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (3.23)$$

onde  $T_i^{exp}$  é a  $i$ -ésima temperatura experimental ( $^\circ\text{C}$ ) medida em um ponto dentro do

cilindro,  $T_i^{sim}$  é o valor obtido por simulação da mesma variável,  $N_p$  é o número de pontos experimentais e  $\frac{1}{\sigma_i^2}$  é o peso estatístico do  $i$ -ésimo ponto.

Os parâmetros  $a$  e  $b$  da Equação (3.21) podem ser determinados através da minimização da função objetivo, Equação (3.23), a qual é realizada em ciclos envolvendo os seguintes passos:

- Passo 1 - Informar o valor inicial do parâmetro “ $a$ ” e “ $b$ ” da Equação (3.21). Resolver a equação de difusão e determinar o qui-quadrado;
- Passo 2 - Apresentar o valor para a correção de “ $a$ ”;
- Passo 3 - Corrigido o parâmetro “ $a$ ” e, mantendo-se o parâmetro “ $b$ ” com um valor constante, resolve-se a equação de difusão e se calcula o qui-quadrado;
- Passo 4 - Comparar o último valor calculado do qui-quadrado com o valor anterior. Se o último for menor, volte para o passo 2; caso contrário, diminua a última correção do valor de “ $a$ ” e proceda ao passo 5;
- Passo 5 - Informar o valor para a correção de “ $b$ ”;
- Passo 6 - Corrigir o parâmetro “ $b$ ” e manter o parâmetro “ $a$ ” com um valor constante. Resolva a equação de difusão e calcule o qui-quadrado;
- Passo 7 - Comparar o último valor calculado do qui-quadrado com o anterior. Se o último valor for menor, retorne para o passo 5; caso contrário, diminua a última correção do valor de “ $b$ ” e proceda ao passo 8;
- Passo 8 - Começar um novo ciclo, voltando ao passo 2, até que a convergência estipulada para os parâmetros “ $a$ ” e “ $b$ ” seja alcançada.

Um aspecto importante para a duração do processo de otimização é o valor inicial de cada parâmetro a ser determinado. Os valores iniciais dos parâmetros podem ser estimados dos valores obtidos de produtos similares já disponíveis na literatura ou através de alguma correlação empírica. Por outro lado, se  $\Gamma^\Phi$  for suposta constante, os passos 5, 6 e 7 não serão necessários.

O software utilizado para determinar a difusividade térmica e a simulação da cinética do transporte de energia, incluindo a interface com o usuário, foi o “Infinite Cylinder” desenvolvido por Silva (2010). Tal software foi desenvolvido no estúdio Compaq Visual Fortran Professional Edition V. 6.6.0 (Fortran 95) usando uma opção de

programação chamada QuickWin Application. A plataforma utilizada foi Windows XP, embora o software também possa ser executado na plataforma Linux.

O software dispõe de vários menus como: O menu “*File*” que apresenta as opções “*New*” ou “*Open*”, que uma vez clicadas, abrem sequencialmente um conjunto de três caixas de diálogos que requerem todas as informações para que uma simulação seja completamente definida, e a opção “*Exit*”, onde encerra-se a execução do software. O menu “*Simulation*” que simula o problema carregado ou busca uma expressão para a difusividade. Caso o usuário opte por pesquisar uma função que represente  $\Gamma^\Phi$  o software apresenta uma caixa de diálogo para que seja informada qual das expressões apresentadas se deseja otimizar (Figura 3.8).

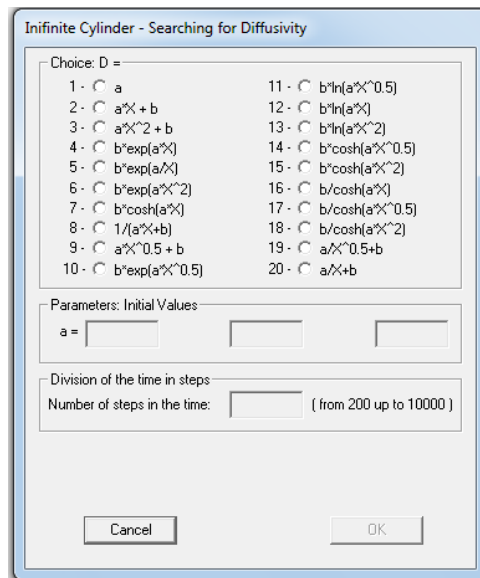


Figura 3.8: Mostra as vinte expressões de difusividade disponíveis no software.

O menu “*Results*” que é habilitado somente ao final de uma simulação e apresenta todos os resultados gerados pelo software, como por exemplo, a difusividade para nó escolhido. O menu “*Preferences*” que possibilita ao usuário algumas escolhas antes da simulação de um problema, como por exemplo, a escolha de um idioma, linguagem ou tolerância por Gauss-seidel. E por ultimo o menu “*information*” que apresenta informações gerais sobre a autoria do produto, arquivos de ajuda, link para a “home page” e ainda uma opção para o envio de email para a autora.

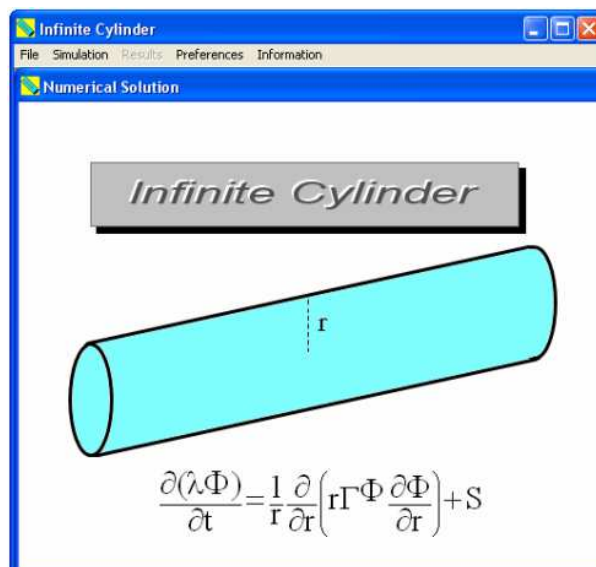


Figura 3.9: Tela principal do software “Infinite Cylinder”.

Este software resolve qualquer problema que envolve fenômenos de difusão, cuja geometria pode ser aproximada para cilindros infinitos. Por tratar de solução numérica pode-se considerar a variação nas dimensões do produto, bem como a variação nos parâmetros de processo.

## PARTE B - METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### 3.6 Matéria prima

Utilizou-se como matéria-prima neste estudo: a manga (*Mangifera indica L.*). Tal produto foi adquirido na feira livre de Cuité - PB. Sua escolha caracterizou-se por fruto saudável e que apresenta polpa firme.

### 3.7 Preparo das Amostras

Nesta pesquisa, para obter a polpa da manga *in natura*, os frutos foram lavados em água corrente para a remoção de sujeira. Após a limpeza, os frutos foram despulpados e postos em um Multiprocessador (Modelo Mondial - 400W, Figura 3.10a), sem adição de água, para a obtenção da polpa, que logo em seguida foram acondicionadas em recipientes

plásticos com tampas. Tal procedimento forneceu 1000 ml (1 litro) de polpa, o que preencheu, por completo, 5 recipientes plásticos com 200 ml cada um (Figura 3.10b).

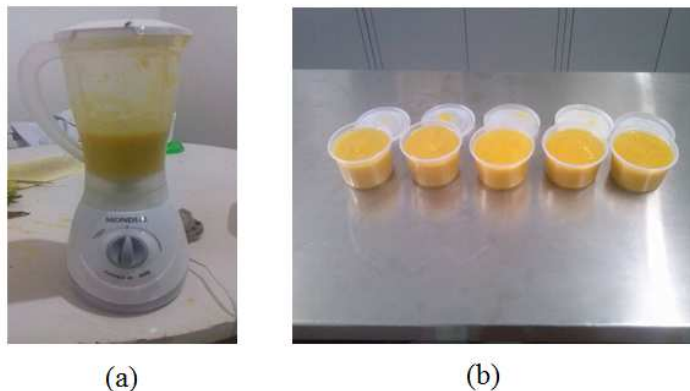


Figura 3.10: (a) Multiprocessador utilizado na obtenção da polpa; (b) Polpa acondicionada em recipiente plástico de 200 ml com tampa.

De posse das polpas acondicionadas, colocou-se os recipientes em cima da bancada do laboratório, para que a polpa estivesse em equilíbrio térmico com o ambiente que possui climatização controlada. Depois de um certo tempo, iniciou-se os procedimentos experimentais.

### 3.8 Confecção dos recipientes

Os recipientes cilíndricos utilizados na experiência foram tubos de alumínio, alguns com diâmetros iguais, mas todos com comprimentos diferentes. O formato dos recipientes estão representados na Figura 3.11. Para a medição do comprimento e dos diâmetros dos recipientes, foi utilizado um paquímetro universal, marca Pantec, com precisão de 0,05 mm e escala máxima de 150 mm (Figura 3.12).

A princípio, realizou-se um pequeno furo na metade do comprimento do cilindro para que fosse possível passar o fio do termopar (Tipo k). O termopar foi posicionado no meio do comprimento do cilindro através de adesivo de silicone acético transparente (resistente a temperaturas de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Após a colocação do termopar, o mesmo foi vedado com o adesivo de silicone no intuito de melhorar a fixação do termopar e impedir que houvesse vazamento do produto ou mesmo a penetração de água durante o processo de aquecimento.

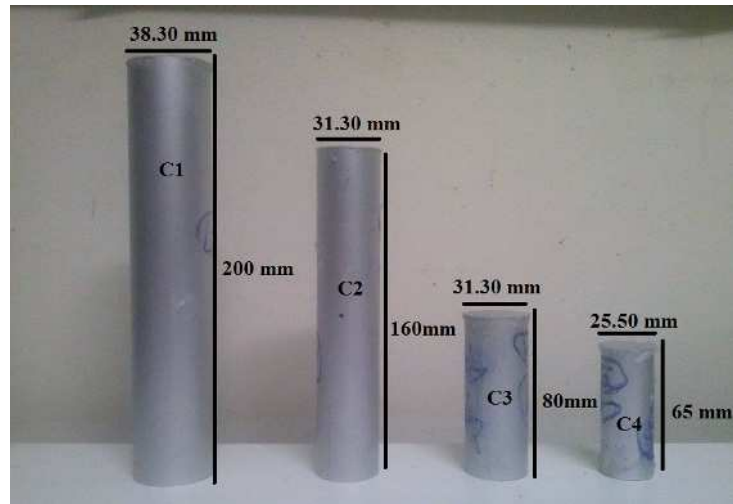


Figura 3.11: Recipientes que foram utilizados para acomodar a polpa no processo de aquecimento.



Figura 3.12: Paquímetro universal PANTEC.

### 3.9 Procedimentos experimentais

O processo térmico foi realizado no Laboratório de Tecnologia de Alimentos, do Centro de Educação e Saúde da Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba. Após o equilíbrio térmico das polpas com o ambiente, estas foram colocadas dentro dos recipientes (Figura 3.13a), com o auxílio de uma colher, até se encontrarem totalmente preenchidos. Em seguida colocou-se o termopar no centro geométrico do recipiente, pois esse é o ponto de interesse da análise, fixando-o com um pouco de cola silicone de tal forma que o mesmo ficasse bem posicionado (Figura 3.13b).

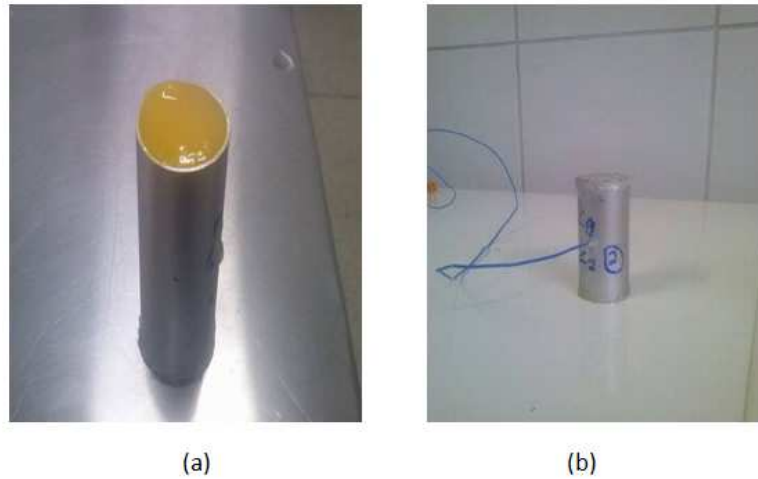


Figura 3.13: (a) Polpa inserida no recipiente; (b) Recipiente pronto para o tratamento térmico.

Em seguida, conectou-se o termopar ao termômetro digital, modelo TH - 095, que possui dois canais e pode ser alimentado através de uma bateria ou uma fonte de 9 V (Figura 3.14).



Figura 3.14: Termômetro digital.

Para medir os intervalos de tempo e suas respectivas temperaturas durante a experiências, foi colocado uma câmera filmadora digital para gravar os dados do termômetro e do cronômetro, podendo assim ao final da experiência, anotar manualmente os resultados através da filmagem. A Figura 3.15 representa a imagem que foi gravada pela filmadora digital.



Figura 3.15: Esquema montado para captar os dados do termômetro e do cronômetro.

### 3.10 O pasteurizador

O pasteurizador e processador Etiel PP - 30 L foi desenvolvido pela fábrica da Etiel localizada na cidade de Gramado - RS. O equipamento é confeccionado em Aço inoxidável AISI 304, com medidas internas iguais a 395 mm (comprimento), 248 mm (largura) e 325 mm (altura), possibilitando uma capacidade nominal de 30 litros (Figuras 3.16 e 3.17). O espaço entre os dois tanques para a circulação de água é de 20 mm na lateral e 33 mm na parte inferior.

Além do tanque de processamento, o pasteurizador e processador Etiel PP -30 L vem acompanhado dos seguintes acessórios de conexão:

- 01 ligação flexível de água fria e quente 1/2”;
- 01 ligação flexível de água fria e quente 3/4”;
- 01 Nipel 1/2”;
- 01 Nipel 3/4”;
- 02 Conexões tipo engate rápido;
- 01 Torneira de 1/2”.

Para realizar a instalação do pasteurizador e processador Etiel PP - 30 L foi desejável que houvesse rede de água próxima ao equipamento. O mesmo foi colocado sobre





Figura 3.16: Pasteurizador e processador Etiel PP - 30 L.

(Fonte: ATAÍDE, 2014)

uma fonte de calor, de forma que a mesma estivesse centralizada na parte de baixo do equipamento. O aquecimento também pode ser efetuado com circulação de água quente proveniente de caldeira. Em seguida conectou-se a parte metálica de um dos conjuntos à entrada de água localizada na parte inferior do tanque, e esta pelo engate rápido a uma mangueira. Por fim, repetiu-se a operação anterior para a saída da água, localizada na parte superior do tanque.

### 3.11 Tratamento térmico

Com o pasteurizador e processador Etiel PP - 30 L corretamente instalado colocou-se água no tanque interno, abriu-se a circulação de água para o espaço entre os dois tanques, até que ela começasse a sair para fechar a entrada de água. Em seguida, ligou-se o a fonte de calor, que neste estudo foi realizado por dois fogões elétricos com termostato e 750 watt de potência cada um. Como o pasteurizador não possui agitação mecânica, a cada 3 ou 4 minutos, realizou-se a homogeneização da água com um agitador, em movimentos de cima para baixo, em toda extensão do tanque. Quando a água contida no interior (10 litros) atingiu a temperatura de 65 °C, colocou-se o recipiente preenchido com a polpa dentro do pasteurizador (Figura 3.17).



Figura 3.17: A polpa de manga em processo de aquecimento.

Dessa forma, a amostra foi aquecida de forma lenta, em banho-maria a  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  por cerca de 30 minutos. Tal procedimento de aquecimento foi realizado 4 vezes com cilindros de tamanhos diferentes. Essas experiências, para controle e análises, receberam um código composto por uma letra seguida de um número no qual, a letra representou a origem do cilindro (C1, C2, C3 e C4), e o número representou a ordem experimental e o cilindro que estava sendo usado (Figura 3.11). Lembrando que apesar de alguns terem diâmetros iguais, todos possuem comprimentos diferentes, sendo que os recipientes C1 e C2 são considerados cilindros infinitos pois seus comprimentos são muito maiores que o raio, ou seja, ( $L \geq 10R$ ) e os outros recipientes C2 e C3, apesar de não corresponderem a este modelo, também foram tratados como cilindros infinitos.

Em todas as experiências, os dados coletados durante a filmagem foram anotados manualmente em um intervalo de tempo de 1 (um) segundo nos picos onde a temperatura aumentava rapidamente. Depois os intervalos foram anotados a cada 5 (cinco) ou 10 (dez) segundos e no final quando a temperatura quase não variava anotou-se a cada 20 (vinte) segundos.

O controle de temperatura durante todo o processo térmico foi também realizado manualmente, onde a temperatura da água foi verificada com o auxílio de um termômetro de espeto, modelo WT - 1, com uma capacidade de leitura de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Figura 3.18). Tal procedimento não é tão eficiente, contudo, manteve a temperatura do pasteurizador em  $65\text{ }^{\circ}\text{C}$  (variando  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$  para mais ou para menos), que é a variação aceitável na temperatura de pasteurização lenta.



Figura 3.18: Termômetro de espeto.

Em linhas gerais a pasteurização é um tratamento térmico realizado nos alimentos em três etapas: aquecimento, tempo de retenção e resfriamento. Nesta experiência, não foi feita a etapa do resfriamento, mas Ataíde (2014) fez e comprovou sua eficiência na redução dos micro-organismos totais, sem proporcionar tanta alteração nutricional, particularmente no valor proteico das polpas. Na experiência feita neste trabalho o intuito foi propor um tratamento térmico no qual o centro geométrico da amostra estivesse em equilíbrio térmico com toda a amostra.

Assim, encerra-se a apresentação dos modelos matemáticos para a simulação da transferência de calor em sólidos cilíndricos, bem como a metodologia experimental utilizada neste trabalho. No próximo capítulo ocorrerá a discussão dos resultados obtidos através do software utilizado, bem como a apresentação e discussão dos resultados obtidos nos procedimentos experimentais.

## Capítulo 4

# Resultados e Discussões

### 4.1 Considerações preliminares

No capítulo anterior, foram apresentados os modelos matemáticos necessários para o desenvolvimento das ferramentas disponibilizadas para a simulação da transferência de calor em sólidos cilíndricos, bem como a metodologia experimental utilizada neste trabalho. No capítulo que aqui se inicia, será feita a discussão do software utilizado, por comparação dos resultados obtidos com as ferramentas desenvolvidas neste trabalho e aqueles disponíveis na literatura, bem como a apresentação e discussão dos resultados obtidos.

### 4.2 Penetração do calor na polpa de manga

Com o intuito de verificar a penetração do calor na polpa de manga, foram realizadas 4 experiências (C1, C2, C3 e C4) com um termopar no centro geométrico. Os resultados obtidos estão descritos a seguir. A Tabela 4.1 mostra as dimensões dos recipientes utilizados durante a experiência

Tabela 4.1: Tamanho dos recipientes C1, C2, C3 e C4

Cilindro	C1	C2	C3	C4
Diâmetro (mm)	38,30	31,30	31,30	25,50
Comprimento (mm)	200	160	80	65

Considerando os dados sobre a temperatura no centro geométrico, obtidos pelas experiências (C1, C2, C3 e C4), foi possível através do LAB Fit Curve Fitting Software (SILVA e SILVA, 2009), transformar esse conjunto de pontos nos gráficos da Figura 4.1, cujos dados encontram-se nas Tabelas A.1 a A.4 (Apêndice).

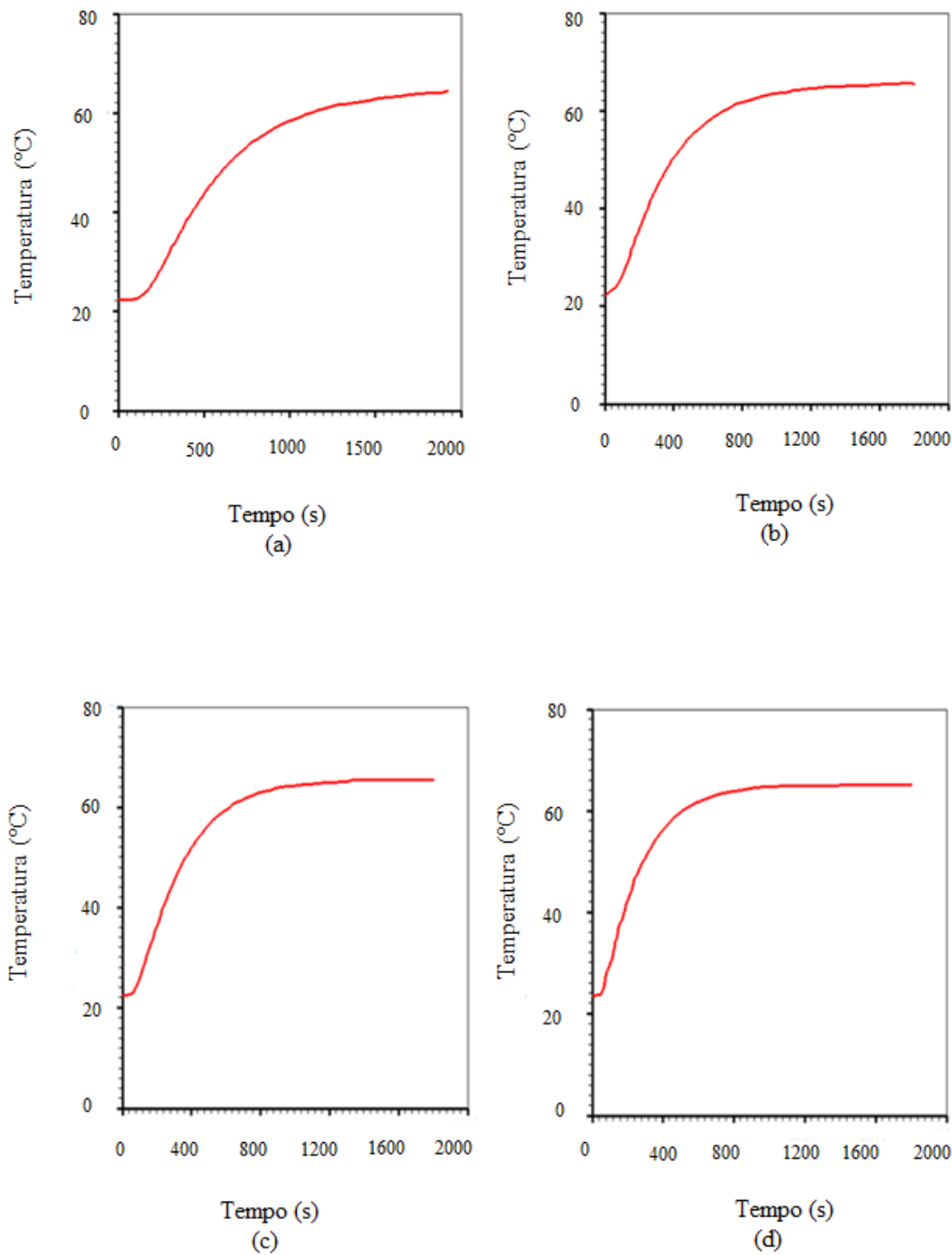


Figura 4.1: Gráficos da temperatura no centro geométrico do recipiente obtida dos dados do aquecimento para os experimentos: (a) C1; (b) C2; (c) C3 e (d) C4.

Nos gráficos mostrados na Figura 4.1, observa-se que as curvas que representam a temperatura do termopar no centro geométrico, apresentam uma variação de temperatura diferente em alguns gráficos. No gráfico (a) que representa o cilindro 1 (maior diâmetro), verifica-se que em 500 s, por exemplo, a temperatura é aproximadamente 45 °C. No gráfico (b) que representa o cilindro 2 (diâmetro menor que C1), nesse mesmo instante de tempo a temperatura é aproximadamente 55 °C. No gráfico (c), o qual representa o cilindro 3 e possui diâmetro igual a C2, nesse intervalo de tempo a temperatura é 56 °C, quase igual ao caso (b). E no gráfico (d) que representa o cilindro 4, e possui o menor diâmetro de todos, nesse intervalo de tempo a temperatura é 65 °C, ou seja, toda a amostra já está em equilíbrio térmico, o que pode-se concluir que o calor demora mais tempo para chegar no centro do recipiente nos cilindros que possuem o diâmetro maior.

As curvas de aquecimento nos gráficos (b) e (c), que representam os cilindros 2 e 3 respectivamente, são análogas, pois o recipiente usado em (b) possui diâmetro igual ao de (c), mostrando que a cinética de penetração de calor são semelhantes nesses casos. Para melhor compreensão das diferenças de temperaturas em cada experiência, bem como a curva de aquecimento, apresenta-se nas Figuras 4.2 e 4.3 a comparação entre as medidas de temperatura em função do tempo no centro geométrico dos recipientes.

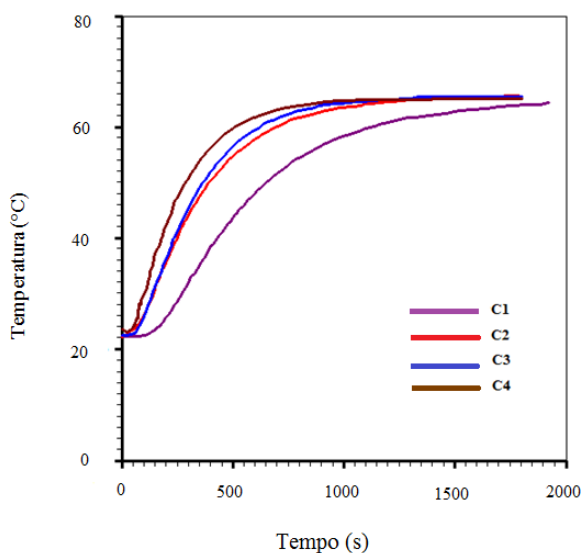


Figura 4.2: Comparação entre as curvas de aquecimento no centro geométrico dos recipientes C1, C2, C3 e C4.

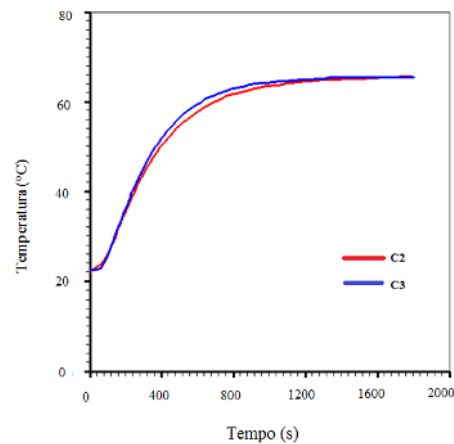


Figura 4.3: Comparação entre as curvas de aquecimento no centro geométrico dos recipientes com diâmetros iguais C2 e C3.

### 4.3 Resultado experimentais

Posteriormente, a apresentação e discussão dos resultados experimentais referentes à penetração de calor, buscou-se realizar otimizações para determinar a função que melhor representa a difusividade térmica para o fenômeno de transferência de calor. Para isso, utilizou-se o software “Infinite Cylinder” desenvolvido por Silva (2010) que apresenta gráficos para a interpretação dos resultados numéricos obtidos. Tal software também simula a transferência de calor usando condição de contorno do primeiro ou terceiro tipo.

### 4.4 A penetração do calor

Existem vários trabalhos de autores que consideram que a difusividade térmica aparente é sensível à temperatura de um produto no qual ocorre transferência de calor. Se existir uma distribuição de temperatura no produto, a consideração de uma expressão para a difusividade térmica aparente em função da temperatura local  $\alpha(T)$ , é uma opção para melhorar os resultados obtidos na discretização da equação de transferência de calor (Ataíde, 2014). O software *Infinite Cylinder* Silva (2010) possibilita que se estime qual a melhor função,  $\alpha(T)$  dentre vinte funções disponibilizadas pelo software. Devido a este fato, foram realizadas otimizações para a cinética de penetração do calor no centro do recipiente usando várias expressões para a difusividade térmica aparente da polpa do manga como função da temperatura local.

## 4.5 Resultados das otimizações

Nesta seção, apresenta-se os resultados obtidos nas otimizações para as quatro experiências com os cilindros utilizados. Analisou-se 6 funções dentre aquelas disponíveis no software *Infinite Cylinder* SILVA (2010). É importante destacar que, em todas as otimizações utilizou-se um valor qualquer para a difusividade térmica constante, pois, nesta fase, o valor da difusividade térmica é apenas lido, não é usado pelo software. De posse dos resultados obtidos nos processos de otimização, em todas as experiências, as funções foram colocadas em Tabelas, por ordem crescente do valor do  $\chi^2$ . Tal fato ocorre, pois a melhor função corresponde a que possui menor  $\chi^2$  e maior  $R^2$ .

### 4.5.1 Experiência com recipiente C1: diâmetro (38.30 mm); comprimento (200 mm).

Para este cilindro, com o intuito de encontrar a função que melhor representa a difusividade térmica aparente, foram utilizadas os dados da Tabela A.1 (Apêndice) e os parâmetros da Tabela 4.2:

Tabela 4.2: Arquivo com dados informados para otimização da experiência C1

<b>Raio (m)</b>	<b>Volumes de controle</b>
1,915 x 10 <sup>-2</sup>	100
<b>Temperatura inicial (°C)</b>	<b>Temperatura final (°C)</b>
22,4	65,0
<b>Número de passos no tempo (s)</b>	<b>Acompanhar transiente de nó</b>
2000	1

Os resultados obtidos nos processos de otimização para os dados da experiência C1 são apresentados na Tabela 4.3, em ordem crescente do valor do  $\chi^2$ .



Tabela 4.3: Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente na experiência C1, do qui-quadrado e do coeficiente de determinação.

Ordem	Função	a	b(m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	$\chi^2$	R <sup>2</sup>
1	$be^{(aT)}$	1,3541657 x 10 <sup>-3</sup>	1,3790773 x 10 <sup>-7</sup>	0,9154954	0,9999533
2	$b \cosh(aT)$	5,4152906 x 10 <sup>-3</sup>	1,4210505 x 10 <sup>-7</sup>	1,000636	0,9999495
3	$aT^2 + b$	2,2201089 x 10 <sup>-12</sup>	1,4180827 x 10 <sup>-7</sup>	1,004161	0,9999490
4	$be^{(aT^2)}$	1,4309393 x 10 <sup>-5</sup>	1,4211581 x 10 <sup>-7</sup>	1,004209	0,9999493
5	$b \cosh(aT^2)$	7,6270262 x 10 <sup>-5</sup>	1,4428386 x 10 <sup>-7</sup>	1,183068	0,9999415
6	a	1,4702825 x 10 <sup>-7</sup>	-	2,413440	0,9999273

A evolução da temperatura no centro do recipiente simulada numericamente usando a função  $\alpha(T) = be^{(aT)}$ , bem como os dados experimentais são mostrados na Figura 4.4.

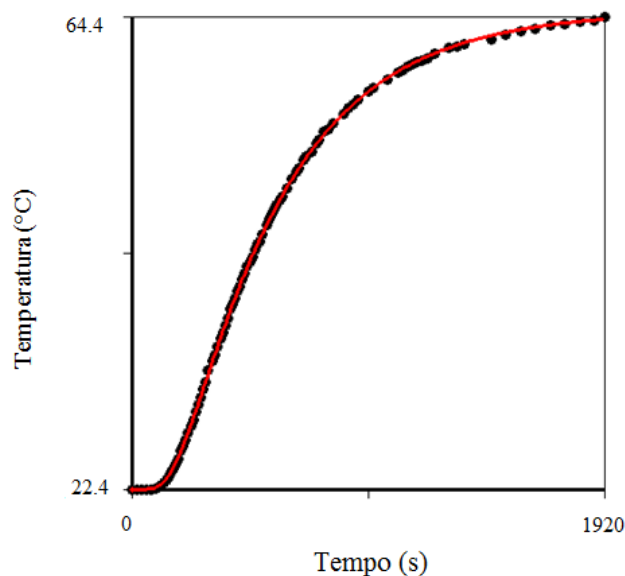


Figura 4.4: Gráfico representando a penetração de calor a partir da simulação numérica e os pontos obtidos experimentalmente no centro do recipiente C1.

Como se pode observar nos resultados expostos anteriormente, o indicador estatístico  $\chi^2$  para a difusividade térmica aparente da polpa de manga na experiência C1, quando expressa pela função  $\alpha(T) = be^{(aT)}$  são melhores que aqueles obtidos quando se considerou constante a difusividade térmica aparente, isso prova que a difusividade varia

com a temperatura local.

#### 4.5.2 Experiência com recipiente C2: diâmetro (31.30 mm); comprimento (160 mm).

Para o cilindro 2, com o intuito de encontrar a função que melhor representa a difusividade térmica aparente, foram utilizadas os dados da Tabela A.1 (Apêndice) e os parâmetros da Tabela 4.4:

Tabela 4.4: Arquivo com dados informados para otimização da experiência C2

<b>Raio (m)</b>	<b>Volumes de controle</b>
1,565 x 10 <sup>-2</sup>	100
<b>Temperatura inicial (°C)</b>	<b>Temperatura final (°C)</b>
22,2	65,6
<b>Número de passos no tempo (s)</b>	<b>Acompanhar transiente de nó</b>
2000	1

Os resultados obtidos nos processos de otimização para os dados da experiência C2 são apresentados na Tabela 4.5, em ordem crescente do valor do  $\chi^2$ .

Tabela 4.5: Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente na experiência C2, do qui-quadrado e do coeficiente de determinação.

Ordem	Função	a	b(m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	$\chi^2$	R <sup>2</sup>
1	a	1,6684449 x 10 <sup>-7</sup>	-	79,34926	0,9982482
2	aT <sup>2</sup> + b	3,5516115 x 10 <sup>-4</sup>	1,6676226 x 10 <sup>-7</sup>	79,64704	0,9982415
3	b cosh(aT <sup>2</sup> )	2,3961827 x 10 <sup>-10</sup>	1,6471738 x 10 <sup>-7</sup>	83,48499	0,9985517
4	b e <sup>(aT<sup>2</sup>)</sup>	1,31554384 x 10 <sup>-6</sup>	1,6368162 x 10 <sup>-7</sup>	87,10236	0,9984389
5	cosh(aT)	2,5867475 x 10 <sup>-3</sup>	1,6361540 x 10 <sup>-7</sup>	87,33194	0,9984328
6	b e <sup>(aT)</sup>	8,2956906 x 10 <sup>-4</sup>	1,5934037 x 10 <sup>-7</sup>	93,45231	0,9981577

A evolução da temperatura no centro do recipiente simulada numericamente usando a função constante  $\alpha(T) = a$ , bem como os dados experimentais são mostrados na Figura 4.5.

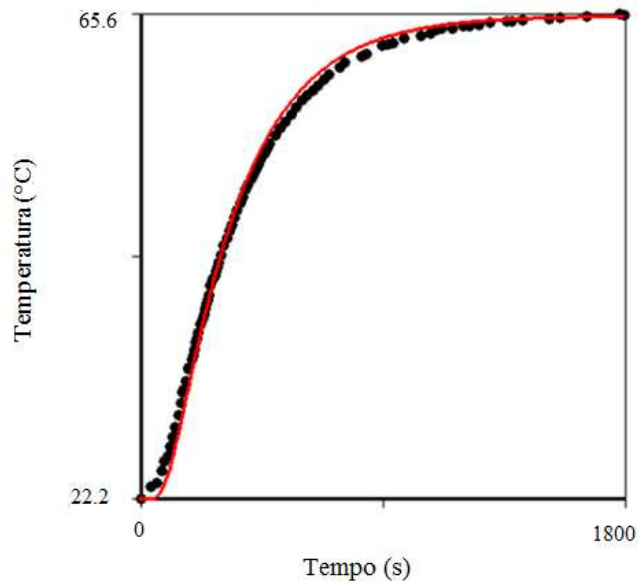


Figura 4.5: Gráfico representando a penetração de calor a partir da simulação numérica e os pontos obtidos experimentalmente no centro do recipiente C2.

Como se pode observar nos resultados expostos anteriormente, o indicador estatístico  $\chi^2$  para a difusividade térmica aparente da polpa de manga na experiência C2, quando expressa pela função constante  $\alpha(T) = a$ , foi melhor que aqueles quando se considerou variável a difusividade térmica. Apesar deste resultado não atender as especificações, mais adiante será discutido e analisado com mais detalhes.

### 4.5.3 Experiência com o recipiente C3: diâmetro (31.30 mm); comprimento (80 mm).

Na experiência com o cilindro 3, para encontrar a função que melhor representa a difusividade térmica aparente, utilizou-se os dados da Tabela A.3 (Apêndice) e os parâmetros da Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Arquivo com dados informados para otimização da experiência C3

Raio (m)	Volumes de controle
$1,565 \times 10^{-2}$	100
Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)
22,5	65,4
Número de passos no tempo (s)	Acompanhar transiente de nó
2000	1

Os resultados obtidos nos processos de otimização para os dados da experiência C3 são apresentados na Tabela 4.7, em ordem crescente do valor do  $\chi^2$ .

Tabela 4.7: Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente na experiência C3, do qui-quadrado e do coeficiente de determinação.

Ordem	Função	a	b(m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> )	$\chi^2$	R <sup>2</sup>
1	a	$1,7668263 \times 10^{-7}$	-	10,64638	0,9995114
2	$aT^2 + b$	$1,7464112 \times 10^{-14}$	$1,7665313 \times 10^{-7}$	10,67763	0,9995095
3	$be^{(aT^2)}$	$1,4778003 \times 10^{-6}$	$1,7529744 \times 10^{-7}$	11,40198	0,9995468
4	$\cosh(aT)$	$2,1214087 \times 10^{-3}$	$1,7495972 \times 10^{-7}$	11,66227	0,9995399
5	$b \cosh(aT^2)$	$2,7844326 \times 10^{-5}$	$1,7509598 \times 10^{-7}$	11,78722	0,9995661
6	$be^{(aT)}$	$2,6198160 \times 10^{-3}$	$1,5519554 \times 10^{-7}$	24,23415	0,9991707

A evolução da temperatura no centro do recipiente simulada numericamente usando a função constante  $\alpha(T) = a$ , bem como os dados experimentais são mostrados na Figura 4.6.

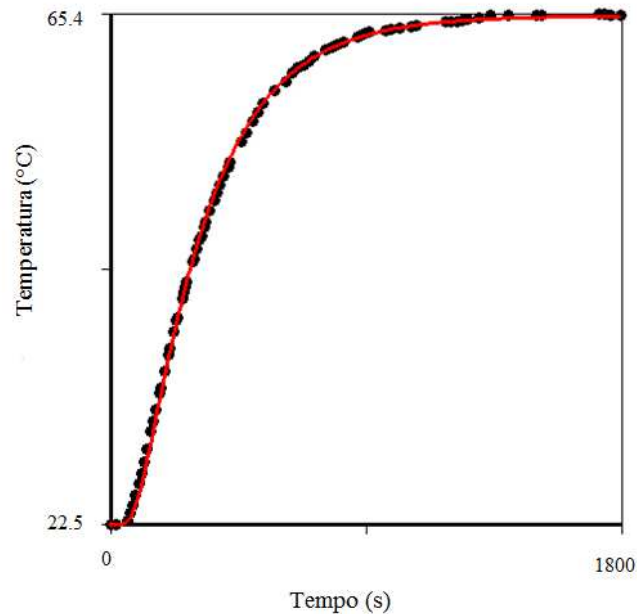


Figura 4.6: Gráfico representando a penetração de calor a partir da simulação numérica e os pontos obtidos experimentalmente no centro do recipiente C3.

Como se pode observar nos resultados expostos anteriormente, o indicador estatístico  $\chi^2$  para a difusividade térmica aparente da polpa de manga na experiência C3, quando expressa pela função constante  $\alpha(T) = a$ , foi melhor que aqueles quando se considerou variável a difusividade térmica. Apesar deste resultado não atender as especificações, mais adiante será discutido e analisado com mais detalhes.

#### 4.5.4 Experiência com o recipiente C4: diâmetro (25.50 mm); comprimento (65 mm).

Nesta ultima experiência, para encontrar a função que melhor representa a difusividade térmica aparente, utilizou-se os dados da Tabela A.4 (Apêndice) e os parâmetros da tabela 4.8.

Tabela 4.8: Arquivo com dados informados para otimização da experiência C4

Raio (m)	Volumes de controle
$1,275 \times 10^{-2}$	100
Temperatura inicial (°C)	Temperatura final (°C)
23,6	65,2
Número de passos no tempo (s)	Acompanhar transiente de nó
2000	1

Os resultados obtidos nos processos de otimização para os dados da experiência C4 são apresentados na Tabela 4.9, em ordem crescente do valor do  $\chi^2$ .

Tabela 4.9: Valores de a e b das funções da difusividade térmica aparente na experiência C4, do qui-quadrado e do coeficiente de determinação.

Ordem	Função	a	b( $m^2s^{-1}$ )	$\chi^2$	$R^2$
1	$b \cosh(aT^2)$	$3,1169674 \times 10^{-11}$	$1,4885593 \times 10^{-7}$	24,71930	0,9988133
2	a	$1,4885593 \times 10^{-7}$	-	24,71930	0,9988132
3	$b \cosh(aT)$	$2,2255406 \times 10^{-7}$	$1,4885893 \times 10^{-7}$	24,71931	0,9988131
4	$be^{(aT^2)}$	$1,1551555 \times 10^{-6}$	$1,4716100 \times 10^{-7}$	26,42147	0,9988313
5	$aT^2 + b$	$1,9746711 \times 10^{-13}$	$1,4709296 \times 10^{-7}$	26,53188	0,9988267
6	$be^{(aT)}$	$1,6107347 \times 10^{-3}$	$1,3706673 \times 10^{-7}$	36,26519	0,9984169

A evolução da temperatura no centro do recipiente simulada numericamente usando a função  $\alpha(T) = b \cosh(aT^2)$ , bem como os dados experimentais são mostrados na Figura 4.7.

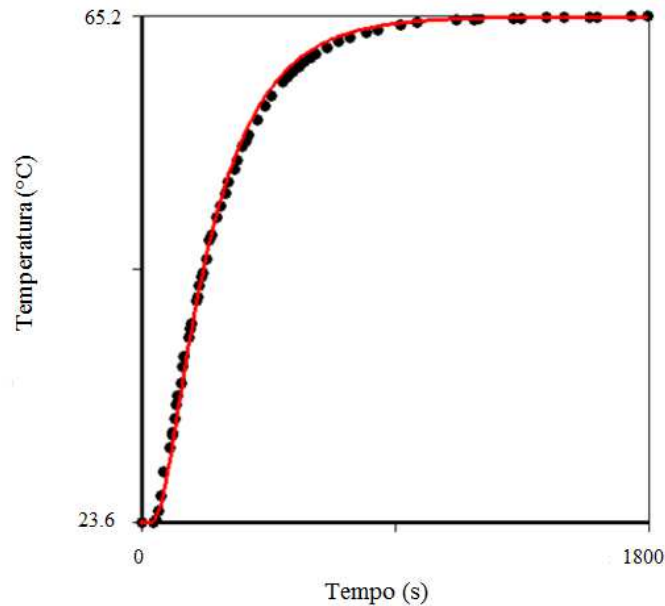


Figura 4.7: Gráfico representando a penetração de calor a partir da simulação numérica e os pontos obtidos experimentalmente no centro do recipiente C4.

Como se pode observar nos resultados expostos anteriormente, o indicador estatístico  $\chi^2$  para a difusividade térmica aparente da polpa de manga na experiência C4, quando expressa pela função  $\alpha(T) = b \cosh(aT^2)$ , foi melhor que aqueles obtidos quando se considerou constante a difusividade térmica aparente, isso prova que a difusividade varia com a temperatura local.

## 4.6 Discussão sobre os resultados das otimizações

Como pode ser visto nos resultados expostos anteriormente, o valor para difusividade térmica da manga, nos recipientes C1 e C4, representado pelas funções  $\alpha(T) = 1,3890773 \times 10^{-7} e^{(1,3541657 \times 10^{-3} T)}$  e  $\alpha(T) = 1,4885593 \times 10^{-7} \cosh(3,1169674 \times 10^{-11} T^2)$ , respectivamente, foram melhores que os resultados obtidos nas experiências C2 e C3 que apontaram a melhor expressão para difusividade térmica como sendo uma função cons-

tante. Os resultados encontrados nas experiências C1 e C4 tornam-se coerentes quando comparados com os resultados encontrados na literatura por Ataíde (2014) e Costa (2015).

Ataíde (2014) determinou expressões para a difusividade térmica aparente da polpa de mamão e de cajú, e na ocasião encontrou  $\alpha(T) = 1,243 \times 10^{-7} \cosh(1,756 \times 10^{-4}T^2)$  e  $\alpha(T) = 1,201 \times 10^{-7} \cosh(1,979 \times 10^{-4}T^2)$ , respectivamente. Com este resultado o autor comprovou que a difusividade térmica é crescente com a temperatura local.

Costa (2015) testou várias experiências com cilindros diferentes, contendo polpa de jaca, e encontrou a seguinte expressão para melhor representar a difusividade térmica variável com a temperatura local  $\alpha(T) = 2,959 \times 10^{-3}T + 1,337 \times 10^{-7}$ .

Na literatura existem trabalhos de autores que usaram diferentes métodos para encontrar a difusividade térmica da manga, e de outras frutas, mostrando que a mesma varia com o aumento da temperatura. Dantas Junior et. al (2007), encontraram um valor para difusividade térmica da polpa de manga espada de  $1,465 \times 10^{-7} (m^2s^{-1})$ , utilizando o método criado por Dickerson (1965).

Simões e Murr (2000), determinou a difusividade térmica para quatro amostras diferentes de polpa de manga (polpa Integral, peneirada, centrifugada e concentrada), usando o método utilizado por Silva (1997), onde verificou-se a influência dos sólidos solúveis e insolúveis. Os resultados encontrados para a difusividade térmica das polpas integral, centrifugadas e peneiradas variaram entre  $1,38 \times 10^{-7}(m^2s^{-1})$  a  $1,41 \times 10^{-7}(m^2s^{-1})$ , mostrando que os sólidos insolúveis não mostraram grande influência no cálculo da difusividade térmica. Já as polpas concentradas apresentaram uma diminuição da difusividade térmica quando se aumentou a concentração de sólidos solúveis, apresentando um valor de  $1,28 \times 10^{-7}(m^2s^{-1})$ .

Silva et. al (2010) usou o método de FLASH e encontrou valores para difusividade térmica da acerola que variaram de  $1,88$  a  $2,14 \times 10^{-7}(m^2s^{-1})$ . Com os resultados os autores verificaram que a difusividade térmica aumentou com a temperatura local.



Os resultados obtidos nas experiências C2 e C3, onde mostraram que a melhor expressão que representa a difusividade térmica foi a função constante dada por:  $\alpha(T) = 1,6684449 \times 10^{-7} (m^2 s^{-1})$  e  $\alpha(T) = 1,7668263 \times 10^{-7} (m^2 s^{-1})$  respectivamente, podem ser explicados segundo Ukrainczyk (2009), onde o autor mostra em suas experiências feitas com cilindros infinitos, que para melhorar a precisão e rigor dos resultados da difusividade térmica, um cilindro com um raio tão grande quanto possível, deve ser utilizado a fim de aumentar a precisão e exatidão do método. Esses resultados podem ser justificados devido a erros durante a experiência, como por exemplo, mau posicionamento do termopar, pois um erro como esse em um cilindro de raio pequeno é mais acentuado. Dessa forma, como mostrado anteriormente, o cilindro 1 que possui o maior diâmetro, foi aquele que apresentou o melhor resultado para difusividade térmica, mostrando que os argumentos de Ukrainczyk (2009) são coerentes com as experiências realizadas neste trabalho. Vale ressaltar que, apesar do Cilindro 4 apresentar um diâmetro pequeno, os resultados também foram bons, devido ao fato de não ter cometido possíveis erros durante a experiência.

Silva et. al (2015) reforça que a forte redução na área do fluxo de calor no modelo em uma dimensão, superestima significativamente a difusividade quando comparada com esta propriedade obtida com os modelos 3D (e também 2D). Além disso, os modelos 3D quando simplificados para o caso unidimensional, não fornecem informações tão boas. No entanto, os parâmetros de processo obtidos neste estudo de otimização servem, pelo menos, tal como os valores iniciais para outros processos de otimização envolvendo um modelo 3D.

Portanto, os resultados obtidos para a difusividade térmica na otimização feita neste trabalho, bem como o método empregado, mostram ser coerentes quando comparados com aqueles encontrados na literatura, Verificando que, assim como nos trabalhos citados aqui, a difusividade térmica varia com a temperatura local.

## 4.7 Simulação com os dados experimentais

Usando o menu “*Simulation*” também disponível no software *Infinite Cylinder*, foram gerados os gráficos das Figuras 4.8 a 4.11 em que, através do código de cores, mostra a distribuição da temperatura no interior do recipiente ao simular as condições experimentais para cada recipiente contendo polpa de manga.

### 4.7.1 Simulação com os dados da experiência C1

Na Figura 4.8, são mostrados os gráficos de contorno para a polpa da manga em cinco instantes do processo de aquecimento utilizando o recipiente C1.

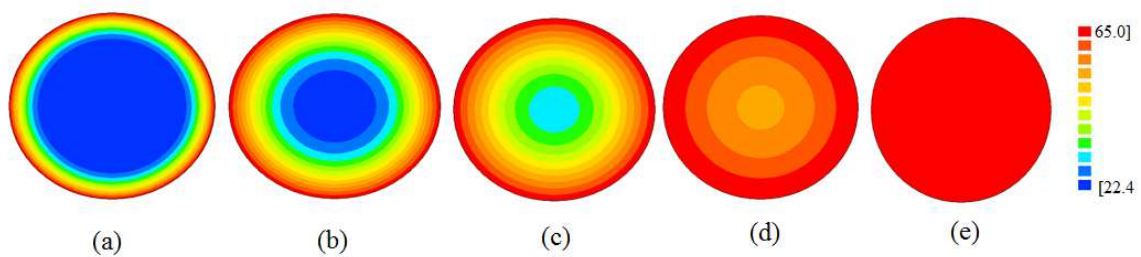


Figura 4.8: distribuição das temperaturas no interior da polpa de manga nos instantes: (a) 5 min; (b) 10 min; (c) 15 min; (d) 25 min; (e) 30 min.

Nos gráficos mostrados acima, observar-se que, após 30 minutos, todos os pontos da amostra de polpa de manga atingiram a temperatura de tratamento (equilíbrio térmico).

### 4.7.2 Simulação com os dados da experiência C2

Na Figura 4.9, são mostrados os gráficos de contorno para a polpa da manga em cinco instantes do processo de aquecimento utilizando o recipiente C2.

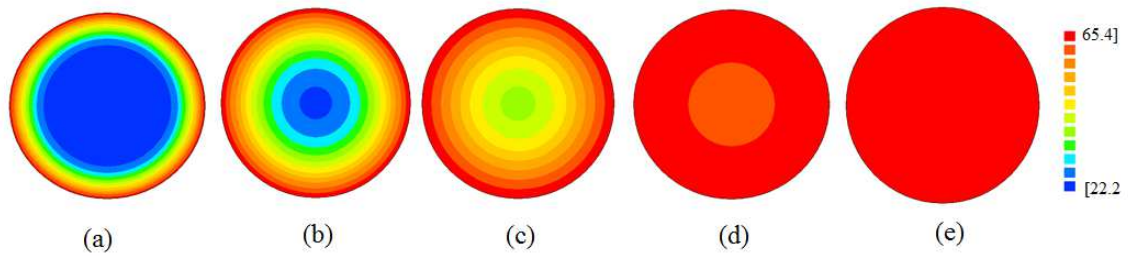


Figura 4.9: distribuição das temperaturas no interior da polpa de manga nos instantes: (a) 5 min; (b) 10 min; (c) 15 min; (d) 25 min; (e) 30 min.

Observar-se que, após 25 minutos, quase todos os pontos da amostra de polpa de manga atingiram a temperatura de tratamento, o que mostra um aquecimento mais rápido em relação ao recipiente C1, devido o diâmetro ser menor. Verifica-se também que, em 30 minutos todo os pontos, assim como no recipiente C1, já atingiram o equilíbrio térmico.

### 4.7.3 Simulação com os dados da experiência C3

Na Figura 4.10, são mostrados os gráficos de contorno para a polpa de manga em cinco instantes do processo de aquecimento utilizando o recipiente C3.

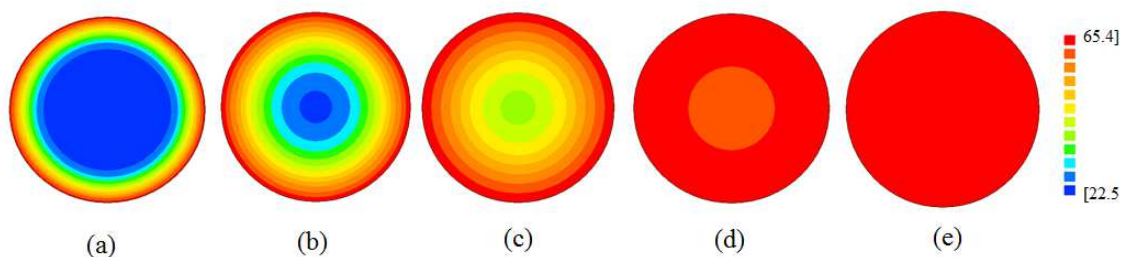


Figura 4.10: distribuição das temperaturas no interior da polpa de manga nos instantes: (a) 5 min; (b) 10 min; (c) 15 min; (d) 25 min; (e) 30 min.

Como pode ser observado, os gráficos de contorno nesta experiência são iguais aos do recipiente C2, pois, os diâmetros dos recipientes são iguais, o que verifica-se que a distribuição de temperatura também é igual.

#### 4.7.4 Simulação com os dados da experiência C4

Na Figura 4.11, são mostrados os gráficos de contorno para a polpa da manga em cinco instantes do processo de aquecimento utilizando o recipiente C4.

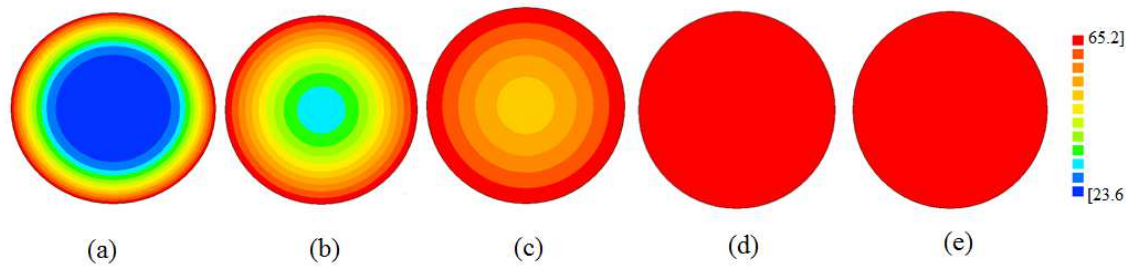


Figura 4.11: distribuição das temperaturas no interior da polpa de manga nos instantes: (a) 5 min; (b) 10 min; (c) 15 min; (d) 25 min; (e) 30 min.

Observar-se que, após 25 minutos, todos os pontos da amostra de polpa de manga atingiram a temperatura de tratamento. Neste caso, o aquecimento ocorreu mais rápido em relação as outras experiências. Tal fato explica-se devido o recipiente C4 Possuir o menor diâmetro de todos.

## 4.8 Discussão sobre os resultados das simulações

Os resultados obtidos através das simulações mostram que, em todas as experiências, a temperatura de equilíbrio é atingida após 30 minutos. Dessa forma é possível destacar a importância deste trabalho, nos que se diz respeito a possibilidade de realizar simulações de aquecimento de produtos pastosos contidos em recipientes cilíndricos, garantindo que apenas por simulação, a região menos favorável do produto também tenha alcançado a temperatura de tratamento (equilíbrio térmico). Sendo assim é possível alterar a geometria das embalagens sem que para isso se faça necessário o investimento em experimentos, possibilitando a redução dos custos.

## Capítulo 5

# Conclusões e Sugestões

### 5.1 Considerações preliminares

No capítulo anterior, realizou-se a discussão dos resultados obtidos com as ferramentas utilizadas neste trabalho. No capítulo que aqui se inicia, são apresentadas as principais conclusões obtidas, bem como sugestões para trabalhos futuros.

### 5.2 Conclusões

Diante dos resultados obtidos nas aplicações aos dados experimentais da polpa da manga, é possível apresentar algumas conclusões que serão enumeradas a seguir.

- Os resultados obtidos para os parâmetros termo-físicos, através do software utilizado, fornecem resultados condizentes com a literatura.
- O software utilizado para simular o processo de difusão de calor em processos de pasteurização e determinar parâmetros termo-físicos forneceu resultados condizentes com a literatura.
- Para o recipiente C1, estimou-se que a melhor função para representar a difusividade térmica variável da polpa de manga, é crescente com a temperatura local, sendo expressa por  $\alpha(T) = 1,3890773 \times 10^{-7} e^{(1,3541657 \times 10^{-3} T)}$ .

- Para o recipiente C2, estimou-se que a melhor função para representar a difusividade térmica da polpa da manga foi a função constante, expressa por  $\alpha(T) = 1,6684449 \times 10^{-7} (m^2 s^{-1})$ .
- Para o recipiente C3, estimou-se que a melhor função para representar a difusividade térmica da polpa da manga foi a função constante, expressa por  $\alpha(T) = 1,7668263 \times 10^{-7} (m^2 s^{-1})$ .
- Para o recipiente C4, estimou-se que a melhor função para representar a difusividade térmica variável da polpa de manga, é crescente com a temperatura local, sendo expressa por  $\alpha(T) = 1,4885593 \times 10^{-7} \cosh(3,1169674 \times 10^{-11} T^2)$ .
- Os indicadores estatísticos das cinéticas de aquecimento melhoram sensivelmente quando se considera a difusividade térmica aparente do manga variável, pois, nas experiências C1 e C4, o qui-quadrado diminuiu enquanto o coeficiente de determinação aumentou.
- Os resultados obtidos mostram que quanto maior o diâmetro do recipiente, maior será o tempo, para que toda a amostra atinja o equilíbrio térmico e, conseqüentemente melhor será o valor da difusividade térmica.
- As soluções numéricas obtidas com o software empregado, foram usadas para estimar o tempo e as condições adequadas ao processo. De modo, torna-se desnecessário a realização de experimentos a cada vez que um recipiente cilíndrico de dimensões diferentes for utilizado para acondicionar o produto.
- Como uma contribuição deste trabalho, as ferramentas numéricas utilizadas para descrever o processo de transferência de calor por condução em polpa de manga, usando a condição de contorno de primeiro tipo constante e a difusividade térmica variável em função da temperatura local, fornecem resultados eficientes para o estudo da penetração de calor em polpa de manga.

### 5.3 Sugestões para futuros trabalhos de pesquisa

- Aplicar a metodologia proposta para outros produtos alimentícios em estado pastoso.
- Aplicar a metodologia proposta para produtos acondicionados em recipientes com outras geometrias.
- Fazer o resfriamento após a etapa de aquecimento, bem como a análise microbiológica antes e depois.

---

## Referências Bibliográficas

- [1] ABREU, S.R.,S.M.; PEREIRA, S.S.F.; TRINDADE, F.B.; OLIVEIRA, G.C.; SANTOS, C.M.L. *A importância das frutas na alimentação*. Organização Mundial de Saúde: Sete Lagoas - MG, 2008.
- [2] ANDRADE, P.F. de S. *Fruticultura - Análise da Conjuntura Agropecuária*. SEAB - Secretaria de Estado da Agricultura e do Abastecimento. 2012.
- [3] ATAÍDE, J.S.P. *Transferência de calor durante o processo de pasteurização de polpas de frutas armazenadas em recipientes obtidos por revolução de áreas planas*. 2014. 259 f. Tese (Doutorado em engenharia de processos) Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, PB, 2014.
- [4] AZEVEDO, L.C.; DE AZOUBEL, P. M.L.; SILVA, I.R.A.; ARAUJO, A. J. de B.; OLIVEIRA, S.B. *Caracterização físico-química da farinha da casca de manga cv. tommy atkins*. Anais do XXI CBCTA, 2008.
- [5] BETTA, G.; RINALDI, M.; BARBANTI, D.; MASSINI, R. *A quick method for thermal diffusivity estimation: application to several foods*. Journal of Food Engineering, v. 91 p. 34-41, 2009.
- [6] BIRD, R. B.; STEWART, W. E.; LIGHTFOOT, E. N. *Transport phenomena*. 2. ed. New York: John Wiley e Sons, Inc., 2001.
- [7] BORTOLI, A.L. *Introdução à dinâmica dos fluidos computacional*. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRS, 2000, 134 p.
- [8] CARCIOFI, B. A. M.; FAISTEL, J.; ARAGÃO, G. M. F.; LAURINDO, J. B. *Determination of thermal diffusivity of mortadella using actual cooking process data*. Journal of Food Engineering, v. 55, p. 89-94, 2002.



- [9] CARVALHO, J. M.; MENDONÇA, M. C. A.; REIS, A. J. *Produção de manga no Brasil e sua comercialização nos mercados interno e externo*. Caderno de Administração Rural, Lavras, v. 9, n. 1, p. 53-60, 1997.
- [10] CAVALCANTI, M.T.; SILVA, V.C.; COSTA, T.S.; FLORENÇIO, I M.; FLORENTINO, E.R. *Obtenção do amido do endocarpo da manga para diversificação produtiva na indústria de alimentos*. Revista Verde (Mossoró - RN - Brasil), v.6, n. 5, p. 80 - 83 dezembro de 2011.
- [11] CORREIA, R.C.; ARAUJO, J.L.P. *Cultivo da Mangueira - Mercado Interno; Mercado externo; Características do mercado*. Embrapa Semiárido: Sistemas de Produção, 2 - 2ª edição, 2010.
- [12] COSTA, W.S. *Descrição Da Transferência De Calor Em Produtos Alimentares Submetidos a Processos Com Condição De Contorno Variável*. 2015. 259 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB. 2015.
- [13] DANTAS JUNIOR, E.E.; QUEIROZ, A.J.M.; FIGUEIREDO, R.M.F. *Determinação da difusividade térmica da polpa da manga espada*. Revista Educação Agrícola Superior, v.22, n.1, p.43-46, 2007.
- [14] DAMIANI, C.; ALMEIDA, A.C.S.; FERREIRA, J.; ASQUIERI, E.R.; VILAS BOAS, E.V.B.; SILVA, F.A. *Doces de corte formulados com casca de manga*. Revista Pesquisa Agropecuária Tropical, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 360-369, jul./set, 2011.
- [15] DINCER, I; GENÇELI, O.F. *Cooling process parameters of cylindrical products cooled both in water and in air*. *Int. J. Heat mass transfer*. 1995.
- [16] FARIAS, V.S.O. *Difusão 3D em sólidos com forma arbitrária usando coordenadas generalizadas*. 265 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB. 2011.
- [17] FELLOWS, P. *Food processing technology: principles and practice*. CRC. 2. ed., 2006.
- [18] FELIPE, É.M.F.; COSTA, J M.C.; MAIA, A.M.; HERNANDEZ, F.F.H. *Avaliação da qualidade de parâmetros minerais de pós-alimentícios obtidos de casca de manga*

- e maracujá*. Revista Alimentação e Nutrição. Araraquara, v. 17, n. 1, p. 79-83, jan./mar. 2006.
- [19] GAVA, A.J. *Princípio de Tecnologia de alimentos*. 2. ed. São Paulo: Nobel, 2009.
- [20] IBGE. *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia>>. Acesso em: 15 de fevereiro de 2016.
- [21] JARAMILLO-FLORES, M.E.; HERNANDEZ-SANCHEZ, H. *Thermal diffusivity of soursop (Annona muricata L.) pulp*. Journal of food engineering, v. 46, n. 2, p. 139 - 143, 2000.
- [22] LINS, M. A. A. *Estudo analítico e numérico das propriedades termo-físicas durante o processo de transferência de calor em produtos de forma cilíndrica*. 2013. 262 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2013.
- [23] MARIANI, V.C., LIMA, A.G.B., COELHO, L.S. *Apparent thermal diffusivity estimation of the banana during drying using inverse method*. Journal of Food Engineering, 85, 569-579, 2008.
- [24] MARIANI, V.C., AMARANTE, A.C.C.; COELHO, L.S. *Estimation of apparent thermal conductivity of carrot purée during freezing using inverse problem*. International Journal of Food Science and Technology, 44, 1292-1303, 2009.
- [25] OETTERER, M.A.; REGITANO-D'ARCE, M. A. B.; SPOTO, M. H. F. *Fundamentos de ciência e tecnologia de alimentos*. São Paulo: Manole, 2006.
- [26] ORDÓÑEZ, J.A. *Tecnologia de alimentos - Componente dos alimentos e processos*. Editora Artmed, v.1, Porto Alegre - RS, 2005.
- [27] POLLONIO, M.A. *Tecnologia de alimentos*. São Paulo: Catálise, 1993.
- [28] PLAZL, I.; LAKNER, M.; KOLOINI, T. *Modeling of temperature distributions in canned tomato based dip during industrial pasteurization*. Journal of Food Engineering, v. 75 p. 400-406, 2006.

- [29] PRESS, W.H.; TEUKOLSKY, S.A.; VETTERLING, W.T.; FLANNERY, B.P. *Numerical recipes in Fortran 77. The art of scientific computing*. New York: Cambridge University Press, v. 1, 1992, 933p.
- [30] RAMPELOTTO, C. *Pasteurização de Salsichas com Ultrassom e Micro-ondas*. 2012. 81 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Santa Maria, 2012.
- [31] SAYKOVA, I.; CWICKLINSKI, G.; CASTELLE, P. *Analytical approach for predicting effective diffusion coefficients in multidimensional slab geometry*. Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy, v. 44, n. 1, p. 44-49, 2009.
- [32] SILVA, C.M.D.P.S. *Difusão de Massa Em Corpos Cilíndricos: Modelagem e Desenvolvimento de Software Com Aplicação à Secagem de Bananas*. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.
- [33] SILVA e SILVA, C.M.D.P., SILVA, W.P., FARIAS, V.S.O., GOMES, J.P. *Effective diffusivity and convective mass transfer coefficient during the drying of bananas*. Journal of Food Science Technology. v.32, n.2, p.342-353, 2012.
- [34] SILVA, J.A. *Tópicos da Tecnologia de Alimentos*. São Paulo - SP. Livraria Varela, 2000.
- [35] SILVA, L.D. *Técnicas analíticas e numéricas para a secagem de sólido na forma de paralelepípedo: Uma abordagem tridimensional*. 2012. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2012.
- [36] SILVA, P.C.G.; COELHO, R.C. *Cultivo da Mangueira - O cultivo da manga no Brasil e no Semiárido nordestino; A importância econômica e social da mangueira no Submédio do Vale do São Francisco; Organização e coordenação setorial*. Embrapa Semiárido: Sistemas de Produção, 2 - 2ª edição. Versão Eletrônica. Ago/2010. Disponível em: < [http : //sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br](http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br). Acesso em: 02/02/2016.

- [37] SILVA, M.A.C.; SILVA, Z.E.; OLIVEIRA PEREIRA, E.; OLIVEIRA SANTOS, S.A.; SILVA, C.K.F. *Determinação de propriedades termofísicas da polpa de acerola: Aplicação do Métodos de FLASH*. VI congresso nacional de engenharia mecânica- CONEM 2010.
- [38] SILVA, W.P. *Discretizações em fenômenos de transporte computacional, cursos 1 e 2*. Apresentações em PowerPoint (2009), online, disponível em: [http : //zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/TCMFC.htm](http://zeus.df.ufcg.edu.br/labfit/TCMFC.htm), data de acesso: Abril/2016.1
- [39] SILVA, W.P.; SILVA, C.M.D.P.S.; RODRIGUES, A.F.; FIGUERÊDO, R.M.F. *One-dimensional numerical solution of the diffusion equation to describe wood dryong: comparison with- and three dimensional solution*. Journalof wood science. v.61 p 370, 2015.
- [40] SILVA, W.P. *Transporte Difusivo em Sólidos com forma arbitrária usando Coordenadas Generalizadas*. 263 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2007.
- [41] SILVA, W.P.; FARIAS, V.S.O.; NEVES, G.A.; LIMA, A.G.B. *Modeling of water transport in roof tiles by removal of moisture at isothermal conditions*, Heat Mass Transfer, v. n. p., DOI. 10. 1007/S00231-011-0931-4, 2011.
- [42] SILVA, W.P.; SILVA, C. M. D. P. S. *Lab fit curve fitting software* (2009) Disponível em: [www.labfit.net](http://www.labfit.net), Acesso em: 10 de março de 2016.
- [43] SILVA, W.P. e SILVA, C.M.D.P.S. *Infinite cylinder* (2008).
- [44] SILVA JUNIOR, A.F. *Desenvolvimento de ferramentas numéricas e computacionais para a descrição de transferência de massa em corpos cilíndricos: Aplicação em desidratação osmótica e secagem complementar de bananas*. 239 f. Tese (Doutorado em engenharia de processos) Universidade Federal de Campina Grande-UFCG, PB, 2015.
- [45] SIMÕES e MURR *Determinação da difusividade térmica da polpa da manga*. Acta Scientiarum, 22(5), p. 1225-1228, 2000.
- [46] TOLEDO, M.T.T. et al. *Consumo de frutas e hortaliças de usuário de serviços de atenção primária a saúde*. Revista Nutrição em Pauta, v. 25, n. 112, 2012.

- 
- [47] UKRAINCZYK, N. *Thermal diffusivity estimation using numerical inverse solution for 1D heat conduction*. International Journal of Heat and Mass Transfer v. 52 p. 5675-5681, 2009.
- [48] VASCONCELOS, M.A.S.; MELO FILHO, A.B. *Conservação de Alimentos*. Recife: EDUFRPE, 2010.
- [49] WOJSLAW, E.B. *Tecnologia de alimentos*. Brasília, 2013.

# Apêndice A

## Apêndice

Tabela A.1: Temperaturas experimentais com o sensor no centro do recipiente para o cilindro 1.

Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (C)
0	22.4	530	45.1
20	22.3	550	45.9
40	22.3	560	46.5
60	22.3	570	46.9
80	22.4	580	47.3
100	22.6	590	47.7
110	22.6	600	48.1
120	22.8	610	48.5
130	23.0	630	49.2
140	23.2	650	50.0
150	23.5	670	50.7
160	23.9	680	51.0
170	24.2	700	51.7
180	24.7	710	52.0
190	25.1	730	52.5
200	25.8	750	53.2
210	26.2	760	53.5
220	26.8	780	54.2

---

230	27.4	800	54.5
240	28.0	820	55.0
250	28.6	860	55.8
260	29.3	880	56.3
270	29.9	900	56.7
280	30.6	920	57.1
290	31.3	960	57.8
300	31.9	980	58.1
310	33.0	1040	58.9
330	33.8	1080	59.5
340	34.4	1100	59.7
350	35.1	1120	60.0
360	35.8	1140	60.2
370	36.4	1160	60.5
380	37.0	1180	60.6
390	37.6	1200	60.8
400	38.5	1230	61.2
410	38.9	1290	61.7
420	39.4	1320	61.8
430	40.0	1350	62.0
440	40.5	1460	62.5
450	41.1	1520	62.9
460	41.6	1580	63.2
470	42.2	1640	64.4
480	42.7	1700	63.7
490	43.1	1760	63.8
500	43.7	1820	64.0
510	44.2	1880	64.1
520	44.5	1920	64.4

Tabela A.2: Temperaturas experimentais com o sensor no centro do recipiente para o cilindro 2.

Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (C)
0	22.2	400	50.4
40	23.3	410	50.9
60	23.7	420	51.3
80	24.7	430	51.8
90	25.6	440	52.2
100	26.1	450	52.7
110	26.9	460	53.2
120	27.8	470	53.6
130	28.7	480	54.0
140	29.7	500	54.8
150	30.8	520	55.5
155	31.8	540	56.0
160	32.0	560	56.6
170	32.8	580	57.3
176	33.9	600	57.9
177	34.0	620	58.4
190	34.7	640	58.8
195	35.1	660	59.3
200	35.6	680	59.8
205	36.2	700	60.2
210	36.6	740	60.9
215	37.1	760	61.3
225	39.9	820	61.9
230	38.4	840	62.1
235	38.8	900	62.8
240	39.3	920	62.9
245	39.7	940	63.1
250	40.1	980	63.5



---

255	40.5	1040	63.7
260	41.4	1080	63.9
270	41.9	1100	64.2
275	42.2	1120	64.3
280	42.6	1160	64.4
285	43.0	1200	64.6
290	43.4	1220	64.6
300	44.1	1260	64.7
310	44.9	1300	64.9
320	45.6	1360	65.0
330	46.2	1380	62.5
340	46.8	1420	65.1
350	47.4	1520	65.2
360	48.1	1560	65.3
370	48.7	1660	65.4
380	49.3	1780	65.6
390	49.9	1800	65.5

Tabela A.3: Temperaturas experimentais com o sensor no centro do recipiente para o cilindro 3.

Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (C)
0	22.5	480	55.6
20	22.6	500	56.5
60	22.9	520	57.3
70	23.5	540	58.0
80	24.2	580	59.1
90	25.0	620	59.9
100	26.0	640	60.6
110	26.9	660	61.0
120	27.8	680	61.2
130	28.9	700	61.6
140	34.4	720	62.0
150	31.3	780	62.8
160	32.2	800	63.0
175	33.6	820	63.2
180	34.1	870	63.6
190	35.5	880	63.7
205	36.8	890	63.8
210	37.4	900	63.9
225	38.8	910	64.0
230	39.8	970	64.2
235	40.0	990	64.3
255	41.6	1020	64.4
260	42.1	1060	64.5
265	42.5	1080	64.6
270	43.0	1200	64.9
290	44.7	1220	64.9
295	44.9	1240	65.0
305	45.8	1300	65.2

---

315	46.5	1340	65.4
320	46.9	1400	65.4
330	47.6	1500	65.4
335	48.0	1520	65.4
350	49.0	1720	64.5
365	49.9	1740	65.5
375	50.5	1760	65.4
385	51.1	1800	65.4
400	51.9	-	-
415	52.7	-	-
420	53.1	-	-
460	54.8	-	-

Tabela A.4: Temperaturas experimentais com o sensor no centro do recipiente para o cilindro 4.

Tempo (s)	Temperatura (°C)	Tempo (s)	Temperatura (C)
0	23.6	360	54.5
45	23.7	370	55.0
50	23.9	380	55.5
70	25.8	410	56.7
80	27.8	440	57.9
100	29.8	460	58.7
110	30.8	500	59.8
112	31.0	520	60.3
119	32.2	540	60.7
126	33.3	600	61.8
127	34.0	620	62.1
140	35.1	660	62.7
150	37.3	700	63.2
170	38.8	740	63.5
175	39.6	800	63.9
180	40.0	840	64.1
195	41.9	920	64.5
200	42.2	980	64.7
205	43.1	1120	64.9
215	43.8	1180	64.9
220	44.1	1200	65.0
230	45.3	1320	65.0
240	46.8	1350	65.0
250	47.3	1440	65.1
270	48.7	1500	65.1
280	49.7	1590	65.1
300	50.7	1620	65.1
310	51.6	1740	65.2

---

330	52.7	1800	65.2
340	53.4	-	-